

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Инженерно-строительный факультет
Кафедра технологии, организации и экономики строительства

Н.И.Ватин, К.И.Стрелец

Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон

Санкт-Петербург
2003

Оглавление

Введение	3
1. Обзор литературы, постановка задачи исследования	6
1.1. Загрязнения воздушной среды в строительном производстве	6
1.1.1. Охрана труда	6
1.2. Системы пылеудаления	9
1.2.1. Классификация	9
1.2.2. Основные характеристики пылеулавливающего оборудования	11
1.2.3. Использование циклонов в области воздухоочистки	14
1.3. Выводы по главе, постановка задачи исследования.....	29
2. Теоретическое исследование циклонов	31
2.1. Особенности движения одиночной частицы в турбулентном потоке в каналах. 31	
2.2. Противоточный циклон с тангенциальным подводом воздуха	32
2.2.1. Основные допущения.....	32
2.2.2. Радиальное смещение частицы.....	33
2.2.3. Эффективность противоточных циклонов с тангенциальным подводом воздуха 37	
2.2.4. Эффективность инерционного фильтра-сепаратора.....	40
2.3. Прямоточный циклон с винтовым подводом воздуха.....	43
2.3.1. Основные допущения.....	43
2.3.2. Радиальное и осевое смещение частицы	44
2.3.3. Эффективность прямоточного циклона с винтовым подводом воздуха 46	
2.4. Выводы по главе.....	47
3. Экспериментальное исследование циклонов	49
3.1. Описание стенда и методики эксперимента	49
3.1.1. Установка для испытания циклона.	49
3.1.2. Измерение гидравлического сопротивления прямоточного циклона с винтовым подводом воздуха.	49
3.1.3. Определение процента улавливания пыли для прямоточного циклона. 51	
3.1.4. Результаты.....	52
3.1.5. Фракционная эффективность прямоточного циклона.	53
3.1.6. Сопоставление результатов теоретического расчета и результатов полученных экспериментальным путем	54
4. Технические разработки.....	57
4.1. Конструкция циклона	57
4.2. Экономические показатели пылеулавливающих установок	58
Заключение	60
Список использованных источников.	62

Введение

Одной из наиболее тревожных современных проблем стали локальные загрязнения атмосферы промышленными выбросами. Доля промышленных выбросов в общем загрязнении атмосферы возрастает как в связи с расширением сети централизованного теплоснабжения, так и благодаря переводу транспорта на электричество или менее вредное топливо. Основная масса загрязняющих веществ приходится на газообразные вещества и пылеватые материалы, которые могут перемещаться на большие расстояния и накапливаться. При высоких концентрациях на поверхности Земли они способны воздействовать на условия растительной и животной жизни как в локальном, так и в глобальном масштабе [19]. Поэтому развитие многих отраслей производства в сочетании с задачами охраны природы и рационального использования ее ресурсов часто оказываются тесно связанными с проблемой разделения пылесодержащих потоков. Актуальность ее решения возрастает с повышением территориальной концентрации промышленных предприятий и увеличением их единичных мощностей. Отрасль техники и технологии, занимающаяся удалением загрязняющих веществ из промышленных выбросов в атмосферу для защиты воздушного бассейна от загрязнений называется газоочисткой, она находится на пересечении экологии атмосферы и промышленной экологии и является одним из направлений экотехники. Экотехника воздушной среды - так можно осовременить термин "газоочистка", собственная история которой насчитывает столетия [32].

Очистка воздуха от взвешенных частиц производится при помощи газоочистительных аппаратов и фильтров [3,7,8,16,21]. Пылеуловители предназначены для улавливания технологической пыли и очистки выбрасываемого при вентиляции помещений воздуха. В дальнейшем удаление пылеватых включений (пыли) из воздуха будем называть *пылеулавливанием*, а аппараты, очищающие воздух от пыли – *пылеуловителями*.

Проблема снижения пылевых выбросов с целью обеспечения допустимых концентраций пыли в воздушном бассейне промплощадки и населенных мест может быть решена, если для каждого конкретного случая обоснованно выбрать экономичный и достаточно эффективный пылеуловитель. При этом

необходимо принимать во внимание не только условия рациональной технологии, правильной эксплуатации пылеуловителей, но и эффекта рассеивания пыли в атмосфере.

Существует несколько технологий очистки воздуха от пыли:

механическая очистка происходит за счет осаждения частиц под действием внешних сил, в т.ч. очистка воздуха в циклонах, под действием центробежных сил;

мокрая очистка обеспечивает осаждение частиц, за счет их взаимодействия с жидкостью;

очистка при помощи фильтров осуществляется за счет задерживания частиц в фильтрующем материале;

очистка под действием электрического поля.

Повсеместно распространенная циклонная очистка промышленных выбросов от взвесей имеет стоимость на порядок ниже их мокрой очистки, а также очистки в рукавных фильтрах и электрофильтрах. Однако используемые в производственных условиях циклоны не всегда обеспечивают требуемое качество очистки и имеют другие недостатки [34,23].

История очистки воздуха при помощи циклонов берет свое начало в 19 веке. Этой проблеме посвящено много теоретических и экспериментальных исследований [16, 21, 32]. За полтора века «циклоностроения» техника газоочистки использовала множество вариантов конструкций циклонов.

Для расчета эффективности циклона используются методики, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях. Наиболее полные и достоверные результаты дают экспериментальные исследования циклонов, которые проводятся главным образом в физических моделях, выполненных из прозрачных материалов, с использованием подкрашивания струй, лазерной техники, видеосъемки и т.п. Эти дорогостоящие опыты могут дать исчерпывающую информацию о процессах, происходящих в циклоне, но они относятся лишь к конкретной исследуемой конструкции циклона, а другие конструкции следует исследовать вновь в полном объеме.

Значительно более общие результаты и рекомендации можно получить, используя математические модели гидромеханических процессов в циклоне[23,34,31]. К настоящему времени в литературе опубликованы различные варианты математических моделей процесса осаждения частиц

пыли в циклонах. Однако, многие вопросы, возникающие при оценке эффективности циклонов, остаются не исследованными. [1,2,33].

Например, как правило, проводится расчет только суммарной (интегральной) эффективности циклона, без учета эффективности очистки по каждой фракции. Кроме того, если выполняется расчет минимального диаметра d_{\min} частиц, осажденных в циклоне полностью, то не учитывается частичное осаждение частиц, диаметром меньше d_{\min} , которое вносит значительный вклад в значение эффективности циклона [34]. Поэтому, актуальным вопросом является разработка методики более детального теоретического расчета пылеулавливания частиц в циклоне.

Создание математической модели движения частицы пыли в закрученном потоке позволит оценить влияние различных факторов на эффективность улавливания пыли в циклонах, а также создать методику оценки эффективности пылеуловителя.

1. Обзор литературы, постановка задачи исследования

1.1. Загрязнения воздушной среды в строительном производстве.

1.1.1. Охрана труда

1.1.1.1. Виды и вредность промышленных пылей.

Нормальный атмосферный воздух имеет следующий состав (в % объёма): азот-78,8; кислород-20,95; инертные газы-0,93; углекислый газ-0,03; прочие газы-0,01. Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны ограничено требованиями ГОСТ 12.005-88 «Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования» и санитарными нормами проектирования промышленных предприятий [10].

Содержание вредных веществ в воздухе, подаваемом внутрь производственных помещений, а также в воздухе, возвращаемом на рециркуляцию не должно превышать 30% от величины ПДК, устанавливаемых для рабочей зоны [30].

Пылесодержащий воздух представляет собой систему в виде газообразной несущей дисперсной среды и твердой дисперсной фазы, состоящей из частиц, обладающих свойством находиться в несущей среде во взвешенном состоянии более или менее продолжительное время. Примером подобной системы являются аэрозоли, воздушные среды, содержащие взвешенные твердые и жидкие частицы размером менее <1 мкм.

Промышленная пыль бывает органического происхождения (древесная, торфяная, угольная) и неорганического состава (металлическая, минеральная). По воздействию на организм пыли делятся на ядовитые и неядовитые. К наиболее вредным промышленным ядам относятся соединения свинца, ртути, мышьяка, анилина, бензола, хлора и др. Большую опасность представляют яды, вызывающие злокачественные опухоли на коже. Это печная сажа, некоторые анилиновые красители, каменноугольная смола. Неядовитые пыли раздражают кожу, глаза, уши, десны. Проникая в легкие, они вызывают профессиональные заболевания - пневмокониозы, которые ведут к ограничению дыхательной способности легких (силикоз, антракоз и др.).

Эти аспекты загрязнения воздуха хорошо знакомы тем, кто имеет представление о состоянии воздушной среды в помещениях, где выделяются, например, сварочные дымы. Вредные вещества, выделяющиеся при сварке, представлены в виде газов и аэрозолей, некоторые частицы которых настолько малы, что проникая через легочную ткань, попадают в кровь. В наиболее часто встречающихся случаях сварочный дым содержит частицы окислов железа, цинка, кадмия, марганца, а также частицы фтора, асбеста, никеля, хрома, меди и пр. В результате воздействия таких частиц раздражаются слизистые оболочки глаза, возникают аллергические заболевания, сидероз, отек легких, головные боли и боли в груди, разрушаются почки и печень, появляются раковые заболевания.

Пыль является гигиенически вредным компонентом воздуха, вдыхаемого человеком, и отрицательно влияет на организм. Вредность пыли зависит также и от ее количества и дисперсности[32]. Чем больше пыли витает в воздухе, чем мельче пыль, тем она опаснее. Пылинки размером от 0,1 до 10 мкм в воздухе оседают медленно и проникают глубоко в легкие. Более крупные пылинки быстро оседают в воздухе, а при вдыхании задерживаются в носоглотке и удаляются (мерцательным эпителием - покровные клетки с колеблющимися жгутиками) к пищеводу. Гигиеническая вредность пыли зависит от ее химического состава. Наиболее тяжелые последствия вызывает систематическое вдыхание пыли, содержащей диоксид кремния. Осаждаясь на поверхности дыхательных путей, цементная пыль вызывает риниты, бронхиты и другие заболевания, такие как силикоз – общее заболевание организма при котором наблюдаются серьезные изменения в лёгких, сердечно-сосудистой, нервной системах и пищеварении. При кратковременном вдыхании цемента или известковой пыли появляется сухость в дыхательных путях, раздражение слизистой оболочки, сухой кашель. В Приложении 1 представлены размеры частиц типовых загрязнений.

Имеется ряд нормативных документов определяющих предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в атмосферном воздухе населенных мест, а ГОСТ 12.005-88 нормирует ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны производственных помещений [10]. Данные нормы установлены исходя из условия, что при ежедневной работе в пределах 8 ч в течение всего рабочего стажа концентрация не может вызвать у работающих заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых

современными методами исследования, непосредственно в процессе работы или в отдаленные сроки, в том числе у последующих поколений.

1.1.1.2. Защита от загрязнений воздуха при производстве строительных материалов и на строительных площадках.

При многих технологических процессах на строительных площадках и в производстве строительных конструкций в воздушную среду выделяется пыль.

В процессе изготовления сборных ж/б конструкций на предприятии в воздух производственной среды выделяются вредные вещества в виде пыли, газов или паров.

Основными источниками производственной пыли на предприятиях ЖБИ являются склады сыпучих материалов, места их обработки, механическое измельчение твёрдых материалов (размол, транспортирование, перемешивание и др.), БСЦ, места распалубки и чистки форм, гнутья, правки арматурной стали.

Некоторые характеристики наиболее распространенных видов пылей, образующихся в отдельных строительных производствах, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Характеристика дисперсного состава пылей отдельных видов строительных производств.

Наименов. производств	Источник пылеобраз.	Вид пыли	d_{50} мкм	σ	$\rho_{п}$ кг/м ³	$\rho_{п.н.}$ кг/м ³	S см ² /г	$\alpha_{ст}$ ° С
Предприят. строит. Материалов	Сушильн. барабаны, мельницы	Пыль цемента, извести	8-15	2,0-2,6	2800	800	6000	65-75
Предприят. дорожного строит.	Асфальтобетонные заводы	Пыль кварцев.	20	3,5	2700	1000	2700	60

d_{50} —средний (медианный) диаметр частиц пыли;

σ - дисперсия;

$\rho_{п}$ – плотность истинная;

$\rho_{п.н.}$ – плотность насыпная;

$\alpha_{ст}$ – угол естественного откоса пыли (в статике);

S – удельная поверхность.

Запылённость производственных помещений замеряется весовым способом, по которому определяется концентрация пыли в зоне рабочей среды. В целях исключения выбрасывания запыленного воздуха в помещениях бетонных заводов создаются системы аспирации расходных бункеров и мест пересыпки материалов. Очистка воздуха от пыли предусматривается в циклонах и в рукавных фильтрах.

Запылённость арматурных и формовочных цехов устраняют местными отсосами от правильно-отрезных станков, орошением форм перед их очисткой, очисткой форм скребками, оборудованными отсосами.

Помимо этого пыль ухудшает видимость на строительных объектах, снижает светоотдачу осветительных устройств, повышает абразивный износ трущихся изделий машин и механизмов. В результате этих причин снижается производительность и качество труда

На предприятиях стройиндустрии должен осуществляться систематический контроль за содержанием вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Этот контроль проводят заводские санитарные лаборатории, а также городские или районные санитарно-эпидемиологические станции (СЭС).

Применение систем местной очистки обеспечивает требуемый уровень ПДК в зоне дыхания рабочего при производственных процессах, что требуется законодательством всех стран мира в сфере охраны труда и экологии[22].

1.2. Системы пылеудаления

1.2.1. Классификация

Пылеулавливающее оборудование при всем его многообразии может быть классифицировано по ряду признаков: по назначению, по основному способу действия, по эффективности, по конструктивным особенностям. Классификация пылеулавливающего оборудования дана в ГОСТ 25199-82. Оборудование пылеулавливающее. Классификация [8].

Оборудование, применяемое для очистки от пыли воздуха в системах вентиляции, кондиционирования и воздушного отопления, а также для защиты от загрязнения пылью воздушной среды зданий, сооружений и прилегающих к ним территорий, метрополитенов, подземных и открытых горных выработок, подразделяются на следующие типы.

Оборудование, применяемое для очистки от взвешенных частиц пыли воздуха, подаваемого в помещения системами приточной вентиляции, кондиционирования и воздушного отопления – воздушные фильтры.

Оборудование, применяемое для очистки от пыли воздуха, выбрасываемого в атмосферу системами вытяжной вентиляции – пылеулавливающее оборудование или пылеуловители.

Пылеуловители в зависимости от способа отделения пыли от воздушного потока применяют следующих исполнений: оборудование для улавливания пыли сухим способом, при котором отделенные от воздуха частицы осаждаются на сухую поверхность; оборудование для улавливания пыли мокрым способом, при котором отделение частиц от воздушного потока осуществляется с использованием жидкостей. По принципу действия пылеулавливающее оборудование подразделяется на следующие группы: гравитационное, инерционное, фильтрационное, электрическое.

Пылеулавливающее оборудование, в котором отделение пыли от воздушного потока осуществляется последовательно в несколько ступеней, отличающихся по принципу действия, конструктивным особенностям и способу очистки, относят к комбинированному пылеулавливающему оборудованию. Классификация пылеулавливающего оборудования показана на схеме (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Схема классификации пылеулавливающего оборудования

Механические пылеосадители (пылеосадительные камеры, циклоны и пр.) в которых отделение частиц от газов происходит за счет внешних сил,

применяются для грубой очистки газов от частиц более 15-20 мкм, выполняются сухими (отделение под действие механических сил) и мокрыми (отделение при соприкосновении частиц с жидкостью) [16,17, 25,26].

1.2.2. Основные характеристики пылеулавливающего оборудования

К основным характеристикам пылеулавливающего оборудования относятся эффективность (степень) очистки воздуха от пыли, которую также иногда называют коэффициентом полезного действия аппарата, хотя это не отражает ее энергетические характеристики; гидравлическое сопротивление; расход электрической энергии; стоимость очистки.

Эффективность (степень) очистки воздуха от пыли – зная величину концентрации пыли в воздухе до очистки $C_{вх}$, и после очистки $C_{вых}$ (соответственно мг/м³), выражается в процентах, иногда в долях единицы:

$$\eta = \frac{C_{вх} - C_{вых}}{C_{вх}} \cdot 100\%$$

При наличии подсоса воздуха (например, в рукавных фильтрах) эффективность определяется по формуле.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{C_{вых} Q_{вых}}{C_{вх} Q_{вх}} \right) 100\%,$$

Где $Q_{вх}, Q_{вых}$ – соответственно расход воздуха при входе и выходе из аппарата, м³/ч.

При последовательной установке нескольких аппаратов (каскадная, или многоступенчатая очистка), применяемая для более полного обеспыливания воздуха, суммарная эффективность очистки определяется по формуле

$$\varepsilon = [1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \dots (1 - \varepsilon_n)] \cdot 100\%,$$

Где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ - эффективность очистки определяется каждого из аппаратов, входящих в каскад (в долях единицы).

Эффективность очистки – важнейшая характеристика аппарата. На неё ориентируются при выборе пылеулавливающего оборудования в соответствии с допустимым осадочным содержанием в очищаемом воздухе.

Сравнивая два аппарата, сопоставляют проценты пропущенной пыли. Если эффективность одного аппарата 99 % , а другого 98 % , то они пропускают соответственно 1 % и 2 % пыли. Следовательно, эффективность первого аппарата в два раза выше, чем второго.

Для полной характеристики аппарата нужно знать его фракционную эффективность. Она показывает долю уловленной пыли по каждой фракции. Это позволяет выбрать пылеулавливающее оборудование в соответствии с фракционным составом пыли. Фракционная эффективность очистки выражается отношением

$$\varepsilon_{\phi n} = \frac{c_n}{C_{\Pi}}$$

Где c_n - концентрация улавливаемой пыли данной фракции;

C_{Π} - концентрация поступившей в аппарат пыли данной фракции.

Общую эффективность аппарата ε определяют по фракционной эффективности следующим образом

$$\varepsilon = \frac{C_1 \varepsilon_{\phi 1} + C_2 \varepsilon_{\phi 2} + \dots + C_n \varepsilon_{\phi n}}{C_1 + C_2 + \dots + C_n},$$

Где C_1, C_2, \dots, C_n - концентрации пыли соответствующих фракций, поступающей в аппарат;

$\varepsilon_{\phi 1}, \varepsilon_{\phi 2}, \dots, \varepsilon_{\phi n}$ - фракционная эффективность улавливания по данной фракции.

Отношение количества пыли данной фракции ко всей пыли поступившей в аппарат, выражается:

$$\frac{C_1}{C} = \delta_1; \frac{C_2}{C} = \delta_2; \dots; \frac{C_n}{C} = \delta_n.$$

После преобразования получим значение общей эффективности очистки

$$\varepsilon = \delta_1 \varepsilon_{\phi 1} + \delta_2 \varepsilon_{\phi 2} + \dots + \delta_n \varepsilon_{\phi n},$$

Или в процентах

$$\varepsilon = 100 \sum_{\phi=1}^n \delta \varepsilon_{\phi}$$

Производительность характеризуется количеством воздуха, которое очищается за один час. Аппараты, в которых воздух очищается при прохождении через фильтрующий слой, характеризуется удельной

воздушной нагрузкой, т.е. количеством воздуха, которое проходит через один квадратный метр фильтрующей поверхности за один час.

Стоимость газоочистки является важнейшим показателем, т.к. характеризует ее экономичность. Она зависит главным образом от капитальных затрат на оборудование и эксплуатационных расходов. Капитальные зависят от конструктивных особенностей и установленных мощностей оборудования. Эксплуатационные расходы зависят в основном от расхода электрической энергии, которые определяются потребляемой мощностью циклона. Эта мощность зависит от гидравлического сопротивления циклона (потери давления в нем ΔP)

$$\Delta P = \zeta_{ex} \frac{v_{ex}^2 \rho}{2}.$$

где v_{ex} - скорость потока во входном патрубке, м/с.

ζ_{ex} - коэффициент гидравлического сопротивления циклона

ρ - плотность газа.

Расход электрической энергии на пылеулавливания определяется потребляемой мощностью циклона:

$$N = \Delta P \cdot Q,$$

где $Q = v_{ex} \cdot \omega_{ex}$ - расход воздуха,

ω_{ex} - площадь входного живого сечения.

$$N = \zeta_{ex} \frac{v_{ex}^3 \rho}{2} \omega_{ex}.$$

Таким образом, расход электроэнергии существенно зависит от скорости воздуха в пылеуловителе. Расход электроэнергии при одноступенчатой очистке находится в пределах от 0,035 до 1,0 кВт-ч на 1000 кубических метров воздуха.

Стоимость очистки воздуха в различных аппаратах значительно отличается. Как правило, более эффективная очистка обходится значительно дороже. Если стоимость очистки определённого количества воздуха в таком сравнительно простом аппарате, как циклон большой производительности принять за 100% , то стоимость очистки такого же количества воздуха в батарейном циклоне составит 120%, в циклоне с водяной пленкой 130% , в электрофильтрах, в которых электроэнергия расходуется в основном на создание электростатического поля стоимость очистки возрастает до 220%,

т.к. в тканевых фильтрах (в зависимости от типа) за счет увеличения гидравлического сопротивления по мере загрязнения фильтра от 260 до 280%.

Стоимость высокоэффективной двухступенчатой очистки по схеме батарейный циклон электрофильтр составит 330%.

1.2.3. Использование циклонов в области воздухоочистки

Одним из наиболее распространенных устройств пылеочистой техники считаются циклоны (от греч. *kyklon* - кружащийся, вращающийся). Их широкое распространение обусловлено простотой устройства циклона, надежностью в эксплуатации, и небольшими капитальными и эксплуатационными затратах [33,16, 3, 32].

Не известно, кем и когда был создан первый простейший циклон, однако молва утверждает, что в России нечто похожее на циклон использовалось еще на знаменитых Демидовских заводах.

В обзорной статье немецкого исследователя Матиаса Боната "Циклонный очиститель газа от твердых частиц" опубликованной в 1982 году в сборнике "Химико-инженерная техника", так представлена история создания первых циклонов:

"В 1886 году американец О.М. Мерсе. представитель "Кникербокер компани". подал заявку на получение патента на пылесборник и получил авторское свидетельство на первый циклонный очиститель. Хотя циклонный очиститель используется в технике уже на протяжении 100лет, до сегодняшнего дня не удалось полностью вычислить режим потока в этих аппаратах. В создании циклонного аппарата участвовали многие исследователи. Лишь немногим, наверное, известно, что Л.Прандль, который при помощи своих выводов о теории пограничного слоя обосновал современную механику потока, тоже занимался циклонными очистителями. Так фирма MAN в Нюрнберге в 1901 году подала заявку на патент циклонного очистителя, изобретателем которого является Л.Прандль. Работой о вычислениях и параметрах циклонных очистителей, опубликованной в 1956 году. В.Барту из Карлсруе сделал решительный шаг на пути к пониманию аэродинамических процессов в циклонном очистителе, которые определяют режим очистки".

Подобные пылеочистные аппараты широко применяются для сухой очистки газов, выделяющихся при некоторых технологических процессах

(сушка, обжиг, агломерация, сжигание топлива и т.д.). Принцип действия циклонов основан на выделении частиц пыли из газового потока под воздействием центробежных сил, возникающих вследствие вращения потока в корпусе аппарата. Рассмотрим механизм очистки в циклоне на примере противоточного циклона конического исполнения. Корпус циклона состоит из конической и цилиндрической частей. По форме циклоны разделяют на цилиндрические ($H_{ц} > H_{к}$) и конические ($H_{ц} < H_{к}$). $H_{ц}$ и $H_{к}$ – высота цилиндрической и конической части циклона соответственно. Запыленный воздух подается в циклон через патрубок, а очищенный – удаляется через выхлопную трубу.

В результате действия центробежных сил частицы пыли, взвешенные в потоке газа, отбрасываются на стенки корпуса и выпадают из потока.

Вторичный поток, направленный вдоль конической стенки, захватывает отброшенную к стенке пыль и направляет её вниз к пылеосадительной камере (бункеру).

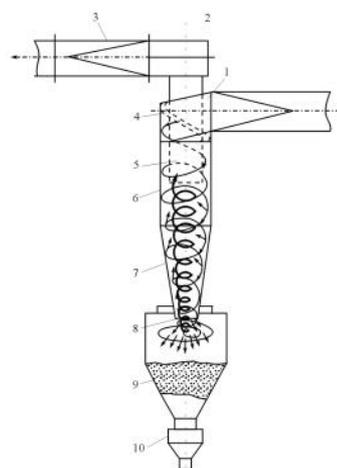


Рис. 1.2. Движение запыленного и очищенного газа в противоточном циклоне

Без этого потока, отдельные частицы, находящиеся у стенки, не смогли бы попасть вниз, поскольку направленная вверх составляющая центробежной силы является большей по сравнению с ускорением свободного падения. О большом влиянии вторичного потока свидетельствует тот факт, что пыль выносятся из лежащих и даже из перевернутых циклонов.

При движении во вращающемся криволинейном потоке газа частицы пыли находятся под действием силы тяжести, центробежной силы и силы сопротивления.

Применяют правые (направление потока воздуха – по часовой стрелке, если смотреть сверху) и левые (направление потока воздуха – против часовой стрелки, если смотреть сверху) циклоны. Циклоны обычно подразделяются на высокоэффективные и высокопроизводительные. Аппараты первого типа отличаются более высокой эффективностью, но требуют больших затрат времени на осуществление процесса очистки, вторые имеют небольшое гидравлическое сопротивление, отличаются

большой производительностью, но одновременно хуже улавливают мелкие частицы пыли.

В зависимости от способа подведения очищаемого воздуха к циклону различают циклоны с тангенциальным и винтовым подводом воздуха (рис.1.3). При прочих равных условиях циклоны с винтовым подводом обладают более высокой эффективностью очистки, нежели, чем циклоны с тангенциальным способом подвода воздуха. В зависимости от требований по производительности и условий применения циклоны изменяют одиночного (внутренний диаметр от 300 до 1400 мм) или группового исполнения [34].

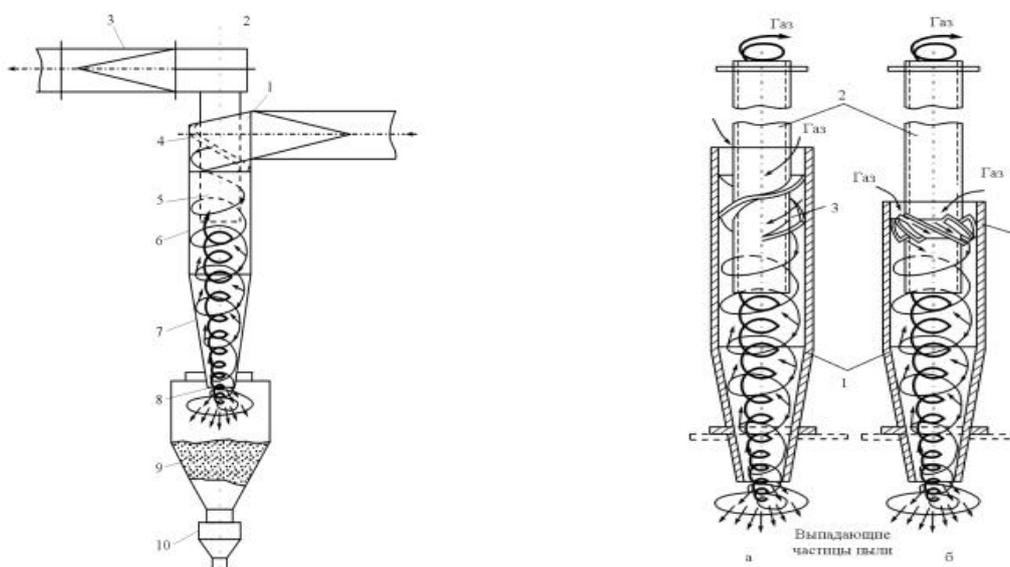


Рис. 1.3. а) Циклон с тангенциальным подводом воздуха

б) Циклон с винтовым подводом воздуха

1.2.3.1. Теоретические основы циклонного процесса

Улавливание пыли в циклонных аппаратах основано на использовании центробежных сил. Пылегазовый поток с большой скоростью по касательной поступает в цилиндрическую часть корпуса циклона, и совершает движение по нисходящей спирали. Под действием центробежной силы, возникающей при вращательном движении потока, пылевидные частицы перемещаются к стенкам циклона.

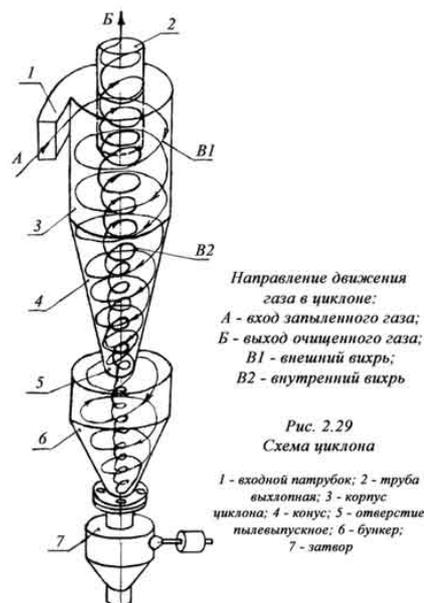


Рис. 1.4. Механизм работы циклона

Пыль отделяется от воздуха при переходе воздушного потока из нисходящего в восходящий, и, по конической части корпуса циклона попадают через пылевывпускное отверстие в бункер для сбора пыли.

Процессы, происходящие в циклонах, весьма сложны и зависят от многих факторов [1, 17, 34]. Поэтому для теоретических расчетов приходится делать ряд допущений:

Пылевидные частицы, поступающие с воздушным потоком в циклон, имеют сферическую форму.

При входе в циклон частицы равномерно распределены по сечению.

Частицы, достигшие стенок циклона, осаждаются (в действительности часть этих осажденных частиц будет отброшена от стенки вследствие турбулизации потока газа).

Не учитывается коагуляция пылевидных частиц в циклоне.

При разработке конструкций циклонов приходится в значительной мере учитывать экспериментальные данные и опыт эксплуатации циклонов в производственных условиях. Теоретические обоснования процесса очистки пыли в циклонах пока еще не полностью изучены, и не могут удовлетворять современным требованиям.

Вследствие того, что масса частиц пыли весьма мала, они практически мгновенно (см.п.2.1.2) приобретают скорость переносящего их объема газа, поэтому тангенциальную составляющую скорости частиц v_T можно без большой ошибки считать равной скорости вращения газового потока [1,34].

Обычно в циклонах центробежное ускорение в несколько сот или тысячу раз больше ускорения свободного падения. Поэтому, даже весьма маленькие частицы пыли не в состоянии следовать за линиями тока газов и под влиянием центробежной силы выносятся из кривой движения газов по направлению к стенке.

В связи с тем, что плотность частиц пыли ρ_s значительно больше плотности воздуха ρ , на частицу действует центробежная сила

$$F_u = \frac{mv_T^2}{R},$$

где m – масса частицы,

R – расстояние от частицы до оси циклона.

Под действием этой силы частица пыли движется в радиальном направлении к стенке циклона, испытывая сопротивление этому движению за счет сил вязкости. Силу этого сопротивления можно определить по формуле Стокса, предполагая, что обтекание частиц ламинарное.

$$F = 3\pi v_R \mu d$$

где v_R - скорость движения частицы в радиальном направлении, м/с,

d - диаметр частицы, м,

μ - вязкость газа, Нс/м².

$$\frac{mv_T^2}{R} = 3\pi v_R \mu d,$$

Отсюда получаем значение скорости радиального движения частицы

$$v_R = \frac{mv_T^2}{3R\pi\mu d} = \frac{d^2 v_T^2 \rho}{18R\mu}$$

Из всех, движущихся в потоке, частиц наибольший путь пройдет частица, находившаяся при входе в циклон вблизи выхлопной трубы. Ее путь будет равен $R_2 - R_1$.

Здесь

R_1 - радиус выхлопной трубы циклона, м.

R_2 - радиус цилиндрической части циклона, м.

Время, затрачиваемое частицей на прохождение этого пути:

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{v_p}$$

В формуле, выражающей v_R , величина R - переменная. Она изменяется в пределах $R_1 < R < R_2$, и ее среднее значение можно принять

как $R = \frac{R_1 + R_2}{2}$. Подставляем это значение R в написанную формулу:

$$v_R = \frac{d^2 v_T^2 \rho}{18 \frac{R_1 + R_2}{2} \mu}$$

Или

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{v_R} = \frac{18(R_2 - R_1)(R_2 + R_1)\mu}{2v_T^2 d^2 \rho} = \frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{v_T^2 d^2 \rho}$$

Из этой формулы можно найти минимальный размер частиц, улавливаемых данным циклоном. Согласно допущению улавливаются все частицы, осевшие на стенках циклона, то есть успевшие пройти путь $R_2 - R_1$ за время прохождения циклона газовым потоком, то есть за время нахождения частицы в циклоне

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{\rho v_T^2 \tau}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{2\pi\rho v_T R n}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2 - R_1)}{\pi\rho v_T n}}$$

Где n - число оборотов, которые совершает газовый поток в циклоне. Обычно принимают $n = 2$.

Данные, полученные по формулам, обычно отличаются от результатов экспериментальных исследований. Результаты экспериментов показывают, что частицы с размером большим d_{\min} улавливаются в циклоне не полностью. Это объясняется как сделанными допущениями, так и влиянием турбулентности. В то же время имеет место улавливание частиц, с диаметром меньше, чем d_{\min} . К примеру, при испытаниях циклона на древесной пыли, образующейся после шлифовки с размером частиц менее 12 микрон, эффективность оказалась выше расчетной в несколько раз, то же самое происходит при улавливании отдельных видов сажи. Это объясняется тем, что не учтена коагуляция частиц внутри циклона.

1.2.3.2. Конструкции циклонов

Наиболее распространенные циклоны нормализованы. Любой из размеров каждого типа может быть выражен в долях от диаметра циклона D согласно ГОСТ Р 51708-2001 [11]. Наиболее часто встречающиеся циклоны

приведены на рис. 11. Конструкциями циклонов у нас в стране занимается ряд научных организаций: институт НИИОГаз (Москва), Свердловский институт охраны труда (Екатеринбург), Ростовский Государственный строительный университет (Ростов – на – Дону) и другие.

В институте НИИОГаз разработан ряд конструкций цилиндрических и конических циклонов (рис.1.5). Широкое распространение в промышленности получили циклоны ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24. Цифровое обозначение циклона соответствует углу α наклона крышки аппарата и патрубка, подводящего запыленный поток. Эти циклоны можно устанавливать одиночно или компоновать в группы по два, четыре, шесть, восемь циклонов.

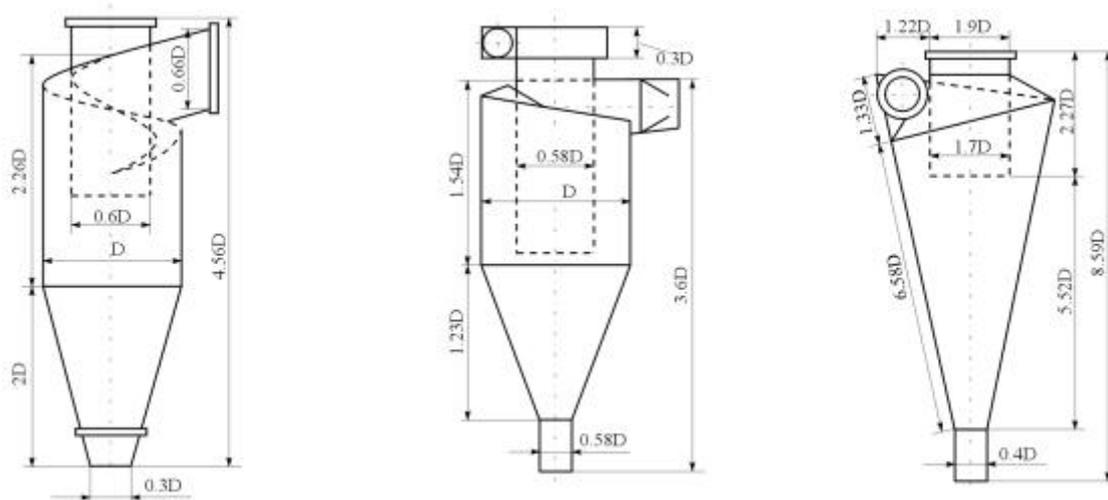


Рис. 1.5. Основные типы циклонов:

а) - конструкции НИИОГаза, б) - конструкции ЛИОТ, в) - конструкции СИОТ.

Так же институтом НИИОГаз проектировались циклоны типа ЦДК-ЦН-33 и ЦДК-ЦН-34, которые имеют высокую эффективность очистки и предназначены для улавливания сажи.

Фракционная эффективность циклонов НИИОГаз

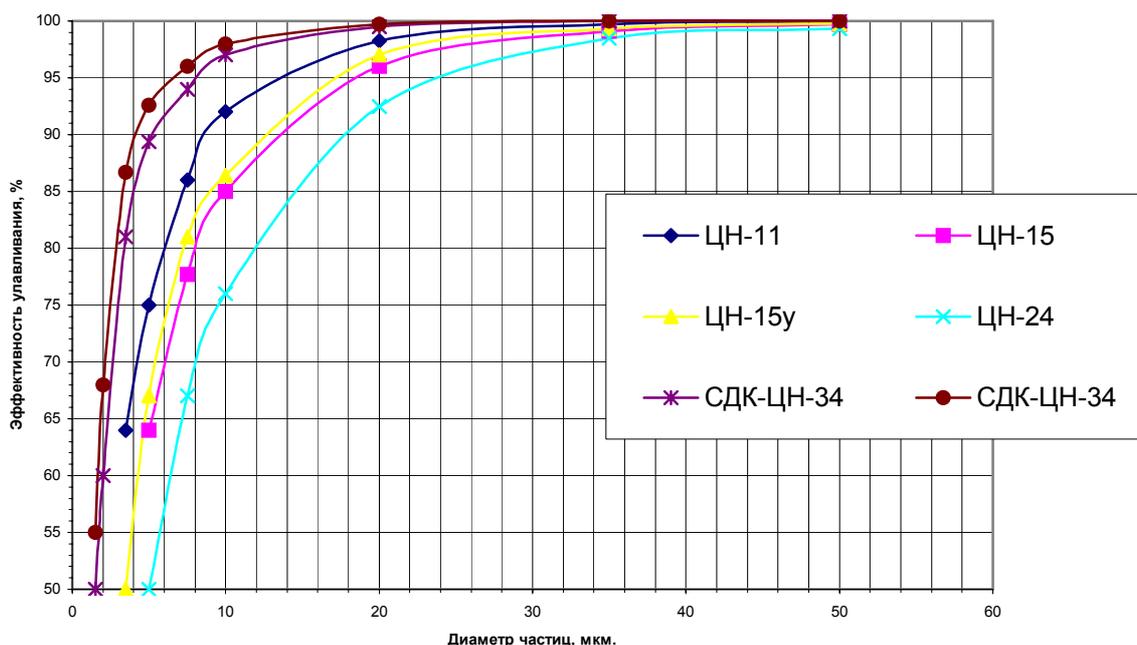


Рис. 1.6. Эффективность циклонов ЦН различных марок:

Циклоны СИОТ (Свердловский институт охраны труда) предназначены для очистки газов от сухой, неволокнистой, неслипающейся пыли. Циклоны СИОТ несколько уступают по эффективности очистки циклонам НИИОГаз, но имеют определенные преимущества в виде уменьшения размеров.

Циклоны ВЦНИООТ применяют для неслипающейся, абразивной пыли, а так же для малослипающейся пыли (сажа, тальк).

Циклоны с нижним выводом воздуха. Циклоны НВГ разработаны на базе циклонов ЦН-15 и СДК-ЦН-33, и применяются в производстве моющих средств, а так же для улавливания пыли кокса в литейном производстве. При улавливании коксовой пыли с медианным диаметром 120 мкм эффективность циклонов данного вида достигала 97-98%.

Циклон с конусом коагулятором (ЦКК) предназначен для улавливания волокнистой пыли, выделяющейся при переработке семян хлопчатника. Так же ЦКК применяется на деревообрабатывающих предприятиях. Характерной особенностью данного циклона является наличие дополнительного конического элемента – конуса-коагулятора. В коагуляторе пылевые частицы коагулируют, образуя устойчивые агрегаты, в результате эффективность циклона повышается и достигает 99%.

Регулируемый циклон РЦ – предназначен для улавливания слипающихся и маслянистых пылей. Это – циклон со спиральным подводом воздуха, который закручивается с помощью спирально-винтового закручивающего аппарата. Он снабжен специальным регулирующим устройством, которое позволяет регулировать воздушный режим работы аппарата. Данная конструкция позволяет предотвратить вынос крупных частиц, позволяет осуществлять коагуляцию пыли.

Циклон с внутренней рециркуляцией (ЦВК) – предназначен для улавливания пыли сои и других видов неслипающейся, мелкодисперсной пыли. Разработан на базе циклона ЦН-15, и отличается от него тем, что в выхлопной трубе имеется щелевое отверстие и винтообразная направляющая лента. Благодаря этому повышается эффективность циклона, которая достигает 99%.

Для унификации циклонов Институтом охраны труда (Санкт-Петербург) были проведены сравнительные испытания различных циклонов по единой методике. По результатам проведенных испытаний циклон ЦН-11, как обладающей наибольшей эффективностью, рекомендован для преимущественного применения.

1.2.3.3. Недостатки известных аналогов аппаратов циклонного типа.

Недостатком циклонов является недостаточная степень очистки газов с различным дисперсным составом твердых частиц, в особенности, если преобладают мелкие частицы размером менее 10 мкм. Поэтому циклоны, в основном, используют для грубой и средней очистки воздуха от сухой, неслипающейся пыли.

Степень очистки циклона также резко снижается из-за возникновения явления подсоса воздуха в корпусе пылесборного бункера, в месте его присоединения к конусу циклона, и в устройствах для разгрузки уловленной пыли, возникновение которого неизбежно при увеличении скорости воздуха выше 15 м/с. Недостатком является большое гидравлическое сопротивление, возникающее вследствие образования в центральной отводящей трубе мощного вихря, что увеличивает энергозатраты и ограничивает производительность аппарата.

1.2.3.4. Выбор и расчет циклонов. Методы экспериментального определения и расчета степени очистки в циклонах.

Циклоны выбирают по расчетной производительности аппарата и расчетной скорости газа при входе в циклон с обеспечением необходимой эффективности очистки при минимальных энергетических затратах (то есть при минимальном гидравлическом сопротивлении). Скорость запыленного потока на входе в циклон должна быть не ниже транспортной скорости, несущей частицы пыли. При снижении этой скорости возникают отложения пыли на стенках газохода и во входном патрубке циклона.

В таблице 1.2 представлена скорость на выходе для некоторых видов циклонов при одинаковой скорости на входе – 18 м/с.

Таблица 1.2.

Скорость на выходе из некоторых видов циклонов:

Тип циклона	Скорость газа на входе в циклон м/сек	Скорость газа на выходе из циклона м/сек
ЦН-15	18	11
ЦН-24	18	18,4
ВЦНИИОТ	18	23

Общее гидравлическое сопротивление циклона равно

$$\Delta P_y = \zeta_{ex} \frac{v_{ex}^2 \rho}{2}$$

Где

v_{ex} - скорость потока во входном патрубке, м/с.

ζ_{ex} - коэффициент гидравлического сопротивления циклона

ρ - плотность газа .

Иногда общее гидравлическое сопротивление циклона определяют также по условной скорости газа в циклоне, отнесенной к площади живого сечения цилиндрической части циклона.

$$\Delta P_y = \zeta_0 \frac{v_0^2 \rho}{2}$$

где

v_0 - условная скорость газа в циклоне, м/с. Обычно v_0 находится в пределах 3

– 3,5 м/с.

ζ_0 - коэффициент гидравлического сопротивления циклона, отнесенный к скорости в полном сечении аппарата.

Для большинства видов циклонных аппаратов коэффициенты ζ_{ex} и ζ_0 постоянны, и не зависят от числа Re . Значения этих коэффициентов для наиболее часто встречающихся видов циклонов приведены ниже:

Таблица 1.3.

Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов:

Тип циклона	Диаметр, мм.	ζ_{ex}	ζ_0
ЦН-11	450	6,1	250
ЦН-15	450	7,6	160
ЦН-15у	450	8,2	170
ЦН-24	450	10,9	80
СИОТ		6,0	
ВЦНИИОТ	370	9,3	
ЛИОТ	700	4,2	460
ЦКК		5,2	
РЦ		5,0	
ЦВР		9,6	

В значение коэффициента гидравлического сопротивления циклонов НИИОГаза вносят поправки, учитывающие диаметр циклона и запыленность воздуха при входе в циклон: $\zeta = K_1 K_2 \zeta_{табл}$, где K_1 - поправочный коэффициент на диаметр циклона, K_2 - поправочный коэффициент на диаметр циклона, а $\zeta_{табл}$ - коэффициент местного сопротивления циклона, определенный по таблице 1.4.

Таблица 1.4.

Значения поправочного коэффициента K_1 на диаметр циклона:

Диаметр циклона, мм.	ЦН-11	ЦН-15; ЦН-15у; ЦН-24	СДК-ЦН-33; СДК-СН-34
150	0,94	0,85	1,00
200	0,95	0,90	1,00
300	0,96	0,93	1,00
450	0,99	1,00	1,00
500	1,00	1,00	1,00

Таблица 1.5.

Значения поправочного коэффициента K_2 на запыленность (при $D=500$ мм.):

Тип циклона	Поправочный коэффициент K_2 при запыленности, г/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1,00	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1,00	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15у	1,00	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87

ЦН-24	1,00	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1,00	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СДК-ЦН-34	1,00	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90

Расчет циклонов производится по следующим данным:

Расход газа, подлежащего очистке при рабочих условиях Q_p , м³/с.

плотность газа в рабочих условиях ρ_g , кг/м³.

Температура газа, T , К.

Динамическая вязкость газа при данной температуре, μ_g , Па·с.

Дисперсный состав пыли, который задается двумя факторами:

Средний размер пыли (такой размер пыли, при котором количество частиц, крупнее этого размера равно количеству частиц мельче его), d_m .

Среднее квадратичное отклонение в функции распределения частиц по размерам, $\lg \sigma_q$.

Исходная запыленность газа, C_{ex} , г/м³.

Требуемая запыленность газа, $C_{вых}$, г/м³.

Плотность пыли, ρ_q , кг/м³.

Расчет производят следующим образом

Вычисляют требуемую эффективность очистки газа

$$\varepsilon = \frac{C_{ex} - C_{вых}}{C_{ex}}$$

Задаются типом циклона. По таблице 1.2 определяют оптимальную скорость газа в аппарате, v_{opt} .

Определяют необходимую площадь циклона, м²:

$$F = \frac{Q_p}{v_{opt}}$$

Задаются количеством циклонов N , и определяют диаметр циклона, м.

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785 N}}$$

Вычисляют действительную скорость газа в циклоне

$$v = \frac{Q_p}{0,785 N D^2}$$

Действительная скорость газа не должна отличаться от оптимальной более, чем на 15%.

Принимают по таблице 1.3 коэффициент гидравлического сопротивления для данного циклона. Для циклонов НИИОГаза вносят поправки на диаметр циклона и запыленность по таблицам 2 и 3 соответственно.

Определяют потери давления в циклоне, Па, по формуле:

$$\Delta P = \zeta_0 \frac{\rho_z v^2}{2}$$

Если потери вполне приемлемы, переходят к определению эффективности очистки газа в циклоне.

Приняв по таблице 4 значения d_{50}^T и $\lg \sigma_4^T$ для табличных условий, (данные таблиц получены экспериментальным путем) определяют значения d_{50} при рабочих условиях (диаметре циклона, скорости потока, плотности пыли, динамической вязкости газа) по уравнению, полученному из критерия Стокса, рассматриваемого в диапазоне Стоксовского закона сопротивления среды:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{D_T} \frac{\rho_{4T}}{\rho_4} \frac{\mu}{\mu_4} \frac{v_T}{v}}$$

Определяют параметр x по формуле:

$$x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{50}}}{\lg^2 \sigma_z + \lg^2 \sigma_4}$$

По графику (рис. 1.7) определяют значение функции $\Phi(x)$, и находят эффективность циклона η :

$$\eta = 0,5(1 + \Phi(x)) .$$

Полученное значение сравнивают с требуемым. Если оно меньше, чем требуемое, то принимают другой циклон, и рассчитывают его аналогичным образом. Замена одного типа циклона на другой, при условии сохранения сопротивления газового тракта постоянным, производится за счет изменения диаметра циклона.

Диаметр нового циклона в этом случае определяется из следующей формулы:

$$D_2 = D_1 \sqrt[4]{\frac{\zeta_{02}}{\zeta_{01}}}$$

Где D_2 - диаметр нового циклона.

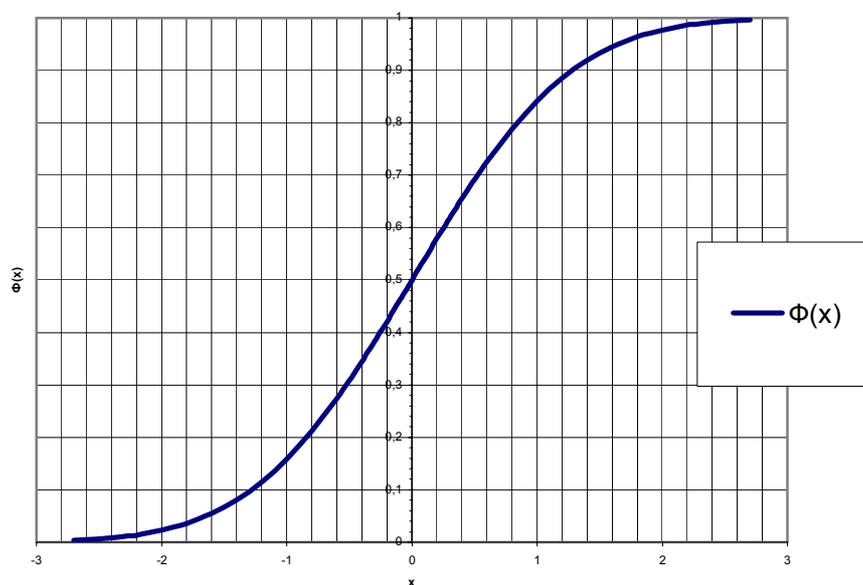
D_1 - диаметр старого циклона.

Таблица 1.6.

Параметры, определяющие эффективность циклона:

Параметры	ЦН-24	ЦН-15у	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СДК-ЦН-34	СИОТ	ВЦНИИ ОТ
d_{50}^T , мкм.	8,5	6,0	4,5	3,65	2,31	1,13	2,6	8,6
$\lg \sigma_4^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,340	0,28	0,32
v_{onm} , м/с.	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	2,0	1,0	4,0

Примечание: Значение d_{50}^T в таблице соответствует следующим условиям эксплуатации циклонов: средняя скорость газа в циклоне $v = 3,5$ м/с; диаметр циклона $D = 600$ мм; плотность частиц $\rho = 1930$ кг/м³; динамическая вязкость газа $\mu_2 = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Рис. 1.7. Значение функции $\Phi(x)$

Кроме того, для циклонов НИИОГаз существуют номограммы определения эффективности циклонов ЦН-15, ЦН-24 в зависимости от d_{50} и $\lg \sigma_4$.

Этот и другие способы определения эффективности циклона приведены для определения общей степени очистки в циклоне, начиная с $\eta = 50\%$ и выше. Однако они исключают возможность теоретического расчета степени очистки циклона по фракциям.

1.2.3.5. Инерционный фильтр-сепаратор

Примером пылеулавливающего аппарата с тангенциальным подводом воздуха с использованием циклонного эффекта, обладающего высокой

производительностью и эффективностью является разработка проф. СПбГПУ А.В.Тананаева (патент RU - 2080939) – инерционный фильтр-сепаратор [20].

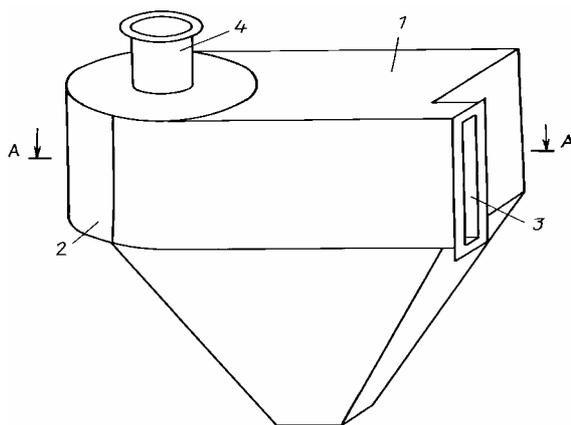


Рис. 1.8. Инерционный фильтр-сепаратор

Данное изобретение – инерционный фильтр-сепаратор относится к устройствам для сухой очистки газов от пылевидных частиц основано на циклонном эффекте очистки, но является более совершенным пылеулавливающим аппаратом и имеет отличительные преимущества над многими известными аналогами.

Сепаратор (рис.1.8 и 1.9) состоит из бункера-пылесборника (1), спирального канала (2), состоящего из ряда секций в виде полуцилиндров с убывающим радиусом кривизны (5), смещенных друг относительно друга на высоту пылеотводящих щелей (6), а также тангенциального входного (3) и расположенного по оси спирали выходного патрубка (4). Устройство для регулирования площади поперечного сечения (9) установлено на входе спирального канала в зоне щели (8), соединяющей полость бункера со спиральным каналом. Эта щель выполнена с возможностью регулирования ее размера. Фильтр-сепаратор снабжен средством для изменения направления течения газа, установленным на выходе спирального канала (11).

значительный вклад в значение эффективности циклона. Таким образом выявляются задачи настоящей работы:

Создание и исследование математических моделей центробежного движения частиц, на основе теоретической механики жидкости.

Разработка методики оценки эффективности циклонов.

Проверка достоверности данной методики расчета эффективности.

2. Теоретическое исследование циклонов

Технические, экономические или технологические разработки, направленные на повышение эффективности циклонов невозможны без изучения гидромеханических особенностей процесса осаждения частиц и их движения во вращающемся потоке газа. Создание математической модели движения аэрозольной частицы в закрученном потоке позволит оценить эффективность пылеулавливания и выявить влияющие на нее факторы.

Рассмотрим общепринятую схему движения газового потока и сепарации в циклоне. Пылегазовый поток с большой скоростью по касательной поступает в цилиндрическую часть корпуса циклона, подвергаясь эффекту центробежного сепарирования по окружности.

2.1. Особенности движения одиночной частицы в турбулентном потоке в каналах.

При рассмотрении движения взвешенных частиц в турбулентном потоке принимается, что абсолютное движение взвешенной частицы представляет собой, сумму переносного движения в составе элементарного жидкого объема, содержащего частицы, и относительного движения внутри этого объема под действием силы тяжести, причем скорость относительного движения равна гидравлическое крупности w . Поэтому ограничимся рассмотрением таких взвешенных частиц, которые "приспосабливаются" к скорости переносящего их объема жидкости за время, значительно меньшее, чем время, в течение которого частица переносится этим объемом. Вычислим время, в течение которого частица приобретает скорость переносящего ее жидкого объема, так называемое время релаксации частицы примеси. Рассмотрим падение частицы под действием силы тяжести в покоящейся воде. Уравнение движения имеет вид:

$$m\ddot{z} = mg - R_z, \quad (2.1)$$

где m – масса частицы;

g – ускорение силы тяжести,

R_z – сила сопротивления, действующая на движущуюся частицу со стороны жидкости (газа) (ось z направлена вниз).

В случае мелких взвешенных частиц справедлива зависимость Стокса,

$$R_z = \beta_1 m \dot{z}, \quad (2.2)$$

где β_1 – размерный коэффициент пропорциональности. При решении уравнения и использовании граничных условий [6], получаем:

$$\dot{z} = w(1 - e^{-\frac{g}{w}t}), \quad (2.3)$$

где w – гидравлическая крупность частиц. Величину

$$t = \frac{w}{g} \quad (2.4)$$

обычно называют временем релаксации взвешенной частицы. За это время частица приобретает скорость переносящего ее жидкого объема, т.е. выйдя из состояния покоя, под действием силы тяжести приобретает скорость около $0,6 w$, а через $3 t$ скорость достигает $0,95 w$.

Если падающая частица крупная и справедлив закон квадратичного сопротивления

$$R_z = \beta_2 m \dot{z}^2, \quad (2.5)$$

То скорость падения частицы, согласно решению уравнения 2.1 при выполнении граничных условий [6] примет вид

$$z = w \cdot t \cdot \frac{g}{w} t. \quad (2.6)$$

Это решение показывает, что крупная частица, выйдя из состояния покоя под действием силы тяжести приобретает скорость $0,95w$ за время

$$t = 1,8 \frac{w}{g}. \quad (2.7)$$

2.2. Противоточный циклон с тангенциальным подводом воздуха

2.2.1. Основные допущения

В циклоне с тангенциальным подводом воздуха (рис.1.3 а) процесс извлечения твердой фазы из газовой среды происходит следующим образом. Подлежащий очистке воздух (или иной газ) движущегося по окружности вокруг оси циклона. Твердые частицы более высокой плотности, чем газ, под действием центробежной силы инерции смещаются к внешней стенке циклона.

Центробежное ускорение в циклоне в несколько сот или тысячу раз больше ускорения свободного падения. Вследствие чего даже весьма маленькие частицы пыли не в состоянии следовать за линиями тока газов и под влиянием

центробежной силы выносятся из кривой движения газов по направлению к стенке.

При рассмотрении центробежного эффекта сепарирования будем считать уловленными частицы, достигшие внешней (наружной) стенки циклона или внешней стенки секции, если циклон разделен на секции с криволинейными каналами.

Процесс сепарации частиц пыли рассмотрим как совокупность движения одиночных частиц в потоке, движущихся по окружности в канале с твердой наружной стенкой с радиусом кривизны R . Взаимодействие частиц, их дробление и слияние учитываться не будет.

Принимаем также следующие допущения:

- влияние турбулентных пульсаций скорости на движение частицы не учитываем;
- течение воздуха рассматривается как установившееся;
- осредненная скорость движения воздуха постоянна по времени и по сечению, эффект проскальзывания частиц относительно газа отсутствует;
- затуханием и переформированием тангенциальной скорости v_T вдоль потока пренебрегаем;
- тангенциальная скорость частиц равна тангенциальной скорости газового потока в точке, в которой они находятся;
- сила тяжести мала по сравнению с силами определяющими осредненное и турбулентными пульсационное движение потока;
- частицы имеют форму шара с диаметром d .

2.2.2. Радиальное смещение частицы

При движении потока в циклоне режим течения газа является турбулентным. Режим движения характеризуется величиной числа Рейнольдса [5,29]:

$$Re = \frac{v_T D_K}{\nu}, \quad (2.8)$$

вычисленному по внешним параметрам потока:

ν - кинематическая вязкость газовой среды,

v_T - тангенциальная скорость газового потока,

D_K - диаметр канала (выхлопной трубы).

При расчете величины числа Рейнольдса для скоростей потока от 3 до 18 м/с (характерных для циклонов) получаем $Re \geq 10^5$, в то время как режим развитой турбулентности наступает при $Re \geq 10^4$.

Для возможности анализа количества уловленных частиц аэрозоля, необходимо определить величину радиального (поперечного к оси вращения потока) смещения твердой частицы при движении по кольцевому каналу. Для анализа поведения аэрозольных частиц необходимо рассмотреть поведение одиночной частицы под действием всех сил (рис.2.2.).

В связи с тем, что плотность частицы ρ_s много больше плотности воздуха, частица, попадая в циклон с некой скоростью входящего потока, по инерции стремясь двигаться равномерно и прямолинейно (рисунок 2.1, траектория 1), отклоняется при этом от оси циклона в сторону его внешней стенки (рисунок 2.1, траектория 2). Согласно принятым допущениям, тангенциальная составляющая скорости частицы v_T равна скорости потока. Радиальному смещению частицы со скоростью v_R препятствует сила сопротивления среды. Сила сопротивления движению частицы вычисляется по формуле Стокса:

$$F_c = 3\pi\mu v_R d, \quad (2.9)$$

где μ - динамическая вязкость газовой среды,
 v_R - радиальная составляющая скорости частицы,
 d - диаметр частицы.

В результате частица движется по криволинейной траектории (рисунок 2.1, траектория 2 и 3). Очевидно, что чем меньше масса и чем больше вязкость газа (а следовательно, и инерция) частицы, тем ближе ее траектория будет к окружности (рисунок 2.1, траектория 3).

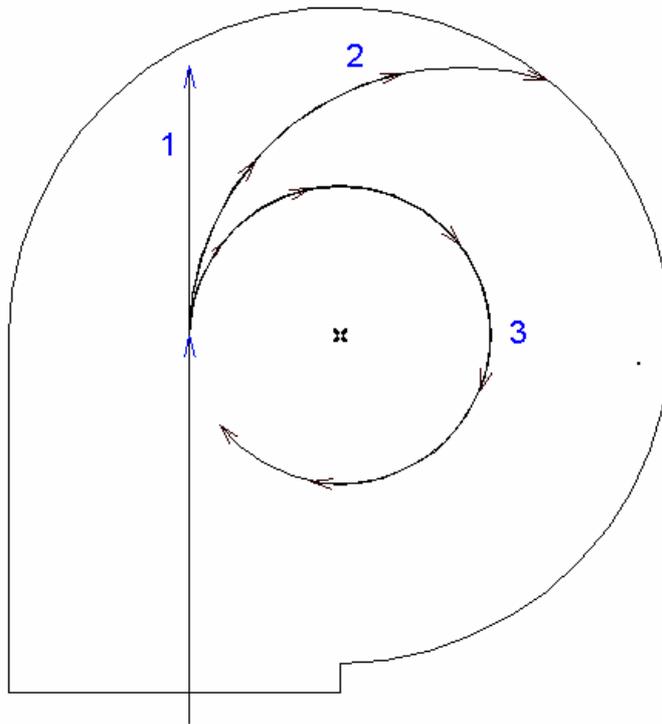


Рис. 2.1.Траектории движения частиц

Криволинейной траектории движения частицы соответствует сила центростремительного ускорения

$$F_u = \frac{\pi}{6 \cdot R_q} v_T^2 \rho d^3, \quad (2.10)$$

где, ρ - плотность частицы,

v_T – тангенциальная составляющая скорости частицы,

R_q - радиус кривизны траектории частицы.

Поскольку сила сопротивления является единственным источником центростремительного ускорения частицы, то, приравнявая $F_{Ц}$ и F_C , получаем

$$\frac{\pi}{6} \cdot \frac{v_T^2}{R_q} \rho_s d^3 = 3\pi\mu d v_R. \quad (2.11)$$

Можно предположить, что, по прошествии некого пути в циклоне, частица движется в радиальном направлении с постоянной скоростью. Тогда эта скорость определится как:

$$v_R = \frac{v_T^2}{18 \cdot R_q} \rho_s \frac{d^2}{\mu}. \quad (2.12)$$

Возможность применять формулу Стокса для этого расчета подтверждается при вычислении числа Рейнольдса по диаметру частиц:

$$\text{Re}_q = \frac{v_R d}{\nu}, \quad (2.13)$$

где ν - кинематическая вязкость газовой среды,

d - диаметр частицы.

Для частиц максимального размера из рассматриваемых (диаметра частиц 100 мкм) по формуле 2.9 вычисляем значение числа Рейнольдса. Полученное значение число Рейнольдса $\text{Re} = 13$. При теоретических расчетах аналитическая формула Стокса для силы сопротивления движению шарообразной частицы в газовой среде верна для чисел Рейнольдса меньше 0,1, однако при решении практических задач, допускается применение закона Стокса, если число Рейнольдса приближается к 10, т.к. несовпадение аналитической формулы Стокса с экспериментальными данными не превышает 20% (рис.2.1)

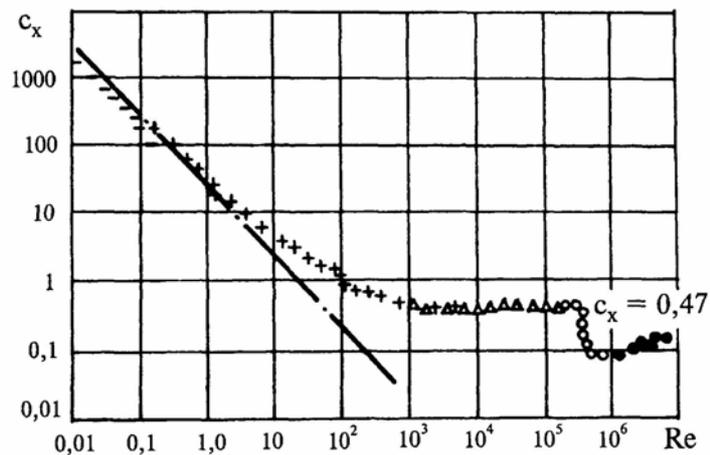


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента сопротивления шара от числа Re , а также влияние условий опыта на величину c_x в районе $\text{Re}_{\text{кр}}$.

Следовательно, для вычисления силы, с которой среда сопротивляется радиальному смещению частицы, можно применять формулу Стокса. Частица движется по криволинейной траектории с радиусом кривизны R_q . Для определения пути, пройденного за время T , принимаем траекторию частицы за окружность радиусом R_q , с центром, совпадающим с осью циклона.

Тогда время, за которое частица пройдет расстояние вдоль окружности равное $L = \pi R_q$ равно:

$$T = \frac{L}{v_T} = \frac{\pi R_q}{v_T}. \quad (2.14)$$

За это время частица изменит свое положение и в радиальном направлении, т.е. сместится от центра циклона.

Для вычисления радиального смещения частицы необходимо удостовериться в том, что время релаксации частиц, время за которое частица приобретает скорость переносящего ее газового потока, много меньше, чем время T , за которое частица сместится к стенке циклона под действием силы центробежного ускорения. Время релаксации частицы $t_{рел}$ вычисляется по формуле 2.4, т.к. рассматриваемые частицы находятся в диапазоне, где верна формула Стокса. Т.е. должно выполняться условие:

$$t_{рел} \ll T. \quad (2.15)$$

Согласно 2.7 и 2.14 получаем:

$$\frac{w}{g} \ll \frac{\pi R_{\text{ц}}}{v_T}. \quad (2.16)$$

Если условие выполняется можно вычислить радиальное смещение частицы. При проверке выполнения условия 2.15 для частиц максимального размера (диаметр частицы равен 100 мкм, гидравлическая крупность, т.е. скорость осаждения частиц под действием силы тяжести составляет $w = 0,7$ [5]) вычисленное по формуле 2.7 время релаксации частиц не превышает 0,01. Что намного меньше значения времени за которое частица сместится к стенке циклона. Т.е. условие 2.15 выполняется.

Смещение частицы (рис.2.2.) в радиальном направлении за время T будет равно:

$$\Delta = v_R T = v_R \frac{\pi R_{\text{ц}}}{v_T}. \quad (2.17)$$

С учетом (4) получим выражение,

$$\Delta = \frac{v_T^2}{18 \cdot R_{\text{ц}}} \rho \frac{d^2}{\mu} \frac{\pi R_{\text{ц}}}{v_T} = \frac{\pi \rho}{18 \mu} v_T d^2. \quad (2.18)$$

А.В.Тананаев предложил (2001 г., частное сообщение) в качестве оценки $R_{\text{ц}}$ использовать радиус циклона R , который очевидно будет меньше, чем $R_{\text{ц}}$, и показал, что в рамках допущения $R_{\text{ц}} = R$ радиальное смещение частиц Δ не зависит от радиуса циклона.

2.2.3. Эффективность противоточных циклонов с тангенциальным подводом воздуха

Рассмотрим криволинейное течение в канале, образованном двумя концентрическими поверхностями. Такое течение является частным случаем

вращения потока или вихря (рис.2.2). Степень очистки газа в пылеуловителе определяют коэффициента улавливания (захвата) взвеси, т.е. процентным отношением концентрации пыли до $C_{вх}$ и после пылеуловителя $C_{вых}$. Данное отношение можно расценивать, как отношение количества частиц, выпавшего в бункер циклона, к общему количеству частиц.

$$\varepsilon = \frac{C_{вх} - C_{вых}}{C_{вх}} \cdot 100\% . \quad (2.19)$$

Как было упомянуто выше, уловленными можно считать частицы, достигшие внешней стенки секции. Из движущихся в потоке частиц наибольшее расстояние в радиальном направлении пройдет частица, которая при входе в циклон находилась вблизи выхлопной трубы, т.е. вблизи внутренней стенки канала (т.к. рассматривается движение частиц по концентрическим секциям). Чтобы такую частицу можно было считать уловленной, ей необходимо пройти расстояние: $R_2 - R_1$.

где R_1 – внутренний радиус цилиндрической поверхности ограничивающей канал,

R_2 - внешний радиус цилиндрической поверхности, ограничивающей канал (рис.2.2.).

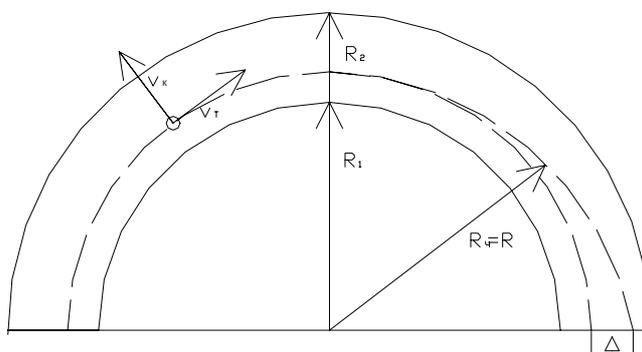


Рис. 2.2. Движение одиночной частицы по окружности при течении газового потока в концентрическом канале.

Радиальное смещение частиц вычисляется по формуле 2.18. Рассмотрим участок, единичной ширины. Поскольку, согласно принятым допущениям, частицы распределены по всему сечению равномерно, процентное же отношение всех уловленных на данном участке частиц, т.е. частиц достигших наружной ограничивающей поверхности к их общему количеству вычисляется так:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{R_2 - R_1} \cdot 100\% . \quad (2.20)$$

Подставим в формулу 2.20 значение Δ из формулы 2.18:

$$\varepsilon = \frac{\pi \rho v_T d^2}{18 \mu (R_2 - R_1)} 100\% . \quad (2.21)$$

Рассмотрения полученной формулы позволяет выявить факторы, от которых зависит эффективность улавливания пыли в циклонных аппаратах.

Данная формула позволяет определить эффективность пылеулавливания по фракциям. На графике на рисунке 2.3 показана фракционная эффективность циклона с тангенциальным подводом воздуха при изменении скорости газового потока на входе в циклон, что влияет на изменение величины числа Рейнольдса и увеличение турбулентности потока. Увеличение скорости газового потока при входе в циклон повышает эффективность улавливания пыли, однако до некоторого значения скорости, характерного для данного вида пыли. Дальнейшее увеличение скорости не только не приводит к повышению эффективности улавливания, но значительно ее снижает. Объясняется это тем, что с возрастанием скорости в циклоне увеличивается турбулизация, которая препятствует сепарации пыли и даже способствует переходу уж отложившейся в бункере пыли вновь во взвешенное состояние и выносу ее из циклона.

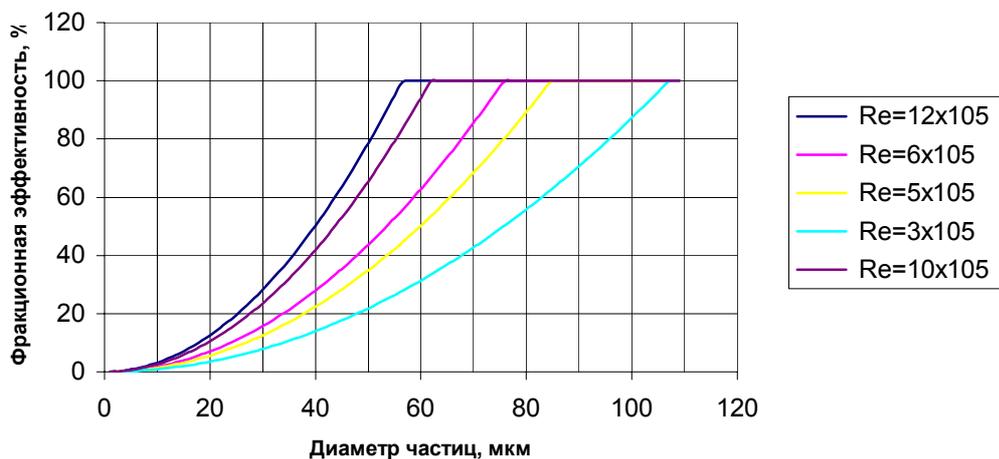


Рис. 2.3. Фракционная эффективность осаждения частиц в криволинейном канале в зависимости от величины числа Рейнольдса Re для газового потока.

Примечание: расчет производился для канала единичной ширины; плотность частиц $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$; динамическая вязкость воздуха $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$.

Увеличение массы (плотности) пылевых частиц облегчает их улавливание и, следовательно, повышает эффективность очистки. Таким образом, коагуляция пыли путем ее предварительной обработки или непосредственно в циклонном аппарате весьма желательна.

Вязкость газа увеличивается при повышении температуры. При этом несколько снижается эффективность улавливания пыли.

2.2.4. Эффективность инерционного фильтра-сепаратора.

В качестве расчетной модели принимаем конструкцию инерционного сепаратора. Движение потока происходит по секциям-каналам, (рис.2.2.) аппарат также оборудован пылеотводящими щелями (рис.2.4.). Рассмотрим влияние размера пылеотводящих щелей на эффективность сепарации. [20,27]

Процесс извлечения твердой фазы из газовой среды происходит следующим образом. Твердые частицы более высокой плотности чем плотность газа, протекающего по криволинейным каналам, под действием центробежной силы инерции смещаются в каждой секции к ее внешней стенке. Вследствие чего образуется пристеночный (циркулирующий) поток, через пылеотводящие щели попадающий в предшествующие каналы меньшей кривизны (бункер в случае первой секции). Центральная же часть потока (сквозной поток) направляется в следующий по ходу канал с большей кривизной (рис.1.9). Уловленными считаются частицы, достигшие внешней стенки секции. Рассмотрим криволинейное течение в канале, образованное двумя концентрическими поверхностями. Примем, что в канале единичной толщины, ограниченном цилиндрическими поверхностями радиусов R_1 и R_2 (рис.2.4), безвихревое потенциальное течение. Будем считать, что данные о дисперсном составе пыли известны. Предполагаем, что пыль на входе в канал равномерно распределена по поперечному сечению канала. Используя полученные в пункте 2.2.3 результаты можно оценить эффективность инерционного сепаратора.

Из движущихся в потоке частиц наибольшее расстояние в радиальном направлении пройдет частица, которая при входе в циклон находилась вблизи внутренней стенки канала. Чтобы такую частицу можно было считать уловленной, ей необходимо пройти расстояние: $R_2 - R_1$.

Где R_1 – внутренний радиус цилиндрической поверхности ограничивающей канал, R_2 - внешний радиус цилиндрической поверхности, ограничивающей канал.

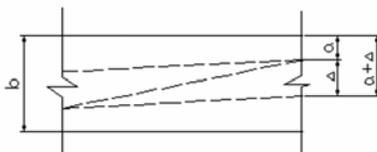


Рис. 2.4.Схема движения частицы в канале единичной толщины

Частицы, отклонившиеся от первоначальной траектории на величину радиального смещения Δ , будут удалены в предшествующий канал через пылеотводящую щель шириной a , если они находятся не далее, чем на расстоянии $a+\Delta$ от наружной стенки канала (рис.2.4.). Радиальное смещение частиц вычисляется по формуле (2.18). Рассмотрим участок, единичной ширины. Поскольку, согласно принятым допущениям, частицы распределены по всему сечению равномерно, процентное же отношение всех уловленных на данном участке частиц, т.е. частиц достигших расстояния $a + \Delta$ от наружной стенки канала к их общему количеству на данном участке, с учетом формулы (2.19) вычисляется так:

$$\varepsilon = \frac{(a + \Delta)}{R_2 - R_1} 100\% , \quad (2.22)$$

Подставим в формулу (2.21) значение Δ из формулы (2.18):

$$\varepsilon = \left(\frac{a}{R_2 - R_1} + \frac{\pi \rho v_0 d^2}{18 \mu (R_2 - R_1)} \right) 100\% . \quad (2.23)$$

На графике (рис.2.5 и 2.6) показана фракционная эффективность инерционного фильтра-сепаратора, при изменении величины пылеотводящей щели в долях от ширины канала при постоянных значениях величины скорости

газового потока при входе в циклон. Также показана фракционная эффективность при изменении скорости газового потока при постоянной величине пылеотводящей щели.

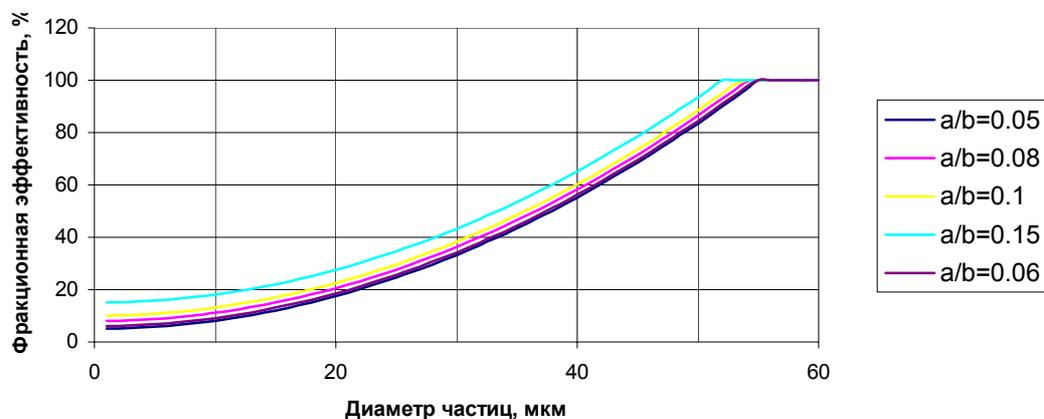


Рис. 2.5. Фракционная эффективность осаждения частиц инерционного сепаратора в зависимости от величины отношения размера щели к ширине канала a/b .

Примечание: расчет производился для канала единичной ширины; плотность частиц $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$; динамическая вязкость воздуха $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$.

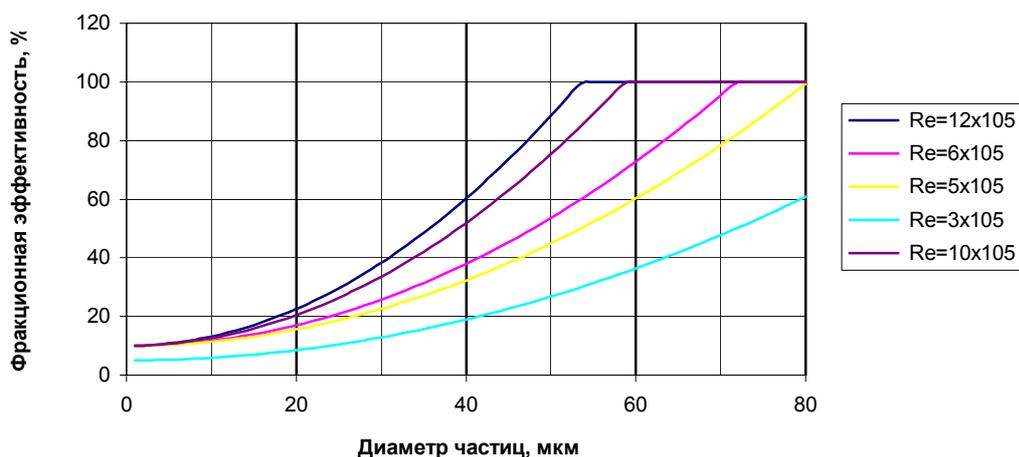


Рис. 2.6. Фракционная эффективность осаждения частиц инерционного сепаратора в зависимости от величины числа Рейнольдса Re для газового потока. 10^5

Примечание: расчет производился для канала единичной ширины; плотность частиц $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$; динамическая вязкость воздуха $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$.

2.3. Прямоточный циклон с винтовым подводом воздуха

В настоящее время расчет эффективности циклонов с винтовым подводом воздуха проводится, в основном, по формулам, полученным из экспериментальных данных, без учета физической сути процесса. На сегодняшний день проводится теоретический расчет только суммарной (интегральной) эффективности циклона, без расчета эффективности очистки по каждой фракции, а так же расчет минимального диаметра d_{\min} частиц, осажденных в теле циклона полностью, опять таки, без учета частичного осаждения частиц, диаметром меньше d_{\min} , который вносит значительный вклад в значение эффективности циклона [33, 34].

2.3.1. Основные допущения

При разработке математической модели были сделаны следующие допущения о потоке и движении частиц внутри циклона на участке после лопаток:

- продольная (осевая) компонента осредненной скорости движения воздуха постоянна во времени и неизменна во всех точках потока;
- тангенциальная компонента осредненной скорости движения воздуха v_T не зависит от продольной координаты;
- течение воздуха рассматриваем в рамках модели вязкой несжимаемой жидкости;
- течение воздуха рассматривается как установившееся;
- осредненная скорость движения воздуха постоянна по времени и по сечению, эффект проскальзывания частиц относительно газа отсутствует;
- затуханием и переформированием тангенциальной скорости v_T вдоль потока пренебрегаем;
- осевая скорость частиц равна осевой скорости воздуха в точке, в которой они находятся;

- сила тяжести мала по сравнению с силами определяющими осредненное и турбулентными пульсационное движение потока;
- частицы имеют форму шара с диаметром d .
- концентрация пылевидных частиц равномерна по времени и сечению;

2.3.2. Радиальное и осевое смещение частицы

Будем считать, что поток воздуха, попадая в тело циклона, закручивается на один и тот же угол, равный углу поворота лопаток, и приобретает две составляющих осредненной скорости (рис.2.7): v_0 - осевую составляющую и v_T - тангенциальную составляющую.

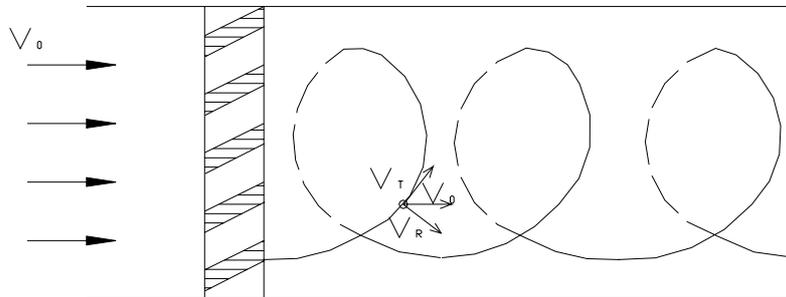


Рис. 2.7. Движение одиночной частицы в теле прямоточного циклона.

Рассмотрим поведение одиночной частицы под действием всех сил. Осевая составляющая v_0 скорости частицы и скорости воздуха в циклоне равна среднерасходной скорости воздуха до входа в циклон:

$$v_0 = \frac{Q}{\omega}, \quad (2.24)$$

где Q - объемный расход воздуха

ω - площадь поперечного сечения циклона.

Будем считать, что тангенциальная скорость равна:

$$v_T = v_0 \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.25)$$

α - угол поворота лопаток винта циклона.

Как было показано выше, в радиальном направлении частица движется с постоянной скоростью (в соответствии с законом Стокса (см. п.2.2.2), в рамках принятых допущений):

$$v_R = \frac{v_T^2}{18 \cdot R_{\text{г}}} \rho \frac{d^2}{\mu}, \quad (2.26)$$

где ρ - плотность частицы

v_0 – тангенциальная составляющая скорости частицы

$R_{ц}$ - Расстояние от оси циклона до частицы

Разбиваем все поперечное сечение циклона на элементарные концентрические кольца, толщиной dr (рис.2.9).

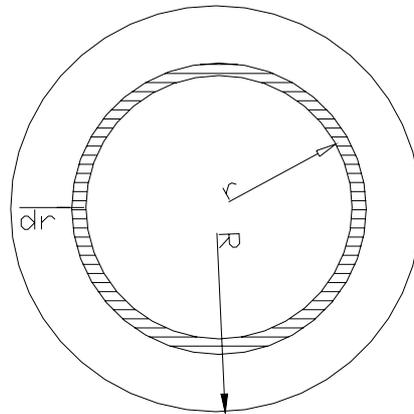


Рис. 2.8. Разделение тела циклона на элементарные кольца

Считаем, что все частицы одного диаметра, находящиеся внутри одного элементарного кольца, имеют одинаковую радиальную скорость, зависящую только от положения кольца:

$$v_R = \frac{v_T^2}{18 \cdot r} \rho \frac{d^2}{\mu}, \quad (2.27)$$

где r - расстояние от центра циклона до данного кольца dr , и достигнут стенки циклона одновременно. Время, затрачиваемое частицами на преодоление расстояния $R - r$ до стенки циклона, можно рассчитать, как отношение пути к скорости частиц:

$$T = \frac{S}{v_R} = \frac{18r(R-r)\mu}{d^2 v_T^2 \rho}. \quad (2.28)$$

Для вычисления расстояния пройденного частицей в направлении стенки циклона, необходимо учесть выполнения условия 2.15, которое с учетом формул 2.4 и 2.22 примет вид:

$$\frac{w}{g} \ll \frac{18r(R-r)\mu}{d^2 v_T^2 \rho}. \quad (2.29)$$

При численной проверке условие 2.15 выполняется. Тогда за время T частицы в циклоне пройдут в продольном направлении расстояние, равное:

$$S_0 = v_0 T = v_0 \frac{18r(R-r)\mu}{d^2 v_T^2 \rho}. \quad (2.30)$$

Из этих двух равенств можно вычислить, на каком расстоянии от начала циклона осядут частицы из любого элементарного кольца dr .

Продифференцируем формулу $S_0 = v_0 \frac{18r(R-r)\mu}{d^2 v_T^2 \rho}$ по dr :

$$\frac{dS_0}{dr} = v_0 \frac{18(R-2r)\mu}{d^2 v_T^2 \rho}, \quad (2.31)$$

Очевидно, что в точке $r = \frac{R}{2}$ $\frac{dS_0}{dr} = 0$, следовательно, функция $S_0 = f(r)$ в точке $r = \frac{R}{2}$ имеет экстремум (максимум). Следовательно, частицы, находящиеся на расстоянии половины радиуса, пройдут наибольшее расстояние в осевом направлении.

2.3.3. Эффективность прямоточного циклона с винтовым подводом воздуха

2.3.3.1. Расчетная модель (переход от d к Δ)

Разобьем интервал от 0 до $S_{\max} = v_0 \frac{18(R/2)^2 \mu}{d^2 v_T^2 \rho}$ на n равных отрезков (в проделанном расчете $n = 13$). Для каждого из этих отрезков рассчитаем координаты r_1 и r_2 элементарных колец dr_1 и dr_2 , с которых частицы попадут, соответственно, в начальную и конечную точку отрезка (рис.2.9).

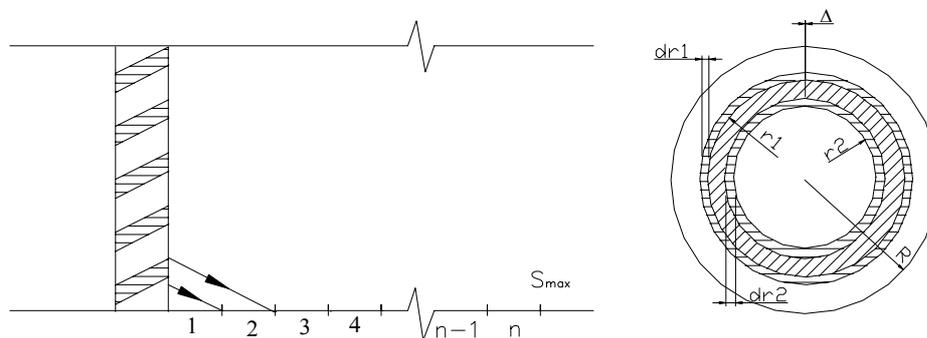


Рис. 2.9. Расчетная модель

Считаем, что все частицы, находящиеся между этими двумя элементарными кольцами, попадут в данный отрезок. Поскольку, по допущению 4, частицы

распределены по всему сечению равномерно, то количество частиц, осевших на каждом i -том отрезке пропорционально площади соответствующего кольца $\pi(r_1^2 - r_2^2)$. Процентное же отношение всех осевших на данном участке частиц к их общему количеству вычисляется как

$$\varepsilon = \frac{\pi(r_1^2 - r_2^2)}{\pi R^2} \cdot 100\% = \frac{r_1^2 - r_2^2}{R^2} \cdot 100\% , \quad (2.32)$$

2.3.3.2. Определение эффективности прямоточного циклона с винтовым подводом воздуха.

После учета турбулентного разброса частиц, проводится окончательный расчет распределения осажденных частиц по длине циклона с учетом поправки на турбулентность. По результатам расчета строилась графики, показывающие зависимость распределения количества осажденных частиц по длине циклона, в зависимости от диаметра пылевидных частиц, а также зависимость процента осажденных частиц в зависимости от угла поворота лопаток циклона (рис.2.12 и 2.13).

Сравнение результатов расчета с использованием данной методики с экспериментальными данными приведено в следующей главе.

2.4. Выводы по главе

Для технических разработок, направленные на повышение эффективности циклонов потребовалось создание математической модели движения аэрозольной частицы в закрученном потоке. Выявлены факторы, от которых зависит эффективность улавливания пыли в циклонных аппаратах, предложены методики расчета эффективности.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. При движении частицы в закрученном потоке радиальное смещение частицы определяется свойствами частицы, скоростью газового потока, вязкостью потока.
2. Была предложена методика оценки эффективности для противоточного циклона с тангенциальным подводом воздуха.
3. Показано, что при увеличении скорости газового потока увеличивается эффективность пылеулавливания.
4. Для инерционного сепаратора показана также зависимость эффективности от критерия Рейнольдса для газового потока, от размера частиц и от конструкции аппарата. Очевидно, что можно

повысить эффективность улавливания при увеличении размеров пылеотводящих щелей.

5. Для прямоточного циклона с вихревым подводом воздуха предложена методика расчета эффективности, обеспечивающая возможность подбора параметров воздухоочистного оборудования.

3. Экспериментальное исследование циклонов

3.1. Описание стенда и методики эксперимента

3.1.1. Установка для испытания циклона.

В качестве экспериментального образца для подтверждения достоверности расчетов с использованием разработанной методики оценки эффективности циклонов, был использован прямоточный циклон с винтовым подводом воздуха, разработанный ЗАО «СовПлим» ЦП-2500, с длиной 0,75 м., диаметром – 0,25 м., и углом поворота лопаток винта - 45°. Испытания циклона проводились на установке, состоящей из следующего оборудования: распылитель, лемниската, прямоточный циклон с пылесборником, струевыпрямитель, вентилятор производства ЗАО «СовПлим» марки FS – 4700, дросселирующее устройство, тканевый мешок для сбора пыли на выходе из циклона. Схема стенда для испытания циклона показана на рисунке 3.1.

Для определения фракционной степени очистки аппарата на основании опытных испытаний полученные в результате пробного запуска аппарата пробы пыли были взяты для проведения лабораторного анализа.

3.1.2. Измерение гидравлического сопротивления прямоточного циклона с винтовым подводом воздуха.

Измерение гидравлического сопротивления проводилось на установке для испытаний циклона (рис.3.1) В воздуховодах на входе и выходе циклона просверлены отверстия диаметром 8-10 мм - обозначены на схеме "точка 1" и "точка 2"(см. рис.3.1.).С использованием прибора Model 8360 VelociCalc Plus производилось измерение статического давления и скорости в этих точках. В точке 1 стенда измерялось падение статического давления (по отношению к атмосферному) на входе в циклон, в точке 2 стенда - на выходе из циклона. Разность этих цифр - потеря статического давления на циклоне.

Динамическое давление не учитывается, т.к. хотя после циклона воздух приобретает закрутку (скорость увеличивается, осевая составляющая скорости остается неизменной), но в реальной вентсистеме энергия закрутки не используется (теряется).

При испытании циклона были проведены измерения гидравлического сопротивления при четырех значениях производительности аппарата (расхода газа): 820 м³/ч, 1400 м³/ч, 2270 м³/ч, 2950 м³/ч

Результаты измерений приведены на графике (рис.3.2).

По графику (рис.3.2.) видим, что зависимость падения напора от расхода приближается к параболической. Значение коэффициента гидравлического сопротивления циклона вычисляется по формуле:

Где Δp – потеря давления в аппарате, Па

V – скорость газового потока, м/с

ρ - плотность газа.

$$\xi = \frac{\Delta p}{\frac{\rho v^2}{2}}. \quad (3.1)$$

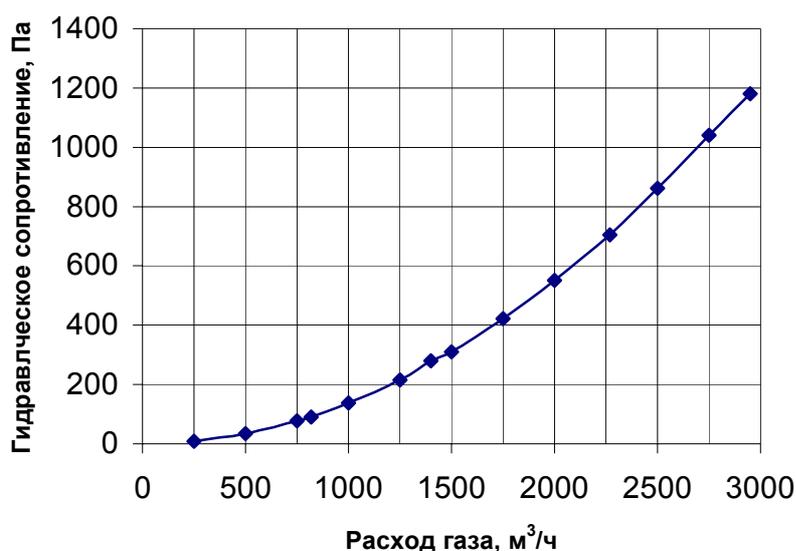


Рис. 3.2. Гидравлическое сопротивление прямоточного циклона.

Зависимость падения напора отнесенного к скоростному напору от числа Рейнольдса не зависит, что показывает автомодельность сопротивления по числу Рейнольдса (рис.3.3).

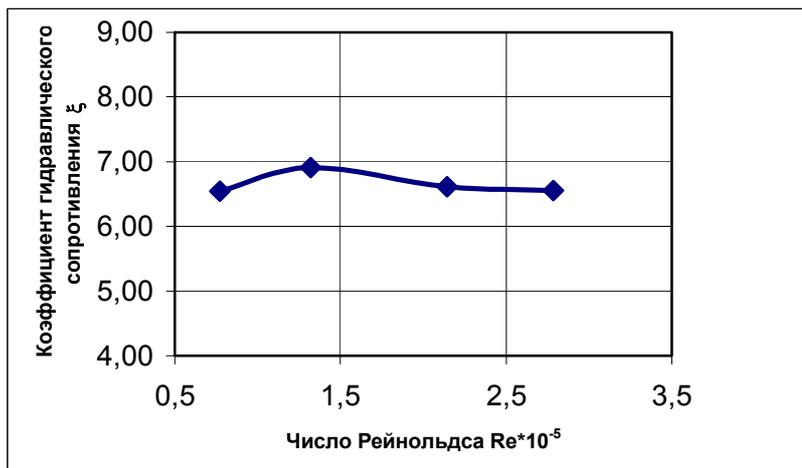


Рис. 3.3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления прямооточного циклона от числа Рейнольдса

По результатам измерений, среднее значение коэффициента гидравлического сопротивления прямооточного циклона с винтовым подводом воздуха, вычисленное по формуле 3.1 составляет 6,6.

3.1.3. Определение процента улавливания пыли для прямооточного циклона.

Согласно ГОСТ 25757. Сухие инерционные пылеуловители [11]. Испытания циклона рекомендуется проводить на среднедисперсной пыли. Чаще всего в мировой практике для подобных испытаний применяется кварцевая пыль. Для измерения эффективности циклона были использованы две пробы кварцевой пыли: пыль находящейся на границе между среднедисперсной и крупнодисперсной; и пыль между среднедисперсной и мелкодисперсной. Получены значения эффективности циклона во всем диапазоне среднедисперсных кварцевых пылей (определены 2 граничных значения).

Начальная и конечная концентрация пыли была определена аккредитованной лабораторией физико-химических методов анализа и контроля объектов внешней среды ЗАО «ПКТИ». Результаты приведены в приложении 1.

Образцы пыли, полученные вследствие испытаний данного аппарата были доставлены соискателем в лабораторию Механики грунтов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета для исследования и определения дисперсного состава. В состав образцов

входили: образцы исходного состава пыли, состава пыли, уловленной циклоном, образцы состава пыли, прошедшей циклон, а также образцы пыли, извлеченной с участка зачистки рабочего цеха.

В соответствии с техническим заданием, разработанным для лаборатории соискателем, в состав исследований входило: определение плотности частиц пыли для всех проб; определение гранулометрического состава всех проб пыли. [Приложение 2]

Плотность частиц пыли определялась в соответствии с ГОСТ 5180-84, введенного в действие с 01.07.1985 г. [12] Согласно стандартам плотность определялась пикнометрическим методом, который основан на определении объема жидкости, вытесненной пылевыми частицами, масса которых предварительно измерена. Поделив массу на вытесненный ею объем, получаем плотность данного материала. Гранулометрический состав пыли определялся ареометрическим методом в соответствии с ГОСТ 12536-79, введенного в действие с 01.07.1980г. [13] Из-за отсутствия точных лабораторных методов определения дисперсного состава пыли, использовались методы, применяемые для определения гранулометрического состава грунтов. Гранулометрический состав проб пыли определялся по весовому содержанию в нем частиц различной крупности, выраженному в процентах по отношению к весу сухой пробы грунта, взятой для анализа.

При подготовке проб пыли к анализу, для выделения частиц размером менее 0.1 мм, пробы подверглись размачиванию и кипячению в воде с добавлением аммиака.

При исследовании пыли, проба которой была взята с участка зачистки, предварительно отделялись хлопьевидные включения остатков ткани зачистного круга через сито с диаметром ячеек 0,25 мм.

3.1.4. Результаты

Результаты определения гранулометрического состава проб пыли приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Результаты определения гранулометрического состава проб пыли

п/п	№ пробы	Место отбора	ρ_s	Гранулометрический состав, %.					Уд. поверх. S см ² /г
				Диаметр частиц, мкм:					
				>50	<50	<10	<5	<1.5	
1	№1	исходный состав	2,64	8,2	91,8	41,0	23,3	4,0	

		пыли							
2	№2	пыль, уловлен. циклоном	2,63	14,1	85,9	7,3	3,2	0	
3	№4	исходный состав пыли	2,67	63,2	36,8	11,2	4,8	1,1	1900
4	№5	пыль, уловлен. циклоном	2,63	71,0	29,0	0,5	0,5	0,5	
5	№6	пыль, прошедш. циклон	2,67	1,9	98,1	83,1	16,0	5,3	
6	№7	исходный состав пыли	2,68	18,0	82,0	37,5	21,5	5,6	5570
7	№8	пыль, уловлен. циклоном	2,66	27,5	72,5	7,5	1,5	0,5	
8	№3	участ. зачистки, бункер№1	5,62	>30	<30	<6	<1		
				96,35	3,65	2,6	1,3		

Примечание: Для пробы № 3 в числителе – диаметр частиц в мкм, в знаменателе – содержание частиц менее данного диаметра в %.

Результаты анализа фракционного состава и эффективности циклона показаны также в виде логарифмических зависимостей (рис.3.4.,3.5.,3.6.,3.7.).

Достоверность экспериментальных результатов была подтверждена дополнительным анализом проб пыли, проведенным в лаборатории ОАО «Механобр Аналит». Анализ производится на лазерном измерителе Анализетте 22 фирмы Фрич. Результаты анализов приведены в Приложении №4.

3.1.5. Фракционная эффективность прямооточного циклона.

Расчет фракционной эффективности прямооточного циклона проводится в соответствии с экспериментальными данными для «Пыли-образца №2».

Начальная концентрация пыли, согласно данным полученным при измерении составляет 550 мг/м³, конечная концентрация: 53 мг/м³. результаты измерения гранулометрического состава приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Результаты определения гранулометрического состава проб пыли для «пыли-образца №2»

№ пробы	Место отбора	ρ_s	Гранулометрический состав, %.				
			Диаметр частиц, мкм:				
			50-100	20-50	10-20	5-10	<5
№4	исходн.	2,67	63,2	17,8	7,8	6,4	4,8
№6	прошедш циклон	2,67	2,0	3,0	15,0	30,0	50,0

Более подробный фракционный анализ частиц: Приложение №2. Измерение проб пыли «проба №6» проведены на лазерном приборе приложение 3.

По формуле 2.8 определяем общую и фракционную эффективность циклона.

Таким образом: общая эффективность составляет: 90,4%.

Фракционная эффективность:

Для частиц размера:

< 5 мкм: 0%

5-10 мкм: 55%

10-20 мкм: 81,5%

20-50 мкм: 98,4%

50-100 мкм: 99,7%

3.1.6. Сопоставление результатов теоретического расчета и результатов полученных экспериментальным путем

Результатом данной работы практической и теоретической работы стало определение фракционного состава улавливаемых частиц, что позволило определить фракционную эффективность данного испытываемого пылеулавливающего аппарата, а также сравнить его пылеочистную способность для частиц разного гранулометрического состава.

Эффективность, вычисленная по результатам эксперимента, сравнивалась с результатами, полученными при теоретическом расчете эффективности аппарата с теми же параметрами с использованием предложенной методики расчета.

Теоретический расчет проводился для тех же параметров аппарата для газового потока, скорость на входе в циклон составляет 16 м/с плотность газа 1,29 кг/м³. Считаем что температура равна 20°C, а угол поворота лопастей винта составляет 45°.

Таким образом: общая эффективность составляет, вычисленная по формуле 2.19: 93,26. Фракционная эффективность, вычисленная по формуле 2.32, для частиц размера:

< 5 мкм: 16,55%

5-10 мкм: 57,20%

10-20 мкм: 100%
 20-50% мкм: 100%
 50-100% мкм:100%

Сравниваем результаты, полученные при теоретическом расчете и при эксперименте.

Значение разницы между величиной эффективности пылеулавливания вычисленной по формуле 2.32 и полученной экспериментально приведена в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Сопоставление величины эффективности пылеулавливания вычисленной теоретическим путем с величиной эффективности полученным экспериментально %.

При расчете общей эффективности:	2,86
При расчете фракционной эффективности для частиц диаметром, мкм:	
<5	16,55
5-10	2,2
10-20	18,5
20-50	1,6
50-100	0,3
Значение средней разности измерений	7,83

Также результаты сравнения приведены на графике (рис.3.8).

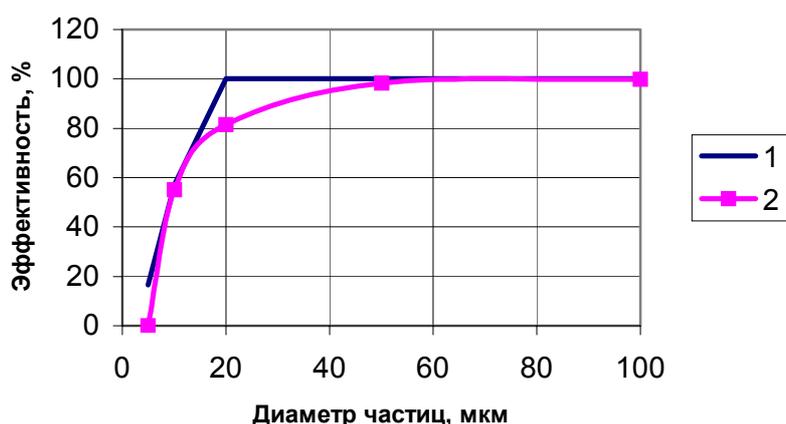


Рис. 3.8. Сопоставление величины эффективности пылеулавливания вычисленной теоретическим путем – 1 с величиной эффективности полученным экспериментально – 2.

Максимальное значение отклонения не превышает 20%, что подтверждает возможность использования созданной методики расчета эффективности пылеулавливания для прямоточных циклонов. Величина общей эффективности и эффективности улавливания частиц размером более 10 мкм, полученная при теоретическом расчете и подтвержденная экспериментом превышает 80%, т.е. данная технологическая разработка обеспечивает требованиям ГОСТ Р 51708-2001 [11]. Требования безопасности и методы испытаний.

Что подтверждает целесообразность ее внедрения в серийное производство.

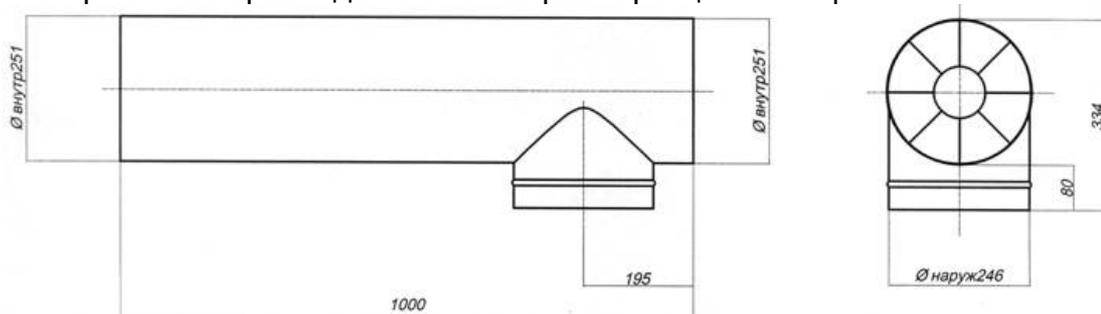
4. Технические разработки

4.1. Конструкция циклона

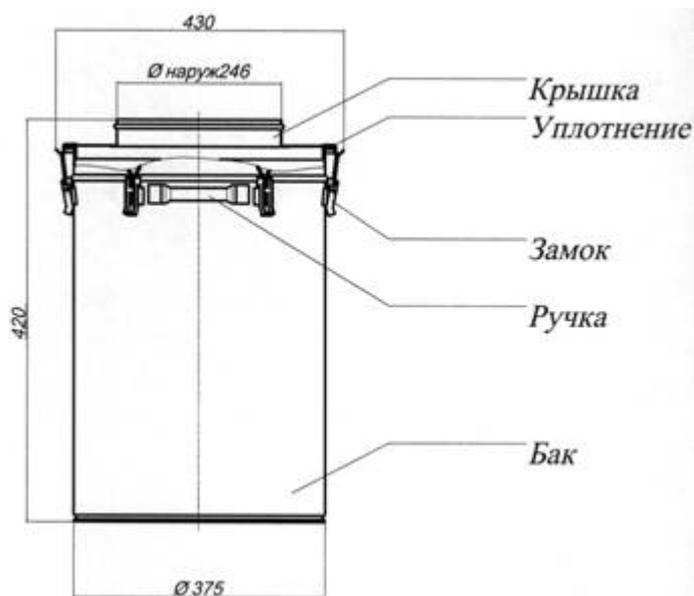
По результатам работы была оказана научно-методическая поддержка при проектировании, отработке опытного образца и постановке на серийное производство прямооточного циклона ЦП-2500, данная конструкция, сертифицирована, готовится к серийному выпуску. Предложенная методика расчета эффективности прямооточного циклона, которая также позволяет определить оптимальные геометрические характеристики данного аппарата, такие как угол лопаток, закручивающий газовый поток, длину корпуса циклона. В соответствии со значениями фракционной эффективности для различных углов закрутки газового потока в циклоне (см. график рис.2.13) полученным по формуле 2.32 выданы рекомендации по углам закрутки лопаток для оптимизации соотношения величины эффективности очистки и гидравлического сопротивления.

Конструкция циклона показана на схеме (рис.4.1).

Габаритные и присоединительные размеры циклона ЦП-2500



Габаритные и присоединительные размеры бункера-пылесборника приведены далее.



Циклон ЦП содержит корпус поз.1, розетку поз.2, жалюзийную решетку поз.3, выходной конус поз.4, патрубок удаления пыли поз.5.

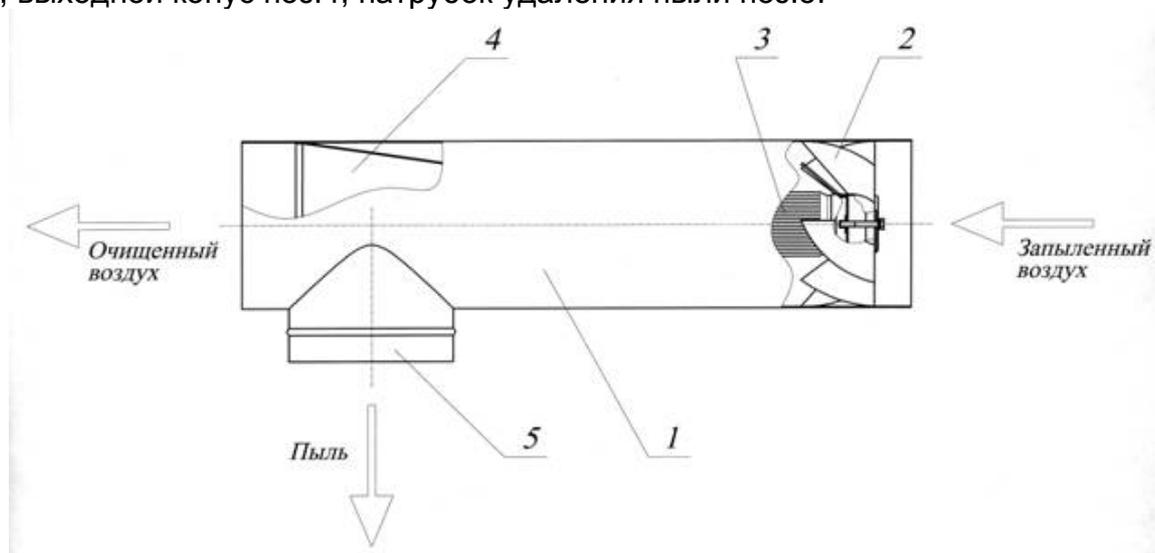


Рис. 4.1. Схема прямооточного циклона с винтовым подводом воздуха ЦП-2500

4.2. Экономические показатели пылеулавливающих установок

Важнейшим экономическим показателем пылеулавливающей установки является удельная годовая стоимость очистки (на единицу производительности, обычно $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$). Указанный расход складывается из амортизационных отчислений от стоимости оборудования и стоимости помещений, занимаемых установкой, расходов на эксплуатацию. Эксплуатационные расходы включают стоимость электроэнергии, стоимость воды и расходы на ее очистку (при мокром пылеулавливании), зарплату, расходы, связанные с удалением уловленной пыли, стоимость затрачиваемых материалов и др.

Из эксплуатационных затрат вычитают стоимость уловленной пыли, если она может быть использована, стоимость сэкономленной теплоты, если применяется рециркуляция воздуха.

К экономическим показателям относятся также затраты электроэнергии и воды на единицу производительности установки, себестоимость очистки 1000 м³ воздуха. Данный показатель изменяется в широких пределах в зависимости от применяемого оборудования, числа ступеней очистки (это связано с требованиями к очистке).

Сравнение экономических вариантов систем очистки производится по разности приведенных затрат. Экономический эффект (в руб. в год) может быть определен по формуле:

$$\mathcal{E} = (C + B - K) - (C_2 + E - K_2)$$

где C; C₂ — годовые эксплуатационные расходы базового варианта (аналога) и сравниваемого варианта; K — капитальные затраты базового варианта (аналога)

и сравниваемого варианта;

E - нормируемый отраслевой коэффициент эффективности капитальных вложений (принимают 0,12; 0,15).

Ниже приведены данные об удельных расходах энергетических ресурсов (электроэнергии и воды) на очистку 1000 м³ технологических выбросов.

Вид пылеулавливающего оборудования	Электроэнергия, кВт-ч	Вода, м ³
Электрофильтры сухие	0,5-1,0	—
Электрофильтры мокрые	0,3—0,5	4-6
Скрубберы Вентури	1-4	0,5—1,2
Форсуночные скрубберы	0,15-0,20	3-6
Циклоны	0,20-0,25	—
Батарейные циклоны	0,20-0,25	—
Тканевые фильтры	0,4-0,6	—
Центробежные скрубберы ВТИ	0,30—0,40	0,1-0,14
Пенные аппараты:	0,20—0,25	0,8—0,9
с провальными решетками		
с переливными решетками	0,20-0,25	0,2—0,3

Заключение

Очистка воздуха имеет важнейшее санитарно-гигиеническое, экологическое и экономическое значения. Поступления в помещение воздуха, не подвергнутого очистке или недостаточно очищенного может привести к негативным последствиям. Эффективная очистка воздуха позволяет решить важную экологическую и экономическую проблему – перейти на замкнутый воздушный цикл, осуществить безотходное производство, что способствует улучшению санитарно-гигиенической и экологической обстановки, дает существенную экономию энергетических ресурсов.

Требования к качеству воздушной среды, в том числе к чистоте воздуха, постоянно возрастают. В связи с этим необходимо разрабатывать и внедрять новые методы и более совершенное оборудование для очистки воздуха.

Результаты данного исследования направлены на увеличение эффективности и качественного улучшения характеристик воздухоочистного оборудования.

Разработанные методы оценки эффективности циклона могут быть использованы для определения целесообразности внедрения циклона в серийное производство, а также выявления технологической области для его наиболее рационального применения. Созданная программа расчета эффективности циклона позволяет увеличить точность расчета, таким образом, возможно практическое увеличение эффективности очистки воздуха от пылевидных частиц.

Основные научные и практические результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1. Выполненный обзор литературы показал актуальность гидравлических исследований в области очистки воздуха, а также необходимость создания методики расчета эффективности пылеулавливающих аппаратов.
2. Для обоснования технических разработок по совершенствованию циклонов предложена модель движения частицы пыли в закрученном турбулентном течении, дающей возможность расчета радиального инерционного смещения частицы.
3. Предложена методика оценки фракционной эффективности пылеулавливания для различных моделей пылеулавливающих аппаратов циклонного типа.
4. Выполнено экспериментальное определение эффективности пылеулавливания прямооточного циклона. Проведенный анализ показывает, что

допущения, принятые при рассмотрении движения частиц во вращающемся потоке обеспечивает качественное совпадение полученных теоретических и экспериментальных результатов.

5. Произведен расчет технических параметров циклона для пылей различного размера на основании рекомендаций по совершенствованию установки прямоточного циклона (угол закрутки потока, длина циклона). Технические решения внедрены в производство предприятием ЗАО «СОВПЛИМ».

6. Дальнейшим направлением исследований является более точный учет турбулентности при движении газового потока, усовершенствование конструкции испытываемой модели прямоточного циклона с целью уменьшения гидравлического сопротивления.

Список использованных источников.

1. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. – М.: Металлургия, 1988.-255 с.
2. Буров А.И. Гидравлика стратифицированных криволинейных течений в аппаратах с обратными связями: дис. На соиск. Ст. д.т.н. – Одесса, 1991.
3. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Тарат Э.Я. Технология пылеулавливания. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 192 с.
4. Гигиенические требования к микроклиматц производственных помещений. Санитарные правила и нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России. – 1997. – 20с.
5. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). – СПб.: СПбГПУ, 2002. – 544 с.
6. Гиргидов А.Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью. – СПб.: СПбГТУ, 1996. – 260 с.
7. ГОСТ 4.125-84. Оборудование газоочистительное и пылеулавливающее. Номенклатура основных показателей.
8. ГОСТ 12.2.043-80. Оборудование пылеулавливающее. Классификация.
9. ГОСТ 25199-82. Оборудование пылеулавливающее. Термины и определения
10. ГОСТ 12.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
- 11.ГОСТ Р 51708-2001. Пылеуловители центробежные. Требования безопасности и методы испытаний.
- 12.ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического и микроагрегатного состава.
- 13.ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик.
- 14.ГОСТ 25757-83 Пылеуловители инерционные сухие. Типы и основные параметры
- 15.Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: «Машиностроение», 1975. – 559 с.
- 16.Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. – СПб.: Химия, 1993. – 320 с.

- 17.Кривошеев Р.В. Теоретические основы подготовки пробы для масс-спектрометрических систем газового анализа Режим доступа: [http://explorer.newmail.ru/arhiv/06_2000/krivosheev2_0600.html]
- 18.Общие сведения по фильтрам. Режим доступа: [www.sovplym.com]
- 19.Оспищев С.Н., Стрелец К.И. Очистка воздуха в системах общеобменной вентиляции: Материалы 3-й международной научно-практической конференции "Экономика, экология и общество России в 21-м столетии". - СПб.: СПбГТУ, 2001.- с. 1018-1020.
- 20.Патент РФ 2080939 от 26.01.1995 Инерционный фильтр-сепаратор. Тананаев А.В.
- 21.Производство газоочистительного и пылеулавливающего оборудования и аппаратуры. Режим доступа: [<http://www.promsnab.net>]
- 22.Пчелинцев В.А., Коптев Д.В., Орлов Г.Г. Охрана труда в строительстве: Учеб. Для строит. вузов и фак. – М.: Высш. Шк., 1991. – 272 с.
- 23.Сабуров Э.Н., Карпов С.В., Осташев С.И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах. – Л.: Ленинградский Университет, 1989. – 274 с.
- 24.Стрелец К.И., Ковалев А.А., Ватин Н.И. Очистка газовых потоков от твердых примесей при помощи инерционного фильтра сепаратора ХХХ Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.1: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. 99 с.
- 25.Стрелец К.И., Милюкова А.А., Ватин Н.И. Очистка промышленных газов: ХХХ Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.1: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. 99 с.
- 26.Стрелец К.И. Очистка промышленных газов: Материалы политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности северо-западного региона». - СПб.: СПбГТУ, 2001.- С.36.
- 27.Стрелец К.И., Тананаев А.В., Эффективность инерционных фильтров сепараторов: Материалы международной научно-технической конференции «Технология, строительство и эксплуатация инженерных систем». - СПб.: СПбОДЗПП, 2002. - С.33-34.
- 28.Строительные нормы и правила. Отопление, вентиляция и кондиционирование. СНиП 2.04.05-91 – М.:1992 – 65 с.
- 29.Тананаев А.В. Течения в каналах МГД-устройств. – М.: Атомиздат, 1979. – 368 с.

30. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешнико Н.С.в. Техника защиты окружающей среды: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1989. – 512с.
31. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 390 с.
32. Федоров Б.С., Чекалов. Л.В. и др. Экотехника. Экологический консорциум "РОСГАЗООЧИСТКА". Режим доступа: [<http://kondore.newmail.ru/Kniga> 20.05.2002].
33. Шияев М. И., Шияев А. М., Афонин П. В., Стрельникова Н. А. Исследование процесса пылеулавливания и гидравлического сопротивления в каскаде прямоточных циклонов // Изв.вузов. Сер. Строительство. Сан. Техника. – 1999.- №8.
34. Штокман Е.А. Очистка воздуха. – М.: издательство АСВ, 1998. – 320 с.

Приложение 1

Размеры частиц типовых загрязнений.

Тип загрязнения	Диапазон размеров частиц, (микрон)
Сварочные дымы	5-0.01
Паячные дымы	2-0.01
Табачный дым	1-0.01
Дым от резины	0.5-0.01
Масляный дым	1-0.01
Вирусы	0.1-0.01
Нагар	1-0.01
Масляный туман	100-1
Пыльца	100-10