

Министерство образования Российской Федерации  
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**А.Г.Ветошкин**

***ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПЫЛЕОЧИСТКИ***

Учебное пособие

Пенза 2005

УДК 628.5  
ББК 20.1

Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. - с.: ил., библиогр.

Рассмотрены основы процессов и аппаратов технологии защиты атмосферы от аэрозольных пылевых выбросов с использованием различных методов и способов: гравитационные, центробежные, мокрые, электрические. Приведены методики расчета и проектирования аппаратов пылеочистки, включая пылеосадительные камеры, циклоны, вихревые аппараты, фильтры, мокрые скрубберы, электрофильтры. Приведены сведения по совершенствованию систем пылеочистки.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Экология и безопасность жизнедеятельности» Пензенского государственного университета. Оно предназначено для студентов специальности 280202 «Инженерная защита окружающей среды» и может быть использовано в качестве основной учебной литературы по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды», при курсовом и дипломном проектировании по специальности 280202 и в качестве дополнительной учебной литературы при изучении дисциплины «Экология» студентами других инженерных специальностей.

Рецензенты:

Кафедра «Инженерная экология» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства.

Кандидат технических наук, профессор, академик МАНЭБ В.В.Арбузов (Пензенский филиал Международного независимого эколого-политологического университета).

Издательство Пензенского государственного университета  
А.Г.Ветошкин

## Содержание

### Введение

1. Характеристики аэрозольных выбросов в атмосферу.
  2. Классификация методов и аппаратов для очистки аэрозолей.
  3. Основные характеристики аппаратов для очистки аэрозолей.
  4. Механическое пылеулавливание.
    - 4.1. Пылеосадительные камеры.
    - 4.2. Циклонные осадители.
      - 4.2.1. Конструкции циклонов.
      - 4.2.2. Расчет циклонов.
    - 4.3. Вихревые пылеуловители.
  5. Фильтрация аэрозолей.
    - 5.1. Волокнистые фильтры.
    - 5.2. Тканевые фильтры.
      - 5.2.1. Фильтровальные ткани.
      - 5.2.2. Рукавные фильтры.
    - 5.3. Зернистые фильтры.
    - 5.4. Расчет и выбор газовых фильтров.
  6. Мокрое пылеулавливание.
    - 6.1. Полые газопромыватели.
    - 6.2. Орошаемые циклоны с водяной пленкой.
    - 6.3. Пенные пылеуловители.
    - 6.4. Ударно-инерционные пылеуловители.
    - 6.5. Скоростные пылеуловители (скрубберы Вентури).
  7. Электрическая очистка газов.
    - 7.1. Принцип действия электрофильтров.
    - 7.2. Конструкции электрофильтров.
    - 7.3. Подбор и расчет электрофильтров.
  8. Совершенствование процессов и аппаратов для пылегазоочистки.
    - 8.1. Специализация аппаратов.
    - 8.2. Предварительная обработка аэрозолей.
    - 8.3. Режимная интенсификация.
    - 8.4. Конструктивно-технологическое совершенствование.
    - 8.5. Многоступенчатая очистка.
- Литература.
- Приложение. Краткие характеристики пылеуловителей.

## Введение

Промышленное производство и другие виды хозяйственной деятельности людей сопровождаются выделением в воздух помещений и в атмосферный воздух различных веществ, загрязняющих воздушную среду. В воздух поступают аэрозольные частицы (пыль, дым, туман), газы, пары, а также микроорганизмы и радиоактивные вещества.

На современном этапе для большинства промышленных предприятий очистка вентиляционных выбросов от вредных веществ является одним из основных мероприятий по защите воздушного бассейна. Благодаря очистке выбросов перед их поступлением в атмосферу предотвращается загрязнение атмосферного воздуха.

Очистка воздуха имеет важнейшее санитарно-гигиеническое, экологическое и экономическое значение.

Этап пылеочистки занимает промежуточное место в комплексе «охрана труда — охрана окружающей среды». В принципе пылеулавливание при правильной организации решает проблему обеспечения нормативов предельно-допустимых концентраций (ПДК) в воздухе рабочей зоны. Однако все вредности через систему пылеулавливания при отсутствии системы пылеочистки выбрасываются в атмосферу, загрязняя ее. Поэтому этап пылеочистки следует считать неотъемлемой частью системы борьбы с пылью промышленного предприятия.

Цель настоящего учебного пособия - систематизировать сведения по процессам и аппаратам очистки воздуха от аэрозольных примесей, методические подходы к расчету сепарационного оборудования. Приводятся необходимые сведения по устройству, работе и расчету типового пылеулавливающего оборудования. Изложение материала сопровождается примерами расчета, которые облегчают усвоение теоретических вопросов.

### 1. Характеристики аэрозольных выбросов в атмосферу.

Под атмосферным загрязнением понимают присутствие в воздухе газов, паров, частиц, твердых и жидких веществ, тепла, колебаний, излучений, которые неблагоприятно влияют на растения, животных, человека, климат, материалы, здания и сооружения.

Загрязнение атмосферы может происходить как вследствие преобразования ее компонентов, так и переноса загрязняющих веществ из других частей биосферы. Эти процессы могут иметь природный или антропогенный характер.

Вещества, попадающие в атмосферу непосредственно из-за человеческой деятельности, обычно относят к антропогенным выбросам и загрязнителям.

Выбросы в атмосферу различают по виду, составу, количеству, агрегатному состоянию, характеру появления и пребывания в атмосфере, влиянию на биосферу и множеству других признаков. Классификации антропогенных выбросов, пригодной для изучения их свойств с целью подбора способов очистки, пока нет. В стандартной классификации загрязнители разделены на 4 класса по агрегатному состоянию: газо- и парообразные, жидкие, твердые и смешанные. По химическому составу они делятся на группы, а в зависимости от размера частиц — на подгруппы. Например, твердые выбросы подразделяются на 4 подгруппы с размерами частиц, мкм: менее 1; 1...10; 10...50 и более 50.

В атмосферу Земли ежегодно поступает 150 млн. тонн различных аэрозолей, около 1 куб. км пылевидных частиц искусственного происхождения. Еще большее разнообразие свойственно органической пыли, включающей алифатические и ароматические углеводороды, соли кислот. Она образуется при сжигании остаточных нефтепродуктов, в процессе пиролиза на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и других подобных предприятиях.

В основном существуют два основных источника загрязнения атмосферы:

- стационарные источники (промышленные предприятия, топливно-энергетический комплекс, сельское хозяйство, горнодобывающая промышленность);
- передвижные источники (транспорт).

Основными источниками искусственных аэрозольных загрязнений воздуха являются ТЭС, которые потребляют уголь высокой зольности, обогатительные фабрики, металлургические, цементные, магнезитовые и сажевые заводы. Аэрозольные частицы от этих источников отличаются большим разнообразием химического состава. Чаще всего в их составе обнаруживаются соединения кремния, кальция и углерода, реже - оксиды металлов: железа, магния, марганца, цинка, меди, никеля, свинца, сурьмы, висмута, селена, мышьяка, бериллия, кадмия, хрома, кобальта, молибдена. Источником пыли и ядовитых газов служат массовые взрывные работы. Так, в результате одного среднего по массе взрыва (250...300 тонн взрывчатых веществ) в атмосферу выбрасывается около 2 тыс.куб.м. условного оксида углерода и более 150 т. пыли. Производство цемента и других строительных материалов также является источником загрязнения атмосферы пылью. Основные технологические процессы этих производств - измельчение и химическая обработка шихт, полуфабрикатов и получаемых продуктов в потоках горячих газов всегда сопровождается выбросами пыли и других вредных веществ в атмосферу.

Твердые компоненты аэрозолей в ряде случаев особенно опасны для организмов, а у людей вызывают специфические заболевания.

Загрязнение воздуха вызывает значительные экономические потери. Запыленность и загазованность воздуха в производственных помещениях приводит к снижению производительности труда, потере рабочего времени из-за увеличения заболеваемости. Во многих производствах наличие пыли в воздушной среде ухудшает качество продукции, ускоряет износ оборудования. В процессе производства, добычи, транспортирования многих видов материалов, сырья, готовой продукции часть этих веществ переходит в пылевидное состояние и теряется (уголь, руда, цемент и др.), загрязняя в то же время окружающую среду. Потери на ряде производств составляют до 3...5 %. Велики также потери из-за загрязнения окружающей среды. Мероприятия по уменьшению последствий загрязнения обходятся дорого.

На предприятиях имеют место организованные (через трубы, вентиляционные шахты и т. п.) и неорганизованные выбросы (через фонари и проемы в цехах, от мест погрузки и разгрузки транспорта, из-за утечек в коммуникациях и др.). Неорганизованные выбросы по мнению специалистов составляют от 10 до 26 % от общего количества выбросов в атмосферу.

Поступление в воздушную среду производственных помещений и выброс в атмосферу аэрозолей и других вредных веществ - результат несовершенства технологического и транспортного оборудования, в первую очередь, его негерметичности, а также отсутствия или недостаточной эффективности пылеулавливающих и локализирующих устройств и систем.

Аэрозоль представляет собой дисперсную систему, в которой дисперсной средой является газ, в частности, воздух, а дисперсной фазой — твердые или жидкие частицы. Наиболее мелкие (тонкие) аэрозольные частицы по размерам близки к крупным молекулам, а для наиболее крупных наибольший размер определяется их способностью более или менее длительное время находиться во взвешенном состоянии.

В атмосфере аэрозольные загрязнения воспринимаются в вид дыма, тумана, мглы или дымки. Значительная часть аэрозолей образуется в атмосфере при взаимодействии твердых и жидких частиц между собой или с водяным паром. Средний размер аэрозольных частиц составляет 1...5 мкм.

К аэрозолям относятся пыли, туманы и дымы.

*Пылями* называют дисперсионные аэрозоли с твердыми частицами, независимо от дисперсности. Пылью обычно также называют совокупность осевших частиц (гель или аэрогель).

Под *туманами* понимают газообразную среду с жидкими частицами как конденсационными, так и дисперсионными, независимо от их дисперсности.

*Дымами* называют конденсационные аэрозоли с твердой дисперсной фазой или включающие частицы и твердые, и жидкие.

В процессах пылеулавливания весьма важны физико-химические характеристики пылей и туманов, а именно: дисперсный (фракционный) состав, плотность, адгезионные свойства, смачиваемость, электрическая заряженность частиц, удельное сопротивление слоев частиц и др. Для правильного выбора пылеулавливающего аппарата необходимы прежде всего сведения о дисперсном составе пылей и туманов.

Аэрозоли обычно полидисперсны, т. е. содержат частицы различных размеров.

*Дисперсность* - степень измельчения вещества. Под дисперсным (зерновым, гранулометрическим) составом понимают распределение частиц аэрозолей по размерам. Он показывает, из частиц какого размера состоит данный аэрозоль, и массу или количество частиц соответствующего размера.

Дисперсность в значительной мере определяет свойства аэрозолей. В результате измельчения изменяются некоторые свойства вещества и приобретаются новые. Это вызвано, в основном, тем, что при диспергировании вещества многократно увеличивается его суммарная поверхность.

Дисперсный состав пыли имеет первостепенное значение для разработки и совершенствования пылеулавливающих аппаратов и систем, а также для осуществления мероприятий по предотвращению выделения пыли и ее распространению.

Интервал дисперсности аэрозольных частиц весьма велик: от  $10^{-7}$  до 1 см. Нижний предел определяется возможностью длительного самостоятельного существования весьма малых частиц; верхний предел ограничен тем, что крупные частицы весьма быстро осаждаются под действием сил тяжести и во взвешенном состоянии практически не наблюдаются.

Весь диапазон размеров частиц разбивают на фракции. Под фракцией понимают массовые (счетные) доли частиц, содержащихся в определенном интервале размеров частиц. Например, применяют следующую шкалу размеров пылевых частиц: 1 — 1,3 — 1,6 — 2,0 — 2,5 — 3,2 — 4,0 — 5,0 — 6,3 — 8,0 — 13 — 16 — 20 — 25 — 32 — 40 — 50 — 63 мкм.

Дисперсный состав пыли представляют в виде таблицы или графика.

В таблице дается распределение пыли по фракциям в процентах от общей массы. Пример приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1

## Дисперсный состав пыли

Размер частиц на границах фракций, мкм	<1,5	1,5-2,5	2,5-5	5-7,5	7,5-10	10-15	15-25	25-35	35-50	>50
Фракции, % от общей массы частиц	2,19	3,73	7,89	13,16	15,45	21,13	18,63	6,06	5,1	6,66

Результаты определения дисперсного состава могут быть представлены в виде таблицы, в которой приведены проценты массы или числа частиц, с размерами меньше или больше заданного. Пример - таблица 1.2.

Таблица 1.2

## Фракции пыли с частицами меньше или больше заданного размера

Размер частиц $d$ , мкм	1,5	2,5	4	7	10	15	25	50
Масса частиц больше $d$ , %	97,81	94,08	86,19	70,74	49,61	30,98	17,82	6,66
Масса частиц меньше $d$ , %	2,19	5,92	13,81	29,26	50,39	69,02	82,18	93,34

Совокупность всех фракций аэрозоля называют фракционным составом его дисперсной фазы, которую можно представлять графически. Откладывая по оси абсцисс значения интервалов, составляющих фракции, а по оси ординат - доли или процентные содержания частиц соответствующих фракций, получают гистограммы - ступенчатые графики фракционного состава. С уменьшением интервалов фракций гистограммы приближаются к плавным кривым. Иногда такие кривые бывают близки по форме к кривой нормального распределения случайных величин, которая описывается двумя параметрами - средним диаметром частиц  $d_m$  и стандартным отклонением  $\sigma$  от него:

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^N M_i d_i}{\sum_{i=1}^N M_i}; \quad \sigma = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N M_i (d_m - d_i)^2}{\sum_{i=1}^N M_i} \right]^{1/2}, \quad (1.1)$$

где  $M_i$  - число частиц в  $i$ -той фракции.

Результаты определения дисперсного состава пыли обычно представляют в виде зависимости массовых (иногда счетных) фракций частиц от их размера. Распределения частиц примесей по размерам могут быть различными, однако на практике они часто согласуются с логарифмическим нормальным законом распределения Гаусса (ЛНР). В интегральной форме это распределение описывают формулой

$$M(d_q) = \frac{100}{\lg \sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lg d_q} \exp\left[-\frac{\lg^2(d_q / d_{50})}{2 \lg^2 \sigma} d(\lg d_q)\right], \quad (1.2)$$

где  $M(d_q)$  — относительная доля частиц размером менее  $d_q$ ;  $d_{50}$  — медианный размер частиц, при котором доли частиц размером более и менее  $d_{50}$  равны;  $\lg \sigma$  — среднеквадратичное отклонение в функции ЛНР.

Графики ЛНР частиц обычно строят в вероятностно-логарифмической системе координат, текущий размер частиц откладывают на оси абсцисс, а на оси ординат — относительную долю частиц с размерами меньше  $d_q$ . Шкалу оси абсцисс строят по логарифму диаметра частиц, а оси ординат — вычислением каждого из значений шкалы по уравнению

$$100 - M(d_q) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy, \quad (1.3)$$

где  $y = \lg \frac{d_q / d_{50}}{\lg \sigma}$ .

Цифровые значения этой функции затабулированы и приводятся в сокращенном виде (табл. 1.3).

Таблица 1.3.

$M(d_q)$	$y$	$M(d_q)$	$y$
1	-2,326	50	0,0
10	-1,645	55	0,126
15	-1,282	60	0,253
15,9	-1,036	65	0,384
20	-1,00	70	0,524
25	-0,842	75	0,675
30	-0,675	80	0,842
35	-0,524	84,1	1,00
40	-0,384	85	1,036
45	-0,253	90	1,282
	-0,126	95	1,645
		100	2,326

Если в этой системе координат интегральное распределение частиц по размерам описывается прямой линией, то данное распределение подчиняется ЛНР. В этом случае  $d_m = d_{50}$  находят как абсциссу точки графика, ордината которой равна 50%, а  $\lg \sigma$  — из уравнения  $\lg \sigma = \lg d_{84.1} - \lg d_{50}$ . Для характеристики пылей и сравнения их между собой достаточно иметь два параметра:  $d_{50}$  и  $\lg \sigma$ . Значение  $d_{50}$  дает средний размер частиц, а  $\lg \sigma$  — степень полидисперсности пыли. В табл. 1.4 приведены значения  $d_{50}$  и  $\lg \sigma$  для некоторых пылей.

Таблица 1.4

Технологический процесс	Вид пыли	$d_{50}$ , мкм	$\lg \sigma$
Заточка инструмента	Металл, абразив	38	0,214
Размол в шаровой мельнице	Цемент	20	0,468
Сушка угля в барабане	Каменный уголь	15	0,334
Экспериментальные исследования	Кварцевая пыль	3,7	0,405

По дисперсности пыли классифицированы на 5 групп: I — очень крупнодисперсная пыль,  $d_{50} > 140$  мкм; II — крупнодисперсная пыль,  $d_{50} = 40 \dots 140$  мкм; III — среднедисперсная пыль,  $d_{50} = 10 \dots 40$  мкм; IV — мелкодисперсная пыль,  $d_{50} = 1 \dots 10$  мкм; V — очень мелкодисперсная пыль,  $d_{50} < 1$  мкм.

Важный параметр пыли — ее плотность. От плотности частиц пыли зависит эффективность ее осаждения в гравитационных и центробежных пылеуловителях.

Склонность частиц пыли к слипаемости определяется ее адгезионными свойствами. Чем выше слипаемость пыли, тем больше вероятность забивания отдельных элементов пылеуловителя и налипания пыли на газоходах. Чем мельче пыль, тем выше ее слипаемость. Слипаяемость пыли значительно возрастает при ее увлажнении.

Смачиваемость частиц жидкостью (водой) влияет на работу мокрых пылеуловителей, а электрическая заряженность частиц — на их поведение в пылеуловителях и газоходах.

## 2. Классификация методов и аппаратов для очистки аэрозолей

Под обезвреживанием воздушно-газовых выбросов понимают отделение от газа аэрозольных примесей или превращение в безвредное состояние загрязняющих примесей.

Процесс обеспыливания воздуха в общем виде включает следующие основные этапы:

- предотвращение распространения «исходной» аэродисперсной системы в воздухе рабочей зоны и увеличения устойчивости этой системы в направлении строго ограниченной заранее выделенной области (процесс пылеулавливания);

- разрушение пылевого аэрозоля, заключающегося в выделении пыли из воздуха (процесс пылеочистки);

- дальнейшее снижение устойчивости пылевого аэрозоля, сохранившегося после реализации предыдущих этапов, заключающееся в интенсификации распространения оставшихся в воздухе пылевых частиц и аэрации дисперсной среды в приземном слое атмосферы (процесс рассеивания пыли).

На каждом этапе предусматривается введение искусственных аэродисперсных систем или организация направленных внешних силовых полей. Процесс обеспыливания включает три элемента: пылеулавливание (ПУ), пылеочистку (ПО) и рассеивание пыли (РП). Каждый элемент системы можно реализовать различными методами (аэродинамическим, гидродинамическим, электромагнитным, теплофизическим, механическим и др.), которые определяются характером направленных внешних воздействий на пылевой аэрозоль. Любой метод может быть осуществлен различными способами (орошением, пеной, паром, туманом и др.), а способ — техническими средствами.

Основным элементом систем пылеочистки является аппарат очистки воздуха от пыли.

Среди исходных данных для выбора способов, технических средств и параметров пылеулавливания наиболее важным являются технологические и пылеаэродинамические.

Наиболее полная классификация аппаратов основывается на использовании следующих способов обеспыливания:

— физические способы включают: механический (аэродинамический, гидродинамический, фильтрационный), электрический, магнитный, акустический, оптический, ионизирующий, термический;

— химический;

— физико-химический;

— биохимический;

— физико-биохимический.

Каждый из указанных способов имеет определенную область применения и широту использования. В своей основе они базируются на одном (или нескольких) из следующих процессов обеспыливания: осаждения, коагуляции, удаления, обеззараживания, сжигания и улавливания.

Для обезвреживания аэрозолей (пылей и туманов) используют сухие, мокрые и электрические методы. В основе сухих методов лежат гравита-

ционные, инерционные, центробежные механизмы осаждения или фильтрационные механизмы. При использовании мокрых методов очистка газовых выбросов осуществляется путем тесного взаимодействия между жидкостью и запыленным газом на поверхности газовых пузырей, капель или жидкой пленки. Электрическая очистка газов основана на ионизации молекул газа электрическим разрядом и электризации взвешенных в газе частиц.

При обработке выбросов, содержащих твердые аэрозольные загрязнители, низких величин проскока (1...2% и менее) можно достичь, как правило, только двухступенчатой очисткой. Для предварительной очистки могут быть применены жалюзийные решетки и циклонные аппараты (иногда для больших выбросов - пылеосадительные камеры), а для окончательной - пористые фильтры, электрофильтры или мокрые пылеосадители.

Жидкие аэрозоли (туманы) могут быть скоагулированы посредством изменения параметров состояния (охлаждения и повышения давления) с целью осаждения в последующем с использованием как правило мокрых способов улавливания в мокрых скрубберах, пористых и электрических фильтрах, в абсорберах.

Мокрые способы очистки твердых и жидких аэрозолей имеют существенный недостаток - необходимость отделения уловленного загрязнителя от улавливающей жидкости. По этой причине мокрые способы следует применять только при отсутствии других методов очистки, отдавая предпочтение способам с минимальным расходом жидкости.

В основу действия аппаратов для очистки аэрозольных выбросов положен определенный физический механизм. В улавливающих устройствах находят применение следующие способы отделения взвешенных частиц от взвешивающей среды, т. е. воздуха (газа): осаждение в гравитационном поле, осаждение под действием сил инерции, осаждение в центробежном поле, фильтрование, осаждение в электрическом поле, мокрая очистка и др.

По основному механизму отделения частиц аэрозолей и носит название пылеулавливающий аппарат.

В устройстве для очистки аэрозольных выбросов, наряду с основным механизмом улавливания, обычно используются и другие закономерности. Благодаря этому общая и фракционная эффективность аппарата достигает более высокого уровня.

*Гравитационное осаждение.* Частицы аэрозолей осаждаются из потока загрязненного воздуха под действием силы тяжести. Для этого необходимо создать соответствующий режим движения загрязненного воздуха в аппарате с учетом размера частиц, их плотности и т. д.

*Инерционное осаждение.* Инерционное осаждение основано на том, что частицы аэрозолей и взвешивающая среда ввиду значительной разности плотностей обладают различной инерцией. Аэрозольные частицы, двигаясь по инерции, отделяются от газовой среды.

*Осаждение под действием центробежной силы.* Происходит при криволинейном движении загрязненного воздушно-газового потока. Под действием возникающих центробежных сил аэрозольные частицы отбрасываются на периферию аппарата и осаждаются.

*Эффект зацепления.* Частицы аэрозолей, взвешенные в воздушной (газовой) среде, задерживаются в узких извилистых каналах и порах при прохождении воздушно-газового потока через фильтровальные материалы.

*Мокрая очистка.* Смачивание поверхности элементов аппаратов водой или другой жидкостью способствует задержанию аэрозольных частиц на данной поверхности.

*Осаждение в электрическом поле.* Проходя электрическое поле, частицы аэрозолей получают заряд. Двигаясь к электродам противоположного знака, они осаждаются на них.

В практике улавливания аэрозольных частиц находят применение и другие методы: укрупнение частиц в акустическом поле, термофорез, фотофорез, воздействие магнитного поля, биологическая очистка.

Пылеулавливающее оборудование при всем его многообразии может быть классифицировано по ряду признаков: по назначению, по основному способу действия, по эффективности, по конструктивным особенностям.

В соответствии с ГОСТ 12.2.043-89 «Оборудование пылеулавливающее. Классификация.» аппараты очистки в зависимости от размеров улавливаемых частиц и эффективности их улавливания разделены на пять классов (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Классификация пылеуловителей

Класс аппарата	Размеры эффективно улавливаемых частиц, мкм	Эффективность по массе пыли, при группе дисперсности пыли				
		I	II	III	IV	V
I	более 0,3-0,5	-	-	-	99,9-80	<80
II	Более 2	-	-	99,9-92	92-45	-

III	Более 4	-	99,9-99	99-80	-	-
IV	Более 8	>99,9	99-95		-	-
V	Более 20	>99	-		-	-

Примечание. Пределы эффективности соответствуют границам зон классификации групп пылей.

Часто в зависимости от коэффициента очистки аппараты делят на две группы: грубой очистки и тонкого обеспыливания. Однако понятие грубой очистки и тонкого обеспыливания являются относительными в зависимости от вида производства и задач обеспыливания.

По ГОСТ 12.2.043—89 все оборудование для санитарной очистки газов и воздуха от взвешенных дисперсных частиц подразделяется на две категории: аппараты сухой очистки и аппараты мокрой очистки.

В свою очередь аппараты, использующие сухие методы очистки, по сущности происходящих в них физических явлений подразделяются на гравитационные, инерционные, фильтрационные и электрические.

Пылеулавливающее оборудование в зависимости от способа отделения пыли от воздушного потока применяют следующих исполнений: оборудование для улавливания пыли сухим способом, при котором отделенные от воздуха частицы пыли осаждаются на сухую поверхность; оборудование для улавливания пыли мокрым способом, при котором отделение частиц от воздушного потока осуществляется с использованием жидкостей.

Пылеулавливающее оборудование по принципу действия подразделяется на группы, по конструктивным особенностям на виды и действует по сухому (табл. 2.2.) и мокрому (табл. 2.3.) способу.

Таблица 2.2.

Группы и виды пылеулавливающего оборудования для улавливания пыли сухим способом

Группа оборудования	Вид оборудования	Область применения	
		воздушных фильтров	пылеуловителей
Гравитационное	Полое	-	+
	Полочное	-	+
Инерционное	Камерное	-	+

	Жалюзийное	-	+
	Циклонное	-	+
	Ротационное	-	+
Фильтрационное	Тканевое	-	+
	Волокнистое	+	—
	Зернистое	-	+
	Сетчатое	+	—
	Губчатое	+	—
Электрическое	Однозонное	-	+
	Двухзонное	+	+

Таблица 2.3.

Группы и виды пылеулавливающего оборудования для улавливания пыли мокрым способом

Группа оборудования	Вид оборудования	Область применения	
		воздушных фильтров	пылеуловителей
Инерционное	Циклонное	-	+
	Ротационное	-	+
	Скрубберное	-	+
	Ударное	-	+
Фильтрационное	Сетчатое	+	-
	Пенное	-	+
Электрическое	Однозонное	-	+
	Двухзонное	+	+
Биологическое	Биофильтр	-	+

Примечание. Знак «+» означает применение; знак «-» означает неприменение.

Аппараты мокрой очистки подразделяются на инерционные, фильтрационные и электрические.

Наиболее распространенным оборудованием для улавливания дисперсных частиц из воздушно-газовых потоков являются: сухие гравитационные и инерционные вихревые осадители, фильтры различных конструкций, мокрые пылеуловители, электрофильтры.

В целом система очистки воздуха и газов может содержать оборудование нескольких типов, соединенное в последовательную цепочку по мере повышения эффективности пылеулавливания. Пылеулавливающее оборудование, в котором отделение пыли от воздушного потока осуществля-

ется последовательно в несколько ступеней, отличающихся по принципу действия, конструктивным особенностям и способу очистки, относят к комбинированному пылеулавливающему оборудованию.

В настоящее время используются различные методы и аппараты для улавливания аэрозольных примесей из воздуха. На практике для этого чаще всего применяют аппараты гравитационные, инерционные сухие и мокрые, фильтрующие в пористом слое и в электрическом поле. К основным представителям инерционных сухих пылеуловителей относят жалюзийные устройства, циклоны одиночные и групповые, мультициклоны, а мокрых - промыватели полые и насадочные, пенные, ударно-инерционного действия (струйные, импакторные, ротоклоны), скрубберы Вентури. Пористые фильтры различают по фильтрующему материалу (фильтры из волокнистых - тканых и нетканых, сыпучих материалов, уплотненных металлических и металло-керамических порошков, металлических и полимерных сеток), а затем - по конструкциям, типоразмерам и частным признакам. У электрофильтров основным разделительным признаком считается горизонтальное или вертикальное направление движения обрабатываемого потока.

Выбор оборудования при формировании системы пылеулавливания зависит от конкретных требований производства и физико-механических и физико-химических свойств дисперсных частиц.

В основе оригинальной концепции классификации сепараторов взвешенных частиц, которая была предложена А.И. Пирумовым, лежит принцип разделения пылеуловителей на классы по размерам эффективно улавливаемых частиц (табл. 2.4). Такая классификация оказывает существенную помощь при выборе средств пылеулавливания.

Таблица 2.4.

Классификация пылеуловителей по размерам эффективно улавливаемых частиц

Класс сепаратора	I		II		III		IV		V
Минимальный размер эффективно улавливаемых частиц, мкм	0,3		2		4		8		20
Группа пыли по дисперсности	V	IV	IV	III	III	II	II	I	I
Медианный диаметр час-	менее	1...10	1...10	10...40	10...40	40... 120	40.. 120	бо- лее	бо- лее

тиц, мкм*	1							120	120
Максимальная степень очистки, %	80	80...99	45...92	92...99	80...99	99...99,9	95...99,9	более 99,9	более 99

\*Примечание. Группа пыли и соответствующий ей размер частиц, которые могут быть уловлены с максимальной степенью очистки в данном классе сепаратора.

В табл. 2.5 приведены характеристики различных пылеуловителей. Эти сведения значительно облегчают выбор подходящего оборудования для систем очистки воздушно-газовых выбросов от взвешенных частиц.

Таблица 2.5

Структурные характеристики различных систем пылеулавливания

Показатели	Пылеуловители					Фильтры	
	гравитационные	центробежные		мокрые		тканевые	электрические
		низконапорные	средненапорные	низконапорные	высоконапорные		
1	2	3	4	5	6	7	8
Гидравлическое сопротивление	до 100	100-300	750-1250	750-1500	5000-12500	750-1500	100-400
Характерный параметр	$m_1$	$\omega$			$Stk$	При $d_T < 0,3$ мм $D$ ; при $d_T > 0,3$ мм $Stk$	$K_E$
Зависимость эффективности улавливания от размера частиц		$f(d_T^2 C_k)$				При $d_T < 0,3$ мм $f(c_k/d_T)$ ; при $d_T > 0,3$ мм $f(d_T^2/c_k)$	$f(d_T C_k)$
от темпера-	прак	$f(C_k/\mu_2)$		практически		При	

туры	ти- чес- ки не явля- ется		не является	$d_T < 0,3\text{мм}$ $f(c_k T_2 / \mu_2)$ ; при $d_T > 0,3\text{мм}$ $f(c_k / \mu_2)$	$f(c_k / \mu_2)$		
от концен- трации	не явля- ется	Определя- ется диа- метром ап- парата и свойствами пыли	Определяется системой во- доснабжения и возможны- ми затратами энергии	определя- ется типом фильтра (обычно не более 20 г/м <sup>3</sup> )	предель- ная $c = \frac{n_i e \rho_T d_T}{12 \epsilon_0 E}$		
от влажно- сти	не является		Способству- ет росту эф- фективности	не является	Способст- вует росту эффектив- ности		
Ориентиро- вочный ми- нимальный размер час- тиц, улав- ливаемых с высокой эффектив- ностью, мкм	50- 40	40- 30	25-8	5-2	1-0,1	0,1	1,0-0,25
Макси- мально до- пустимая температу- ра газа, °С	Определяется материалом, из ко- торого изготовлен аппарат			Определя- ется мате- риалом фильтрую- щей пере- городки (<220-250)	Определя- ется соста- вом газа и свойства- ми пыли		
Нижняя предельная температу- ра газа	Выше точки росы		Любая	Выше точки росы			
Стойкость к коррозии	Достаточно стойки		При наличии в газах ки- слот, щело-	Стойки при температуре, превышающей точку росы.			

				чей требуется антикоррозионная защита		
Взрыво- и огнеопасность	Незначительная			Минимальная	Большая	
Ориентировочная стоимость очистки по отношению к низконапорным циклонам	-	1,0-1,5	2,0-3,0	2,5	3,0-7,5	5,0-15,0

Обозначения:  $m_t$ ,  $d_t$  - масса, диаметр частицы;  $\omega$  - центробежный фактор осаждения;  $Stk = d_t^2 \rho_t v_z / (18 \mu_z)$  - критерий Стокса;  $D$  - коэффициент диффузии;  $K_E$  - коэффициент напряженности;  $c$  - концентрация пыли;  $T_z$ ,  $\mu_z$ ,  $v_z$ ,  $\rho_z$  - абсолютная температура, динамическая вязкость, скорость, плотность газа;  $n_{и}$  - концентрация ионов в  $1 \text{ м}^3$ ;  $e$  - диэлектрическая постоянная;  $E$  - напряженность электрического поля.

Простые методы обработки выбросов современных производственных процессов также скорее всего не обеспечат надлежащей степени очистки, предотвращающей ощутимый ущерб окружающей среде. Так, например, простые пылеуловители - осадительные камеры, жалюзийные решетки, циклоны могут быть удачно применены в двухступенчатой схеме очистки для предварительной обработки выбросов. Однако следовало бы отказаться от использования мультициклонов в качестве единственного средства очистки дымовых газов парогенераторов электростанций. Объемы выбросы теплоэнергетических установок достигают  $400 \dots 500 \text{ м}^3/\text{с}$ , и поэтому проросок загрязнителя в  $1 \dots 2\%$  может представлять серьезную опасность окружающей среде, в то время как мультициклоны обеспечивают степень очистки не более, чем на  $85 \dots 90\%$ .

Все компоненты, подлежащие удалению, необходимо оценить по физико-химическим и санитарно-гигиеническим свойствам. По аэрозольным загрязнителям необходимы сведения о размерах частиц, абразивности, слипаемости, удельном электрическом сопротивлении, характере взаимодействия с жидкостями.

При обработке выбросов, содержащих твердые аэрозольные загрязнители, низких величин пророска ( $1 \dots 2\%$  и менее) можно достичь, как правило,

только двухступенчатой очисткой. Для предварительной очистки могут быть применены жалюзийные решетки и циклонные аппараты (иногда для небольших выбросов - пылеосадительные камеры), а для окончательной - пористые фильтры, электрофильтры или мокрые пылеосадители.

Жидкие аэрозоли (туманы) могут быть скоагулированы посредством изменения параметров состояния (охлаждения и повышения давления) с целью осаждения в последующем с использованием как правило мокрых способов улавливания в мокрых скрубберах, пористых и электрических фильтрах, в абсорберах.

Если твердые или жидкие аэрозоли по элементному составу не содержат других элементов, кроме углерода, водорода и кислорода (пыль растительного происхождения, шерстяные волокна, туманы минеральных масел и др.), то они могут быть обезврежены в одну стадию - непосредственным сжиганием в топках котлов и печей.

### **3. Основные характеристики аппаратов для очистки аэрозолей**

К основным характеристикам оборудования для очистки аэрозолей от взвешенных частиц относятся эффективность (степень) очистки воздуха от пыли, которую также иногда называют коэффициентом полезного действия аппарата, хотя это не отражает ее физический смысл; гидравлическое сопротивление; стоимость очистки. К общим параметрам пылеуловителей относят их производительность по очищаемому газу и энергоемкость, определяемую величиной затрат энергии на очистку  $1000 \text{ м}^3$  газа.

При оценке эффективности работы пылеуловителей принимают во внимание:

- общую эффективность обеспыливания, или количество пыли, задержанной в пылеуловителе, по отношению к количеству пыли, содержащейся в обеспыливаемом газе;
- фракционную эффективность, определяющую полноту улавливания частиц определенных размеров; ее выражают процентом отделенных в пылеуловителе частиц пыли определенных размеров;
- остаточное содержание пыли в газе при выходе его из пылеуловителя;
- распределение остатка пыли в газе по размеру частиц или скорости витания.

Кроме того, существенным фактором для оценки эффективности пылеуловителей является расход потребляемой энергии, а при подборе того или иного типа пылеуловителя — частота распределения дисперсности фракций.

Основным показателем, характеризующем работу аппаратов очистки воздуха от пыли в тех или иных конкретных случаях их применения, является коэффициент (степень) очистки (эффективность обеспыливания), %:

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{ул}}}{M_{\text{вх}}} \cdot 100 = \frac{M_{\text{вх}} - M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}}} \cdot 100 = \frac{M_{\text{ул}}}{M_{\text{ул}} + M_{\text{вых}}} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где  $M_{\text{вх}}$ ,  $M_{\text{ул}}$  и  $M_{\text{вых}}$  — масса частиц пыли, содержащихся в газах соответственно на входе в аппарат (т. е. до очистки), уловленных в аппарате и на выходе из аппарата после очистки.

При эксплуатации отдельных видов пылеулавливающих аппаратов (ПУА) возможен дисбаланс по газу. В этом случае расходы газа пересчитывают на стационарные условия ( $t = 20^\circ$ ,  $P = 101$  кПа или 760 мм рт. ст.), а коэффициент очистки определяется по формуле (%)

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{вх}} V_{\text{вх}} - C_{\text{вых}} V_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}} V_{\text{вх}}} \cdot 100, \quad (3.2)$$

где  $C_{\text{вх}}$  и  $C_{\text{вых}}$  — средние концентрации частиц в газах соответственно на входе в аппарат и на выходе из него (соответственно мг/м<sup>3</sup>);  $V_{\text{вх}}$  и  $V_{\text{вых}}$  — объемный расход газов, поступающих в аппарат и выходящих. Общий коэффициент очистки зависит от условий эксплуатации ПУА и недостаточно полно отражает уровень его совершенства при работе на пылях разной дисперсности. Степень совершенства ПУА характеризует достигаемые с его помощью фракционный и парциальный коэффициенты очистки.

Если объемные расходы газа до и после аппарата равны, то выражение примет распространенный вид (%)

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}}\right) \cdot 100. \quad (3.3)$$

Если не происходит подсоса воздуха в аппарате, эффективность очистки определяют по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}}} \cdot 100\%. \quad (3.4)$$

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

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{M_{\text{вых}} \cdot V_{\text{вх}}}{M_{\text{вх}} \cdot V_{\text{вых}}}\right) \cdot 100\%. \quad (3.5)$$

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

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{m_{\phi,y}}{M_{\phi,n}}, \quad (3.6)$$

где  $m_{\phi,y}$  - количество уловленной пыли фракции;  $M_{\phi,n}$  — количество поступившей в аппарат пыли фракции.

Фракционный коэффициент равен отношению количества пыли данной фракции, уловленной в аппарате  $M_{\phi,ул.}$ , к количеству входящей пыли той же фракции  $M_{\phi,вх}$  (%):

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{M_{\phi,ул.}}{M_{\phi,вх}} \cdot 100 = \frac{\varphi_{ул} \cdot M_{ул}}{\varphi_{вх} \cdot M_{вх}} \cdot 100 = \varepsilon \frac{\varphi_{ул}}{\varphi_{вх}}, \quad (3.7)$$

где  $\varphi$  - доля массы пыли данной фракции в общем количестве пыли в воздухе.

Общую эффективность аппарата  $\varepsilon$  определяют по фракционной эффективности следующим образом

$$\varepsilon = \frac{M_{\phi_1} \cdot \varepsilon_{\phi_1} + M_{\phi_2} \cdot \varepsilon_{\phi_2} + \dots + M_{\phi_n} \cdot \varepsilon_{\phi_n}}{M_{\phi_1} + M_{\phi_2} + \dots + M_{\phi_n}}, \quad (3.8)$$

где  $M_{\phi_1}, M_{\phi_2}, \dots, M_{\phi_n}$  - масса пыли соответствующих фракций, поступившей в аппарат;  $\varepsilon_{\phi_1}, \dots, \varepsilon_{\phi_n}$  - фракционная эффективность улавливания по данной фракции.

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

$$\frac{M_{\phi_1}}{M} = \delta_1; \frac{M_{\phi_2}}{M} = \delta_2; \dots \frac{M_{\phi_n}}{M} = \delta_n. \quad (3.9)$$

После преобразования получим значение общей эффективности очистки

$$\varepsilon = \delta_1 \cdot \varepsilon_{\phi_1} + \delta_2 \cdot \varepsilon_{\phi_2} + \dots + \delta_n \cdot \varepsilon_{\phi_n} \quad (3.10.)$$

или в процентах

$$\varepsilon = 100\% \sum_1^n \delta_i \cdot \varepsilon_{\phi_i}. \quad (3.11)$$

Парциальный коэффициент очистки используется реже и равен отношению количества частиц данного размера, уловленных в аппарате  $M_{п,ул.}$  к количеству частиц данного размера на входе в аппарат  $M_{п,вх}$  (%):

$$\varepsilon_n = \frac{M_{n,ул.}}{M_{n,вх}} \cdot 100 = \frac{\eta_{n,ул} \cdot M_{ул}}{\eta_{n,вх} \cdot M_{вх}} \cdot 100 = \varepsilon \frac{\eta_{n,ул}}{\eta_{n,вх}}, \quad (3.12)$$

где  $\eta_n$  — доля частиц данного размера.

Обычно  $\varepsilon_{\phi}$  и  $\varepsilon_n$  для ПУА определяют экспериментально, путем проведения соответствующих испытаний аппаратов.

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

$$\varepsilon = [1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2) \dots (1 - \varepsilon_n)] 100\%, \quad (3.13)$$

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

Эффективность очистки - важнейшая характеристика аппарата. На нее ориентируются при выборе пылеулавливающего оборудования в соответствии с допустимым остаточным содержанием пыли 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.

*Производительность* характеризуется количеством воздуха, которое очищается за 1 час. Аппараты, в которых воздух очищается при прохождении через фильтрующий слой, характеризуются удельной воздушной нагрузкой, т. е. количеством воздуха, которое проходит через 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности за 1 час.

*Гидравлическое сопротивление* имеет важное значение, так как от его величины зависит требуемое давление вентилятора, а следовательно, и расход электроэнергии. Гидравлическое сопротивление аппарата определяют по формуле

$$H = A \cdot v^n \quad (3.16)$$

где  $v$  - скорость движения воздуха через аппарат, м/с;  $A, n$  — коэффициенты, определяемые экспериментальным путем и зависящие от конструкции аппарата.

*Расход энергии* зависит в значительной мере от гидравлического сопротивления аппарата. В электрофильтрах электроэнергия расходуется в основном на создание электростатического поля. Расход электроэнергии при одноступенчатой очистке находится в пределах от 0,035 до 1,0 кВт·ч на 1000 м<sup>3</sup> воздуха. Удельные затраты энергии на удаление дисперсных примесей возрастают пропорционально снижению концентрации взвешенных в потоке частиц, поскольку степень очистки в пылеулавливающих аппаратах практически не зависит от начальной концентрации загрязнителя. В дополнение к этому затраты растут и с уменьшением размеров частиц.

В последние годы в качестве одного из показателей работы аппаратов очистки стали использовать энергетические затраты, расходуемые на конкретный процесс различными способами обеспыливания. В качестве показателя энергетического баланса по аналогии с коэффициентом полезного действия используют так называемый энергетический КПД:

$$\varepsilon^E = \frac{E_n}{E_3} \quad (3.17)$$

где  $E_n$  — полезно используемая энергия;  $E_3$  — вся энергия, затраченная в процессе обеспыливания.

Энергетический коэффициент не учитывает термодинамические потери, связанные, например, с неизобарностью реального теплового процесса, сопутствующего процессу обеспыливания. Поэтому оценку систем обеспыливания по энергетическому КПД нельзя считать всегда обоснованной. Такой подход справедлив для обратимых термодинамических процессов.

*Стоимость очистки* является важнейшим показателем, так как характеризует экономичность очистки. Она зависит от многих факторов: капитальных затрат на оборудование, эксплуатационных расходов и др.

Стоимость очистки воздуха в различных аппаратах значительно отличается. Как правило, более эффективная очистка обходится значительно дороже. Если стоимость очистки определенного 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 скруббере ВТИ - 140 %, в электрофилт্রে - 220 %, в тканевых фильтрах (в зависимости от типа) от 260 до 280 %. Двухступенчатая очистка по схеме батарейный циклон - электрофилтър стоит 330 % .

#### 4. Механическое пылеулавливание

Термин «механические осадители» обычно используют для обозначения устройств, в которых частицы осаждаются под действием либо сил тяжести или инерции, либо и тех и других. В гравитационных осадителях частицы осаждаются из потока газа под действием собственного веса. В инерционных осадителях поток частиц, взвешенных в газе, внезапно подвергается изменению направления движения. Возникающие инерционные силы стремятся выбросить частицы из потока. Циклоны-осадители, в которых используется инерция центробежной силы, являются важным частным случаем инерционных осадителей.

Скорость удаления частиц пропорциональна осаждающей силе. Из-за очень малого веса мелких частиц гравитационное осаждение оказывается слишком медленным и малоэффективным процессом для частиц размером менее 100 мкм. При использовании инерционного эффекта скорость улавливания резко повышается. Благодаря этому можно уменьшить размер оборудования и расширить диапазон эффективного улавливания до частиц

размером около 20 мкм. Для некоторых циклонов предельный размер улавливаемых частиц составляет 5...10 мкм.

Для осаждения под действием гравитации газ обычно просто медленно пропускают через большую камеру, причем частицы имеют возможность осесть в бункер на дне. Расстояние, требуемое для осаждения частиц, можно уменьшить путем разделения пространства камеры несколькими горизонтальными параллельными поддонами.

Гравитационные камеры можно снабжать отражательными перегородками для изменения направления движения газа и привлечения сил инерции для увеличения осадительного действия. В других конструкциях для создания инерционного эффекта используют заслонки, отбойники.

В циклонных осадителях газу сообщают вращательное или вихревое движение, чтобы подвергнуть частицы воздействию центробежной силы. Это достигается или тангенциальным вводом потока в круглую камеру, или пропусканием газа мимо лопастей, радиально ориентированных по отношению к оси потока.

Устройства всех этих типов характеризуются простотой конструкции и работы. Они относительно дешевы по сравнению с другими типами осадителей. В общем они не имеют движущихся частей, а для обеспечения рабочих условий можно использовать любой материал. Затраты энергии на работу также относительно малы, что обусловлено малым перепадом давления при течении газа через устройство.

Осадители рассматриваемого типа используются для первичного удаления грубых частиц газового потока. В большинстве случаев защиты воздуха от загрязнения требуется улавливание гораздо более мелких частиц (размером около 1 мкм), поэтому обычно необходимо применять осадители других типов. Однако механические осадители можно использовать как предварительные, располагая их последовательно с устройствами других типов, чтобы уменьшить нагрузку на последние. Это особенно необходимо при сильно запыленных газовых потоках. Механические осадители могут работать долгое время без обслуживания с малыми энергетическими затратами.

#### **4.1. Пылеосадительные камеры**

Простейшим сепаратором твердых взвешенных частиц является пылеосадительная камера, в которой запыленный газовый поток перемещается с малой скоростью, делающей возможным гравитационное осаждение (седиментацию) транспортируемой взвеси.

Для достижения приемлемой эффективности очистки газов данными устройствами необходимо, чтобы частицы находились в пылеосадитель-

ных аппаратах возможно более продолжительное время, а скорость движения пылевого потока была незначительной. Поэтому данное оборудование относится к категории экстенсивного оборудования, рабочие объемы таких аппаратов весьма значительны, что требует больших производственных площадей. Однако пылеосадительные камеры и пылевые мешки обладают очень незначительным гидравлическим сопротивлением (50...300 Па).

В промышленности пылеосадительные камеры используются в качестве устройств предварительной обработки газов, например, для отделения крупных частиц и разгрузки аппаратов последующих ступеней. В связи с этим данное оборудование используют только на первых ступенях систем газоочистки для осаждения частиц крупных размеров (более 100 мкм). Обычно средняя расходная скорость движения газов в пылеосадительных камерах составляет 0,2...1 м/с, а в пылевых мешках – 1...1,5 м/с.

На рис. 4.1 представлены наиболее распространенные конструкции пылеосадительных камер и пылевых «мешков».

Для равномерного газораспределения по сечению пылеосадительные камеры могут снабжаться диффузорами и газораспределительными решетками, а для снижения высоты осаждения частиц - горизонтальными или наклонными полками. Эффективность улавливания частиц с помощью гравитационного осаждения можно повысить, уменьшая требуемый путь их падения. Это можно осуществить, помещая в камеру горизонтальные пластины, что превращает ее в группу небольших параллельных камер. В некоторых конструкциях пылеосадительных камер для повышения их эффективности предусматривается устройство цепных или проволочных завес и отклоняющихся перегородок. Это позволяет дополнительно к гравитационному эффекту использовать эффект инерционного осаждения частиц при обтекании потоком газов различных препятствий.

Действие силы тяжести может быть увеличено инерционными силами, если к потолку камеры прикрепить вертикальный экран. При обтекании газовым потоком нижней кромки экрана частицы будут увлекаться вниз инерционной силой, возникающей при искривлении линий тока газа.

Целью расчета пылеосадительных камер является подбор их габаритных размеров и определение коэффициента очистки. В общем случае коэффициенты очистки могут быть найдены опытным путем, так как процесс седиментации сопровождается турбулентной диффузией. Особенно заметно влияет турбулентность на ухудшение оседания частиц в камерах с рассекателями, а также в полых осадительных емкостях большой высоты.

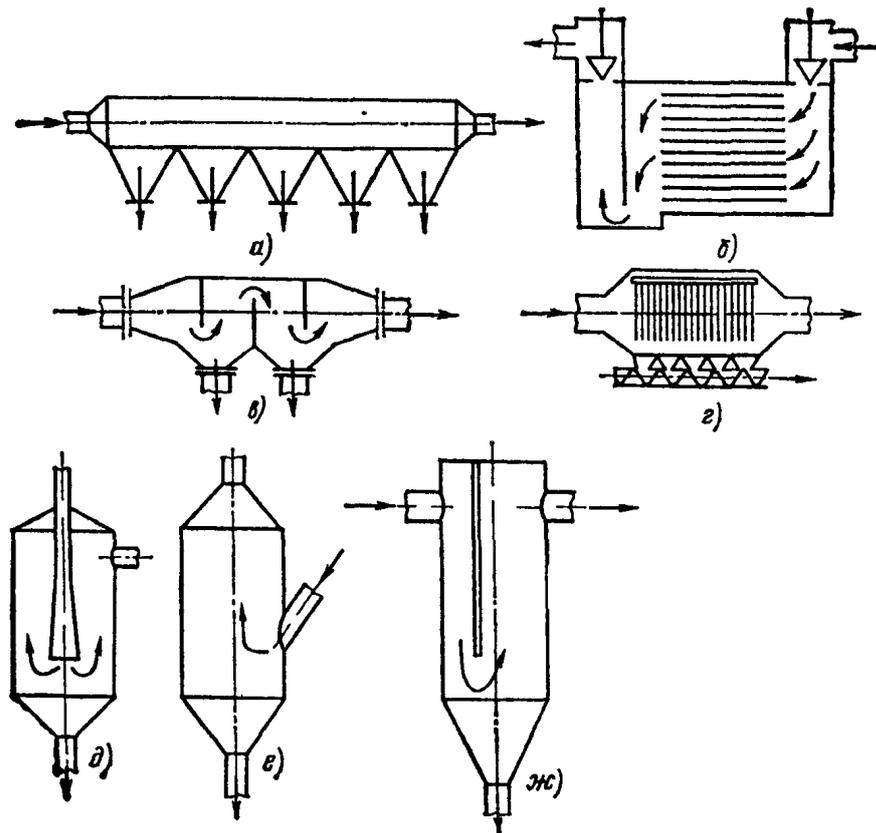


Рис. 4.1. Пылеосадительные камеры и простейшие пылеосадители инерционного действия:

а – простейшая пылеосадительная камера; б – многополочная камера; в – камера с перегородками; г – камера с цепными или проволочными завесами; д – пылевой «мешок» с центральным подводом газа; е - пылевой «мешок» с боковым подводом газа; ж – пылеосадитель с отражательной перегородкой.

Конструирование осадительных камер основано на подсчете сил, действующих на частицу, и скорости вертикального движения вниз под действием результирующей силы. В соответствии с законом Ньютона чистое ускорение вертикального движения частиц определяется результирующим действием силы тяжести, плавучести и сопротивления среды. В случае газов эффектом плавучести можно пренебречь. Силу сопротивления выражают через коэффициент сопротивления  $\zeta$ , зависящий от числа Рейнольдса  $Re$  для движения частицы:

$$m \frac{dw_{oc}}{dt} = g m - \zeta \frac{\rho_c w_{oc}^2}{2} \pi r_c^2, \quad (4.1)$$

где  $\zeta = \zeta(Re) = \zeta\left(\frac{\rho_c w_{oc} d_{\text{ч}}}{\mu}\right)$ ;  $m$  – масса частицы;  $w_{oc}$  – скорость движения частицы;  $t$  – время;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\rho_c$  – плотность среды (газа);  $r_{\text{ч}}$  – радиус частицы.

Функциональную зависимость между  $\zeta$  и  $Re$  берут из стандартных графиков или уравнений, описывающих движение индивидуальной сферической частицы. При  $Re < 0,5$  эта зависимость характеризуется законом Стокса  $\zeta = 24/Re$ . Для больших  $Re$  можно использовать эмпирическое уравнение Клячко:

$$\zeta = 24/Re + 4/Re^{1/2},$$

которое применимо в диапазоне  $0,5 < Re < 800$ . Для маленьких частиц в выражение для силы сопротивления следует вводить поправку Каннингема на скольжение, но в этом случае гравитационное осаждение уже не играет роли.

Из уравнения (4.1) ясно, что вертикальное ускорение частицы продолжается до тех пор, пока сила веса не станет равной силе сопротивления; после этого частица движется с постоянной скоростью. Эта скорость называется стационарной скоростью осаждения частицы. Время, которое необходимо для достижения этой скорости, очень мало. Стационарная скорость может быть найдена приравниванием левой части уравнения (4.1) нулю, заменой  $m$  на  $(\rho_{\text{ч}} - \rho_c)d_{\text{ч}}^3/6$  и представлением в безразмерной форме

$$4g \cdot d_{\text{ч}}^3 \rho_c (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) / 3\mu^2 = \zeta \cdot Re^2 = 0.$$

Это выражение определяет число Галилея

$$Ga = 4g \cdot d_{\text{ч}}^3 \rho_c (\rho_{\text{ч}} - \rho_c) / 3\mu^2.$$

Это число пропорционально  $d_{\text{ч}}^3$  и независимо от  $w_{oc}$ . Условием достижения стационарной скорости является  $Ga = \zeta Re^2$ .

Можно определить другое безразмерное число, которое пропорционально  $(w_{oc})^3$  и независимо от  $d_{\text{ч}}$ :

$$\frac{Re}{\zeta} = \frac{Re^2}{Ga} = \frac{3\rho_c^2 w_{oc}}{4g(\rho_{\text{ч}} - \rho_c)\mu}.$$

Прямое соотношение между  $d_{\text{ч}}$  и  $w_{oc}$  можно дать через комбинацию  $(Re/\zeta)^{1/3}$  в функции  $Ga^{1/3}$ . Эта зависимость хорошо выражается эмпирическим соотношением

$$\lg(Re/\zeta)^{1/3} = -1,387 + 2,153 \lg Ga^{1/3} + 0,548 \lg^2 Ga^{1/3} + 0,05665 \lg^3 Ga^{1/3}. \quad (4.2)$$

Таким образом, чтобы рассчитать стационарную скорость осаждения для частиц любого размера  $d_{\text{ч}}$  сначала надо найти критерий  $Ga$ , как описано выше. Затем по уравнению (4.2) рассчитывают  $Re/\zeta$ , а затем получают  $w_{oc}$ , используя данное выше определение  $Re/\zeta$ .

В диапазоне применимости закона Стокса скорость находится просто:

$$w_{oc} = \frac{g(\rho_c - \rho_g)d_c^2}{18\mu} \quad (4.3)$$

Соотношение между размером частицы и стационарной скоростью осаждения показано на рис. 4.2.

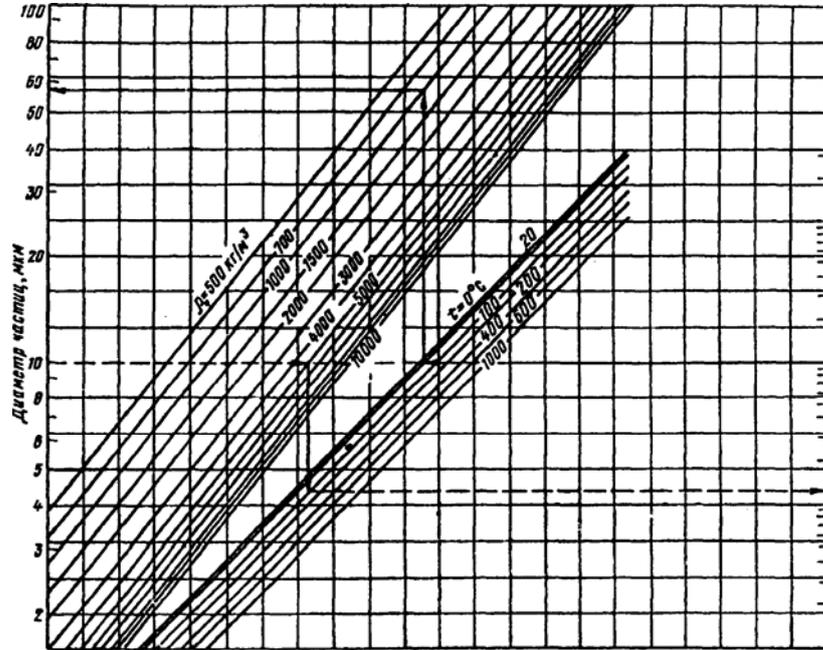


Рис. 4.2. Скорость осаждения в функции размера частиц.

Простая модель проектирования осадительной камеры получается на основе предположения о фронтальном характере течения газа через камеру и равномерном расположении частиц в газе. На рис. 4.3 схематически показано сечение камеры. Частица, входящая в камеру со скоростью, равной скорости газа  $v_0$  на уровне  $h_c$  должна следовать прямолинейной траектории. Осядет или нет данная частица, определяется из условия  $w_{oc}h_c \leq v_0l$ . Осажденная фракция частиц с одной и той же скоростью седиментации  $w_{oc}$  определяется соотношением  $h_c/H = v_0l/w_{oc}$ .

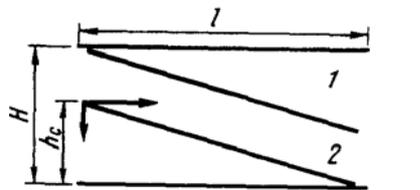


Рис. 4.3. Схема осаждения частиц в камере: 1 – очищенная зона; 2 – предельная траектория.

Размеры камеры ( $H, L, B$ ) определяются размером  $d_q^*$  наименьших частиц, которые должны быть осаждены полностью. Рассчитываем  $w_{oc}^*$ , принимаем  $h_c/H = 1$ , находим  $L = w_{oc}^*/v$ . Значение  $v$  должно быть меньше скорости, при которой начинается унос частиц, или меньше 3,05 м/с, в зависимости от того, какие из этих значений меньше. Наконец, находим произведение  $BH = Q_T/v$ , что позволяет выбрать высоту и ширину.

Габаритные размеры камеры, необходимые для гравитационного осаждения частиц крупнее заданного размера частиц  $d_q$ , обычно определяются по соотношению:

$$L = H \frac{v}{w_{oc}}, \quad (4.4)$$

где  $L$  - длина камеры,  $H$  - высота камеры.

Скорость движения газов в камере  $v$  обычно назначается в пределах 0,2...0,8 м/с, а скорость витания частиц с размером  $d_q$  может быть рассчитана по зависимости (4.3) или по графику 4.2. Высота и ширина пылеосадительной камеры принимаются из конструктивных соображений, исходя из предельной скорости движения газов в камере.

Следует учитывать, что при движении запыленных газов в камере турбулентность потока нарушает нормальное гравитационное осаждение, в особенности частиц малых размеров, и действительная степень очистки газов оказывается ниже, чем определенная из уравнения (4.4).

Эффективность пылеосадителя можно рассчитать с использованием соотношения фракционной эффективности, дающей зависимость эффективности улавливания от размера частиц. В сочетании с данными о распределении поступающих в пылеосадитель частиц по размерам фракционная эффективность позволяет определить общую эффективность улавливания.

Для пылеосадительных камер с  $L/H > 3$  значение парциальных коэффициентов очистки (в %) может быть найдено с достаточной степенью точности на основании расчетов средней концентрации частиц соответствующего размера в выходном сечении пылеосадительной камеры по формуле (%):

$$\varepsilon_n = 100 \left( 1 - \frac{1}{i} \sum_0^i N_i \right) \quad (4.5)$$

где  $i$  - число точек, для которых рассчитывается концентрация частиц;  $N_i$  - отношение концентрации частиц данного размера в расчетной точке выходного сечения камеры к их концентрации во входном сечении. Концентрация этих частиц во входном сечении принимается равномерно распределенной по сечению. Предполагается, что распределение частиц по раз-

мерам подчиняется нормальному закону распределения, значение величины  $N$  определяется по уравнению:

$$N = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1. \quad (4.6)$$

Значения функций  $\Phi(x_1)$  и  $\Phi(x_2)$  определяются из таблицы нормальной функции распределения (табл. 4.1).

Величины  $x_1$  и  $x_2$ , в свою очередь, определяются из выражений:

$$x_1 = \frac{H + h - L \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{2D_t - l/v}}; \quad (4.7)$$

$$x_2 = \frac{H - h + L \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{2D_t - l/v}}; \quad (4.8)$$

где  $h$  - расстояние от потолка камеры;  $D_t$  - коэффициент турбулентной диффузии частиц.

При выполнении условия  $w_{oc} < Lg/v$ , что характерно для большинства случаев осаждения в камерах, коэффициент турбулентной диффузии частиц совпадает с коэффициентом турбулентной диффузии газового потока и может быть рассчитан по формуле Шервуда - Вертца:

$$D_t = 0,02 v H \sqrt{\lambda}, \quad (4.9)$$

где  $\lambda$  - коэффициент трения потока, может быть принят равным 0,03.

Тогда выражения (4.7) и (4.8) значительно упрощаются и принимают вид:

$$x_1 = \frac{1 + h/H - L/H(w_{oc}/v)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \cdot L/H}}, \quad (4.10)$$

$$x_2 = \frac{1 - h/H + L/H(w_{oc}/v)}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \cdot L/H}}, \quad (4.11)$$

$$(w_{oc}/v)_{50} \approx 1,5 H/L. \quad (4.12)$$

Дополнительные значения  $w_{oc}/v$ , необходимые для определения нескольких точек зависимости  $\varepsilon_n = f(d_q)$ , принимаются больше и меньше значения  $(w_{oc}/v)_{50}$ . Полный коэффициент очистки и степень очистки определяются по уравнению:

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_n \frac{N_{ex}}{100} \Delta d_q, \quad (4.13)$$

где  $N_{ex}$  - плотность распределения, %/мкм;  $\Delta d_q$  - разность граничных размеров выбираемого диапазона частиц из гистограммы, мкм.

Таблица 4.1.

## Значения нормальной функции распределения

$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6	7	8
- 2,70	0,0035	- 1,06	0,1446	0,00	0,5000	1,08	0,8599
- 2,60	0,0047	- 1,04	0,1492	0,02	0,5080	1,10	0,8643
- 2,50	0,0062	- 1,02	0,1539	0,04	0,5160	1,12	0,8686
- 2,40	0,0082	- 1,00	0,1587	0,06	0,5239	1,14	0,8729
- 2,30	0,0107	- 0,98	0,1635	0,08	0,5319	1,16	0,8770
- 2,20	0,0139	- 0,96	0,1685	0,10	0,5398	1,18	0,8810
- 2,10	0,0179	- 0,94	0,1736	0,12	0,5478	1,20	0,8849
- 2,00	0,0228	- 0,92	0,1788	0,14	0,5557	1,22	0,8888
- 1,98	0,0239	- 0,90	0,1841	0,16	0,5636	1,24	0,8925
- 1,96	0,0250	- 0,88	0,1894	0,18	0,5714	1,26	0,8962
- 1,94	0,0262	- 0,86	0,1949	0,20	0,5793	1,28	0,8997
- 1,92	0,0274	- 0,84	0,2005	0,22	0,5871	1,30	0,9032
- 1,90	0,288	- 0,82	0,2061	0,24	0,5948	1,32	0,9066
- 1,88	0,0301	- 0,80	0,2119	0,26	0,6026	1,34	0,9099
- 1,86	0,0314	- 0,78	0,2177	0,28	0,6103	1,36	0,9131
- 1,84	0,0329	- 0,76	0,2236	0,30	0,6179	1,38	0,9162
- 1,82	0,0344	- 0,74	0,2297	0,32	0,6255	1,40	0,9192
- 1,80	0,0359	- 0,72	0,2358	0,34	0,6331	1,42	0,9222
- 1,78	0,0375	- 0,70	0,2420	0,36	0,6406	1,44	0,9251
- 1,76	0,0392	- 0,68	0,2483	0,38	0,6480	1,46	0,9279
- 1,74	0,0409	- 0,66	0,2546	0,40	0,6554	1,48	0,9306
- 1,72	0,0427	- 0,64	0,2611	0,42	0,6628	1,50	0,9332
- 1,70	0,0446	- 0,62	0,2676	0,44	0,6700	1,52	0,9357
- 1,68	0,0465	- 0,60	0,2743	0,46	0,6772	1,54	0,9382
- 1,66	0,0485	- 0,58	0,2810	0,48	0,6844	1,56	0,9406
- 1,64	0,0505	- 0,56	0,2877	0,50	0,6915	1,58	0,9429
- 1,62	0,0526	- 0,54	0,2946	0,52	0,6985	1,60	0,9452
- 1,60	0,0548	- 0,52	0,3015	0,54	0,7054	1,62	0,9474
- 1,58	0,0571	- 0,50	0,3085	0,56	0,7123	1,64	0,9495
- 1,56	0,0594	- 0,48	0,3156	0,58	0,7190	1,66	0,9515
- 1,54	0,0618	- 0,46	0,3228	0,60	0,7257	1,68	0,9535
- 1,52	0,0643	- 0,44	0,3300	0,62	0,7324	1,70	0,9554
- 1,50	0,0668	- 0,42	0,3372	0,64	0,7389	1,72	0,9573
- 1,48	0,0694	- 0,40	0,3446	0,66	0,7454	1,74	0,9591
- 1,46	0,0721	- 0,38	0,3520	0,68	0,7517	1,76	0,9608
- 1,44	0,0749	- 0,36	0,3594	0,70	0,7580	1,78	0,9625

- 1,42	0,0778	- 0,34	0,3669	0,72	0,7642	1,80	0,9641
- 1,40	0,0808	- 0,32	0,3745	0,74	0,7703	1,82	0,9656
- 1,38	0,0838	- 0,30	0,3821	0,76	0,7764	1,84	0,9671
- 1,36	0,0869	- 0,28	0,3897	0,78	0,7823	1,86	0,9686
- 1,34	0,0901	- 0,26	0,3974	0,80	0,7881	1,88	0,9699
- 1,32	0,0934	- 0,24	0,4052	0,82	0,7939	1,90	0,9713
- 1,30	0,0968	- 0,22	0,4129	0,84	0,7995	1,92	0,9726
- 1,28	0,1003	- 0,20	0,4207	0,86	0,8051	1,94	0,9738
- 1,26	0,1038	- 0,18	0,4286	0,88	0,8106	1,96	0,9750
- 1,24	0,1075	- 0,16	0,4364	0,90	0,8159	1,98	0,9761
- 1,22	0,1112	- 0,14	0,4443	0,92	0,8212	2,00	0,9772
- 1,20	0,1151	- 0,12	0,4522	0,94	0,8264	2,10	0,9821
- 1,18	0,1190	- 0,10	0,4602	0,96	0,8315	2,20	0,9861
- 1,16	0,1230	- 0,08	0,4681	0,98	0,8365	2,30	0,9893
- 1,14	0,1271	- 0,06	0,4761	1,00	0,8413	2,40	0,9918
- 1,12	0,1314	- 0,04	0,4840	1,02	0,8461	2,50	0,9938
- 1,10	0,1357	- 0,02	0,4920	1,04	0,8508	2,60	0,9953
- 1,08	0,1401	- 0,00	0,5000	1,06	0,8554	2,70	0,9965

Следует иметь в виду, что  $\sum N_{ex} \Delta d_c$  должно быть равно 100 %.

Расчеты пылеосадительных камер выполняют в следующем порядке.

1. Определяют скорость газового потока в рабочем сечении камеры:

$$v = \frac{V}{H \cdot B}, \quad (4.14)$$

где  $V$  - расход газов, м<sup>3</sup>/с;  $H, B$  - высота и ширина камеры, м.

Чем меньше скорость потока, тем больше степень очистки, но и более громоздкой получится камера. Желательно, чтобы скорость потока не превышала 0,8...1 м/с, однако для компактных частиц большой плотности ее можно доводить до 2...3 м/с.

2. Принимают по конструктивным соображениям соотношение длины и высоты камеры  $L/H$ . Для конструкций с  $L/H < 3$  данная методика расчета не дает необходимой точности.

3. Принимают, что отношение скорости витания частиц  $w_{oc}$ , которые будут уловлены в камере на 50 %, к скорости газового потока приблизительно соответствует полутора значениям  $(w_{oc}/v)_{50} \approx 1,5 \cdot H/L$  и находят из этого соотношения величину  $w_{oc}$ .

4. Диаметр частиц, оседающих в камере на 50 %, находят в предположении, что оседание происходит в соответствии с законом Стокса по формуле:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \mu w_{oc}}{g(\rho_c - \rho_g)}}, \text{ м.} \quad (4.15)$$

Для нагретых газов может быть использована формула

$$d_{50} = 1,614 \cdot 10^{-3} (273 + t)^{0,75} \left[ \frac{w_{oc}}{\rho_{\text{ч}} (384 + t)} \right]^{0,5} \text{ м.} \quad (4.16)$$

5. Выбирают несколько соотношений  $w_{oc} / v$ , больших и меньших принятого и определяют соответствующие значения  $d_{\text{ч}}$ .

6. Определяют среднюю концентрацию частиц на выходе из камеры для каждого принятого соотношения  $w_{oc}/v$  или, что то же самое, для каждого принятого значения  $d_{\text{ч}}$  следующим образом:

а) назначают "k" точек по высоте сечения, задаваясь величиной  $h/H$ , где  $h$  - расстояние от потолка камеры до рассматриваемой точки;

б) рассчитывают так называемые параметры очистки  $x_1$  и  $x_2$  (параметры функции парциального распределения  $\Phi(x)$ ) по формулам:

$$x_1 = \frac{1 + \frac{h}{H} - \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}; \quad (4.17)$$

$$x_2 = \frac{1 - \frac{h}{H} + \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{oc}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^{-3} \frac{L}{H}}}; \quad (4.18)$$

в) по значениям  $x_1$  и  $x_2$  из таблицы 4.1 находят интегралы вероятностей  $\Phi(x_1)$  и  $\Phi(x_2)$  и подсчитывают значение  $N_i$ :

$$N_i = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 100; \quad (4.19)$$

г) усредняют значение  $N$  по сечению, вычисляя его как среднее арифметическое по высоте сечения:

$$N_{cp} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{k}; \quad (4.20)$$

д) определяют средний парциальный коэффициент осаждения частиц рассматриваемого размера (с принятой скоростью осаждения-витания):

$$\varepsilon_{n,cp} = 100 - N_{cp}. \quad (4.21)$$

7. Находят полный коэффициент очистки  $\eta$  как сумму произведений долей частиц соответствующих фракций на их фракционные (парциальные) коэффициенты очистки по формуле

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_{\text{п}} \frac{N_{\text{ex}}}{100} \Delta d_{\text{ч}}.$$

**Пример 4.1.** Определить эффективность осаждения частиц в пылеосадительной камере, если она имеет длину  $L = 10$  м, высоту  $H = 1$  м, ширину  $B = 2$  м. Расход воздуха через камеру  $V = 3600$  м<sup>3</sup>/ч, плотность частиц  $\rho_{\text{ч}} = 500$  кг/м<sup>3</sup>, вязкость газа  $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

Скорость потока в сечении камеры

$$v = \frac{V}{3600 \cdot H \cdot B} = \frac{3600}{3600 \cdot 12} = 0,5 \text{ м/с.}$$

По уравнению (4.12) находим относительную скорость осаждения частиц, улавливаемых в камере с эффективностью, равной 50 %:

$$\left(\frac{w_{oc}}{v}\right)_{50} = 1,5 \frac{H}{L} = 1,5 \frac{1}{10} = 0,15.$$

Отсюда скорость осаждения-витания  $(w_{oc})_{50} = 0,075 \text{ м/с.}$

Тогда по найденной скорости осаждения-витания, заданной плотности и вязкости газа находим размер частиц, улавливаемых в камере с эффективностью 50 %:

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot w_{oc}}{g(\rho_q - \rho_c)}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 18 \cdot 10^{-6} \cdot 0,075}{9,8(500 - 1,25)}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 70 \text{ мкм.}$$

Для определения зависимости  $\eta_n = f(d_q)$  выбираем несколько дополнительных относительных скоростей витания:

$$\left(\frac{w_{oc}^1}{v}\right)_{50} = 0,1 \text{ и } \left(\frac{w_{oc}^2}{v}\right)_{50} = 0,2.$$

Этим значениям относительных скоростей витания соответствуют диаметры частиц  $d_q^1 = 60 \text{ мкм}$  и  $d_q^2 = 90 \text{ мкм}$ .

Средняя концентрация частиц на выходе из камеры определяется как средняя величина в 4...5 точках сечения. С этой целью зададимся пятью значениями  $h/H$ : 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0.

Результаты расчетов представим в следующем виде:

- для  $(w_{oc}/v) = 0,1$

$h/H$	0	0,25	0,5	0,75	1,0
$x_1$	0	0,95	1,89	2,83	3,78
$x_2$	7,56	6,63	5,65	4,73	3,78
$\Phi(x_1)$	0,5	0,83	0,97	0,995	1
$\Phi(x_2)$	1	1	1	1	1
$N_i$	0,5	0,83	0,97	0,995	1

Среднее значения  $N_{cp}$  составляет 0,86, а парциальный коэффициент очистки газа для частиц с размером  $d_q = 60 \text{ мкм}$   $\varepsilon_n = 100(1 - 0,86) = 14 \%$ ;

- для  $(w_{oc}/v) = 0,2$

$h/H$	0	0,25	0,5	0,75	1,0
$x_1$	-3,78	-2,84	-1,89	-0,95	0
$x_2$	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3

$\Phi(x_1)$	0	0,002	0,03	0,171	0,5
$\Phi(x_2)$	1	1	1	1	1
$N_i$	0	0,002	0,03	0,171	0,5

Среднее значение  $N_{cp}$  составляет 0,14, а парциальный коэффициент очистки газа для частиц с размером  $d_q = 90$  мкм  $\varepsilon_n = 100(1 - 0,14) = 86$  %.

Таким образом, в результате расчета получены три значения парциальных коэффициентов очистки газа (14, 50 и 86 %) при трех значениях  $(w_{oc}/v) = 0,1; 0,15; 0,2$ .

Полный коэффициент очистки газа рассчитывается по уравнению (4.13) при наличии гистограммы пыли на входе в камеру.

## 4.2. Циклонные осадители

Наибольшее распространение в системах пылеочистки получили циклоны. Циклоны широко применяются для очистки от пыли вентиляционных и технологических выбросов во всех отраслях народного хозяйства.

На практике система улавливания частиц создается путем придания запыленному потоку закрученного или вращательного движения, ограниченного цилиндрическими стенками. Частицы осаждаются при отбрасывании на стенки. Такое устройство называется циклоном.

Эффективность циклонов можно объяснить на следующем примере. Частица массой  $m$ двигающаяся по круговой траектории радиуса  $r$  с тангенциальной скоростью  $u_t$ , подвержена действию центробежной силы  $m u_t^2/r$ . Для типичных условий  $u_t = 15$  м/с,  $r = 0,6$  м эта сила примерно в 39 раз превышает силу тяжести. Поэтому указанная сила может резко увеличить осаждение в камере.

Циклоны просты в изготовлении, надежны в эксплуатации при высоких давлениях и температурах, обеспечивают фракционную эффективность очистки на уровне 80...95% от частиц пыли размером более 10 мкм. Циклоны в основном рекомендуется использовать перед высокоэффективными аппаратами пылеочистки (тканевыми и электрофильтрами). В ряде случаев циклоны обеспечивают эффективность очистки, достаточную для выброса газов или воздуха в атмосферу.

В России и СНГ для циклонов принят стандартизированный ряд внутренних диаметров  $D$ : 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000 мм. Для всех одиночных циклонов бункеры выполняются цилиндрическими с коническим днищем. Диаметр бункера принимают  $1,5 D$  для цилиндрических и  $1,1...1,2 D$  для конических циклонов. Высота цилиндрической части бункера принимается  $0,8 D$ , угол конусности стенок днища -  $60^\circ$ .

Циклоны делятся на циклоны большой производительности и циклоны высокой эффективности. Первые имеют обычно большой диаметр и обеспечивают очистку значительных количеств воздуха. Вторые - сравнительно небольшого диаметра (до 500...600 мм). Очень часто применяют групповую установку этих циклонов, соединенных параллельно по воздуху.

Эффективность очистки газа в циклонах в основном определяется дисперсным составом и плотностью частиц улавливаемой пыли, а также вязкостью газа, зависящей от его температуры. При уменьшении диаметра циклона и повышении до определенного предела скорости газа в циклоне эффективность очистки возрастает. Поэтому диаметры серийно выпускаемых циклонов не превышают 5 м.

Циклоны, как правило, используют для грубой и средней очистки воздуха от сухой неслипающейся пыли. Принято считать, что они обладают сравнительно небольшой фракционной эффективностью в области фракций пыли размером до 5...10 мкм, что является основным их недостатком. Однако циклоны, особенно циклоны высокой эффективности, улавливают не такую уж малую часть пыли размером до 10 мкм - до 80 и более процентов.

В современных высокоэффективных циклонах, в конструкции которых учтены особенности улавливаемой пыли, удалось существенно повысить общую и фракционную эффективность очистки. Отмеченный выше недостаток обусловлен особенностями работы циклонов, в частности, турбулизацией потока запыленного воздуха, которая препятствует сепарации пыли.

Разработано и применяется в технике обеспыливания большое число различных типов циклонов, которые отличаются друг от друга формой, соотношением размеров элементов и т. д. (рис. 4.4).

Конструктивно циклоны могут быть выполнены одиночными, групповыми и батарейными. Среди одиночных и групповых циклонов наибольшее распространение получили циклоны НИИОГаза типов ЦН-15 и СК-ЦН производительностью 600...230 000 м<sup>3</sup>/ч, а среди батарейных циклонов - типов БЦ-2, ПБЦ, ЦБ-254 Р, ЦБ-150у производительностью от 12 000 до 480 000 м<sup>3</sup>/ч. Эффективность очистки в батарейных циклонах выше, чем в одиночных или групповых, так как в них циклонные элементы имеют значительно меньший диаметр при равных производительностях.

Запыленный воздух поступает в циклон через патрубков, очищенный — удаляется через выхлопную трубу. В зависимости от способа подведения воздуха к циклону различают циклоны с тангенциальным и спиральным подводом воздуха. При прочих равных условиях циклоны со спиральным подводом обладают более высокой эффективностью очистки. Поток

запыленного воздуха входит в корпус циклона обычно со скоростью 14...20 м/с.

Применяют циклоны правые (вращение потока запыленного воздуха по часовой стрелке, если смотреть сверху) и левые (вращение против часовой стрелки).

Скорость газа в свободном сечении цилиндрической части циклонов должна лежать в пределах 2,5...3,5 м/с. В обычных условиях оптимальной считается скорость 3,5 м/с, а скорость 2,5 м/с рекомендуется принимать при работе с абразивной пылью.

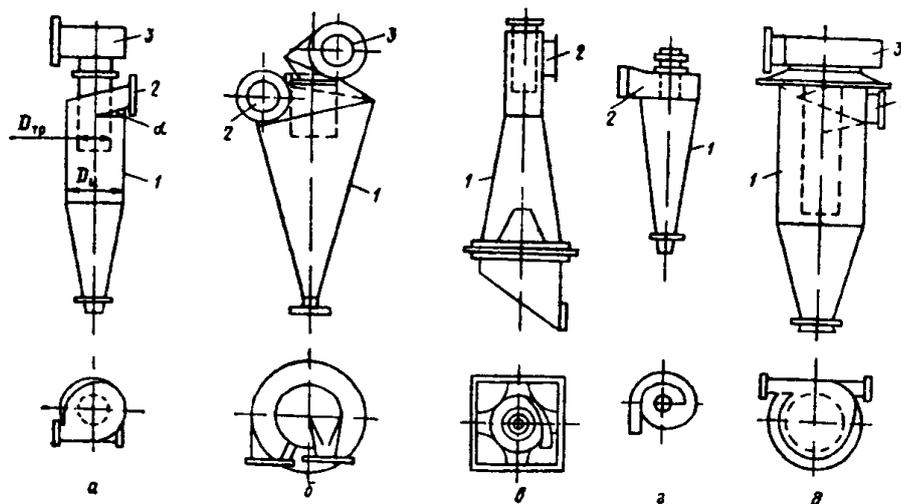


Рис. 4.4. Основные типы конструкций циклонов:  
 а – циклон НИИОГгаза; б – СИОТ; в – ВЦНИИОТ; г – СК-ЦН-34;  
 д – ЛИОТ; 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходная улитка.

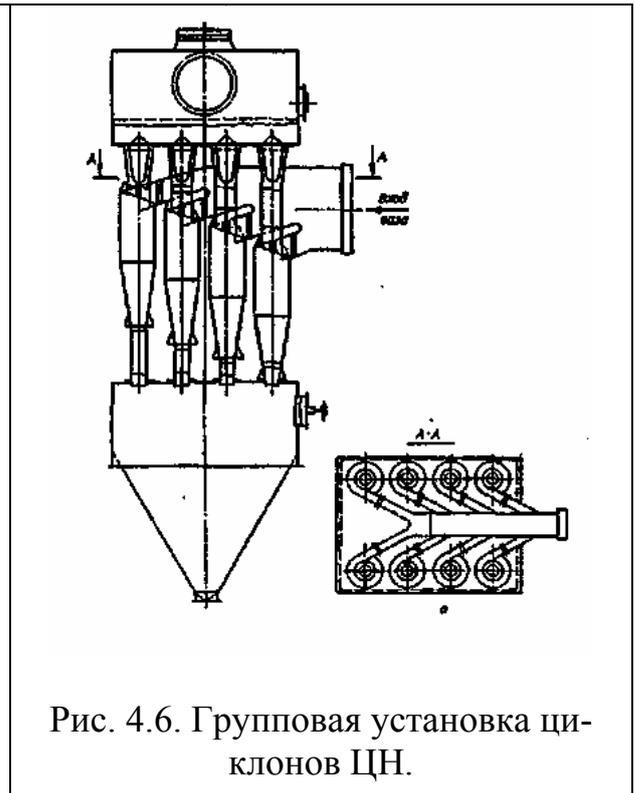
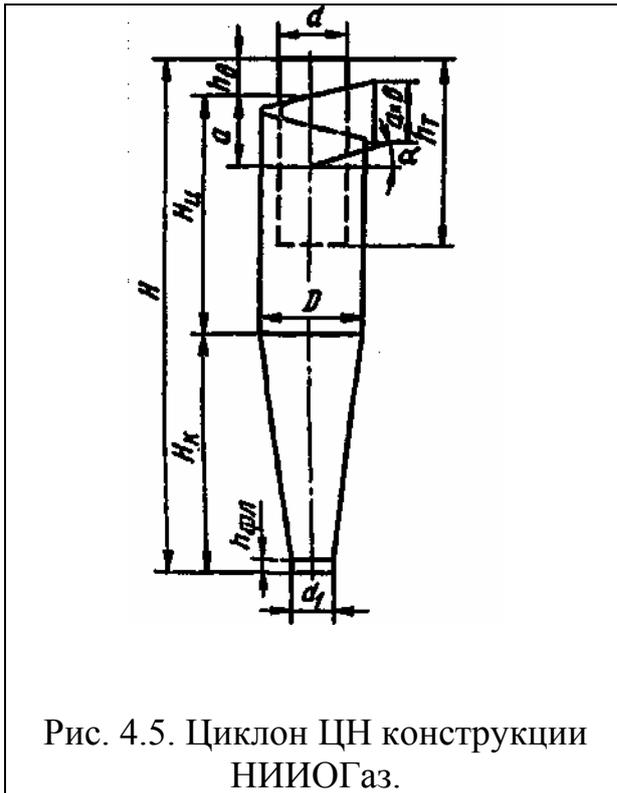
Запыленные газы подаются в циклоны через тангенциальные или аксиальные завихрители и совершают внутри аппаратов сложное вращательно-поступательное движение, характеристики которого изучены еще недостаточно. На частицы, взвешенные в потоке внутри циклона, действует сила инерции, которая стремится сместить их с криволинейных линий тока по касательным, направленным под некоторым углом вниз и к стенке корпуса. Частицы, соприкасающиеся с внутренней поверхностью стенки, под действием сил тяжести, инерции и опускающегося газового потока скользят вниз и попадают в пылеприемник (бункер). Частицы, не достигшие стенки, продолжают движение по криволинейным линиям тока и могут быть вынесены из циклона газовым потоком, который может захватить и некоторое количество осевших в бункер частиц.

Упрощенно считая, что траектории движения взвешенных частиц близки к окружностям, можно величину возникающей силы инерции принять пропорциональной квадрату тангенциальной скорости, массе частиц и обратно пропорциональной радиусу вращения. Так, при радиусе вращения менее метра и тангенциальной скорости в пределах 10...15 м/с сила инерции на порядок превосходит силу тяжести. По этой причине сепарация частиц в циклонах происходит намного интенсивнее, чем в гравитационных осадителях.

Поскольку инерционная сила пропорциональна массе, то мелкие частицы улавливаются в циклонах плохо. Степень очистки аэрозолей с размерами частиц свыше 10 мкм находится в пределах 80...95%, а более мелких частиц - намного хуже. Увеличение эффекта осаждения частиц за счет уменьшения диаметра циклона и повышения скорости потока возможно до некоторых пределов, ограниченных техническими и экономическими факторами, такими как рост энергетических затрат, ухудшение очистки вследствие повторного захвата отсепарированных частиц, абразивный износ, увеличение металлоемкости и другими. Для широко распространенных циклонов оптимальные значения скоростей потоков и конструктивных параметров установлены опытным путем и приводятся в справочной литературе.

#### **4.2.1. Конструкции циклонов**

*Циклоны НИИОГаз.* В институте НИИОГаз разработан ряд конструкций цилиндрических и конических циклонов. Широкое распространение получили цилиндрические циклоны (рис. 4.5) ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24. Цифровое обозначение циклона соответствует углу наклона крышки аппарата и патрубка, подводящего запыленный поток. Для данных циклонов характерна удлиненная цилиндрическая часть корпуса. Циклон ЦН-15у имеет укороченную коническую часть. Его применяют при ограничении по высоте, он имеет несколько худшие показатели, чем ЦН-15.



Циклон ЦН-11 предназначен для очистки воздуха (газов) от сухой неслипающейся неволокнистой пыли, образующейся в различных помольных и дробильных установках и при транспортировании сыпучих материалов.

Для улавливания взрывоопасной и легковозгораемой пыли циклоны ЦН должны быть выполнены по специальным чертежам и не иметь узлов, где могло бы происходить скопление пыли, и должны быть снабжены необходимым количеством взрывных клапанов.

Цилиндрические циклоны ЦН в зависимости от требуемой производительности можно устанавливать одиночно или компоновать в группы по два, четыре, шесть, восемь циклонов (рис. 4.6).

Соотношение размеров (в долях внутреннего диаметра) для циклонов ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24 дано в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Соотношение размеров (в долях внутреннего диаметра) для циклонов ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24

Наименование	Тип циклона	
	ЦН-15; ЦН-15у; ЦН-24	ЦН-11
Внутренний диаметр выхлопной трубы, $d$	0,59 для всех типов	
Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия, $d_1$	0,3-0,4* для всех типов	
Ширина входного патрубка в циклоне (внутренний размер), $b$	0,2 для всех типов	
Ширина входного патрубка на входе (внутренний размер), $b_1$	0,26 для всех типов	
Длина входного патрубка, $l$	0,6 для всех типов	
Диаметр средней линии циклона, $D_{cp}$	0,8 для всех типов	
Высота установки фланца, $h_{\phi}$	0,1 для всех типов	
Угол наклона крышки и входного патрубка циклона, $\alpha$	15°; 15°; 24°	11°
Высота входного патрубка (внутренний диаметр), $a$	0,66; 0,66; 1,11	0,48
Высота выхлопной трубы, $h_T$	1,74; 1,5; 2,11	1,56
Высота цилиндрической части циклона, $H_{ц}$	2,26; 1,51; 2,11	2,06
Высота конуса циклона, $H_k$	2,0; 1,50; 1,75	2,0
Высота внешней части выхлопной трубы, $h_b$	0,3; 0,3; 0,4	0,3
Общая высота циклона, $H$	4,56; 3,31; 4,26	4,38

\* Большой размер принимается при малых  $D$  и большой запыленности

К коническим циклонам НИИОГаз относятся аппараты СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М (рис. 4.2,г; табл. 4.3). Циклоны имеют удлиненную коническую часть и спиральный входной патрубок. Циклоны обладают

высокой эффективностью очистки. Они предназначались для улавливания сажи.

Таблица 4.3.

Соотношение размеров (в долях диаметра  $D$ ) для циклонов  
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М

Наименование	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Внутренний диаметр цилиндрической части, $D$	До 3500 мм		До 4000 мм
Высота цилиндрической части, $H_{ц}$	0,535	0,515	0,4
Высота конической части, $H_{к}$	3,0	2,110	2,6
Внутренний диаметр выхлопной трубы, $d$	0,334	0,340	0,22
Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия, $d_1$	0,334	0,229	0,18
Ширина входного патрубка, $b$	0,264	0,214	0,18
Высота внешней части выхлопной трубы, $h_{в}$	0,2-0,3	0,2-0,3	0,3
Высота установки фланца, $h_{фл}$	0,1	0,1	0,1
Высота входного патрубка, $a$	0,535	0,515	0,4
Длина входного патрубка, $l$	0,6	0,6	0,6
Высота заглубления выхлопной трубы, $h_{т}$	0,535	0,515	0,4
Текущий радиус улитки, $\rho$	$D/2+b\varphi/2\pi$	$D/2+b\varphi/\pi$	$D/2+b\varphi/\pi$

Фракционная эффективность циклонов ЦН-11, ЦН-15 и конических циклонов представлена на рис. 4.7.

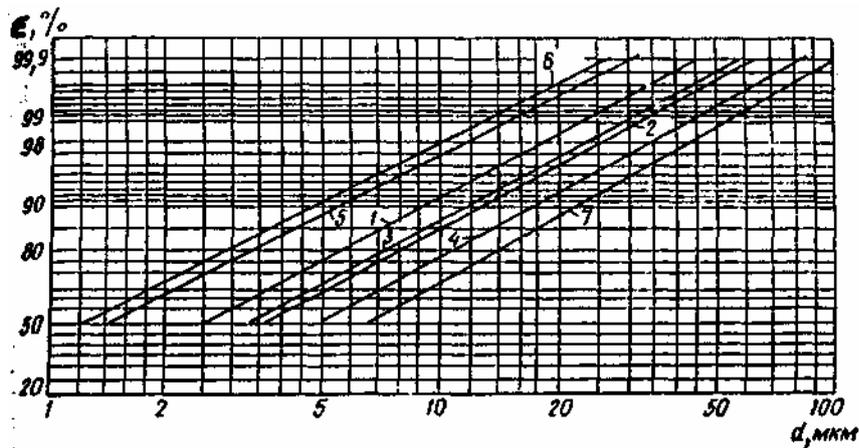


Рис. 4.7. Фракционная эффективность циклонов ЦН НИИОГаз:  
 1 - ЦН-11; 1 - ЦН-15; 3 - ЦН-15у; 4 - ЦН-24; 5 - СДК-ЦН-33; 6 - СК-ЦН-34.

Циклоны СИОТ (Свердловский институт охраны труда) полностью лишены цилиндрической части. Выхлопная труба опущена в верхнюю часть конуса. Входной патрубок имеет треугольное сечение (рис. 4.8, табл. 4.4). Циклоны СИОТ применяют для очистки газов (воздуха) от сухой неволокнистой, неслипающейся пыли.

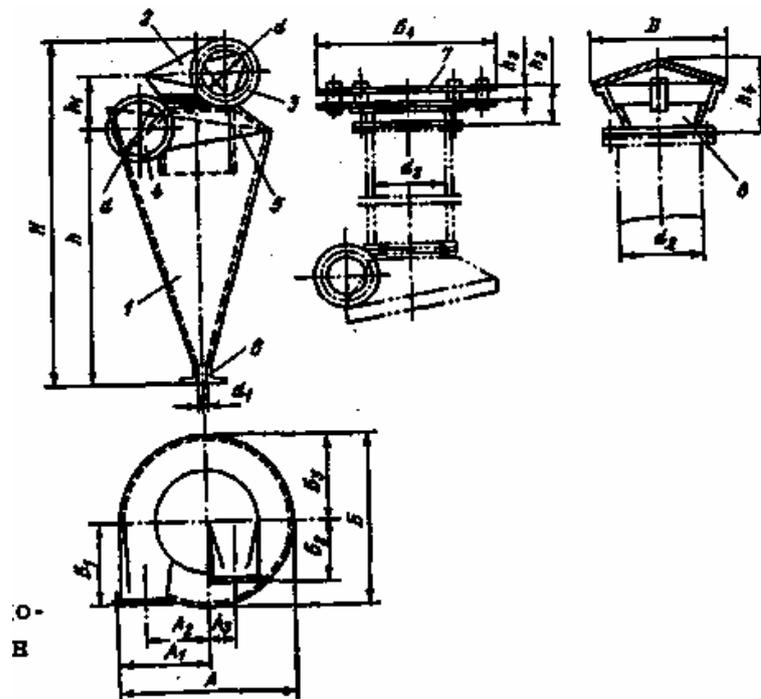


Рис. 4.8. Циклон конструкции СИОТа:  
 1 - корпус; 2 - раскручиватель; 3, 4 - входной и выходной патрубки;  
 5 - крышка корпуса; 6 - пылеотводящий патрубок; 7 - раскручиватель;  
 8 - колпак.

При установке циклона на всасывающей линии вентилятора очищенный газ (воздух) выходит из аппарата через раскручиватель с винтовой крышкой, а при установке на нагнетательной линии - через шахту с колпаком или раскручивателем в виде плоского щита.

Таблица 4.4.

Циклоны конструкции СИОТа

Но- мер ци- клона	Произво- дитель- ность, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Размеры, мм									Масса, кг
		$A_1$	$A_2$	$A_3$	$B$	$H$	$h$	$h_1$	$d$	$d_1$	
1	1,5	703	264	135	675	1720	1360	235	170	68	51
2	3	1045	380	195	970	2455	1960	335	245	98	102
3	4,5	1242	465	240	1184	2995	2400	407	300	120	148
4	6	1428	535	275	1363	3440	2765	460	345	138	195
5	7,5	1595	597	310	1520	3830	3075	525	385	154	244
6	8,5	1698	635	330	1620	4080	3280	555	410	164	275
7	10	1943	690	335	1758	4423	3555	605	445	178	323

Циклоны ВЦНИИОТ. Циклоны с обратным конусом разработаны ВЦНИИОТ (г. Москва) (рис. 4.9, табл. 4.5).

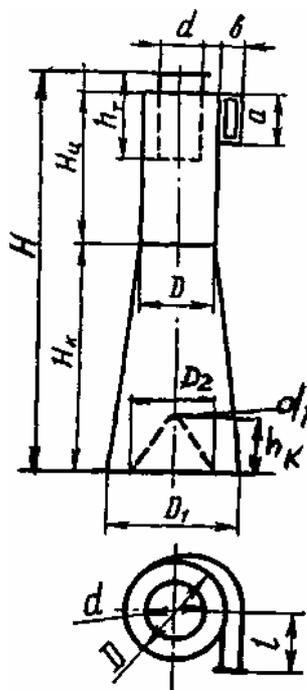


Рис. 4.9. Циклон ВЦНИИОТ.

Применяют для улавливания сухой не слипающейся, не волокнистой и абразивной; а также слабослипающейся (сажа, тальк) пыли. Пылегазовый поток проходит в бункер через кольцевую щель между двумя соосными конусными поверхностями. Обеспыленный газ (воздух) возвращается в корпус циклона через отверстие в вершине внутреннего конуса.

Таблица 4.5.

Соотношение размеров (в долях диаметра  $D$ ) для циклонов типа ВЦНИИОТ

Наименование	Величина
Внутренний диаметр цилиндрической части, $D$	До 1000 мм
Высота цилиндрической части, $H_{ц}$	2,0
Высота конической части, $H_{к}$	3,0
Внутренний диаметр выхлопной трубы, $d$	0,5
Диаметр нижней части конуса, $D_1$	1,6
Диаметр внутреннего конуса, $D_2$	1,4
Диаметр отверстия внутреннего конуса, $d_1$	0,1
Высота внутреннего конуса, $h_{к}$	0,68
Высота заглубления выхлопной трубы, $h$	2,1
Полная высота циклона, $H$	5,2
Длина входного патрубка, $l$	0,6
Высота входного патрубка, $a$	1,0
Ширина входного патрубка, $b$	0,25

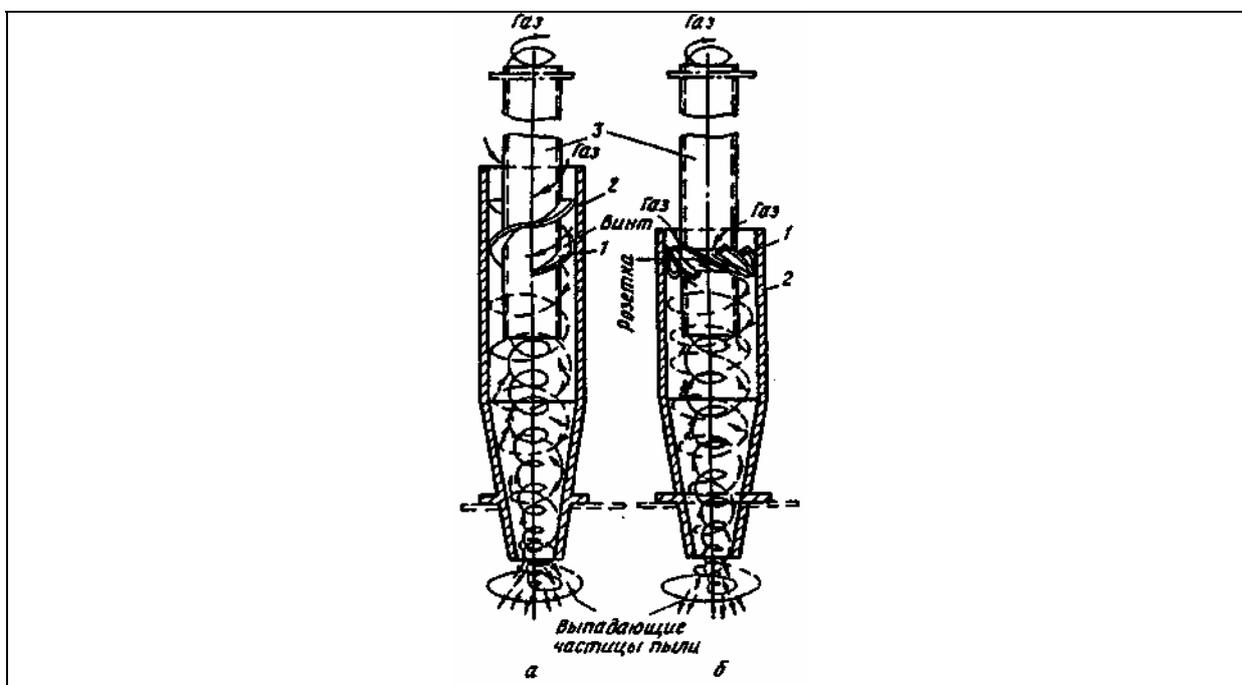
Для унификации циклонов (их в нашей стране применяется несколько десятков типов) в институте охраны труда (Санкт-Петербург) были проведены сравнительные испытания по единой методике. По результатам испытаний циклон ЦН-11, как обладающий наибольшей эффективностью и хорошо приспособленный для групповой установки, был рекомендован для преимущественного применения. Циклоны ЦН-15, СИОТ и ВЦНИИОТ несколько уступают по эффективности циклону ЦН-11, но имеют определенные преимущества в отношении габаритов: циклон СИОТ по высоте на 30 % меньше, чем ЦН-11, но больше его по диаметру на 17%; диаметр циклона ЦН-15 на 10% меньше, чем ЦН-11.

Циклоны больших размеров имеют худшие показатели по очистке, и поэтому часто для достижения необходимой пропускной способности компонуют группы циклонов меньшего диаметра. Компоновка может выполняться прямоугольной или круговой. Группы циклонов обычно имеют общие подводящие и отводящие коллекторы, объединенный пылесборник. Бункеры групп до 4 циклонов могут выполняться круглой и прямоугольной формы, выше 4 - только прямоугольной. Группы рекомендуется компоновать из четного числа циклонов. Общее количест-

во циклонов в группе может быть доведено до 16, однако более 8 циклонов компоновать вместе нежелательно. При большом числе циклонов практически невозможно организовать равномерное распределение газов ко всем аппаратам, что приводит к нерасчетным режимам их работы и существенному снижению степени очистки газа. Ухудшают очистку и перетоки пыли в общем бункере, из-за которых она интенсивнее, чем в одиночных циклонах, захватывается очищенным газом.

*Батарейные циклоны.* При необходимости обеспечения большой пропускной способности используют батарейные циклоны (мультициклоны). Они состоят из циклонных элементов, объединенных в одном корпусе и имеющих общий бункер. Подключение циклонов параллельное от общего коллектора загрязненных газов, отвод очищенного газа также объединен. Циклонные элементы могут быть с возвратным потоком или прямоточные. Прямоточные элементы обладают всеми недостатками аналогичных одиночных циклонов и используются реже возвратно-поточных. В отечественных циклонных элементах подвод загрязненных газов производится коаксиально через завихрители типа "винт" и "розетка" (рис. 4.10, *а* и *б*) или тангенциально через укороченные улитки (рис. 4.10, *в*); четырехзаходный улиточный (рис. 4.10, *г*).

Розеточные завихрители по сравнению с винтовыми обеспечивают более высокую очистку газа, но в большей степени подвержены забиванию пылью. Для пылей третьей группы слипаемости направляющие типа "розетка" не рекомендуются, а пыли четвертой группы (сильнослипающиеся) вообще нежелательно очищать в батарейных циклонах.



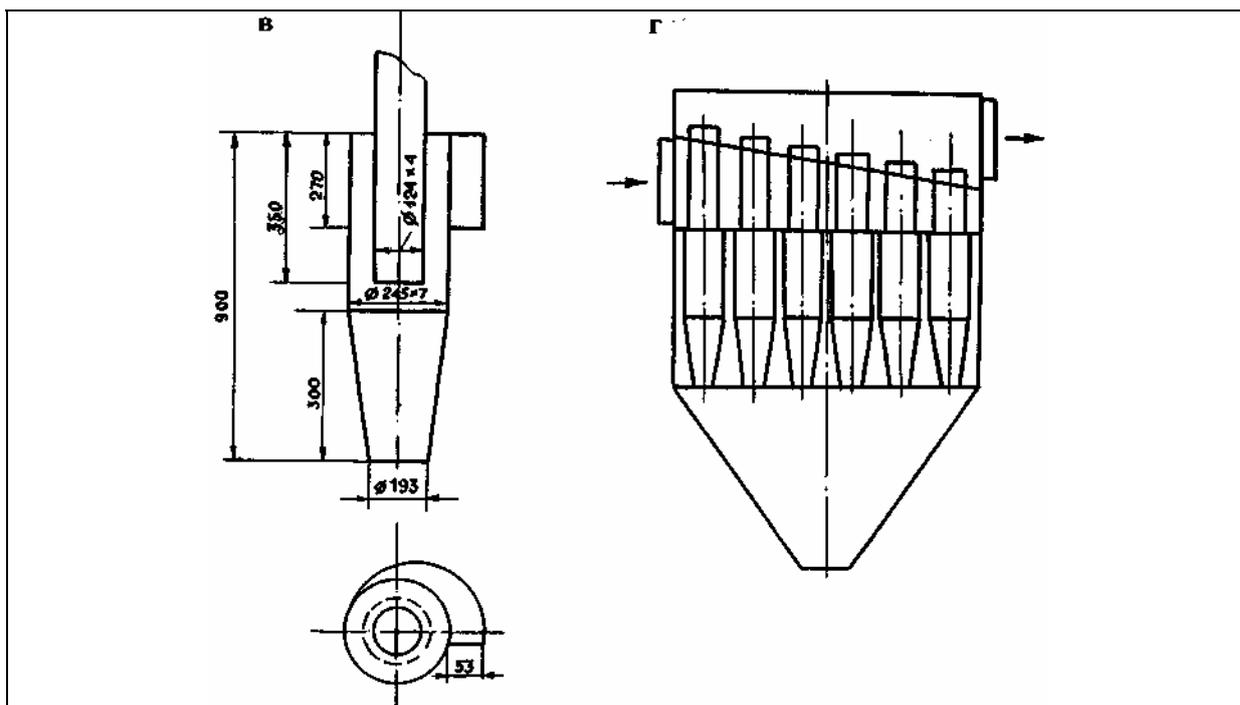


Рис. 4.10. Циклонные элементы батарейного циклона:  
*a* - с направляющим аппаратом типа «винт»; *б* - с направляющим аппаратом типа «розетка»; *в* - вход через укороченные улитки; *г* - четырехзаходный улиточный вход.

Элементы с полуулиточным подводом имеют лучшие показатели очистки за счет герметичности узла ввода газов. В то же время степень очистки газов в батарейных циклонах любых типов ниже, чем в одиночных циклонах. Недостатки, присущие групповой установке циклонов, в батарейных циклонах усугубляются большим числом объединяемых элементов. Технические характеристики некоторых типов батарейных циклонов с возвратно-поточными элементами приведены в таблице 4.6, а с прямоточными - в таблице 4.7.

Таблица 4.6.

Технические характеристики батарейных циклонов с возвратно-поточными элементами.

Тип циклона	Число элементов, шт	Оптимальная скорость газов в элементе, м/с	Пропускная способность м <sup>3</sup> /с	Коэффициент сопротивления	Тип направляющего аппарата элемента	Область применения
ЦБ-254Р	25; 30; 40; 50; 60; 80	4,5	5,5...16	90	розетка	Очистка высокотемпературных газов (до t=400°C) от золы и пыли
БЦ-2	20; 25; 30; 36; 42; 46	4,5	4,2; 5,25; 6,3; 7,55; 9,2; 11,7	65	розетка	Очистка невоспламеняющихся и пожаровзрывоопасных аэрозолей с температурой до 150°C
ПБЦ	24; 36; 48; 92; 116; 140	3,5	3,3; 7; 9,7; 13,9; 20,8; 27,8	120	полуулиточный	

Таблица 4.7..

Технические характеристики батарейных циклонов с прмоточными элементами.

Тип циклона	Количество секций	Количество элементов в одной секции		Пропускная способность м <sup>3</sup> /с	Область применения
		по длине	по ширине		
БЦ 1x8x8...БЦ 1x11x16	1	8...11	8...16	8,5...27,3	Очистка от крупной золы продуктов сгорания парогенераторов производительностью 25...320 т/ч
БЦ 2x5x6...БЦ 2x11x16	2	5...11	6...16	8...54,7	
БЦ 3x8x9	3	8	9	33,5	
БЦ 4x8x9...БЦ 4x11x18	4	8...11	9...18	38,7...121	
БЦУ-М	1...2	10...14	7...24	13...240	

#### 4.2.2. Расчет циклонов

При проектировании циклона выбирают его геометрию, затем определяют размер, фракционную эффективность, перепад давления и потребную для каждого циклона мощность. Эти расчеты основываются на заданных скорости потока газа, составе, температуре, давлении, концентрации пыли, а также на данных о дисперсном составе пыли. Эти данные необходимы,

чтобы сформулировать требования к устройству для вторичного улавливания пыли, если таковое предполагается использовать.

Циклоны обычно выбирают из числа серийных, исходя из производительности по газовому потоку. В дальнейшем проводят расчет критического (минимального) диаметра частиц  $d_{кр}$ , полностью улавливаемых аппаратом, эффективности улавливания пыли  $\eta$  и гидравлического сопротивления циклона  $\Delta P_u$ .

Критический размер частиц может быть найден, к примеру, по следующей зависимости:

$$d_{кр} = 3 \left\{ V_u \mu_z D_u (D_u + b) / [\rho_z (v_{ex}^2)^2] \right\}^{0,5} [1 + ((D_u + b) / 2D_u)^{0,5}], \quad (4.22)$$

где  $V_z$  - объемный расход газа, м<sup>3</sup>/с;  $v_{ex}^2$  - скорость газа на входе в циклон, м/с;  $D_u$ ,  $b$  - характерные размеры циклона, показанные на рис. 4.11.

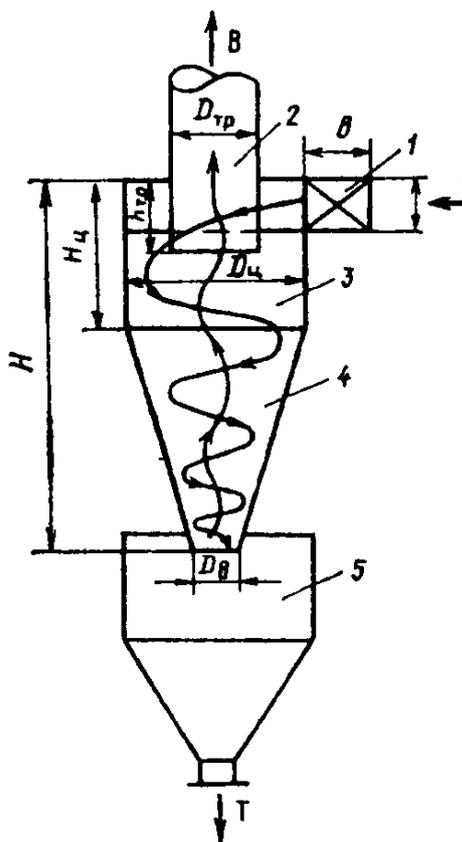


Рис. 4.11. К расчету одиночного циклона:

1 – входной патрубок; 2 – выходная труба; 3 – цилиндрическая камера; 4 – коническая камера; 5 – пылесадительная камера.

Объем циклона  $V_u$  рассчитывают по зависимости на основе геометрических параметров, приведенных на рис. 4.11:

$$V_u = (\pi/4) \{ [(H - H_u)/(D_u - D_s)] [(D_u^3 - D_s^3)/3] + D_u^2 H_u - D_{\text{тр}}^2 h_{\text{тр}} \} \quad (4.23)$$

Эффективность улавливания можно рассчитывать по зависимости:

$$\varepsilon = 1 - \exp[-2(c\psi)^{1/(2n+2)}]. \quad (4.24)$$

Величину  $c$  в зависимости (4.24) рассчитывают по уравнению:

$$c = \frac{\pi D_u^2}{F_{\text{ex}}} \left\{ 2 \left[ 1 - \left( \frac{D_{\text{тр}}}{D_u} \right)^2 \right] \left( \frac{h_{\text{тр}}}{D_u} - \frac{h_1}{2D_u} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{h_{\text{тр}} + l - H_u}{D_u} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[ 1 + \frac{D'_\kappa}{D_u} + \left( \frac{D'_\kappa}{D_u} \right)^2 \right] + \frac{H_u}{D_u} - \left( \frac{D_{\text{тр}}}{D_u} \right)^2 \frac{l}{D_u} - \frac{h_{\text{тр}}}{D_u} \right\} \quad (4.25)$$

где

$$l/D_u = 2,3(D_{\text{тр}}/D_u)(D_u^2/F_{\text{ex}})^{1/3}; \quad (4.26)$$

$$D'_\kappa/D_u = [D_u - (D_u - D_B)(h_{\text{тр}} + l - H_u)/(H - H_u)]/D_u. \quad (4.27)$$

Величина  $\psi$  в уравнении (4.24) есть не что иное, как модифицированный инерционный параметр, характеризующий состояние пылегазовой смеси:

$$\psi = [d_q^2 \rho_q v_{\text{ex}}^2 / 18 \mu_z D_u] (n + 1). \quad (4.28)$$

Значение  $n$  может быть найдено по формуле

$$n = 1 - (1 - 0,016 D_u)^{0,14} (T_z/283)^{0,3}, \quad (4.29)$$

где  $T_z$  - абсолютная температура газов, К.

Гидравлическое сопротивление циклонов можно рассчитать по общепринятой для однофазных потоков формуле:

$$\Delta P_u = \xi_u v_z^2 \rho_z / 2, \quad (4.30)$$

где  $v_z$  - скорость газа в свободном сечении циклона;  $\xi_u$  - коэффициент сопротивления циклона, рассчитанный по скорости  $v_z$  и зависящий от состояния поверхности аппарата, концентрации и свойств частиц, поэтому определяется для каждой конструкции по справочникам.

В циклонных аппаратах формируются сложные потоки, аэродинамические параметры которых (скорости, давления, концентрации частиц загрязнителей и их фракционный состав) непрерывно меняются. Методы теоретического определения коэффициентов очистки из-за значительного расхождения результатов с опытом неприменимы для практического использования. Из эмпирических методов наиболее надежны расчеты по парциальным коэффициентам очистки, найденным экспериментально.

Как показывает опыт, величины парциальных коэффициентов осаждения для многих типов циклонов вполне удовлетворительно аппроксимируются прямой линией в вероятностно-логарифмической системе координат. Это позволя-

ет использовать функции нормального распределения при подсчете полного коэффициента осаждения.

Циклоны выбирают по расчетной производительности аппарата и расчетной скорости газа (воздуха) при входе в циклон с обеспечением необходимой эффективности очистки при минимальных энергетических затратах (т.е. при минимальном гидравлическом сопротивлении).

Общее гидравлическое сопротивление циклона равно

$$\Delta P_{\text{ц}} = \zeta_{\text{вх}} \cdot v_{\text{вх}}^2 \cdot \rho / 2, \quad (4.31)$$

где  $\zeta_{\text{вх}}$  – коэффициент гидравлического сопротивления циклона;  $v_{\text{вх}}$  – скорость потока во входном патрубке, м/с.

Общее гидравлическое сопротивление циклона определяют также по условной скорости газа (воздуха) в циклоне  $v_0$ , отнесенной к площади свободного сечения цилиндрической части циклона

$$\Delta P_{\text{ц}} = \zeta_0 \cdot v_0^2 \cdot \rho / 2, \quad (4.32)$$

где  $\zeta_0$  - коэффициент гидравлического сопротивления циклона, отнесенный к скорости в полном сечении циклона;  $v_0$  – находится обычно в пределах 3...3,5 м/с.

Для большинства циклонных аппаратов коэффициент  $\zeta$  постоянен и не зависит от числа Re.

Значения коэффициентов гидравлического сопротивления ряда циклонов приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8.

Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов.

Тип циклона	Диаметр, мм	Без улитки		С улиткой на выхлопной трубе	
		$\zeta_{\text{ц}}$	$\xi_0$	$\xi_{\text{ц}}$	$\xi_0$
ЦН-11	450	6,1	250	5,2	210
ЦН-15	450	7,6	160	6,7	140
ЦН-15у	450	8,2	170	7,5	100
ЦН-24	450	10,9	80	12,5	90
СИОТ		6,0	-	4,2	-
ВЦНИИОТ	370	9,3	-	10,4	-
ЛИОТ	700	4,2	460	3,7	411
ЦКК		5,2	-	-	-
РЦ		5,0	-	-	-
ЦБР		9,6	-	-	-

В значение коэффициента гидравлического сопротивления циклонов НИИОГаза вносят поправки, учитывающие диаметр циклона и запылен-

ность воздуха (газа) при входе в циклон:  $\zeta = K_1 K_2 \xi_{\text{табл.}}$ , где  $K_1$  - поправочный коэффициент на диаметр циклона (табл. 4.9);  $K_2$  - поправочный коэффициент на запыленность потока (табл.4.10);  $\xi_{\text{табл.}}$  - коэффициент местного сопротивления циклона по табл. 4.8.

Таблица 4.9

Поправочный коэффициент  $K_1$  на диаметр циклона

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

Таблица 4.10

Поправочный коэффициент  $K_2$  на запыленность ( $D = 500$  мм)

Тип циклона	Поправочный коэффициент $K_2$ , при запыленности г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,5
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15у	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Для расчета циклонов необходимы следующие данные:

- расход газа (воздуха), подлежащего очистке при рабочих условиях,  $V_p$ , м<sup>3</sup>/с;
- плотность газа при рабочих условиях  $\rho_r$ , кг/м<sup>3</sup>;
- динамическая вязкость газа при рабочей температуре  $\mu_r$ , Па·с;
- дисперсный состав пыли, который задается двумя параметрами:  $d_m$  и  $\lg\sigma_{\text{ч}}$ :  $d_m$  - такой размер пыли, при котором количество частиц крупнее  $d_m$  равно количеству частиц мельче  $d_m$ ;  $\lg\sigma_{\text{ч}}$  - среднее квадратическое отклонение в функции распределения частиц по размерам;

- запыленность газа  $C_{вх}$ , г/м<sup>3</sup>;
- плотность частиц пыли  $\rho_{ч}$ , кг/м<sup>3</sup>;
- требуемая эффективность очистки газа  $\varepsilon$ , %.

Расчет циклонов выполняют в такой последовательности:

1. Задаются типом циклона. По табл. 4.11. определяют оптимальную скорость газа в аппарате  $v_{опт}$ .

Таблица 4.11.

Параметры, определяющие эффективность циклонов

Параметры	ЦН-24	ЦН-15у	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34М	СК-ЦН-34	СИОТ	ВЦНИИОТ
$d_{50}^T$ , мкм	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13	2,6	8,6
$\lg \sigma_{ч}^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340	0,28	0,32
$v_{опт}$ , м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	11,7	2,0	1,00	4,00

Примечания: 1. Значения  $d_{50}^T$  в таблице, соответствуют следующим условиям работы циклонов: средняя скорость газа в циклоне  $v = 3,5$  м/с; диаметр циклона  $D = 0,6$  м; плотность частиц  $\rho_{ч} = 1930$  кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость газа  $\mu_{г} = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

2. Определяют необходимую площадь сечения циклона, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{V_p}{v_{опт}} \quad (4.33)$$

3. Определяют диаметр циклона, м, задаваясь количеством циклонов  $N$ :

$$D_{ц} = \sqrt{\frac{F}{0,785 \cdot N}} \quad (4.34)$$

Диаметр циклона округляют до стандартной величины.

4. Вычисляют действительную скорость газа в циклоне

$$v = \frac{V_p}{0,785 \cdot D_{ц}^2 \cdot N} \quad (4.35)$$

Скорость газа в циклоне не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15 %.

5. Принимают по табл. 4.8. коэффициент гидравлического сопротивления для данного циклона. Для циклонов НИИОГаз вносят поправки по табл. 4.8-4.10.

6. Определяют потери давления в циклоне, Па, по формуле

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho_{г} v^2}{2} \quad (4.36)$$

Если потери  $\Delta P$  приемлемы, переходят к определению эффективности очистки газа в циклоне.

7. Приняв по табл. 4.11. значения  $d_{50}^T$  и  $\lg \sigma_4^T$  для табличных условий, определяют значения  $d_{50}$  при рабочих условиях (диаметре циклона, скорости потока, плотности пыли, динамической вязкости газа) по уравнению

$$d_{50} = d_{50}^m \left( \frac{D}{D_m} \cdot \frac{\rho_{ч.м}}{\rho_ч} \cdot \frac{\mu}{\mu_m} \cdot \frac{v_m}{v} \right)^{1/2} \quad (4.37)$$

8. Определяют параметр  $x$  по формуле

$$x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{50}}}{\lg^2 \sigma_m + \lg^2 \sigma} \quad (4.38)$$

9. По табл. 4.1. определяют значение  $\Phi(x)$ , которое представляет собой эффективность очистки газа, выраженную в долях единицы. Полученное значение сравнивают с требуемым. Если оно меньше требуемого, принимают другой циклон и рассчитывают его.

Приближенное определение эффективности улавливания пыли в циклоне может быть выполнено с помощью номограммы, рис. 4.12., с учетом типа циклона, его диаметра, гидравлического сопротивления, среднего медианного размера пыли, ее плотности, температуры среды.

Пользование номограммой (рис. 4.12.) показано на примерах:

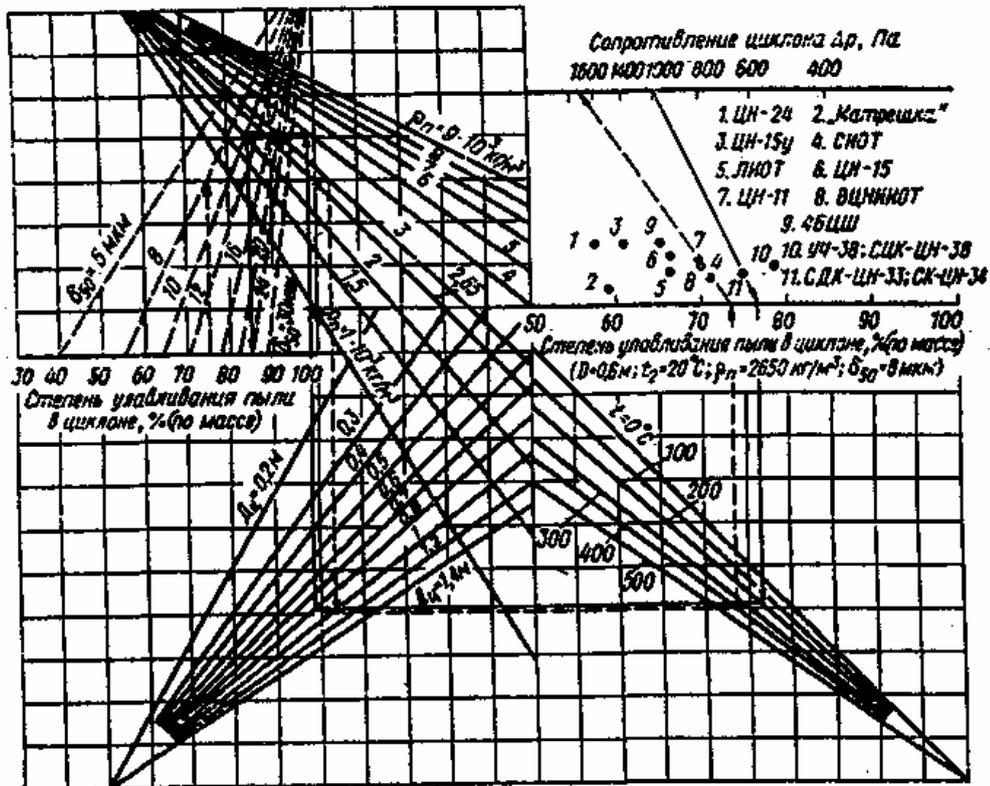


Рис. 4.12. Номограмма для определения эффективности циклона.

**Пример 4.3.** Определить гидравлическое сопротивление циклона СДК-ЦН-33 при следующих условиях: требуемая эффективность аппарата 75 %; средний медианный размер пыли 8 мкм; плотность пыли 3000 кг/м<sup>3</sup>; диаметр циклона 1000 мм; температура очищаемого газа 400°С.

Точку на шкале в верхнем правом углу, выражающую сопротивление циклона, 1000 Па, соединяем с точкой 11, соответствующей циклону, и проводим прямую до пересечения с горизонтальной шкалой в правой средней части номограммы. Из точки пересечения проводим вертикальную линию до пересечения с линией, характеризующей температуру газа. Из точки пересечения - горизонтальную линию до пересечения с линией, выражающей диаметр циклона. Затем - вертикальную линию до пересечения с линией, характеризующей плотность пыли. После этого - горизонтальную линию до пересечения с линией, выражающей средний медианный размер частиц пыли. Вертикальная линия, проведенная из точки пересечения до шкалы эффективности, пересекается с ней в точке, характеризующей эффективность 85 %.

**Пример 4.4.** Определить, каким будет гидравлическое сопротивление циклона ВЦНИИОТ при следующих условиях: требуемая эффективность улавливания  $\varepsilon = 75\%$ ; средний медианный размер пыли  $d_{50}^T = 8$  мкм; плотность пыли  $\rho = 3000$  кг/м<sup>3</sup>; диаметр циклона 1000 мм, температура газа 400°С.

На горизонтальной шкале в левой части номограммы находим точку, соответствующую эффективности 75 %. Из этой точки проводим линию до пересечения с линией  $\delta_{50} = 8$  мкм, затем до пересечения с линией  $\rho = 3000$  кг/м<sup>3</sup>; до линии  $D_{\text{ц}} = 1000$  мм; до линии  $t = 400^\circ\text{C}$ . Из найденной точки поднимаемся до горизонтальной шкалы в правой части номограммы. Найденную точку соединяем с точкой 8, характеризующей циклон ВЦНИИОТ. Продолжая линию до пересечения со шкалой сопротивлений циклона в верхнем правом углу, находим  $\Delta P \approx 1500$  Па.

**Пример 4.5.** Подобрать циклон для следующих условий: расход очищаемого воздуха  $V = 10000$  м<sup>3</sup>/ч, температура воздуха  $t = 40^\circ\text{C}$ , пыль с начальной концентрацией  $C_1 = 10000$  мг/м<sup>3</sup>, плотность пыли  $\rho_{\text{п}} = 2900$  кг/м<sup>3</sup>, медианный диаметр частиц  $d_{50} = 15$  мкм.

При  $t = 40^\circ\text{C}$  плотность воздуха  $\rho = 1,128$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость воздуха  $\mu = 19,3 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

Решение.

1. Примем циклон ЦН-24, скорость воздуха в циклоне  $v_0 = 4,5$  м/с.
2. Площадь сечения циклона

$$F = V/(3600 \cdot v_0) = 10000/(3600 \cdot 4,5) = 0,617 \text{ м}^2.$$

3. Принимаем к установке один циклон, его диаметр согласно расчету:

$$D_{\text{ц}} = 1,13 \cdot F^{1/2} = 1,13 \cdot 0,617^{1/2} = 0,888 \text{ м.}$$

Принимаем циклон с диаметром  $D' = 0,9$  м.

4. Действительная скорость воздуха в циклоне:

$$v_0' = 1,27 \cdot V / (3600 \cdot D'^2) = 1,27 \cdot 10000 / (3600 \cdot 0,9^2) = 4,36 \text{ м/с.}$$

5. Действительная скорость воздуха отклоняется от оптимальной:

$$[(4,5 - 4,36) / 4,5] \cdot 100\% = 3 \text{ \%}.$$

Принимаем, что выброс очищенного воздуха от одиночного циклона производится в атмосферу.

6. Определяем гидравлическое сопротивление циклона.

Коэффициент местного сопротивления циклона равен

$$\zeta_{\text{ц}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \zeta_{0\text{табл}} + K_3, \quad (4.39)$$

где  $K_1$  – коэффициент, зависящий от диаметра циклона (табл. 4.9);  $K_2$  – поправочный коэффициент на запыленность воздуха (табл. 4.10);  $\zeta_{0\text{табл}}$  – коэффициент местного сопротивления циклона, отнесенный к скорости в сечении циклона (табл. 4.8);  $K_3$  – коэффициент на способ компоновки для группы циклонов ЦН (табл. 4.12).

Гидравлическое сопротивление циклона равно:

$$H_{\text{ц}} = \zeta_{\text{ц}} \cdot v_0'^2 \cdot \rho / 2 = 76 \cdot 4,36^2 \cdot 1,28 / 2 = 814 \text{ Па.}$$

**Расчет последовательно установленных циклонов.** В практике эксплуатации очистных устройств иногда применяют последовательную установку циклонов, различающихся по конструкции. Расчеты таких групп циклонов проще всего выполнять по величине парциального проскока через каждый аппарат.

Можно принять следующий порядок расчета:

1. Определяют значения  $d_{50}$  для каждого из установленных циклонов как для самостоятельно работающих по изложенной выше методике.

2. Для каждого из циклонов находят диаметры частиц, улавливаемых на 15,9%, по формуле:

$$\lg d_{15,9} = \lg \sigma + \lg d_{50}. \quad (4.40)$$

3. В вероятностно-логарифмической системе координат наносят точки  $d_{15,9}$  и  $d_{50}$  и проводят через них прямые, получая тем самым линии парциальных проскоков через каждый циклон.

4. Определяют величины парциальных проскоков  $\varepsilon_j$  через все циклоны перемножением парциальных проскоков  $\varepsilon_i$  через каждый циклон:

$$\varepsilon_j = \prod_{i=1}^N \varepsilon_i, \quad (4.41)$$

где  $N$  – количество последовательных циклонов.

5. Полученные значения  $\varepsilon_j$  наносят на график, аппроксимируют точки прямой линией, находят по ней значения  $D_{50}$  и  $\lg \sigma$ .

6. По уравнению (4.38) находят значение  $x$ , а из таблицы 4.1 -  $\Phi(x)$ , которое считают равным полному коэффициенту очистки газов, последовательно прошедших через все циклоны.

Последовательная установка однотипных циклонов не практикуется, хотя имеются сведения об успешном опыте применения и такого способа сепарации.

**Расчет групповых и батарейных циклонов.** Расчеты циклонов, работающих параллельно в групповой установке, выполняют так же, как и индивидуальных. Ухудшение степени очистки из-за неравномерности распределения потоков и перетоков пыли из одного циклона в другой через общий бункер во внимание не принимается.

Расчеты батарейных циклонов выполняют в следующем порядке.

1. Задаются оптимальной скоростью потока  $w_{\text{опт}}$  в пределах 3,5...5 м/с. Нижний предел лимитируется опасностью забивания направляющего аппарата, верхний - интенсификацией абразивного износа элементов и уноса пыли.

2. Рассчитывают расход газа через один элемент  $V_1$ :

$$V_1 = 0,785 w_{\text{опт}} D^2, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.42)$$

Диаметр циклонного элемента  $D$  обычно принимают в пределах 250 мм. Дальнейшее уменьшение диаметра не приводит к увеличению степени очистки.

3. Определяют количество элементов:

$$N = V / V_1. \quad (4.43)$$

4. Принимают типовую конструкцию батарейного циклона с близкой пропускной способностью и числом элементов таким образом, чтобы скорость в отдельном элементе не выходила за пределы оптимальных значений.

5. По уточненной скорости потока в элементе определяют аэродинамическое сопротивление циклона  $\Delta P$ :

$$\Delta P = \zeta \cdot \rho \cdot w^2 / 2, \text{ Па}. \quad (4.44)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta$  принимают по опытным данным.

6. Коэффициент очистки газа в элементе циклона  $\eta_1$  определяют по методике расчета индивидуального циклона, используя опытные значения  $d_{50}$  и  $\lg \sigma$  принятого типа элемента. Коэффициент очистки газа в батарейном циклоне при большом количестве элементов может быть ниже на 20...25%, чем в одиночном элементе, что обязательно следует учитывать при выборе средств очистки.

**Пример 4.6.** Рассчитать степень очистки в циклонном сепараторе продуктов сгорания угля. Характеристика золы:  $d_m = 20$  мкм;  $\sigma = 3,0$ ;  $\rho_ч = 2240$  кг/м<sup>3</sup>; плотность дымовых газов в нормальных условиях  $\rho_0 = 1,31$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая

вязкость в рабочих условиях для газовой смеси  $\mu = 6,55 \cdot 10^{-6}$  Па·с. Расход газоносителя  $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $2,78 \text{ м}^3/\text{с}$ ), зольность  $42 \text{ г}/\text{м}^3$ , температура  $140^\circ\text{C}$ .

Расчеты характеристик осаждения золы в индивидуальном циклоне выполняем в следующем порядке.

1. Задаемся типом циклона. Принимаем к расчету возвратно-поточный циклон типа ЦН-11. По таблице 4.11 принимаем величину оптимальной скорости потока в циклоне  $w_{\text{опт}} = 3,5 \text{ м}/\text{с}$ .

Подсчитываем скорость потока в циклоне с диаметром  $1000 \text{ мм}$  (формула 4.35):

$$v = \frac{2,78}{0,785 \cdot 1^2 \cdot 1} = 3,54 \text{ м}/\text{с}.$$

2. Подбираем значения  $\zeta_{500}$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  для циклона ЦН-11, работающего на выхлоп в атмосферу, по таблицам 4.9, 4.10 и 4.12 и определяем коэффициент гидравлического сопротивления циклона (формула 4.39):

$$\zeta = 10,92 \cdot 250 + 0 = 230.$$

Примечание. Значения  $\zeta$  отнесены к средней скорости газового потока в аппарате и определены для циклонов ЦН, СДК-ЦН, СК-ЦН при  $D = 500 \text{ мм}$ ,  $v = 3 \text{ м}/\text{с}$ .

Таблица 4.12.

Поправочный коэффициент  $K_3$  на способ компоновки группы (для циклонов ЦН)

Характеристика компоновки	$K_3$
Круговая компоновка, нижний подвод очищаемых газов к каждому циклону	60
Прямоугольная компоновка, подвод газов в общую камеру	60
Прямоугольная компоновка, отвод очищенных газов из общей камеры	35
Прямоугольная компоновка, улиточный отвод от каждого циклона	28

3. Вычисляем диаметр циклона (формула 4.34):

$$D_{\text{ц}} = \left( \frac{10000}{3600 \cdot 0,785 \cdot 3,54 \cdot 1} \right)^{1/2} = 1,005 \text{ м}.$$

Принимаем стандартный диаметр циклона  $D = 1000 \text{ мм}$ .

4. Вычисляем плотность дымовых газов в рабочих условиях  $\rho_{\text{г}}$ :

$$\rho_{\text{г}} = 1,31273 / (273 + 140) = 0,87 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Определяем потери давления в циклоне (формула 4.36):

$$\Delta P = 2300,873,54^2 / 2 = 1254 \text{ Па.}$$

Величина потерь давления достаточно высока, однако может быть обеспечена дымососами обычных марок, устанавливаемых в котельных.

5. Из таблицы 4.11. находим значение  $d_{50} = 3,65$  мкм для циклона ЦН-11 диаметром  $D_T = 600$  мм при табличной плотности частиц  $1930 \text{ кг/м}^3$  и вязкости газа-носителя  $22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , а также величину  $\lg \sigma_\eta = 0,352$ .

Пересчитаем значение  $d_{50}$  при рабочих условиях по формуле (4.37):

$$d_{50} = 3,65 \left( \frac{1000}{600} \cdot \frac{1930}{2240} \cdot \frac{6,55 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{3,54} \right) = 2,36 \text{ мкм.}$$

Определяем параметр осаждения:

$$x = \frac{\lg \frac{20}{2,36}}{\sqrt{0,352^2 + \lg^2 3}} = 1,565.$$

6. Находим по таблице 4.1 значение интеграла вероятности  $\Phi(x) = 0,941$  и приравниваем к нему величину коэффициента очистки  $\eta = 94,1 \%$ .

Такой результат позволяет использовать циклон только для предварительной очистки дымовых газов заданного состава, поскольку в этом случае достигается низкое качество очистки, что подтверждается расчетом валового выброса загрязнителя в атмосферу после циклона. При заданных условиях (содержание золы  $42 \text{ г/м}^3$ , количество дымовых газов  $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) суточный выброс золы после циклона составит:

$$M = 0,042 \cdot 10000(1 - 0,941) \cdot 24 = 595 \text{ кг.}$$

7. Попробуем увеличить коэффициент очистки, выбрав циклон с более высоким сопротивлением. Чтобы суточный выброс золы от одного парогенератора не превосходил  $100 \text{ кг}$ , коэффициент очистки должен быть не ниже  $99\%$ . Вычислим требуемую для этого величину коэффициента сопротивления:

$$\zeta = 230 \left( \frac{100 - 94,1}{100 - 99} \right)^2 \cdot \frac{3,54}{3,5} \cdot \frac{1000}{1000} = 8000.$$

Отечественной промышленностью такие циклоны серийно не выпускаются. Их сопротивление на порядок превысило бы возможности тягодутьевых установок типовых котельных. Следовательно, для заданных условий циклон неприемлем как индивидуальное средство очистки и может служить лишь в качестве первой ступени перед аппаратами тонкой очистки.

**Пример 4.7.** Рассчитать степень очистки в батарейном циклоне дымовых газов котлоагрегата из трех котлов при температуре  $170^\circ\text{C}$ , динамической вязкости газа в рабочих условиях  $\mu = 5,63 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$  расходе газа  $V = 130000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и остальных условиях примера 4.6.

Расчеты выполняем в следующем порядке.

1. Принимаем значение оптимальной скорости

$$v_{opt} = 5 \text{ м/с.}$$

2. Определяем расход газа через один циклонный элемент, принимая его диаметр 250 мм:

$$V_1 = 0,785 \cdot 0,25^2 = 0,245 \text{ м}^3/\text{с.}$$

3. Определяем количество элементов:

$$N = 130000 / (3600 \cdot 0,245) = 3,61 / 0,245 = 148 \text{ шт.}$$

4. Выбираем два батарейных циклона типа ЦБ-254Р, составленных из 80 возвратно-поточных элементов с направляющими типа "розетка". При выборе типа циклона, кроме его соответствия по количеству элементов, принималась во внимание и возможность работы при температуре среды выше 150<sup>0</sup>С. Зола, образующаяся при сгорании бурых углей, не слипающаяся, что допускает использование направляющих типа "розетка".

Проверяем скорость потока через 1 элемент:

$$v = 36,1 / (160 \cdot 0,785 \cdot 0,25^2) = 4,6 \text{ м/с,}$$

что близко к оптимальной скорости (4,5 м/с) для выбранного типа батарейного циклона.

5. Принимаем по таблице 4.6 коэффициент гидравлического сопротивления элемента  $\xi = 90$  и вычисляем плотность дымовых газов в рабочих условиях (при 170<sup>0</sup>С)  $\rho_g$ :

$$\rho_g = 1,31 \cdot 273 / (273 + 170) = 0,81 \text{ кг/м}^3.$$

Определяем потери давления в циклоне:

$$\Delta P = 90 \cdot 0,81 \cdot 4,6^2 / 2 = 771 \text{ Па.}$$

Величина потери давления в циклоне приемлема для тягодутьевых устройств типовых котельных.

6. Принимаем по таблице 4.13 значения  $d_{50} = 3,85$  мкм и  $\lg \sigma_\eta = 0,46$  для элемента типа "розетка" с углом наклона завихрителей 25<sup>0</sup>.

Таблица 4.13.

Рабочие характеристики циклонных элементов

Характеристики	Тип элемента				
	"розетка" $\alpha = 25^\circ$ , D=250 мм	"розетка" $\alpha = 30^\circ$ , D=250 мм	"Энергоуголь" D=250 мм	"Энергоуголь" D=230 мм	Прямоточный ЦКТИ D=250 мм
$D_{50}$ , мкм	3,85	5	3	2,85	4
$\lg \sigma_\eta$	0,46	0,46	0,325	0,325	0,325

Примечание: значения  $d_{50}$  получены для элементов типа "розетка" и "Энергоуголь" при скорости потока 4,5 м/с, динамической вязкости газов  $23,7 \cdot 10^{-6}$  Па·с, плотности частиц  $2200 \text{ кг/м}^3$ , а для прямоточных элементов -

при скорости потока 12 м/с, динамической вязкости газа  $18,8 \cdot 10^{-6}$  Па·с плотности частиц  $2200 \text{ кг/м}^3$  и рециркуляции из бункера до 10% от расхода подаваемого газа.

Пересчитываем значение  $d_{50}$  при рабочих условиях:

$$d_{50} = 3,85 \left( \frac{250}{250} \cdot \frac{2200}{2700} \cdot \frac{5,63 \cdot 10^{-6}}{23,7 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{4,5}{4,6} \right) = 1,68 \text{ мкм.}$$

Подсчитываем параметр осаждения  $x$  и находим соответствующее ему значение интеграла вероятности  $\Phi(x)$ :

$$x = \frac{\lg \frac{20}{1,68}}{\sqrt{0,46^2 + \lg^2 3}} = 1,889;$$

$$\Phi(x) = 0,9705.$$

Следовательно, расчетная степень очистки  $\varepsilon = 97,05\%$ .

Учитывая, что результат получен при условии равенства степени очистки газов в батарейном циклоне коэффициенту осаждения одиночного элемента, а реальный пропуск выше в 5...6 раз, следует сделать вывод, что батарейные циклоны могут применяться лишь для предварительной очистки дымовых газов заданного состава.

### 4.3. Вихревые пылеуловители

Вихревые пылеуловители появились в промышленности в 50-х годах, но тем не менее они успели получить значительное распространение. В вихревом пылеуловителе, как и в циклоне, сепарация пыли основана на использовании центробежных сил. Основным их отличием от циклонов является наличие вспомогательного закручивающего газового потока.

Применяют два вида вихревых пылеуловителей: сопловые (рис. 4.13, а) и лопаточные (рис. 4.13, б).

В аппарате того и другого типа запыленный газ поступает в камеру через входной патрубок с завихрителем типа «розетка» и обтекателем. В кольцевом пространстве между корпусом аппарата и входным патрубком расположена подпорная шайба, которая обеспечивает безвозвратный спуск пыли в бункер.

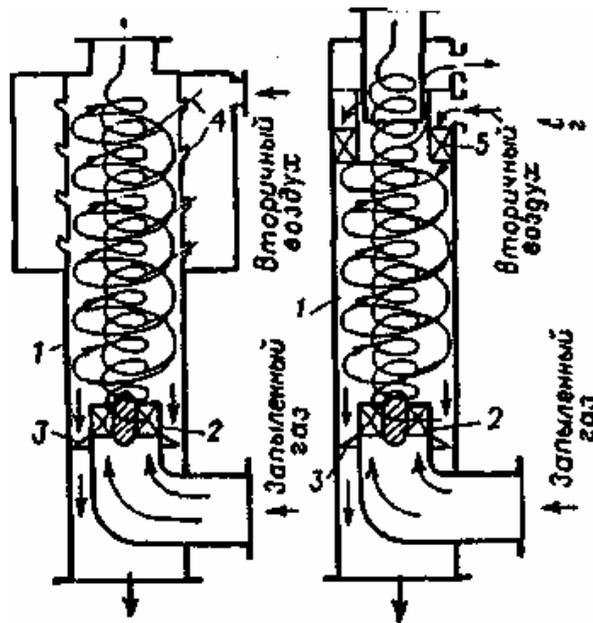


Рис. 4.13. Вихревые пылеуловители соплового (а) и лопаточного (б) типов:  
 1 - камера; 2 - лопаточный завихритель; 3 - подпорная шайба; 4 - сопла;  
 5 - кольцевой лопаточный завихритель.

В вихревом аппарате соплового типа (рис. 4.13, а) запыленный поток закручивается лопаточным завихрителем и движется вверх, подвергаясь при этом воздействию вытекающих из тангенциально расположенных сопел струй вторичного газового потока. Под действием центробежных сил взвешенные в потоке частицы отбрасываются к периферии, а оттуда - в возбуждаемый струями вихревой поток вторичного газа, направляющий их вниз в кольцевое межтрубное пространство. Вторичный обтекания потока очищаемого газа постепенно полностью проникает газовый поток в ходе в него. Обтекатель направляет поток газа к периферии. Пылевые частицы за счет воздействия центробежных сил перемещаются из центральной части потока к периферии.

Далее процесс в аппаратах двух видов несколько отличается. В сопловом аппарате на запыленный поток воздействуют струи вторичного воздуха (газа), выходящие из сопел, расположенных тангенциально. Поток переходит во вращательное движение.

Отброшенные под действием центробежных сил к стенкам аппарата пылевые частицы захватываются спиральным потоком вторичного воздуха (газа) и вместе с ним движутся вниз в бункер. Здесь частицы пыли выделяются из потока, а очищенный воздух (газ) снова поступает на очистку,

Сопла для подачи вторичного воздуха нужно расположить по нисходящей спирали. Оптимальной явилась установка 8 сопел диаметром 11 мм

двумя спиральными рядами под углом наклона  $30^\circ$ . В качестве оптимальной рекомендуется установка лопаток завихрителя под углом  $30^\circ \dots 40^\circ$  при отношении диаметра завихрителя к диаметру аппарата, равном  $0,8 \dots 0,9$ .

Вихревой пылеуловитель лопаточного типа (рис. 3.13, б) отличается тем, что вторичный поток вводится в верхней части аппарата через завихритель. В аппарате лопаточного типа вторичный воздух, отобранный с периферии очищенного потока, подается кольцевым направляющим аппаратом с наклонными лопатками. По основным показателям аппараты лопаточного типа оказались более эффективными: при одинаковом диаметре камеры - 200 мм и производительности  $330 \text{ м}^3/\text{ч}$  гидравлическое сопротивление соплового аппарата составило  $3,7 \cdot 10^3 \text{ Па}$ , эффективность 96,5 %, а лопаточного - соответственно  $2,8 \cdot 10^3 \text{ Па}$  и 98% (при улавливании особо мелкодисперсной пыли).

Применяют следующие способы подведения к вихревому пылеуловителю воздуха, необходимого для закручивания обеспыливаемого потока: из окружающей среды, из очищенного потока, из запыленного потока. Первый вариант целесообразен, если очистке подвергается горячий газ, который необходимо охладить. Применяя второй вариант, можно несколько повысить эффективность очистки, так как для использования в качестве вторичного воздуха отбирают периферийную часть потока очищенного воздуха с наибольшим содержанием остаточной пыли. Третий вариант наиболее экономичен: производительность установки повышается на  $40 \dots 65 \%$  с сохранением эффективности очистки.

Производительность вихревого пылеуловителя по газам можно менять в пределах от 0,5 до 1,15 по отношению к номинальной. Это объясняется решающим влиянием на эффективность очистки параметров вторичного потока, при сохранении которых остается неизменной окружная скорость закручивания потока запыленных газов и соответственно центробежная сила, действующая на частицы пыли.

Вихревой пылеуловитель может применяться для очистки вентиляционных и технологических выбросов от мелкодисперсной пыли в химической, нефтехимической, пищевой, горнорудной и других отраслях промышленности. В вихревых пылеуловителях достигается весьма высокая для аппаратов, основанных на использовании центробежных сил, эффективность очистки – 98...99 % и выше. На эффективность очистки оказывает незначительное влияние изменение нагрузки (в пределах от 50 до 115 %) и содержания пыли в очищаемом воздухе (газе) - от 1 до  $500 \text{ г}/\text{м}^3$ . Аппарат может применяться для очистки газов с температурой до  $700^\circ\text{C}$ . В вихревом пылеуловителе не наблюдается износа внутренних стенок аппарата, что связано с особенностями его воздушного режима. Аппарат более

компактен, чем другие пылеуловители, предназначенные для сухой очистки выбросов.

Степень очистки в вихревых пылеуловителях значительно выше, чем в сухих циклонах, и может достигать значений, характерных для мокрых циклонов. Эффективность вихревых пылеуловителей при очистке воздуха (газа) от ряда пылей и пылевидных материалов, имеющих различный медианный диаметр частиц, характеризуют следующие данные (табл. 4.14).

Таблица 4.14.

Эффективность вихревых пылеуловителей

Пыль или пылевидный материал	Медианный диаметр частиц, мкм	Эффективность пылеулавливания, %
Синтетический порошок	4	98,0
Целлюлоза	6	96,5
Стиральный порошок	10	98,0
Карбонат кальция	11	99,0
Эпоксидная смола	22	98,0
Полиакрилнитрил	32	99,8

За рубежом вихревые пылеуловители изготавливаются на производительность от 330 до 30000 м<sup>3</sup>/ч очищаемого газа (воздуха). Одиночные аппараты при необходимости можно сгруппировать на требуемую производительность. Известны установки с производительностью более 300000 м<sup>3</sup>/ч. Имея высокую эффективность очистки, установки вихревых пылеуловителей успешно конкурируют с электрическими и тканевыми пылеуловителями.

Пылеуловитель выбирают, исходя из расхода запыленного газа, по которому можно рассчитать диаметр аппарата:

$$D_a = (4V_2 / \pi v_2)^{0,5}. \quad (4.45)$$

где  $V_2$  - объемный расход запыленного газа, м<sup>3</sup>/с;  $v_2$  - скорость газа в рабочей зоне пылеуловителя, м/с (рекомендуется принимать в пределах 5...12 м/с).

Критический диаметр частиц, полностью улавливаемых в пылеуловителе, может быть рассчитан по одной из зависимостей:

$$d_{кр} = \{(v_2/H) \ln(D_a/D_{тр}) / [(1/18 \mu_2)(\rho_{т} - \rho_2)\omega^2]\}^{0,5}; \quad (4.46)$$

$$d_{кр} = (3/2\pi\tau)[(\mu_2/\rho_{т})\tau \ln(1 + V_2/V_1)]^{0,5}, \quad (4.47)$$

где  $H$  — высота пылеулавливающей камеры, м;  $D_{тр}$  - диаметр патрубка для подвода запыленного газа, м;  $\omega$  - угловая скорость газового потока в аппа-

рате,  $c^{-1}$ ;  $s$  - число оборотов потока газа в пылеуловителе,  $\tau = 1/2 \pi R_1^2 H / (V_1 + V_2)$  - время пребывания газа в ядре потока, с;  $R_1$  - радиус ядра потока, принимаемый равным радиусу ввода первичного потока, м;  $V_1, V_2$  - объемный расход первичного и вторичного потоков газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Эффективность пылеулавливания (в %) является основным критерием, по которому оценивается работа вихревого пылеуловителя, и определяется как отношение количества уловленной пыли к общему количеству пыли, поступающему в аппарат:

$$\varepsilon = [(c_n - c_k) / c_n] \cdot 100. \quad (4.48)$$

Так как запыленный газ в пылеуловитель может подаваться двумя потоками - через верхний и нижний подводящие патрубки, то общая эффективность очистки будет определяться в зависимости от распределения потоков по вводам:

$$\varepsilon = (V_1 \varepsilon_1 + V_2 \varepsilon_2) / V, \quad (4.49)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - эффективность пылеулавливания в первичном и вторичном потоках газа.

Величины  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  (в %) могут быть рассчитаны по зависимостям:

$$\varepsilon_1 = [(D_{1н}^2 - 4r_{1i}^2) / (D_{1н}^2 - D_{вт}^2)] \cdot 100; \quad (4.50)$$

$$\varepsilon_2 = [(D_a^2 - 4r_{2i}^2) / (D_a^2 - D_{2н}^2)] \cdot 100, \quad (4.51)$$

где  $D_{1н}$  - диаметр ввода первичного потока;  $D_{вт}$  - диаметр втулки аксиального завихрителя;  $r_{1i}, r_{2i}$  - радиус, на котором частица входит в аппарат с потоками газа;  $D_a$  - диаметр аппарата;  $D_{2н}$  - внутренний диаметр вторичного потока.

Гидравлическое сопротивление вихревых пылеуловителей рассчитывают по зависимости, аналогичной применяемой для расчета циклонов:

$$\Delta P = \xi_{пв} v_z^2 \rho_z / 2, \quad (4.52)$$

где  $v_z$  - скорость газа в рабочей зоне аппарата, м/с;  $\xi_{пв}$  - коэффициент гидравлического сопротивления, рассчитываемый по скорости  $v_z$ .

**Пример 4.9.** Определить конструктивные размеры, гидравлическое сопротивление и эффективность очистки пыли в вихревом пылеуловителе при следующих исходных данных:

Производительность по запыленному воздуху, $\text{м}^3/\text{ч}$	2400
Скорость воздуха в рабочей зоне аппарата, м/с	до 10
Температура воздуха, поступающего на очистку, $^{\circ}\text{C}$	95
Плотность частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$	4280
Начальная запыленность воздуха, $\text{кг}/\text{кг}$	0,0167
Давление в аппарате, МПа	0,1

Дисперсный состав пыли:

$d_r$ , мкм	0-5	5-10	10-30	30-50
$\Delta R$ , %	10	80	5	5

Определяем геометрические размеры аппарата. Диаметр вихревого пылеуловителя

$$D = [4V/(\pi w)]^{0,5} = [4 \cdot 2400/(3,14 \cdot 10 \cdot 3600)]^{0,5} = 0,29 \text{ м.}$$

Принимаем диаметр аппарата  $D = 0,3$  м.

Действительная скорость газа в аппарате:

$$v = 4V/(\pi D^2 \cdot 3600) = 4 \cdot 2400/(3,14 \cdot 0,3^2 \cdot 3600) = 9,8 \text{ м/с.}$$

Определяем значения коэффициентов  $\chi_1$  и  $\chi_2$ , задаваясь коэффициентом  $\alpha = F_2/F_1 = 2$  и коэффициентом  $\gamma = v/v_1 = 0,5$  (где  $F_1, F_2$  - проходные сечения патрубков верхнего и нижнего потоков,  $v_1$  - скорость газа в верхнем патрубке):

$$\chi_1 = [\gamma/(1+\alpha)]^{0,5} = [0,5/(1+2)]^{0,5} = 0,408;$$

$$\chi_2 = [1-\alpha\gamma/(1+\alpha)]^{0,5} = [1-2 \cdot 0,5/(1+2)]^{0,5} = 0,801.$$

Диаметр ввода нижнего потока:

$$D_1 = \chi_1 D = 0,408 \cdot 0,3 = 0,12 \text{ м.}$$

Диаметр патрубка вывода очищенного воздуха:

$$D_{\text{вых}} = \chi_2 D = 0,801 \cdot 0,3 = 0,22 \text{ м.}$$

Высота рабочей зоны аппарата:

$$H_{\text{р.з.}} = (2,8 \dots 3,1)D = 3,1 \cdot 0,3 = 0,93 \text{ м.}$$

Примем высоту  $H_{\text{р.з.}} = 1$  м.

Диаметр отбойной шайбы

$$D_{\text{ш}} = (0,9 \dots 0,95)D = 0,93 \cdot 0,3 = 0,28 \text{ м.}$$

Площадь ввода верхнего и нижнего потоков:

$$F_2 = F - F_{\text{вых}} = (\pi/4)(D^2 - D_{\text{вых}}^2) = (\pi/4)(0,3^2 - 0,22^2) = 0,033 \text{ м}^2;$$

$$F_1 = \pi D_1^2/4 = 0,785 \cdot 0,12^2 = 0,0113 \text{ м}^2.$$

Фактическое соотношение величины  $\alpha$ :

$$\alpha = F_2/F_1 = 0,033/0,0113 = 2,9.$$

Так как для промышленных аппаратов значение  $\alpha$  должно быть в пределах 2...4, то коррекцию геометрических размеров аппарата проводить не следует.

Диаметр вытеснителя:

$$d_{\text{выт}} = 0,1D = 0,1 \cdot 0,3 = 0,03 \text{ м.}$$

Лопатки завихрителей нижнего и верхнего потоков рекомендуют установить под углом  $\beta = 30^\circ$  к горизонту.

Рассчитаем потери давления в аппарате.

Конструктивный параметр интенсивности крутки потока:

$$n = (8D_1^2/3\pi)[(D_1^3 - d_{\text{выт}}^3)/(D_1^2 - d_{\text{выт}}^2)]\text{tg}\beta = \\ (80,12^3/33,14)[(0,12^3 - 0,03^3)/(0,12^2 - 0,03^2)]\text{tg}30^\circ = 0,545.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления нижнего потока:

$$\xi_1 = 5,5n + [260 + 4,8(n - 3,8)^2][(V_2/V) - 0,3]^3 = \\ = 5,5 \cdot 0,545 + [260 + 4,8(0,545 - 3,8)^2][(1776/2400) - 0,3]^3 = 29,5.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления верхнего потока

$$\xi_2 = 2,6 + 158(0,6 - V_2/V)^2 = 2,6 + 158(0,6 - 1776/2400)^3 \approx 2,6.$$

Общий коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\xi = \xi_1(1 - V_2/V)^3(F/F_1)^2 + \xi_2(V_2/V)^3(F/F_1)^2 = 29,5(1 - 0,74)^3 \times \\ \times (0,071/0,0113)^2 + 2,6(0,74)^3(0,071/0,033)^2 = 25,3.$$

Гидравлическое сопротивление аппарата

$$\Delta P = \xi \rho v^2/2 = 25,3 \cdot 0,96 \cdot 9,8/2 = 1460 \text{ Па}$$

Рассчитаем эффективность пылеулавливания.

Площадь ввода нижнего потока разбиваем на кольцевые участки с радиусами  $r_{1i} = 0,02; 0,035; 0,055$ .

Значения эмпирических коэффициентов  $a$  и  $b$ , характеризующих аэродинамику аппарата.

$$a = -[5,5(V_2/V_1) + 2,8] = -(5,5 \cdot 2,9 + 2,8) = -18,75;$$

$$b = [5,5(V_2/V_1) + 0,4](1/R) = (5,5 \cdot 2,9 + 0,4)(1/0,15) = 109.$$

Радиус разделения потоков:

$$R_0 = (1 - 0,19V_2/V_1)R = (1 - 0,19 \cdot 2,9) \cdot 0,15 = 0,067 \text{ м.}$$

Рассчитаем поправочный коэффициент для определения минимального диаметра улавливаемых частиц для  $r_{11} = 0,015$  м:

$$K_{11} = \frac{b(r_{1i} - R_0)}{a(a + R_0)(a + br_{1i})} + \frac{1}{a^2} \ln \frac{R_0(a + br_{1i})}{br_{1i}(a + bR_0)} = \\ = \frac{109(0,015 - 0,067)}{-18,75(-18,75 + 109 \cdot 0,067)(-18,75 + 109 \cdot 0,015)} + \\ + \frac{1}{(-18,75)^2} \ln \frac{0,067(-18,75 + 109 \cdot 0,015)}{0,015(-18,75 + 109 \cdot 0,067)} = 6,94 \cdot 10^{-3}.$$

Рассчитаем минимальный диаметр улавливаемых частиц, вылетающих с радиуса  $r_{11} = 0,015$  м:

$$d_{1i} = \frac{7,52 \cdot R^3}{VR_0} \left\{ \frac{\mu V_2 \ln[(R_0/r_{1i})^2(1 + \alpha)K_{11}]}{\rho_r H \ln(1 + \alpha) \ln(R_0/r_{1i})^2} \right\} = \frac{7,52 \cdot 0,15^3}{0,67 \cdot 0,067} \times \\ \times \left\{ \frac{2,1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,49 \ln[0,067/0,015]^2(1 + 2,9)] \cdot 6,94 \cdot 10^{-3}}{4280 \cdot 1,0 \ln(1 + 2,9) \ln(0,067/0,015)^2} \right\}^{0,5} = \\ = 2,94 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Аналогично рассчитываем  $K_{li}$  и  $d_{li}$  для радиусов:  $r_{li} = 0,02$  м;  $r_{li} = 0,035$  м;  $r_{li} = 0,055$  м.

Рассчитываем фракционную эффективность улавливания частиц, поступающих в пылеуловитель с нижним потоком и вылетающих с радиуса  $r_{11} = 0,015$  м:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\phi i} &= [(r_1^2 - r_{li}^2)/(r_1^2 - r_{\text{выт}}^2)] \cdot 100 = \\ &= [(0,06^2 - 0,015^2)/(0,06^2 - 0,015^2)] \cdot 100 = 100 \text{ \%}.\end{aligned}$$

Аналогично проводим расчет для радиусов  $r_{12} = 0,02$  м;  $r_{13} = 0,035$  м;  $r_{14} = 0,055$  м.

Результаты расчетов представлены ниже:

$r_{li}$ , м	$K_{li}$ , м	$d_{li}$ , м	$\varepsilon_{\phi i}$ , %
0,015	$6,94 \cdot 10^{-3}$	$2,94 \cdot 10^{-6}$	100
0,02	$5,68 \cdot 10^{-3}$	$2,18 \cdot 10^{-6}$	94,8
0,035	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-6}$	70,4
0,055	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	17,0

Определяем поправочный коэффициент для расчета минимального диаметра улавливаемых частиц. Ввод верхнего потока разбиваем на кольцевые участки с радиусами  $r_{2i} = 0,11; 0,12, 0,13, 0,14$ .

Для  $r_{2i} = 0,11$

$$\begin{aligned}K_{2i} &= \frac{b(r_{2i} - R_u)}{a(a + bR_u)(a + dr_{2i})} + \frac{1}{a^2} \cdot \ln \frac{R_u(a + br_{2i})}{r_{2i}(a + bR_u)} = \\ &= \frac{109(0,11 - 0,155)}{18,75(-18,75 + 109 \cdot 0,155)(-18,75 + 0,11)} + \\ &+ \frac{1}{(-18,75)^2} \ln \frac{0,155(-18,75 + 109 \cdot 0,11)}{0,11(-18,75 + 109 \cdot 0,155)} = 2,39 \cdot 10^{-2}.\end{aligned}$$

Рассчитываем минимальный диаметр улавливаемых частиц, вылетающих с радиуса  $r_{2i} = 0,11$  м:

$$\begin{aligned}r_{2i} &= \frac{4,95R^3}{V} \sqrt{\frac{\mu V_2 \{R_0 \ln[(R - R_u)/(R - r_{2i})] - 1,15(R - R_0)\} K_{2i}}{\rho_T H(R^2 - R_0^2) R_0 \ln[(R - R_u)/(R - r_{2i})]}} = \\ &= \frac{4,95 \cdot 0,15^3}{0,67} \times \\ &\times \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,49 \{0,067 \ln[(0,15 - 0,14)/(0,15 - 0,11)] - 1,15(0,15 - 0,067)\} \cdot 2,39 \cdot 10^{-2}}{4280 \cdot 1 \cdot (0,15^2 - 0,067^2) \cdot 0,067 \ln[(0,15 - 0,14)/(0,15 - 0,11)]}} = \\ &= 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}.\end{aligned}$$

Аналогично рассчитываем значения  $K_{2i}$  и  $d_{2i}$  для радиусов  $r_{2i} = 0,12; 0,13; 0,14$ .

Определяем фракционную эффективность пылеулавливания частиц, поступающих в пылеуловитель с верхним потоком для  $r_{2i} = 0,11$  м:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi 2i} &= [(R^2 - r_{2i}^2)/(R^2 - r_{\text{вых}}^2)] \cdot 100 = \\ &= [(0,15 - 0,11)/(0,15 - 0,11)] \cdot 100 = 100 \% \end{aligned}$$

Аналогично рассчитываем эффективность пылеулавливания частиц, вылетающих с радиусов  $r_{2i} = 0,12; 0,13; 0,14$  м. Результаты расчетов представлены ниже:

$r_{2i}$ , м	$K_{2i}$ , м	$d_{2i}$ , м	$\varepsilon_{\phi li}$ , %
0,11	$2,39 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	100
0,12	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	77,9
0,13	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$	53,9
0,14	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$	27,9

Анализ полученных данных показывает, что частицы размером более  $3,2 \cdot 10^{-6}$  м полностью улавливаются в пылеуловителе. С целью определения общей эффективности пылеулавливания приведем дополнительный анализ фракции 0...5 мкм. Распределение выглядит следующим образом: 0...2 мкм - 3 %, 2...4 мкм - 3 %, 4...5 мкм - 7 %.

Общая эффективность пылеулавливания аппарата:

- для нижнего потока

$$\varepsilon_1 = \sum_{j=1}^n \eta_{\phi 1j} \Delta R_j = 1 \cdot 0,9 + 0,704 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,03 = 0,951;$$

- для верхнего потока

$$\varepsilon_2 = \sum_{j=1}^n \eta_{\phi 2j} \Delta R_j = 1 \cdot 0,9 + 0,539 \cdot 0,03 + 1 \cdot 0,03 = 0,946;$$

- общая эффективность

$$\varepsilon = [(V_1/V)\eta_1 + (V_2/V)\eta_2] \cdot 100 = (0,26 \cdot 0,951 + 0,74 \cdot 0,946) \cdot 100 = 94,7 \%$$

## 5. Фильтрация аэрозолей

В фильтрационных сепараторах очистка воздуха (газа) от аэрозольных загрязнений (пыли, сажи, капельной влаги) происходит при прохождении загрязненного потока через слой пористого материала. В качестве фильтрующего слоя используют ткани, кокс, гравий и др.

Фильтрация диспергационных и конденсационных аэрозолей в пористой среде обеспечивает высокую степень осаждения взвешенных частиц с

любыми размерами, вплоть до близких к молекулярным. Дисперсная примесь улавливается при огибании потоком аэрозоля препятствий, образованных на его пути структурными элементами пористого слоя.

Процесс фильтрации основан на многих физических явлениях (эффект зацепления, в том числе ситовый эффект, - аэрозольные частицы задерживаются в порах и каналах, имеющих сечение меньше, чем размеры частиц; действие сил инерции - при изменении направления движения запыленного потока частицы отклоняются от этого направления и осаждаются; броуновское движение - в значительной мере определяет перемещение высокодисперсных субмикронных частиц; действие гравитационных сил, электростатических сил - аэрозольные частицы и материал фильтра могут иметь электрические заряды или быть нейтральными).

Существенными для фильтрации считаются следующие механизмы осаждения частиц на препятствиях: касание (зацепление), отсеивание (отсев, ситовой эффект), инерционный захват, гравитационное и диффузионное осаждение, электростатическое взаимодействие. Доля вклада каждого из них может изменяться от 0 до 1 в зависимости от условий, в которых происходит осаждение.

Перечисленные факторы указывают причину приближения частиц к препятствию на расстояние, при котором становится возможным их осаждение, то есть отделение от газовой фазы. Само же отделение происходит в случае удержания частиц на структурном элементе пористой среды силами межмолекулярных (вандерваальсовых, квантовых электрических) или химических связей.

Общим способом взаимодействия частиц с препятствием для всех разновидностей пористых сред является касание, т.е. когда препятствием будут уловлены (захвачены) и удержаны все частицы, которые могут его задеть (коснуться, зацепить). Поэтому частицы, проходящие от препятствия на расстоянии меньше своего радиуса, считаются осажденными за счет касания.

В процессе фильтрации практически всегда происходят отсеивание и инерционный захват частиц. Ситовой эффект определяет степень осаждения частиц, которые по размерам не проходят сквозь поры. Он приобретает одно из определяющих значений после осаждения на структурных элементах фильтра первичного слоя улавливаемых частиц (автослоя), который уменьшает размеры пор и выполняет в дальнейшем функции фильтрующей среды.

Массивные частицы вследствие инерции не могут огибать препятствие вместе с газовым потоком. Сойдя с линии тока, частицы могут столкнуться с препятствием или зацепить его. При фильтрации за счет инерционного захвата осаждаются частицы размером более 1 мкм.

Гравитация, диффузия и электростатические силы оказывают влияние на осаждение частиц только в определенных условиях. Гравитационное осажде-

ние может быть заметно, если в фильтрующей среде возможно образование застойных зон, например, в круглых порах и полостях.

Частицы размером менее 0,1 мкм могут приблизиться к препятствию, совершая хаотичные перемещения (диффундируя) под воздействием броуновского движения молекул. Доля диффузионного осаждения в улавливании более крупных частиц незначительна.

Электростатические силы проявляются при взаимодействии носителей зарядов. Частицы загрязнителей и элементы пористой среды обычно имеют небольшое число зарядов, приобретенных естественным путем (при диспергации компактных объектов, трении движущихся частиц, адсорбции газовых ионов), но сила их взаимодействия невелика. Необходимость учета электростатического взаимодействия возникает только при искусственной зарядке фильтрующего материала и частиц.

Большинство фильтров обладает высокой эффективностью очистки. Фильтры применяют как при высокой, так и при низкой температуре очищаемой среды, при различной концентрации в воздухе взвешенных частиц.

Соответствующим подбором фильтровальных материалов и режима очистки можно достичь требуемой эффективности очистки в фильтре практически во всех необходимых случаях.

Обладая многими положительными качествами, фильтрующие устройства в то же время не лишены недостатков: стоимость очистки в фильтрах выше, чем в большинстве других пылеуловителей, в частности, в циклонах. Это объясняется большей конструктивной сложностью фильтров по сравнению с другими аппаратами, большим расходом электроэнергии. Многие конструкции фильтрационных пылеуловителей более сложны в эксплуатации и требуют квалифицированного обслуживания.

По типу структурных элементов пористого слоя различают волокнистые, тканевые и зернистые фильтры. В волокнистых фильтрах осаждение взвешенных частиц происходит на слоях волокон, удерживаемых конструкциями в виде прямоугольных рам, колец и др.

### **5.1. Волокнистые фильтры**

В волокнистых фильтрах фильтрующий слой образован относительно равномерно распределенными тонкими волокнами фильтрующих материалов. Эти фильтры предназначены для улавливания частиц мелкодисперсной и особо мелкодисперсной пыли при ее концентрации в очищаемом воздухе (газе) в пределах 0,5...5 мг/м<sup>3</sup>.

Волокнистые фильтры могут быть подразделены на тонковолокнистые, глубокие и грубоволокнистые фильтры.

Тонковолокнистые фильтры имеют диаметры волокон менее 5 мкм и используются для улавливания высокодисперсной пыли и других аэрозольных частиц размером 0,05... 0,1 мкм с эффективностью по субмикронным частицам не менее 99 %. В качестве фильтровального материала используется ФП (фильтр Петрянова).

Фильтры с материалом ФП часто используются для улавливания опасных (высокотоксичных, радиоактивных, бактериологически зараженных и др.) аэрозолей с последующим уничтожением или захоронением.

Удельный расход обрабатываемых газов на один квадратный метр поверхности фильтра имеет размерность скорости. Эта величина является характеристикой удельной нагрузки, а не скорости.

Удельная нагрузка  $W_{sf}$  \* на фильтры подобного типа находится в пределах 0,01...0,1 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>с), сопротивление чистых фильтров - в пределах 200...300 Па, отработавших - 700...1500 Па. Фильтры предназначены для длительной работы (от нескольких месяцев до нескольких лет) при невысоком содержании дисперсной примеси (до 0,5 мг/м<sup>3</sup>) с последующей заменой, поскольку регенерация отработанных фильтров невозможна.

Характеристики фильтров тонкой очистки, используемых для обработки технологических газов, приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Характеристики фильтров тонкой очистки

Марка фильтра	Фильтрующая поверхность, м <sup>2</sup>	Максимальная производительность, м <sup>3</sup> /с	Фильтрующий материал	Размеры фильтра, мм	Предел температур, t <sub>max</sub> , °С
ФБ-0,5	0,5	0,02	ФПП-25	235×235×256	60
ФБ-2	2	0,06	"	330×300×390	"
ФБ-10	10	0,285	"	510×510×552	"

Для тонкой очистки газовых выбросов, когда температура очищаемой среды выше 60 °С и в ней находятся вещества, разрушающие материалы ФП (при наличии в обрабатываемых газах веществ, агрессивных по отношению к перхлорвинилу, ацетилцеллюлозе, полиакрилонитрилу) применяют фильтры ПФТС, снаряженные стекловолокном (рис. 5.1). Производительность фильтров 200...1500 м<sup>3</sup>/ч, сопротивление 200...1000 Па.

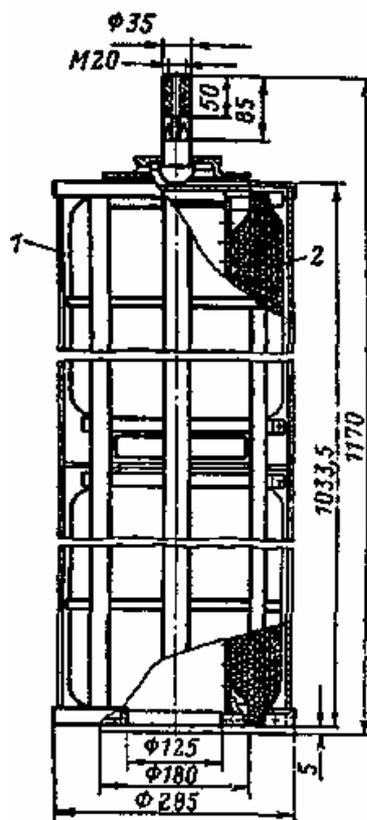


Рис. 5.1. Фильтр ПФТС-500: 1 — каркас; 2 — фильтрующий пакет.

Основного недостатка тонковолокнистых фильтров (короткий срок службы фильтрующего слоя из-за неприменимости регенерации) лишены *глубокие фильтры* (фильтры долговременного пользования). Первый слой фильтра на пути движения очищаемой среды состоит из грубых волокон, последний слой - из тонких. Диаметр грубых волокон 8...19 мкм. Фильтры имеют высоту фильтрующего слоя от 0,3 до 2 м и рассчитаны на работу при давлении до 0,3 МПа. Фильтр применяется в системах стерилизации воздуха в производстве антибиотиков, витаминов и других био- и медицинских препаратов. Они могут применяться и для тонкой очистки некоторых видов технологических газовых выбросов. Фильтр периодически стерилизуют острым паром, затем просушивают сухим воздухом. Они рассчитаны на срок службы 10...20 лет.

*Грубоволокнистые фильтры.* Эти фильтры называют также предфильтрами, так как их устанавливают перед тонковолокнистыми фильтрами для предварительной очистки воздуха (газов). Благодаря этому снижается стоимость очистки, поскольку стоимость грубоволокнистых фильтров почти в 10 раз ниже тонковолокнистых, их легче заменять или регенерировать. Фильтровальный материал предфильтра состоит из смеси волокон диаметром от 1 до 20 мкм. Фильтр марки ФГ показан на рис. 5.2. Грубово-

локнистые фильтры отличаются низким начальным сопротивлением (порядка 100 Па) и высокой пылеемкостью. При удельной нагрузке  $0,05...1 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$  фильтры должны полностью улавливать частицы крупнее 1 мкм.

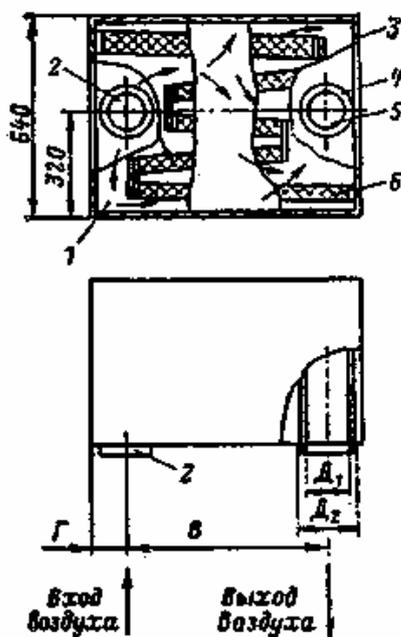


Рис. 5.2. Фильтр грубой очистки ФГ:

- 1 - форкамера; 2 - входное отверстие; 3 - корпус; 4 - выходное отверстие;  
5 - уплотнительное кольцо; 6 - фильтрующий элемент.

## 5.2. Тканевые фильтры

Широко распространены тканевые фильтры. Рукавные тканевые фильтры применяются для очистки больших объемов воздуха (газов) со значительной концентрацией пыли. Фильтрующими элементами в этих аппаратах являются рукава из специальной фильтровальной ткани.

Рукавные фильтры обеспечивают тонкую очистку воздуха от пылевых частиц, имеющих размер менее 1 мкм. Наряду с циклонами рукавные фильтры являются одним из основных видов пылеулавливающего оборудования и широко применяются на предприятиях черной и цветной металлургии, химической промышленности, промышленности строительных материалов, пищевой промышленности, в энергетических установках и др.

Известны всасывающие и нагнетательные рукавные фильтры.

Всасывающие фильтры устанавливаются до вентилятора, т. е. на его всасывающей линии. Нагнетательные рукавные фильтры устанавливаются на нагнетательной линии. Воздух, очищенный в рукавах нагнетательных

фильтров, поступает непосредственно в помещение, где установлены фильтры. Недостатком нагнетательных фильтров, из-за которого не может быть рекомендовано их применение, является поступление воздуха после фильтров в помещение. При наличии неплотностей в рукавах происходит выбивание пыли в помещение. Запыленный воздух проходит через вентилятор, что вызывает более быстрый износ вентилятора, а при перемещении воздуха, содержащего пожаро- и взрывоопасную пыль, это недопустимо.

Недостатком всасывающих фильтров является наличие значительных подсосов воздуха.

В эксплуатации находятся многие конструкции рукавных фильтров, отличающиеся формой корпуса, диаметром и длиной рукавов, видом применяемой фильтровальной ткани, способом регенерации и др.

В настоящее время выпускается и эксплуатируется множество разнообразных конструкций тканевых фильтров. По форме фильтровальных элементов и тканей они могут быть рукавные и плоские (полотняные), по виду опорных устройств - каркасные, рамные и т.д., по наличию корпуса и его форме - цилиндрические, прямоугольные, открытые (бескамерные), по числу секций - одно- и многосекционные. Фильтры могут также различаться по способу регенерации и ряду других признаков.

### **5.2.1. Фильтровальные ткани**

В тканевых фильтрах применяются тканые или валяные материалы, выполняющие роль подложки для фильтрующей среды, которой является первичный слой уловленной пыли. Ткани для фильтров изготавливают из натуральных, или синтетических волокон диаметром 10...30 мкм, скручиваемых в нити диаметром около 0,5 мм. Размеры пор между нитями обычно составляют 100...200 мкм.

Эффективность очистки воздуха (газов) в рукавных пылеуловителях в основном зависит от свойств фильтровальной ткани, из которой изготовлены рукава аппарата, а также от того, в какой мере эти свойства соответствуют свойствам очищаемой среды и взвешенных в ней частиц.

При прохождении запыленного воздуха (газа) через ткань пылевые частицы задерживаются между нитями и ворсом. Сетка образуется нитями основы и утка и дополнительно переплетается ворсинками. Наличие ворса повышает эффективность фильтрации.

Ворс должен быть обращен навстречу запыленному потоку. При движении запыленного потока воздух прижимает ворсинки к ткани. При обратной продувке происходит выпучивание ворсинок, и накопившиеся пылевые частицы удаляются (рис. 5.3). Если же ворс будет направлен в противоположную сторону, то количество задержанной пыли уменьшается,

поскольку происходит выпучивание ворсинок. Затрудняется и регенерация, так как ворсинки прижимаются к нитям и препятствуют отделению пыли от ткани.

Чистая ткань не обеспечивает необходимую эффективность очистки. После регенерации на ткани остается некоторый слой пыли. После нескольких циклов (запыление - регенерация и т. д.) ткань приобретает рабочее состояние.

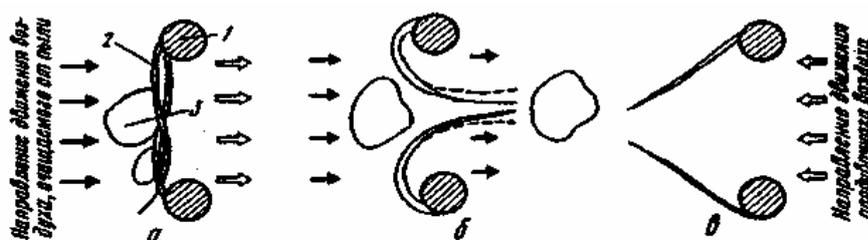


Рис. 5.3. Положение ворса фильтрованной ткани при различных режимах работы: а - рабочее положение ворса: 1 - нить ткани; 2 - нить ворса; 3 - частицы пыли; б - пылевой пробой ткани; в - обратная продувка.

В ней создается остаточный слой пыли, который вместе с тканью образует фильтрующий слой. В процессе фильтрации этот слой увеличивается. После очередной регенерации он уменьшается до остаточной величины. Обычно после нескольких циклов запыления и регенерации сопротивление ткани стабилизируется. Однако в некоторых случаях сопротивление ткани непрерывно растет. Это происходит при застревании в волокнах ткани пылевых частиц, а также при конденсации влаги на поверхности, замасливание ткани и т. д., в результате чего уменьшается сечение пор.

Фильтровальные ткани должны обладать рядом положительных свойств: обеспечивать эффективную очистку, допускать достаточную воздушную нагрузку, обладать необходимой пылеемкостью, способностью к регенерации, высокой долговечностью, стойкостью к истиранию и другим механическим воздействиям, низкой гигроскопичностью, невысокой стоимостью. К ткани могут быть предъявлены дополнительные требования, обусловленные свойствами очищаемой среды: стойкость к определенным химическим веществам и высокой температуре.

Наибольшее распространение получили фильтры с гибкими фильтрующими перегородками.

В фильтровальных тканях применяются следующие виды волокон: естественные волокна животного и растительного происхождения (шерстяные, льняные, хлопчатобумажные, шелковые); искусственные органические (лавсан, нитрон, капрон, хлорин и др.); естественные минеральные

(асбест); искусственные неорганические (стеклоткань, металлоткань). Данные о свойствах волокон приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Основные свойства текстильных волокон, применяемых для фильтровальных тканей

Исходный полимер или сырье	Название волокна	Плотность кг/м <sup>3</sup>	Термостойкость, °С		Химическая стойкость в различных средах	
			при длительном воздействии	при кратковременном воздействии	кислоты	щелочи
1	2	3	4	5	6	7
Целлюлоза	Хлопок	1520	65-85	90-95	ОП	Х
Протеины	Шерсть	1320	95-100	120	У	ОП
Полиамид	Капрон	1140	80-90	120	ОП	ОХ
	Номекс	1380	220	260	У	ОХ
Полиэфир	Лавсан	1380	130	160	Х	У – П
Полиакрилонитрил	Нитрон	1170	120	150	Х – У	У
Полиолефин	Полипропилен	920	85-95	120	ОХ	ОХ
Поливинилхлорид	Хлорин, ацетохлорин, ПВХ	1380-1470	65-70	80-90	ОХ	ОХ
Политетрафторэтилен	Фторопласт, полифен	2300	220	270	ОХ	ОХ
Полиоксидиазол	Оксалон	-	250	270	Х	-
Алюмосиликатное стекло	Стекловолоконное	2540	240	315	Х	У – П

Условные обозначения: ОХ – очень хорошая; Х – хорошая;

Продолжение табл. 5.2

Стойкость в средах		Горючесть	Прочность на разрыв, МПа	Разрывное удлинение, %	Стойкость к истиранию	Влагоемкость, %, при 20°С	
Окисляющие агенты	Растворители					при φ = 65%	при φ = 90÷95 %
8	9	10	11	12	13	14	15
У	ОХ	Да	360-530	7-8	У	7-8,5	24-27
У	Х	Да	130-200	30-40	У	13-15	21,9
У	Х	Да	450-600	18-32	ОХ	3,5-4,5	7-8,5
Х	Х	Нет	400-800	14-17	ОХ	-	-
Х	Х	Да	450-700	15-25	ОХ	0,4	0,5
Х		Да	300-470	15-17	У	0,9-2	4,5-5
Х	Х	Да	440-860	22-25	ОХ	0	0
ОХ	У - Х	Нет	180-230	15-30	ОП— П	0,17-0,3	0,7-0,9
ОХ	ОХ	Нет	350-400	50	У - П	0	0
-	-	-	-	-	Х	-	-
ОХ	ОХ	Нет	1600-3000	3-4	ОП	0,3	-

У - удовлетворительная; П - плохая; ОП - очень плохая.

В основе выбора материала фильтрующей перегородки лежат следующие показатели: термостойкость, химическая стойкость, воздухопроницаемость, разрывная нагрузка, изгибоустойчивость, а также возможная степень очистки.

*Хлопковое волокно* на 94...95 % состоит из целлюлозы, оно гигроскопично. При относительной влажности воздуха 65 % это волокно поглощает до 8 % влаги, при влажности 93...94 % - 25 % влаги. При нагревании до 120...130°С заметных последствий не наблюдается, при более высокой

температуре происходит разрушение волокна. Слабые растворы едкой щелочи (0,5...5%-ные) не оказывают существенного влияния на хлопковое волокно, при более сильных растворах происходит его разрушение. Многие кислоты действуют на хлопковое волокно разрушающе. Так, 1,5%-ная соляная кислота при температуре 90...100°C разрушает волокно в течение 1 ч. Так же действуют азотная и серная кислоты.

В *шерстяных волокнах* содержится 90 % каротина. При нагревании свыше 170°C они разрушаются. В отличие от хлопкового волокна шерстяные волокна менее стойки к кислотам и более стойки к щелочам. Шерстяное волокно при влажности воздуха 65 % интенсивно поглощает до 15,5 % влаги, при влажности 100 % - 34 % влаги. На шерстяную ткань разрушающе действует вода температурой свыше 70°C и серная, соляная, азотная кислоты концентрацией раствора более 5...7 %. При воздействии воздуха температурой 80°C шерсть становится жесткой и ломкой. Механическая прочность шерстяного волокна ниже, чем хлопкового, однако шерстяные волокна более пригодны для изготовления фильтровальных тканей благодаря большей упругости.

Значительными преимуществами обладают фильтровальные ткани из *нитрона* и *лавсана*. Нитроновое волокно характеризуется прочностью, эластичностью, малой гигроскопичностью. При влажности воздуха 65 % оно поглощает из воздуха лишь 1 % влаги. Нитрон неограниченно долго без заметных последствий выдерживает температуру 120...130°C и ограниченное время 180°C. По сравнению с хлопком нитрон в несколько раз устойчивее к кислотам, органическим растворителям. Он устойчив также к действию микроорганизмов, моли. Ткань из нитрона не подвергается усадке.

Лавсановое волокно обладает прочностью, устойчивостью к истиранию и температуре примерно такими же, как нитроновое волокно, однако более устойчиво к химическим реагентам. Лавсановое волокно обладает малой гигроскопичностью, устойчиво к действию микроорганизмов.

Основное достоинство *волокон асбеста*: обладают высокой термостойкостью, не загнивают, стойки по отношению к растворам щелочей и кислот. Прочность невелика.

*Стекловолоконное* обладает высокой термостойкостью, химической стойкостью, выдерживает значительные разрывные нагрузки. Стеклоткани стойки при температуре до 150...300°C. Фильтровальные стеклоткани обычно изготавливают из волокон диаметром 6...8 мкм. Стеклоткани аппретируют - покрывают кремнийорганическим соединением - силиконом и графитируют. Благодаря этому срок службы стеклоткани увеличивается.

Фильтровальные материалы могут быть ткаными и неткаными, а в зависимости от состояния поверхности - ворсованными и гладкими.

При изготовлении нетканых материалов из синтетических волокон сцепление этих волокон усиливают, пробивая слой волокон специальными иглами и получая, таким образом, иглопробивные материалы. Для этих же целей используют склеивающие добавки и др.

Сопротивление незапыленных фильтровальных тканей при нагрузках по газу (воздуху)  $0,3...2 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{мин})$  обычно находится в пределах  $5...40 \text{ Па}$ .

Срок службы фильтровальных тканей в зависимости от условий эксплуатации (вид пыли, ее концентрация, температура, уровень эксплуатации и др.) может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет.

Удельную воздушную нагрузку ткани (скорость фильтрации),  $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  принимают в зависимости от концентрации пыли в очищаемом воздухе (газе), вида ткани (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Рекомендуемые нагрузки на фильтровальные ткани,  $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$

Ткань	Начальная запыленность воздуха (в $\text{г}/\text{м}^3$ )			
	до			
	1	5	10	20
Фильтр-сукно № 2	1	2	3	4
Сукно ЧШ, ткань ЦМ, нитрон, лавсан, хлопчатобумажная	120-150	80-100	60-70	40-50.
Стеклоткань аппретированная	60-90	50-60	40-50	30-50
Фильтр-сукно № 2	5	6	7	8
Сукно ЧШ, ткань ЦМ, нитрон, лавсан, хлопчатобумажная	70-90 50-70		40-50	30-40
Стеклоткань аппретированная	50-60 40-50		30-50	30-40

Примечание. Данные первых четырех граф относятся к крупнодисперсной пыли 2-й и 3-й групп, последних четырех - к мелкодисперсной и очень мелкодисперсной пыли 4-й и 5-й групп.

Многие ткани изготавливают в виде полотен (кусков), из которых шьют рукава. Диаметр рукавов обычно в пределах  $90...450 \text{ мм}$ . Длина  $2,5...10 \text{ м}$ . Отношение длины рукава к его диаметру  $15...20$ .

Величины воздухопроницаемости характеризуют аэродинамические свойства тканей в незапыленном состоянии. По мере запыления сопротивление ткани начинает расти. Если не принимать никаких мер, оно может увеличиваться до величины напора, развиваемого вентилятором. Дальнейшее накопление пыли приведет к уменьшению подачи вентилятора. Часть пыли при повы-

шенных перепадах давления может проникнуть в поры между нитями и "забить" ткань, сделав ее непригодной для фильтрования. Во избежание этого явления фильтры через определенное время эксплуатации подвергают регенерации. Процесс регенерации является неотъемлемой частью технологии фильтрации и разрабатывается в проекте наряду с другими параметрами фильтрации.

### 5.2.2. Рукавные фильтры

Конструктивно гибкая фильтрующая перегородка выполняется в виде рукава, поэтому и фильтры с гибкими фильтрующими перегородками получили название «рукавные».

В нормально работающих рукавных фильтрах концентрация пыли на выходе из аппарата обычно не превышает  $20 \text{ мг/м}^3$ . При использовании высокоэффективных фильтровальных материалов и улавливании волокнистых пылей концентрация на выходе может снижаться до  $1 \text{ мг/м}^3$  и менее.

Общий вид рукавного фильтра показан на рис. 5.4.

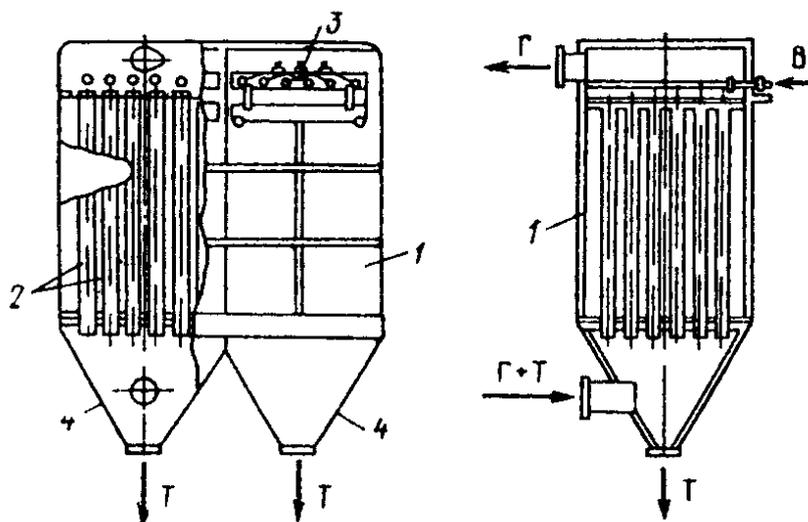


Рис. 5.4. Рукавный фильтр:  
1 – корпус; 2 – фильтрующие рукава; 3 – коллектор сжатого воздуха; 4 – сборник пыли.

Регенерация фильтровальной ткани рукавов производится путем механического или аэродинамического воздействия на фильтровальную ткань с целью разрушения и удаления слоя осевшей пыли.

При выборе способа регенерации имеют значение вид ткани, конструкция аппарата, характеристики пыли и технологического процесса, другие факторы.

Механическое встряхивание может выполняться несколькими способами. Нестойкие на изгиб ткани (например, из стекловолокна) регенерируют быстрым покачиванием из стороны в сторону без изменения натяжения. Фильтры из более эластичных и нетолстых тканей можно отряхивать, придавая материалу волнообразные колебания. Широко используемые для обработки газовых выбросов рукавные фильтры (аппараты с вертикальными фильтрующими элементами в виде тканевых рукавов) встряхивают волнообразным изменением натяжения ткани, поднимая и опуская вверх рукава. Большинство встряхивающих устройств снабжается электроприводом. Иногда встряхивание комбинируют с продувкой тканей.

В ряде рукавных фильтров регенерация фильтровальной ткани осуществляется путем обратной струйной и импульсной продувки рукавов.

Обратной продувкой регенерируют ткани при улавливании легкобрасываемых пылей. Для этого изменяют направление дутья, подавая на регенерацию свежий или очищенный воздух. Последний вариант предпочтительней, так как не увеличивается количество воздуха в системе. Для выполнения обратной продувки фильтр может отключаться посекционно или полностью. Расход воздуха на обратную продувку принимают до 10% от количества очищаемого газа.

При отложениях пыли на внутренней поверхности рукавов осуществляют струйную продувку, подавая воздух из щели кольцевой трубки-каретки, одеваемой на рукав и медленно движущейся вдоль него (рис. 5.5). В полость кольца подается воздух от высоконапорного вентилятора или воздуходувки по гибкому шлангу. Воздух истекает из кольца через щель. Слой осевшей пыли разрушается в результате воздействия на него перемещающегося кольца и выдувания пыли струей воздуха, вытекающей из кольца со скоростью 10...30 м/с. Пыль падает в бункер.

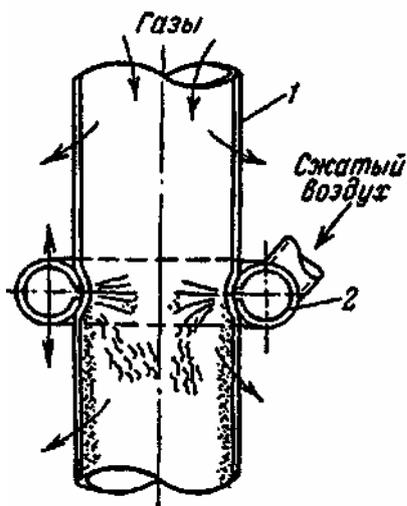


Рис. 5.5. Схема обратной струйной продувки рукавного фильтра:  
 1 - рукав; 2 - кольцо со щелью и патрубком для подвода сжатого воздуха.

Это наиболее мощный способ регенерации, позволяющий выдуть даже частицы пыли, застрявшие в пространстве между нитками. Поэтому фильтры, оборудованные каретками струйной продувки, могут работать с повышенными нагрузками и перепадами давления. Недостатки струйной продувки заключаются в сложности устройства перемещения каретки и истирании ею толстых фильтрующих материалов-войлоков, фетров, для которых в основном струйная продувка и используется.

Другая разновидность выдувания пыли - импульсная регенерация - используется в рукавных фильтрах при схеме подачи загрязненного воздуха снаружи внутрь рукава и отложениях пыли на его внешней поверхности (рис. 5.6). При импульсной продувке струя сжатого воздуха, исходящая из сопла распределительной трубы, подсасывает очищенный газ (воздух) и поступает в рукав. Под воздействием избыточного давления рукав раздувается, происходит разрушение слоя осевшей пыли и ее выпадение в бункер.

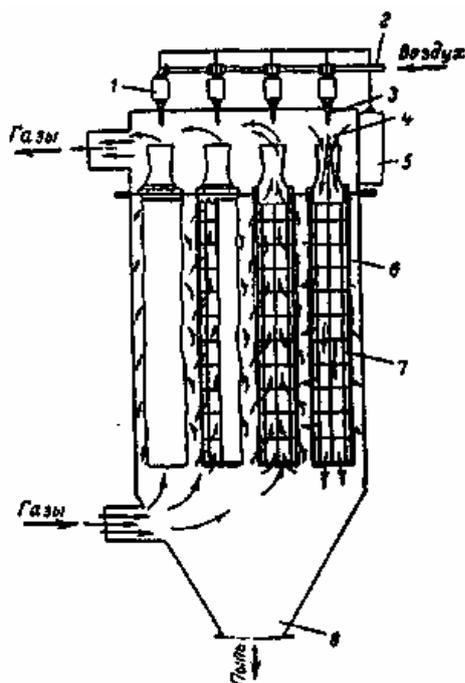


Рис. 5.6. Каркасный рукавный фильтр с импульсной продувкой:  
 1 - соленоидный клапан; 2 - труба для ввода сжатого воздуха; 3 - сопло;  
 4 - струя сжатого воздуха; 5 - прибор автоматического управления  
 регенерацией; 6 - рукав; 7 - каркас; 8 - бункер.

Кроме эффекта продувки пульсирующий поток оказывает и механическое встряхивающее действие. Импульсную регенерацию выполняют без отключения секций. Чтобы не происходило слишком интенсивной регенерации с удалением остаточного равновесного количества пыли (что приведет к большой величине проскока в начальный период работы фильтра после регенерации), варьируют давление сжатого воздуха, продолжительность и частоту импульсов. Продолжительность импульса 0,1...0,2 с, частота - 10 импульсов в минуту, давление сжатого воздуха 500...600 кПа. Расход сжатого воздуха составляет 0,1...0,2 % от количества очищенного газа (воздуха).

Типичным рукавным фильтром с механической регенерацией и обратной продувкой является Г4-БФМ (ФВ). Изготавливаются четыре типоразмера фильтра ФВ: ФВ-30, ФВ-45, ФВ-60, ФВ-90. Фильтрующая поверхность соответственно 30, 45, 60, 90 м<sup>2</sup>.

Технические данные фильтра Г4-БФМ приведены в табл. 5.4. Фильтр изображен на рис. 5.7.

Металлический шкаф фильтра разделен перегородками на секции с фильтрующей поверхностью каждой 15 м<sup>2</sup>. Таким образом, фильтры ФВ-30, ФВ-45, ФВ-60, ФВ-90 имеют соответственно две, три, четыре и шесть секций. В каждой секции расположено 18 рукавов из фильтровальной ткани (3×6 рядов). Рукава подвешены к раме встряхивающего устройства.

В фильтре предусмотрена регенерация рукавов через 3,5 мин продолжительностью 30 с. Регенерация осуществляется встряхиванием и обратной продувкой и производится посекционно.

Таблица 5.4

Характеристика фильтров ФВ (Г4-1БФМ)

Показатели	ФВ-30	ФВ-45	ФВ-60	ФВ-90
Поверхность фильтровальной ткани, м <sup>2</sup>	30	45	60	90
Число секций	2	3	4	6
Число рукавов	36	54	72	108
Материал рукавов	Сукно фильтровальное № 2, нитрон, лавсан НФМ			
Размеры рукавов, мм: диаметр длина	135 2090			

Сопротивление фильтра, Па, не более	450			
Период между встряхиванием секции, мин	3-4			
Мощность электродвигателя, кВт	0,6		1,1	
Частота вращения, об/мин	1350		1400	
Масса, кг	900	1210	1460	2000

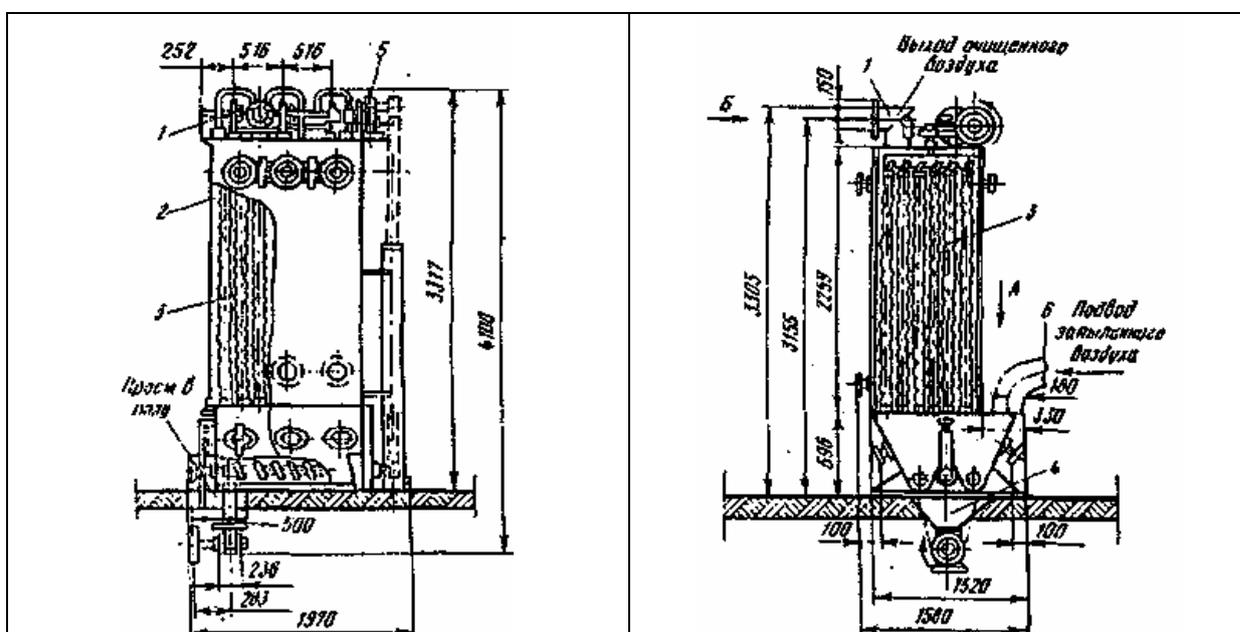


Рис. 5.7. Рукавный фильтр всасывающий типа ФВ (Г4-1БФМ):

- 1 - клапанные коробки для выхода воздуха; 2 - шкаф металлический; 3 - рукава; 4 - сборник пыли; 5 - электродвигатель; 6 - входной патрубок.

Во время регенерации с помощью рычажно-кулачкового механизма закрывается клапан, установленный на выходе очищенного воздуха, и открывается клапан на входе продувочного воздуха снаружи. Наружный воздух поступает в регенерируемую секцию и проходит ткань в направлении, обратном рабочему. При этом слой пыли, осевший на внутренней поверхности ткани, опадает. Одновременно с помощью рычажно-кулачкового механизма происходит встряхивание рукавов. В результате продувки и

встряхивания пыль, осевшая на рукавах, падает в бункер, из которого удаляется шнеком.

Затем регенерируемая секция включается в работу и начинается регенерация следующей секции и т. д.

В настоящее время выпускается и эксплуатируется множество разнообразных конструкций тканевых фильтров. По форме фильтровальных элементов и тканей они могут быть рукавные и плоские (полотняные), по виду опорных устройств - каркасные, рамные и т.д., по наличию корпуса и его форме - цилиндрические, прямоугольные, открытые (бескамерные), по числу секций - одно- и многосекционные. Фильтры могут также различаться по способу регенерации и ряду других признаков. Однозначных или научно обоснованных критериев выбора типа фильтра среди этого многообразия конструкций нет. Рекомендуются, по возможности, использовать фильтры, разработанные для соответствующих отраслей промышленности.

Краткие сведения о характеристиках отечественных конструкций рукавных фильтров, приведенные далее в тексте и таблице 5.5, могут оказать определенную помощь в ориентации среди множества типов аппаратов и быть полезными в качестве первоначальной информации.

Фильтры ФР-6П, ФТ-2М, ФТНС-М предназначены для очистки аспирационного воздуха от волокнистой пыли текстильных и других предприятий легкой промышленности. Регенерация рукавов производится посредством встряхивания ручным или механизированным способами. Удельные газовые нагрузки для фильтров ФР-6П, ФТ-2М и ФТНС-М составляют 0,056, 0,1 и 0,057 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>с) соответственно.

В химической и нефтехимической технологии наибольшее распространение получили рукавные фильтры следующих типов: ФРКИ, ФРКДИ, ФРО, ФРУ, ФР, ГЧ-БФМ, ФРОС. Каждый из типов имеет, как правило, несколько типоразмеров. Из указанной серии можно подобрать фильтр с поверхностью фильтрования от нескольких квадратных метров до нескольких тысяч квадратных метров, способных работать при температурах от нескольких десятков градусов до 500°С.

Фильтры ФР-6П, ФТ-2М, ФТНС-М предназначены для очистки аспирационного воздуха от волокнистой пыли текстильных и других предприятий легкой промышленности. Регенерация рукавов производится посредством встряхивания ручным или механизированным способами. Удельные газовые нагрузки для фильтров ФР-6П, ФТ-2М и ФТНС-М составляют 0,056, 0,1 и 0,057 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>с) соответственно.

Фильтр ЦА-3804 предназначен для улавливания асбестовой пыли. Регенерация рукавов производится механическим встряхиванием.

Фильтры ФРУ разработаны для систем аспирации взрывоопасных химических производств, ФРВ-20 и ФРН-30 - для различных технологических

процессов химических производств, ФР-250 - для аспирационных систем сажевых производств и предприятий по производству минеральных удобрений; СМЦ - для технологических процессов предприятий стройматериалов; РФГ и УРФМ - для предприятий цветной металлургии; Г4-БФМ (ранее - ФВ) - для предприятий пищевой промышленности. Регенерация производится механическим встряхиванием и одновременной обратной посекционной продувкой. Привод систем встряхивания электромеханический, за исключением фильтров УРФМ с пневмоприводом. Удельные газовые нагрузки для фильтров ФРУ составляют:  $0,02 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ , УРФМ –  $(0,012...0,02) \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ , Г4 – БФМ –  $(0,025...0,033) \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ .

Фильтры ФР-518, ФР-650, ФР-5000, ФРДО-6500 со стеклотканями используются для очистки взрывоопасных газовых смесей с температурой до  $240^\circ\text{C}$  от сажи. Их регенерацию осуществляют обратной посекционной продувкой. Удельная нагрузка для фильтров ФР-518 и ФР-650 составляет  $(0,004...0,005) \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ , для фильтра ФР-5000 –  $(0,005...0,006) \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ .

Фильтры ФРО имеют пропускную способность более  $14 \text{ м}^3/\text{с}$  и 3 типоразмера. Фильтры снаряжаются лавсановыми или стеклотканями и предназначены для улавливания пылей и возгонов из газовых выбросов металлургических и машиностроительных предприятий при температурах до  $230^\circ\text{C}$ . Регенерация осуществляется обратной продувкой. Удельная нагрузка для лавсановой ткани  $(0,008...0,015) \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ , для стеклоткани  $(0,005...0,008) \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ .

Фильтры типа РФОСП, РФСП-И, РФСП-1580 разработаны для улавливания возгонов свинца и других тяжелых металлов на предприятиях цветной металлургии при концентрации загрязнителей на входе порядка  $(500... 1000) \text{ мг}/\text{м}^3$ . Конечные концентрации находятся в пределах нескольких  $\text{мг}/\text{м}^3$ . Фильтры снаряжаются двухслойным лавсаном, оборудованы системой струйной продувки и работают с удельными нагрузками до  $0,08 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$  для тонких и  $0,15 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$  для грубых пылей.

Фильтры общего назначения типа ФРКИ разработаны НИИОГаз. Регенерация фильтровальной ткани производится без отключения секций фильтра импульсной верхней подачей внутрь рукавов сжатого воздуха с давлением  $0,3$  или  $0,6 \text{ МПа}$ . Фильтрующий материал - лавсан или войлоки из синтетических волокон. Удельная газовая нагрузка для фильтров ФРКИ составляет  $0,03 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ . Фильтры ФРКН-В и ФРКН-Н-В, предназначенные для улавливания электризующихся пылей, имеют такие же характеристики, как и фильтры ФРКИ соответствующих типоразмеров. Фильтры ФРКДИ отличаются от фильтров ФРКИ большей длиной рукавов. Поэтому в них предусмотрена двухсторонняя импульсная продувка с установкой дополнительных сопел для подачи сжатого воздуха в нижней части каждого рукава. Удельная газовая нагрузка для фильтров ФРДКИ составляет  $0,027 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{с})$ .

Таблица 5.5.

## Технические характеристики рукавных фильтров

Марка фильтра	Площадь фильтрующей поверхности, м <sup>2</sup>	Количество секций, шт	Количество рукавов в секции, шт.	Диаметр рукава, мм	Высота рукава, м	Пропускная способность, м <sup>3</sup> /с/сопротивление, Па
1	2	3	4	5	6	7
ФР-6П	18	1	6	390	2,5	1/500...1000
ФТ-2М	20	1	12	300	1,8	2,5/600
ФТНС-4М	12,4	1	4	386	2,6	-/490
ФТНС-8М	24,8	2	4	386	2,0	-/490
ФТНС-12М	37,2	3	4	386	2,6	-/490
ЦА-3804	4140	3	-	-	-	5,6/-
ФРУ	2,5...50	1...4	14;28;42;56	125	0,9;1;2;2,5	/1500
ФРВ-20	20	2	32	130	1,63	-
ФРН-30	30	2	48	130	1,63	-
ФР-250	281	4	288	135	2,3	-/1000...2000
СМЦ-101А	50;55;110; 115;205	2	36	200	2,2;2,45;4, 9;5,1;9,1	-/1900
РФГ	112;168; 224;280	4;6;8;10	56;84;112; 140	220	3,1	-
УРФМ	1610;2300	14;20	588;840	220	4,063	-/700...1500
Г4-1БФМ	30;45;60; 90	2;3;4;6	36;54;72;108	135	2,09	-/1300
Г4-2БФМ	60;90	4;6	72;108	135	2,09	-/1300
ФР-518 (650)	518 (650)	6	72 (90)	127	3	2,5...3,33/ 1600
ФР-5000	5000	8	504	127	3,09	-/1500...2000
ФРДО-6500	6500	10	212	130	7,85	-
ФРО-2400-1	2400	8	42	200	8	≥14/2000
ФРО-6000-2	6000	10	54	300	10	≥14/2000
ФРО-20300-3	20300	10	216	300	10	≥14/2000
РФОСП	1,9...136	-	2...24	-	1...6	0,17...11,4/ 2000
РФСП-П	370	4	22	300	4,8	-
РФСП-1580	1580	20	24	-	-	до 130/-
ФРКИ-30	30	1	36	135	2	-/2000
ФРКН-В-30	30	1	36	135	2	-/2000
ФРКИ-60	60	2	36	135	2	-/2000
ФРКН-В-60	60	2	36	135	2	-/2000
ФРКИ-90	90	3	36	135	2	-/2000
ФРКН-В-90	90	3	36	135	2	-/2000
ФРКИ-180	180	4	36	135	3	-/2000

1	2	3	4	5	6	7
ФРКИ-360	360	8	36	135	3	-/2000
ФРКДИ-550	550	6	36	135	6	-/2800
ФРКДИ	720	8	36	135	6	-/2800
ФРКДИ-1100	1100	12	36	135	6	-/2800

### 5.3. Зернистые фильтры

Зернистые фильтры используют в газоочистке при невозможности применения тканевых из-за высокой температуры среды. Зернистые фильтры находят все более широкое применение в мире при обработке запыленных выбросов производства строительных материалов, предприятий химической промышленности, при получении редких металлов и в других технологических процессах. Однако по сравнению с тканевыми фильтрами они имеют меньшее распространение. Перспективным направлением можно считать использование зернистых фильтров для одновременного улавливания дисперсных и газообразных примесей газовых выбросов.

Фильтрующий слой в зернистых фильтрах образован зернами сферической или другой формы. Могут использоваться при высоких температурах — до 500...800°C, в условиях воздействия агрессивной среды. Зернистые фильтры распространены значительно меньше, чем тканевые фильтры. Различают насыпные зернистые фильтры, в которых элементы фильтрующего слоя не связаны жестко друг с другом, и жесткие зернистые фильтры, в которых эти элементы прочно связаны между собой путем спекания, прессования, склеивания и образуют прочную неподвижную систему.

Зернистые жесткие фильтры керамические, металлокерамические и другие обладают значительной устойчивостью к высокой температуре, коррозии, механическим нагрузкам. Их недостаток - высокая стоимость, большое гидравлическое сопротивление, трудность регенерации.

В насадке насыпных фильтров используют песок, гравий, шлак, дробленые горные породы, кокс, крошку резины, пластмасс, графита и другие материалы в зависимости от требуемой устойчивости к воздействию температуры, химических веществ.

Как и тканевые фильтры, зернистые насыпные фильтры нуждаются в регенерации. Наибольшее распространение получили следующие способы очистки фильтрующего слоя: импульсной продувкой с периодическим движением слоя; обратной продувкой и ворошением (рыхлением); обратной продувкой и вибровстряхиванием; удалением лобового слоя зерен.

Регенерация осуществляется путем рыхления слоя вручную или механически, промывки водой, замены слоя.

Зернистый фильтр может быть единственной ступенью в установке или первой ступенью перед более эффективным фильтром, например с материалами ФП.

В зернистом гравийном фильтре для улавливания пылей с наличием абразивных частиц и агрессивных газов от дробилок, грохотов, сушилок, мельниц, транспортирующих устройств предприятий по производству цемента, извести, гипса, фосфорных удобрений и др. удельная нагрузка на фильтр составляет 17...50 м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>ч), сопротивление фильтра - в пределах 0,5...1,5 кПа. Эффективность очистки - до 99,8 %.

Характеристики некоторых типов фильтров с зернистым слоем, нашедших применение в промышленности, приведены в таблицах 5.76, 5.7.

Таблица 5.6.

Технические характеристики зернистых фильтров типа ЗФ

Показатели	ЗФ-4М	ЗФ-5М	ЗФ-6М	ЗФ-8	ЗФ-10
Пропускная способность, м/с	2,5...5	5...10	10...40	10...150	10...30
Площадь фильтрации, м <sup>2</sup>	2...4	4...8	8...31	8...120	16...37
Число секций	2...4	2...6	2...8	2...30	6...37
Число фильтрующих слоев	3	3	3	3	2
Продолжительность фильтрации/регенерации, мин	$\frac{40...60}{2...4}$	$\frac{40...60}{2...4}$	$\frac{40...60}{2...4}$	$\frac{40...60}{2...4}$	$\frac{10...15}{0,5...1}$
Максимальная начальная запыленность, г/м <sup>3</sup>	20	20	20	20	5
Наполнитель	Гравий крупностью 3...10 мм				
Максимальная температура, К	673				
Гидравлическое сопротивление, Па	600...1500				
Степень очистки, %	95...99				
Масса, т:					
с наполнителем	2,5...5	4,5...9	9...14	14...180	15...34
без наполнителя	1,5...3	2,5...5	5...10	10...130	10...20
Способ регенерации	Обратная продувка				

Таблица 5.7.

## Техническая характеристика гравийных фильтров циклонов типа ФГЦН

Показатели	ФГЦН-120	ФГЦН-30
Площадь фильтровальной поверхности, м <sup>2</sup>	124	28,8
Удельная нагрузка, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	0,25...0,33	
Гидравлическое сопротивление, Па	1800...2200	1600...2000
Максимальная температура, К	673	
Наполнитель	Гравий крупностью 2...4 мм	
Максимальная начальная запыленность, г/м <sup>3</sup>	30	
Число элементов в аппарате	10	4
Диаметр фильтрующего элемента, мм	2600	2160
Тип циклона	ЦН-15У	ЦН-24
Диаметр циклона, мм	1200	800
Способ регенерации	Ворошение с обратной продувкой	
Привод механизма ворошения	МПО2-26ВК5,5/5,6	МПО2-18ВК6,7
Число оборотов ворошителя, мин <sup>-1</sup>	5,6	6,7
Габариты, мм:		
длина	15300	5930
ширина	7570	4440
высота	11900	8700
Масса, т	68	20

#### 5.4. Расчет и выбор газовых фильтров

Технологические расчеты фильтров сводятся к определению площади фильтровальной перегородки, гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки и аппарата в целом, частоты и продолжительности циклов регенерации фильтрующих элементов.

При выборе конструкции фильтра с гибкой фильтровальной перегородкой приходится учитывать значительное число факторов:

- характеристику очищаемых газов на входе в фильтр: средний объемный расход очищаемых газов в рабочих и нормальных условиях, состав газов и их взрывоопасность, температура и давление, допустимость подсоса, содержание влаги, точка росы;

- свойства пыли: тип пыли (по механизму образования), распределение частиц по размерам, средняя и максимальная массовая концентрации, содержание токсичных веществ, химический состав пыли, ее гигроскопичность и растворимость в воде, склонность к слипанию, взрываемость и горючесть, истинная и насыпная плотности, электризуемость, абразивность, предельно допустимая концентрация;

- характеристику источника выделения пыли: технологические сведения о процессе и применяемом оборудовании, периодичность или непре-

рывность процесса, место отсоса запыленных газов, конструкционные материалы, используемые в технологическом оборудовании;

- характеристику и требования к уловленной пыли: ее ценность, возможность регенерации и возвращения в производство, возможность ее использования в других производствах, способ выгрузки, транспортирования и упаковки;

- основные требования к фильтрам: допускаемое сопротивление фильтра, задаваемая величина выходной концентрации, размер установки, требуемая площадь, место расположения, необходимое вспомогательное оборудование, климатические условия, лимиты по воде, пару, электроэнергии, возможность проведения процесса при аварийной остановке фильтра, капитальные и эксплуатационные затраты.

С учетом физико-химических характеристик выбросов, характера производства, технико-экономических и других факторов обосновывают эффективность очистки газов посредством фильтрации, принимают тип фильтрующей среды и фильтра (волоконный, тканевый, зернистый и др.), подбирают приемлемый материал волокон, ткани или гранул; для тканых и зернистых фильтров определяют также способ регенерации фильтрующего слоя.

Фильтрующая поверхность аппарата определяется из выражения

$$F_{\phi} = [(V_{\text{н}} + V_p) / 60q] + F_p, \quad (5.1)$$

где  $V_{\text{н}}$  - объем газа, поступающего на очистку, м<sup>3</sup>/ч;  $V_p$  - объем газа или воздуха, расходуемого на регенерацию ткани, м<sup>3</sup>/ч;  $q$  - удельная газовая нагрузка фильтровальной перегородки при фильтровании, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·мин);  $F_p$  - фильтрующая поверхность, отключаемая на регенерацию в течение 1 ч, м<sup>2</sup>.

Величину  $F_p$  следует рассчитывать по зависимости

$$F_p = N_c F_c \tau'_p m_p / 3600, \quad (5.2)$$

где  $N_c$  - число секций в фильтре;  $F_c$  - фильтрующая поверхность секции, м<sup>2</sup>;  $\tau'_p$  - время регенерации секции, с;  $m_p$  - число регенерации в течение 1 ч.

Для фильтров с импульсной продувкой в связи с кратковременностью процесса регенерации поверхности фильтра, выключаемой на время регенерации, и объемом газа, расходуемого на обратную продувку, можно пренебречь.

Удельная газовая нагрузка на фильтровальную перегородку для рукавных фильтров колеблется от 0,3 до 6 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·мин). Внутри этого диапазона выбор оптимального значения зависит от многих факторов, к которым в первую очередь относятся свойства улавливаемой пыли, способ регенерации фильтровальных элементов, концентрация пыли в газе, структура фильтровального материала, температура очищаемого газа, требуемая степень очистки.

С достаточной для практических расчетов точностью удельную газовую нагрузку в рукавных фильтрах можно определить из следующего выражения [ $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ ]:

$$q = q_n c_1 c_2 c_3 c_4 c_5, \quad (5.3)$$

где  $q_n$  - нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и ее склонности к агломерации (определяется по данным, приведенным ниже);  $c_1$  - коэффициент, характеризующий особенность регенерации фильтрующих элементов;  $c_2$  - коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку (определяется по рис. 5.8);  $c_3$  - коэффициент, учитывающий влияние дисперсного состава пыли в газе (определяется по данным, приведенным ниже);  $c_4$  - коэффициент, учитывающий влияние температуры газа (определяется по данным, приведенным ниже);  $c_5$  - коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки.

Значения нормативной удельной газовой нагрузки ( $q_n$  в  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ ) для различных материалов приведены ниже:

$q_n = 3,5:$		$q_n = 2,6$	
комбикорм, мука, зерно, жмыховая смесь, пыль кожи, опилки, табак, картонная пыль, поливинилхлорид после распылительной сушилки;		асбест, волокнистые целлюлозные материалы, пыль при выбивке отливок из форм, гипс, известь гашеная, пыль от полировки, соль, песок, пыль пескоструйных аппаратов, тальк, кальцинированная сода;	
$q_n = 2,0$	$q_n = 1,7$	$q_n = 1,7$	
глинозем, цемент, керамические красители, уголь, плавиковый шпат, резина, каолин, известняк, сахар, пыль горных пород;	кокс, летучая зола, металлопорошки, окислы металлов, пластмассы, красители, силикаты, крахмал, смолы сухие, химикаты из нефтесырья;	активированный уголь, технический углерод, моющие средства, порошковое молоко, возгоны цветных и черных металлов.	

Для коэффициента, учитывающего влияние особенностей регенерации фильтровальных элементов, в качестве базового варианта принимается фильтр с импульсной продувкой сжатым воздухом с рукавами из ткани. Для этого аппарата коэффициент  $c_1 = 1$ . При использовании рукавов из нетканых материалов значение коэффициента может увеличиваться на 5...10%. Для фильтров с регенерацией путем обратной продувки и одновременного встряхивания или покачивания рукавов принимается коэффи-

циент  $c_1 = 0,70...0,85$ . Меньшее значение принимается для более плотной ткани. При регенерации путем только обратной продувки  $c_1 = 0,55...0,70$ .

В теории фильтрации принято оперировать с величиной, обратной по смыслу эффективности очистки - проскоком. В практике проектирования установок фильтрации степень очистки не вычисляют, а принимают по информации, приводимой в каталогах заводов-изготовителей. Эту величину также следует рассматривать как оценочную. При эксплуатации фильтра величина проскока не остается постоянной во времени. В цикле между регенерациями проскок падает от максимального до минимального значения по мере накопления пыли на фильтре. В целом за период эксплуатации тканевого фильтра проскок длительное время (несколько тысяч циклов) снижается вследствие увеличения остаточной запыленности ткани, а затем, продержавшись некоторое время на минимальном уровне, начинает расти вследствие износа материала.

Концентрация пыли (коэффициент  $c_2$ ) сказывается на продолжительности цикла фильтрования. При увеличении концентрации увеличивается частота регенерации и удельная нагрузка должна снижаться. Однако зависимость удельной нагрузки от концентрации пыли не является линейной функцией. Наиболее заметно изменение концентрации проявляет себя в интервале концентраций  $1...30 \text{ г/м}^3$  (см. рис. 5.8). При более высоких значениях усиливается влияние коагуляции частиц пыли, и часть ее в виде агломератов падает в бункер до ее осаждения на фильтровальных элементах.

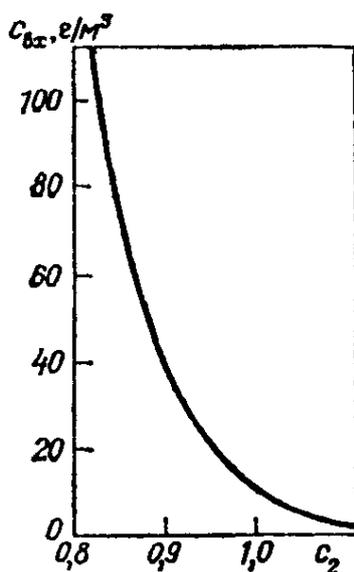


Рис. 5.8. Зависимость коэффициента  $c_2$  от концентрации пыли на входе в фильтр  $c_{ex}$ .

Значения коэффициента  $c_3$ , учитывающего влияние дисперсного состава пыли, приведены ниже ( $d_m$  - медианный размер частиц):

Таблица 5.8.

Зависимость коэффициента  $c_3$  от диаметра частиц

$d_m$ , мкм	<3	3-10	10-50	50-100	>100
$c_3$	0,7-0,9	0,9	1,0	1,1	1,2-1,4

Значения коэффициента  $c_4$ , учитывающего влияние температуры газа, приведены ниже:

Таблица 5.9.

Зависимость коэффициента  $c_4$  от температуры газа

$t$ , °C	20	40	60	80	100	120	140	160
$c_4$	1	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,70

Коэффициент  $c_5$ , учитывающий требования к качеству очистки, оценивается по концентрации пыли в очищенном газе. При концентрации пыли в отходящих газах  $30 \text{ мг/м}^3$   $c_5 = 1$ , а при  $10 \text{ мг/м}^3$  -  $c_5 = 0,95$ .

Энергетические затраты и эффективность процесса очистки непосредственно зависят от сопротивления, создаваемого фильтрующим слоем, т.е. тканью и автослоем (слоем пыли, осевшей на ткани в процессе фильтрации). Составляющую сопротивления, зависящую от структуры ткани, называют остаточным сопротивлением ткани, предполагая, что в порах ткани после регенерации остается определенное (так называемое "равновесное") количество пыли. Однако на величину остатка кроме способа регенерации влияет множество других причин. Поэтому остаточное сопротивление после регенераций может изменяться в достаточно широких пределах.

При подборе рукавных фильтров важным является оценка ожидаемого гидравлического сопротивления, определяющего энергетические затраты на фильтрование. Гидравлическое сопротивление фильтра в Па складывается из сопротивления корпуса  $\Delta P_k$  и сопротивления фильтровальной перегородки  $\Delta P_n$ .

$$\Delta P_\phi = \Delta P_k + \Delta P_n. \quad (5.4)$$

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата определяется величиной местных сопротивлений, возникающих на входе в аппарат и выходе из него и при раздаче потока по фильтровальным элементам. В общем виде гидравлическое сопротивление может быть оценено коэффициентом сопротивления корпуса аппарата, отнесенным к скорости газа во входном патрубке.

$$\xi_{\kappa} = \Delta P_{\kappa}^2 / (v_{\text{вх}}^2 \rho_{\text{г}}), \quad (5.5)$$

где  $v_{\text{вх}}$  - скорость газа во входном патрубке, м/с.

Величина  $\xi_{\kappa}$  при конструировании фильтров обычно принимается равной 1,5...2,0.

Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки включает потери напора за счет самой перегородки ( $\Delta P'_{\text{п}}$ ) и потери за счет осевшей на перегородку пыли ( $\Delta P''_{\text{п}}$ ):

$$\Delta P_{\text{п}} = \Delta P'_{\text{п}} + \Delta P''_{\text{п}}. \quad (5.6)$$

Величину  $\Delta P'_{\text{п}}$  (в Па) удобно вычислять по выражению:

$$\Delta P'_{\text{п}} = K_{\text{п}} \mu w^n, \quad (5.7)$$

где  $K_{\text{п}}$  - коэффициент, характеризующий сопротивление фильтровальной перегородки,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\mu$  - динамическая вязкость газа, Па·с;  $w$  - скорость фильтрования, м/с;  $n$  - показатель степени, зависящий от режима течения газа сквозь перегородку (для ламинарного режима  $n = 1$ , для турбулентного  $n > 1$ ).

Коэффициент  $K_{\text{п}}$  зависит от толщины и проницаемости фильтровальной перегородки, количества пыли, оставшейся на перегородке после регенерации, свойств пыли. Поэтому этот коэффициент определяют экспериментально. Например, для фильтровальных тканей из лавсана, улавливающих цементную или кварцевую пыль с медианным диаметром в пределах 10...20 мкм,  $K_{\text{п}} = (1100...1500) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ , для тех же материалов при улавливании возгонов от сталеплавильных дуговых печей с медианным диаметром частиц 2,5...3,0 мкм  $K_{\text{п}} = (2300...2400) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ . Для более плотных тканей (лавсан, стеклоткань) на тех же пылях коэффициент  $K_{\text{п}}$  увеличивается в 1,2...1,3 раза.

При улавливании пылей с медианным размером частиц меньше 1 мкм коэффициент  $K_{\text{п}}$  увеличивается в несколько раз и для лавсана. При улавливании возгонов кремния с медианным диаметром 0,6 мкм он составляет  $(13000...15000) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ .

Приведенные значения коэффициентов не учитывают возможное увеличение его в присутствии влаги.

Сопротивление в Па, вызванное осевшей на перегородку пылью, рассчитывается по уравнению:

$$\Delta P''_{\text{п}} = \mu \tau c_{\text{вх}} w^2 K_1, \quad (5.8)$$

где  $\tau$  - продолжительность фильтровального цикла, с;  $c_{\text{вх}}$  - концентрация пыли на входе в фильтр,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $K_1$  - параметр сопротивления слоя пыли, м/кг.

Величина  $K_1$  зависит от свойств пыли и порозности слоя пыли на перегородке. Например, для цемента с медианным диаметром частиц  $d_m = 12...20$  мкм  $K_1 = (6,5 - 16) \cdot 10^9$  м/кг, для частиц кремния  $d_m = 0,7$  мкм  $K_1 = 330 \cdot 10^9$  м/кг, для возгонов сталеплавильной дуговой печи  $d_m = 3$  мкм  $K_1 = 80 \cdot 10^9$  м/кг.

Пользуясь формулой (5.8), при известном или заданном гидравлическом сопротивлении слоя пыли можно найти продолжительность фильтровального цикла:

$$\tau = \Delta P_n'' / (\mu c_{\text{вх}} w^2 K_1). \quad (5.9)$$

Следует иметь в виду, что общее сопротивление рукавных фильтров не должно превышать 2800 Па, а сопротивление слоя пыли на перегородке – 600...800 Па.

Ориентировочные значения коэффициентов очистки некоторых видов выбросов в рукавных фильтрах приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10.

Эффективность очистки пыли в рукавных фильтрах

Процесс производства или оборудование, выделяющее дисперсные загрязнители	Содержание частиц менее 5 мкм, мг/м <sup>3</sup>	Конечная концентрация, %	Степень очистки %	Способ регенерации*	Удельная нагрузка, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> с)
1	2	3	4	5	6
Переработка алюминиевой руды	-	3	-	В	0,041
Медная руда:					
погрузка	30	13	98,15	-	-
разгрузка	67	18	86,47	В	0,015
измельчение	2	6	99,75	В	0,015
Переработка железной руды:					
разгрузка вагонеток	-	3	-	-	-
вторичное и третичное дробление	-	3	-	-	-
транспорт тонкоизмельченной руды	-	4	99,69	-	-
Производство известняка:					
первичное измельчение	-	6	-	И	0,028
сита первичного измельчения	-	6	-	И	0,035
транспортировка	-	2	-	И	0,035

Окончание табл. 5.10

1	2	3	4	5	6
обдирка и молотковая мельница	-	2	99,84	В	0,012
вторичное измельчение сита вторичного измельчения	-	4	-	В	0,011
калибровочное сито	-	1	-	И	0,026
Переработка золотой руды, регенерация на складах	-	2	-	В	0,010
Переработка золотой руды, регенерация на складах	12...21	7	95,88	И	0,046
Дробление полевого шпата	-	5	99,92	О	0,015
Размол каолина:					
мельница Раймонда	70	16	99,65	-	-
валковая мельница	70	7	99,60	-	-
Стеклоплавильные печи:					
сода, известняк	-	11	72	О	0,003
сода, свинец, боросиликат	-	9	94,80	В/О	0,003
Производство стекловолокна:					
боросиликатного	-	15	-	В/О	0,004
содоизвестковоборосиликатного	-	59	-	В/О	0,003
Приготовление опок:					
водяная мельница	92	3	99,71	О	0,026
мельница Раймонда	-	2	99,96	О	0,030
Электроплавильная печь	40...65	2	98,67...96,67	В	0,016
Промышленные котельные	-	37	93,15	О	0,025
Отопительные котельные:					
пылевидное сжигание	23...65	2	99,92	О	0,010
механическое слоевое сжигание	5...60	4	99,80	В/О	0,015
Мусоросжигатели	20...65	0,7	99,86	О	0,015

Примечание: В - встряхивание, И - импульсный, О - обратная продувка.

**Пример 5.1.** Подобрать рукавный фильтр для очистки 50 000 м<sup>3</sup>/ч отработанного сушильного агента после сушки известняка в барабанной сушилке. Температура отходящего сушильного агента 80°С, концентрация пыли на выходе из сушилки 1,5 г/м<sup>3</sup>, плотность частиц 1800 кг/м<sup>3</sup>, медианный диаметр частиц пыли 3,5 мкм, содержание пыли после фильтра не должно превышать 15 мг/м<sup>3</sup>. В качестве фильтровальной ткани рекомендуется лавсан. Кроме того, подобрать вентилятор и определить мощность электродвигателя привода, если гидравлическое сопротивление системы без фильтра составляет 1300 Па, КПД вентилятора 0,75, передача к вентилятору - клиноременная.

Определяем удельную газовую нагрузку, пользуясь выражением (5.3):

$$q = q_n c_1 c_2 c_3 c_4 c_5.$$

Принимаем  $q_n = 2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ ,  $c_1 = 1$ ,  $c_3 = 0,9$ ,  $c_4 = 0,78$ ; по графику (рис. 5.8) находим  $c_2 = 1,1$ ; с учетом требований к качеству очистки принимаем  $c_5 = 0,96$ .

Подставив найденные значения коэффициентов в формулу, получаем:

$$q = 2 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot 0,78 \cdot 0,96 = 1,48 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}).$$

Определяем поверхность фильтрования:

$$F = V/(60q) = 50000/(60 \cdot 1,48) = 563 \text{ м}^2.$$

По каталогу для приведенных условий выбираем фильтр ФРКДИ-550 с фактической поверхностью фильтрования 550 м<sup>2</sup>. Некоторое уменьшение поверхности допустимо до тех пор, пока не будет превышена допустимая удельная газовая нагрузка для фильтров данного типа - 1,6 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·мин).

Определяем гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки:

$$\Delta P_n = K_n \mu w^n + K_1 \mu \tau c_{\text{ex}} w^2.$$

Принимаем  $K_n = 2,3 \cdot 10^9 \cdot 1,2 = 2,76 \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$ ,  $K_1 = 80 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$ ,  $w = 0,015 \text{ м/с}$ ,  $\tau^n = 600 \text{ с}$ ,  $\mu = 19 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $n = 1$ . Подставляя эти значения в формулу, получаем:

$$\begin{aligned} \Delta P_n &= 2,76 \cdot 10^9 \cdot 19 \cdot 10^{-6} (0,015)^1 + 80 \cdot 10^9 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \times \\ &\times 600 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} (0,015)^2 = 787 + 308 = 1095 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Определяем гидравлическое сопротивление фильтра в целом:

$$\Delta P_\phi = \Delta P_\kappa + \Delta P_n.$$

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата  $\Delta P_\kappa$  определяем, задавая коэффициентом гидравлического сопротивления корпуса  $\xi_\kappa = 2$ , приведенным к скорости во входном патрубке:

$$v_{\text{ex}} = V/(3600S_{\text{ex}}) = 50000/(3600 \cdot 2,4 \cdot 0,55) = 10,52 \text{ м/с},$$

тогда

$$\Delta P_{\kappa} = \xi_{\kappa} v_{\text{ex}}^2 \rho_c / 2 = 2(10,52)^2 \cdot 0,998 / 2 = 110 \text{ Па}$$

и общее гидравлическое сопротивление фильтра

$$\Delta P_{\phi} = 110 + 1095 = 1205 \text{ Па.} =$$

Исходя из расхода газа и общего сопротивления установки

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_c + \Delta P_{\phi} = 1300 + 1205 = 2505 \text{ Па,}$$

по каталогу и техническим характеристикам выбираем вентилятор высокого давления ВД-15,5 с номинальным расходом  $V_n = 60000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $\Delta P_n = 3000 \text{ Па}$ .

Определяем мощность электродвигателя вентилятора:

$$\begin{aligned} N &= V \Delta P_{\text{общ}} / (3600 \cdot 1000 \eta_g \eta_n) = \\ &= 50000 \cdot 2505 / (3600 \cdot 1000 \cdot 0,75 \cdot 0,92) = 50 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Существует и другая методика расчета рукавного фильтра.

Расчет площади фильтрующей поверхности проводится в следующем порядке.

1. С учетом физико-химических характеристик выбросов, характера производства, технико-экономических и других факторов обосновывают эффективность очистки газов посредством фильтрации, принимают тип фильтрующей среды и фильтра (волоконный, тканевый, зернистый и др.), подбирают приемлемый материал волокон, ткани или гранул; для тканых и зернистых фильтров определяют также способ регенерации фильтрующего слоя.

2. По общему расходу запыленных газов  $V$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , расходу газов  $V_p$  на регенерацию,  $\text{м}^3/\text{с}$ , и удельной нагрузке  $q$   $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , допустимой для выбранного типа фильтра, определяют рабочую площадь фильтрации:

$$F_{\phi} = (V + V_p) / q, \text{ м}^2 \quad (5.10)$$

Количество газов на регенерацию  $V_p$ , принимают по техническим характеристикам выбранных фильтров.

Значение допустимой удельной нагрузки  $q_{\text{доп}}$  (скорости фильтрации) при отсутствии опытных данных подбирают по рекомендациям предприятий - изготовителей, приведенным в каталогах или по другим официальным источникам. Ориентировочные значения  $q_{\text{доп}}$  для рукавных фильтров, составленные на основании обобщения опыта эксплуатации в различных отраслях промышленности, приведены в табл. 5.11.

Таблица 5.11.

## Допустимые удельные нагрузки для рукавных фильтров.

Вид загрязнителя	«Скорость фильтрации» $w$ , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , при способе регенерации		
	В, О	И	О
Сажа, белая сажа (кремнезем), возгоны свинца и цинка, конденсационные аэрозоли, пыль косметических и моющих порошков, молочный порошок, активированный уголь, цементная пыль от печей (в дымовых газах)	0,0075...0,01	0,0133...0,033	0,0055...0,0075
Возгоны железа и ферросплавов, карбидных печей, пыль цемента от мельниц, глинозема, извести, корунда, крахмала, производства удобрений, пластмасс, литейного производства	0,01...0,0125	0,025...0,042	0,0075...0,0092
Летучая зола, пыль каменноугольная, тальковая, пигментов, переработки руд, известняка, каолина, цемента от холодильников, керамических производств, от песко- и дробеструйной очистки, фрита эмалей	0,0117...0,0133	0,033...0,058	0,01...0,015
Пыли асбеста и мелковолокнистых материалов, гипса, перлита, производства резины, шлифовальных процессов, поваренной соли, муки	0,0133...0,0258	0,042...0,075	-
Пыли производства комбикормов, табачных изделий, обработки кожи и дерева, грубые растительные волокна	0,015...0,033	0,042...0,1	-

Примечание: В - встряхивание, И - импульсная продувка, О - обратная продувка.

3. Если регенерацию производят с отключением секций, то к рабочей площади фильтрации  $F$  прибавляют величину площади фильтрации в них и находят общую площадь фильтра:

$$F_{\text{общ}} = F_{\text{ф}} + F_{\text{р}}, \text{м}^2. \quad (5.11)$$

Площадь фильтрации дополнительных секций, отключенных на регенерацию  $F_p$ , м<sup>2</sup>, можно найти из соотношения:

$$F_p = N \cdot F_1 \cdot \tau \cdot n, \text{ м}^2. \quad (5.12)$$

где  $N$  - число секций в фильтре;  $F_1$  - площадь фильтрации одной секции, м;  $\tau$  - время отключения секций на регенерацию, с;  $n$  - количество регенераций за 1 час. При отсутствии технических данных по фильтру для регенерации обратной продувкой или встряхиванием можно оценочно принимать  $n = 1 \dots 10$ ,  $\tau = 2 \dots 20$  с.

Для фильтров с импульсной и струйной продувкой, в которых отключение секций на регенерацию не требуется, общая площадь поверхности фильтрации  $F_{\text{общ}}$  принимается равной рабочей  $F_{\text{ф}}$ .

4. Требуемое количество секций или фильтров находят по соотношению:

$$N = F_{\text{общ}} / f_1, \quad (5.13)$$

где  $f_1$  - площадь одной секции фильтра, м<sup>2</sup>.

Вычисленное значение  $N$  округляют до целого в сторону увеличения.

5. Находят сопротивление фильтровальной установки, потери давления в коммуникациях и выполняют подбор вентилятора.

**Пример 5.2.** Подобрать оборудование для очистки воздуха от пыли. Расход воздуха  $V = 5620$  м<sup>3</sup>/ч. Начальное содержание пыли  $c_1 = 100$  мг/м<sup>3</sup>. При данной начальной концентрации пыли в воздухе можно применить одноступенчатую очистку в рукавном фильтре типа ФВ. Удельную воздушную нагрузку на фильтровальную ткань принимаем согласно данным табл. 5.3:  $q = 120$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

Необходимую поверхность фильтра определяем по формуле:

$$F_{\text{тк}} = V/q = 5620/120 = 46,8 \text{ м}^2.$$

Принимаем к установке фильтр ФВ-60 (поверхность фильтровальной ткани 60 м<sup>2</sup>).

Определяем действительную воздушную нагрузку на фильтровальную ткань

$$q = V/F = 5620/60 = 93,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч}).$$

**Пример 5.3.** Подобрать фильтр для очистки выбросов целлюлозно-бумажного комбината.

Подбор и расчеты фильтра выполняем в следующем порядке.

1. Основываясь на заданном дисперсном составе пыли ( $d_{50} = 1,1$  мкм), можно уверенно предполагать, что из всех рассмотренных ранее способов фильтрация в пористой среде должна обеспечить наиболее высокую степень очистки. Большая начальная запыленность не способствует использованию тонковолокнистых фильтров. В то же время не слишком высокая температура обрабатываемых газов, отсутствие в них острых и раскаленных частиц, хими-

чески агрессивных веществ позволяет остановиться на тканевых фильтрах. По-видимому, было бы целесообразно рассмотреть и вариант совместной очистки от взвешенных частиц и газовых загрязнителей ( $H_2S$ , меркаптаны) посредством сорбции в зернистых фильтрах. Однако можно заранее предполагать, основываясь на характеристиках серийно выпускаемых гравийных фильтров, что степень очистки в них от пылевых загрязнений ниже, чем в тканевых.

По заданной температуре газов  $T = 413$  К подбираем материал фильтра - стеклоткань, которому соответствуют фильтры типа ФР-518, имеющие посекционную регенерацию обратной продувкой. Характеристики фильтра: площадь фильтровальной поверхности  $518$  м<sup>2</sup>, количество секций - 6, количество рукавов в секции - 72, диаметр рукава 127 мм, высота рукава 3 м, габариты фильтра (длина×ширина×высота, м)  $14,5 \times 3,7 \times 9,5$ . Гидравлическое сопротивление в рабочем состоянии 1600 Па, производительность до  $3,33$  м<sup>3</sup>/с, удельная газовая нагрузка до  $0,005$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с).

2. Общий расход запыленных газов  $V = 5$  м<sup>3</sup>/с. Расход газов на регенерацию обратной продувкой примем в количестве 10% от общего расхода обрабатываемых газов.

Для конденсационных аэрозолей и регенерации обратной продувкой значение  $q = 0,0055$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с), что достаточно близко к справочной удельной нагрузке для фильтра ФР-518. Необходимую величину рабочей площади определим из формулы (5.10):

$$F_{\phi} = (5 + 0,5) / 0,005 = 1100 \text{ м}^2.$$

Принимаем к установке 2 фильтра ФР-650 с общей площадью фильтрации  $1300$  м<sup>2</sup>.

3. Определим дополнительную площадь  $F_p$  отключаемых при регенерации секций по формуле (5.12), приняв  $\tau = 5$  с;  $n = 10$ :

$$F_p = 2 \cdot 518 \cdot 5 \cdot 10 / 3600 = 14,4 \text{ м}^2.$$

Общая площадь поверхности фильтрации обеспечивается двумя фильтрами ФР-650:

$$F_{\text{общ}} = 1100 + 14,4 \cong 1115 \text{ м}^2.$$

4. Для определения площади фильтрации одной секции  $f_1$  воспользуемся следующими конструктивными данными: количество рукавов - 90, диаметр рукава 0,127 м, высота 3 м. Определяя площадь фильтрации одного рукава как площадь боковой поверхности цилиндра с одинаковыми диаметром и высотой, получим:

$$f_1 = 3,14 \cdot 0,127 \cdot 3 \cdot 90 = 107,67 \text{ м}^2.$$

Требуемое число секций находим по формуле (5.13):

$$N = 1115 / 107,67 = 10,4.$$

Число секций в 2 фильтрах ФР-650 составляет 12, что превосходит требуемую величину.

5. Принимаем максимально допустимое сопротивление аппарата 1800 Па.

При потере давления в газоходах до 500 Па дутьевым устройством для установки может служить вентилятор типа ВДН -12,5 с подачей 7 м<sup>3</sup>/с, давлением 2580 Па и потребляемой мощностью 22 кВт.

## 6. Мокрое пылеулавливание

Процесс мокрого пылеулавливания основан на контакте запыленного газового потока с жидкостью, которая захватывает взвешенные частицы и уносит их из аппарата в виде шлама. Метод мокрой очистки газов от пыли считается достаточно простым и в то же время весьма эффективным способом обеспыливания.

*Скрубберы* - мокрые пылеуловители с корпусом в виде вертикальной колонны, полые или с насадкой. Через скруббер проходит запыленный поток, и в аппарат вводится жидкость.

В мокрых скрубберах реализуется тесный, бурный контакт газа и жидкости, сопровождающийся генерацией жидких капель. Захват капель газом может привести к уносу жидкости из скруббера в перегреватель, канал, вентилятор, дымовую трубу, а затем в атмосферу. Если не принять мер к отделению захваченной потоком жидкости то это может вызвать коррозию, эрозию, забивание повреждение вентиляторов и выбросы загрязнителя.

Загрязнитель, накапливающийся в жидкости, используемой для орошения скрубберов, следует удалять из системы.

В мокрых скрубберах, предназначенных для пылезолоулавливания, в качестве орошающей жидкости чаще всего применяют воду. Ее расход для разных типов аппаратов может изменяться от 0,1 до 10 м<sup>3</sup> на 1000 м<sup>3</sup> обрабатываемых газов. При совместном решении вопросов пылеулавливания и химической очистки газов выбор орошающей жидкости (абсорбента) определяется условиями процесса абсорбции.

Мокрые пылеуловители имеют ряд преимуществ перед аппаратами других типов:

- отличаются сравнительно небольшой стоимостью и более высокой эффективностью улавливания взвешенных частиц по сравнению с сухими механическими пылеуловителями;

- могут быть применены для очистки газов от частиц размером до 0,1 мкм (например, скрубберы Вентури);

- могут не только успешно конкурировать с такими высокоэффективными пылеуловителями, как рукавные фильтры и электрофильтры, но и

использоваться в тех случаях, когда эти аппараты обычно не применяются, например, при высокой температуре и повышенной влажности газов, при опасности возгорания и взрывов очищенных газов, в качестве теплообменников смешения.

Перечисленные преимущества аппаратов мокрого пылеулавливания позволяют широко их применять в системах пылеочистки сушильных установок, особенно во вторых ступенях очистки.

Однако метод мокрого обеспыливания имеет и ряд недостатков:

- улавливаемый продукт выделяется в виде шлама, что связано с необходимостью обработки сточных вод и, следовательно, с удорожанием процесса очистки;

- при охлаждении очищаемых газов до температуры, близкой к точке росы, а также при механическом уносе из газоочистного аппарата газовым потоком капель жидкости пыль может осаждаться в газопроводах, системах вентиляции, дымососах. Кроме того, брызгоунос приводит к безвозвратным потерям орошающей жидкости;

- в случае очистки агрессивных газов аппаратуру и коммуникации необходимо защищать антикоррозионными материалами.

Сравнение мокрой очистки с сухой показывает, что мокрая очистка имеет меньшую стоимость (без шламового хозяйства) и, как правило, является более эффективной, чем сухая. Большинство мокрых пылеуловителей может применяться для улавливания самых мелких частиц, даже менее 1 мкм.

Мокрые пылеуловители по эффективности и другим показателям не уступают рукавным фильтрам и электрофильтрам, а по ряду показателей их превосходят (возможность очистки газов с высокой температурой и повышенной влажностью, безопасность при улавливании пожаро- и взрывоопасных пылей).

В скрубберах любого типа частицы удаляют по одному или нескольким основным механизмам улавливания: гравитационной седиментации, центробежному осаждению, инерции и касанию, броуновской диффузии, термофорезу, диффузиофорезу, электростатическому осаждению. Скорость осаждения может быть увеличена благодаря укрупнению частиц вследствие агломерации и конденсационного роста.

Распознавание механизмов процессов позволяет создать рациональный метод анализа и предсказать рабочие характеристики скруббера.

Существуют следующие аппаратные механизмы процессов мокрого улавливания аэрозолей:

- 1) улавливание каплями жидкости, двигающимися через газ;
- 2) улавливание цилиндрами (обычно твердыми, типа проволоки);

3) улавливание пленками жидкости (обычно текущими по твердым поверхностям);

4) улавливание в пузырях газа (обычно поднимающихся в жидкости);

5) улавливание при ударе газовых струй о жидкие или твердые поверхности.

В зависимости от способа организации поверхности контакта фаз и принципа действия мокрые пылеуловители можно подразделить на следующие группы:

- полые газопромыватели (полые скрубберы и др.);
- насадочные скрубберы;
- барботажные и пенные аппараты;
- аппараты ударно-инерционного действия (ротоклоны);
- аппараты центробежного действия;
- скоростные аппараты (СПУ Вентури).

Иногда мокрые пылеуловители подразделяются по затратам энергии на низконапорные, средненапорные и высоконапорные. К низконапорным аппаратам относятся пылеуловители, гидравлическое сопротивление которых не превышает 1500 Па (полые газопромыватели, мокрые аппараты центробежного действия). К средненапорным относятся аппараты с гидравлическим сопротивлением от 1500 до 3000 Па (насадочные скрубберы, тарельчатые газопромыватели, газопромыватели с подвижной насадкой). К высоконапорным аппаратам относятся пылеуловители, гидравлическое сопротивление которых выше 3000 Па (аппараты ударно-инерционного действия, механические и скоростные газопромыватели).

Так как основным недостатком мокрых способов обезвреживания является необходимость обработки загрязненных стоков, образовавшихся в процессе очистки газов, то приемлемыми могут быть лишь способы с минимальным водопотреблением. До принятия решения о применении мокрого способа очистки необходимо тщательно проанализировать свойства обрабатываемых выбросов. Необходимо учитывать растворимость, реакционную способность (возможность образования взрывоопасных, коррозионно-активных веществ и вторичных загрязнителей), коррозионную активность компонентов загрязнителя и газа-носителя. Для твердых загрязнителей важны также смачиваемость, схватываемость, слипаемость, для жидких - смачиваемость, плотность, параметры фазовых переходов.

Для общепромышленного применения рекомендованы следующие аппараты: 1) циклоны с водяной пленкой типа ЦВП, скоростные промыватели СИОТ; 2) низконапорные скрубберы Вентури типа КМП; 3) скрубберы Вентури с кольцевым регулируемым сечением; 4) ударно-инерционные пылеуловители; 5) пенные аппараты со стабилизатором пены.

Степень очистки газовых выбросов в мокрых скрубберах может быть найдена только на основе эмпирических сведений по конкретным конструкциям аппаратов. Методы расчетов, нашедшие применение в практике проектирования, основаны на допущении о возможности линейной аппроксимации зависимости степени очистки от диаметра частиц в вероятностно-логарифмической системе координат. Расчеты по вероятностному методу выполняются по той же схеме, что и для аппаратов сухой очистки газов, но имеют еще меньшую сходимость.

Использование метода диаметра отсекаания для предсказания рабочих характеристик скруббера основано на представлении о том, что единственным и наиболее важным параметром, определяющим и трудность удаления частиц из газа и рабочие характеристики скруббера, является диаметр частиц, эффективность улавливания которых составляет 50 %, т. е. диаметр отсекаания  $d_{50}$ . При анализе диапазона размеров общая эффективность улавливания устройства зависит от доли каждой фракции и от эффективности улавливания частиц каждого размера.

Проскок для устройств многих типов, улавливание в которых происходит по инерционному механизму, может быть выражен так:

$$\Pi_d = \exp(-A_e d_i^{B_e}) = 1 - \varepsilon, \quad (6.1)$$

где  $A_e$  - константа;  $d_i$  - размер частиц  $i$ -й фракции;  $B_e$  - константа;  $\varepsilon$  - эффективность, доля.

Иногда расчеты выполняют по так называемому "энергетическому" методу, исходящему из предположения, что количество энергии, необходимое для улавливания частиц загрязнителя, пропорционально степени очистки выбросов независимо от типа очистного устройства.

В энергетических методах расчета предполагается, что зависимость фракционных коэффициентов захвата от энергозатрат  $A$  можно выразить логарифмически нормальным законом и аппроксимировать график зависимости  $\varepsilon = f(A)$  в вероятностно-логарифмической системе координат прямой (или близкой к прямой) линией.

Полному коэффициенту осаждения частиц в аппаратах придается вид экспоненциальной функции энергозатрат:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-B \cdot A^k), \quad (6.2)$$

где  $A$  - удельные энергозатраты на осаждение частиц загрязнителя, Дж/м<sup>3</sup>;  $B$  и  $k$  - эмпирические величины.

Степень очистки связывают с числом единиц переноса (параметром, характеризующим процессы в массообменных аппаратах) следующим соотношением:

$$N = \ln(1 - \varepsilon_{общ})^{-1}. \quad (6.3)$$

В табл. 6.1 приведены числа единиц переноса для некоторых значений коэффициентов очистки, вычисленные по соотношению (6.3).

Таблица 6.1.

Зависимость числа единиц переноса  $N$  от требуемой степени очистки газов  $\varepsilon$  %.

$\eta, \%$	$N$						
90	2,303	99,0	4,605	99,90	6,908	99,990	9,210
95	2,996	99,1	4,710	99,91	7,013	99,991	9,316
95,5	3,101	99,2	4,828	99,92	7,131	99,992	9,433
96	3,219	99,3	4,962	99,93	7,264	99,993	9,567
96,5	3,352	99,4	5,116	99,94	7,419	99,994	9,721
97	3,507	99,5	5,298	99,95	7,601	99,995	9,903
97,5	3,689	99,6	5,521	99,96	7,824	99,996	10,127
98	3,912	99,7	5,809	99,97	8,112	99,997	10,414
98,5	4,00	99,8	6,215	99,98	8,517	99,999	11,513

С учетом соотношения (6.3) зависимость (6.2) в расчетах обычно используют в виде:

$$N = B \cdot A^k. \quad (6.4)$$

Значения  $B$  и  $k$  приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2.

Значения  $B$  и  $k$  для некоторых видов дисперсных загрязнителей.

Наименование загрязнителя	$B$	$k$
1	2	3
Аэрозоль из известковых печей:	$5,53 \cdot 10^{-5}$	1,2295
- сульфата меди	$2,14 \cdot 10^{-4}$	1,068
- свинца и цинка из шахтных печей	$6,74 \cdot 10^{-3}$	0,478
- фосфорной кислоты	$1,34 \cdot 10^{-2}$	0,631
Унос золы, пылевидное сжигание углей	$4,34 \cdot 10^{-3}$	0,3
Пыль ваграночная:	$1,36 \cdot 10^{-2}$	0,621
- доменная	$1,925 \cdot 10^{-1}$	0,326
- колошниковая	$6,61 \cdot 10^{-3}$	0,891
- конверторов при продувке кислородом сверху	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,466
-- томасовских	$2,68 \cdot 10^{-1}$	0,259
- печей известковых	$6,5 \cdot 10^{-4}$	1,053
-- карбидных (в дымовых газах)	$0,82 \cdot 10^{-3}$	0,914
-- мартеновских на воздушном дутье	$1,74 \cdot 10^{-6}$	1,594
--- на обогащенном кислородом дутье	$1,565 \cdot 10^{-6}$	1,619
-- плавильных (для латуни) с оксидами цинка	$2,34 \cdot 10^{-2}$	0,532
--- закрытых (для феррохрома)	$6,49 \cdot 10^{-5}$	1,1
---- электрических (для ферросилиция)	$2,42 \cdot 10^{-5}$	1,26
---- электрических ферросплавных (для силикомарганца)	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,67

Окончание табл. 6.2

1	2	3
-- производства калийных удобрений	$9,05 \cdot 10^{-11}$	2,92
--- целлюлозы	$4 \cdot 10^{-4}$	1,05
- производства каолина	$2,34 \cdot 10^{-4}$	1,15
-- мыла (дурнопахнущие вещества)	$1,09 \cdot 10^{-5}$	1,415
-- черного щелока, обработка сухих газов	$9,3 \cdot 10^{-4}$	0,861
-- черного щелока, обработка предварительно увлажненных газов	$1,32 \cdot 10^{-3}$	0,861
-- фосфорных удобрений (после циклона)	$1,2 \cdot 10^{-1}$	0,454
- тальковая	$2,06 \cdot 10^{-1}$	0,351
Сажа процессов электрокрекинга метана	$10^{-5}$	1,36
Соли натрия в дымовых газах печей термообработки сточных вод	$0,21 \cdot 10^{-5}$	1,515

Для получения достоверных результатов требуется и очень корректный подход к определению доли энергии, затрачиваемой непосредственно на улавливание загрязнителя. Точное теоретическое определение этой величины невозможно. В практике проведения расчетов величину  $A$  составляют из нескольких позиций энергозатрат индивидуально для каждого типа газоочистного устройства. Для рассмотренных конструкций газопромывателей принимают, что доля энергии, непосредственно обеспечивающая очистку газового потока, складывается из энергии газового потока, затрачиваемой на создание газожидкостной смеси и энергии жидкого потока, затрачиваемой на диспергирование жидкости. Потери энергии на трение и местные сопротивления, возникающие при движении потоков к области контакта фаз, должны быть исключены из затрат на очистку.

Степень очистки, определенная по энергетическому методу, оказывается близкой к реальности для таких типов аппаратов, в которых осаждение загрязнителей обеспечивается преимущественно за счет одной из энергетических составляющих, а вкладом остальных составляющих допустимо пренебречь в пределах точности инженерных расчетов. Так, например, для газопромывателей с трубами Вентури, центробежных сепараторов ЦВП, скрубберов ударно-инерционного действия можно без значительной погрешности принять, что осаждение частиц в них происходит за счет энергии газового потока. Поэтому сопротивление этих аппаратов по газу может быть приравнено к величине удельных энергозатрат  $A$  в формуле (6.4).

Список перечисленных выше аппаратов может быть дополнен пенным абсорбером при условии, что в качестве удельной энергозатраты на очистку газов принимается сопротивление не всего аппарата, а только тарелок со слоем пены (и при наличии - каплеуловителей и стабилизирующих решеток). Сопротивление же конструктивных элементов на входе и выходе пенного аппарата (отводов, тройников, расширения и сужения потока) учитываться не должно.

В насадочных скрубберах и центробежных аппаратах с форсуночным распылением жидкости следует учитывать потери энергии и газового, и жидкого потоков.

Для полых газопромывателей основные затраты энергии на очистку газов связаны с распылом орошающей жидкости. Удельные затраты энергии на распыливание жидкости, при условии использования совершенных конструкций распылителей, можно подсчитать по соотношению:

$$A = \Delta p \cdot (V_{ж} / V_{г}), \text{ Дж/м}^3, \quad (6.5)$$

где  $\Delta p$  - давление жидкости перед форсункой, Па;  $V_{ж}$ ,  $V_{г}$  – расходы орошающей жидкости и очищаемого газа, м<sup>3</sup>/с.

Расчеты мокрых скрубберов по энергетическому методу выполняют в следующем порядке.

1. По расходу, составу и свойствам выбросов, требуемой степени их очистки выбирают подходящий тип аппарата.

2. Из уравнения (6.3) или из таблицы 6.1 находят необходимое число единиц переноса.

3. Принимают значения  $B$  и  $k$ , используя данные таблицы 6.2, если заданного вида пыли нет в таблице, желательно провести поиск сведений по другим источникам. При полном отсутствии необходимых сведений остается принимать значения  $B$  и  $k$  для сходных видов пыли, промышленного оборудования, технологических процессов и т.д.

4. Находят из уравнения (6.4) долю энергозатрат  $A$ , необходимую для обеспечения требуемого числа единиц переноса.

5. Распределяют найденную величину энергозатрат  $A$  между элементами аппарата, создающими контакт газов с жидкостью, учитывая их конструктивные особенности и избегая шаблонности.

6. Рассчитывают сопротивления указанных элементов, приводя расходы и другие характеристики потоков к условиям обработки в аппарате.

7. Оценивают приемлемость полученных значений сопротивлений аппарата для имеющихся в наличии или намеченных к установке тягодутьевых устройств. Решение об использовании аппарата следует принимать с учетом величины материальных и энергетических затрат, количества образующихся стоков и т.д.

8. Если принято решение об использовании рассматриваемого типа аппарата, определяют по величине сопротивления скорости газового потока и жидкости в соответствующих элементах, а по ним - требуемые размеры элементов.

9. Уточняют размеры элементов, принимая типовые или стандартные изделия, выписывают их характеристики и подбирают тягодутьевые устройства, насосы, другое вспомогательное оборудование; производят расчет коммуникаций.

## 6.1. Полые газопромыватели

Полые газопромыватели (рис. 6.1) реализуют наиболее простую схему мокрой очистки с организацией промывки запыленных потоков газа в газоходах (воздуховодах) или отдельных камерах (емкостях) различной формы. Орошающая жидкость в них подается встречно или поперек газового потока. Чтобы унос жидкости из зоны контакта был незначительным, размер капель должен быть не менее 500 мкм, а скорость газового потока не должна превосходить (0,8...1,2) м/с.

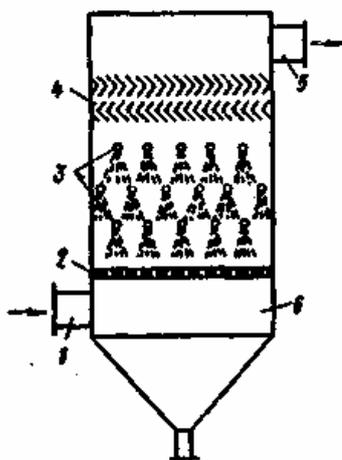


Рис. 6.1. Схема полового газопромывателя:

- 1 - входной патрубок; 2 - газораспределительная решетка; 3 - форсунки;  
4 - каплеуловитель; 5 - выходной патрубок; 6 – бункер.

Для уменьшения габаритов установки скорость потока увеличивают (иногда до 5 м/с и более) и устанавливают на выходе аппарата каплеуловители. Орошающую жидкость разбрызгивают чаще всего с помощью центробежных форсунок, поддерживая ее давление в пределах (0,3...0,4) МПа. Такие форсунки позволяют работать на оборотной воде, из которой удалена грубая взвесь. Диаметр зоны орошения одной форсунки принимают в пределах 500 мм. Из этих условий определяют число форсунок, устанавливаемых в скруббере.

Эффективность очистки в скруббере зависит от дисперсности пыли, размера капель, скорости их падения, расхода жидкости, скорости пылегазового потока. В полом скруббере удельный расход жидкости находится в пределах 2...2,5 л/м<sup>3</sup>, гидравлическое сопротивление 220...250 Па.

Полые газопромыватели могут найти применение для осаждения частиц крупнее 10 мкм. Полые скрубберы используют для очистки газов в металлургическом, литейном производстве, например, для очистки газов из вагранок.

Расчеты параметров полых газопромывателей с определением степени очистки по вероятностному методу выполняют в следующем порядке.

1) Принимают скорость газов  $v$  в скруббере около 1 м/с, перепад давления порядка (200...250) Па и выбирают величину удельного орошения  $m$  в пределах  $(0,5...8) \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> газа.

2) Определяют среднюю площадь скруббера в сечении, перпендикулярном направлению потока газов:

$$f = V_r/v, \text{ м}^2, \quad (6.6)$$

где  $V_r$  - расход очищаемых газов, м<sup>3</sup>/с, подсчитанный по температуре и давлению на выходе из аппарата.

Температуру газов на выходе из скруббера, имевших начальную температуру (150...200)°С и выше, при отсутствии специальных требований можно принимать на 100° ниже начальной, а температуру не нагретых газов - равной начальной.

Находят диаметр аппарата с противоточным орошением или эквивалентный диаметр для аппарата с поперечным орошением. Высоту аппарата  $h$  с круглым поперечным сечением принимают порядка 2,5 диаметров, а с прямоугольным сечением - из конструктивных соображений.

3) Определяют расход жидкости на орошение:

$$L = m \cdot V_r, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6.7)$$

4) Определяют инерционные параметры  $\psi_i$  для фракций частиц заданного состава:

$$\psi_i = d_i^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot v \cdot C_i' / (18 \cdot \mu \cdot l), \quad (6.8)$$

где:  $d_i$  - диаметр частиц  $i$  - той фракции, м;  $\rho_{\text{ч}}$  - истинная плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $C_i'$  - поправка Кенингема (таблица 6.1);  $\mu$  - динамическая вязкость газа, Па·с ( $19,3 \cdot 10^{-6}$  Па·с);  $l$  - определяющий размер, м.

Таблица 6.3.

Поправка Кенингема

$d \cdot 10^6, \text{ м}$	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	10
$C'$	90	24,5	7,9	2,9	1,57	1,16	1,03	1

За определяющий размер при расчете полых скрубберов принимают диаметр капли орошающей жидкости в пределах  $(0,6...1) \cdot 10^{-3}$  м.

5) Определяют коэффициент захвата частиц определенных фракций  $\eta_i$ :

$$\eta_i = \frac{\psi_i^2}{(\psi_i + 0,35)^2}. \quad (6.9)$$

При  $\psi_i = 150$  величина превышает 0,995; при значениях  $\psi_i$  более 170 величину  $\eta_{dri}$  можно принимать равной 1.;

б) Определяют значения парциальных (фракционных) коэффициентов очистки для скрубберов с противоточным орошением по формуле:

$$\varepsilon_{\phi i} = 1 - \exp \left[ - \frac{3 \cdot L \cdot \eta_i \cdot (v + w_k) \cdot h}{2 \cdot V \cdot d_k \cdot w_k} \right] \quad (6.10)$$

а для скрубберов с поперечным орошением по формуле:

$$\varepsilon_{\phi i} = 1 - \exp \left( - \frac{3 L \eta_i h}{2 V d_k} \right). \quad (6.11)$$

В формулах (6.5) и (6.6)  $w_k$  - скорость осаждения капли, м/с;  $d_k$  - диаметр капли, м.

В полых газопромывателях устанавливаются форсунки грубого распыла, создающие капли диаметром  $(0,6...1) \cdot 10^{-3}$  м. Скорость осаждения таких капель можно найти по диаграмме рис. 6.2.

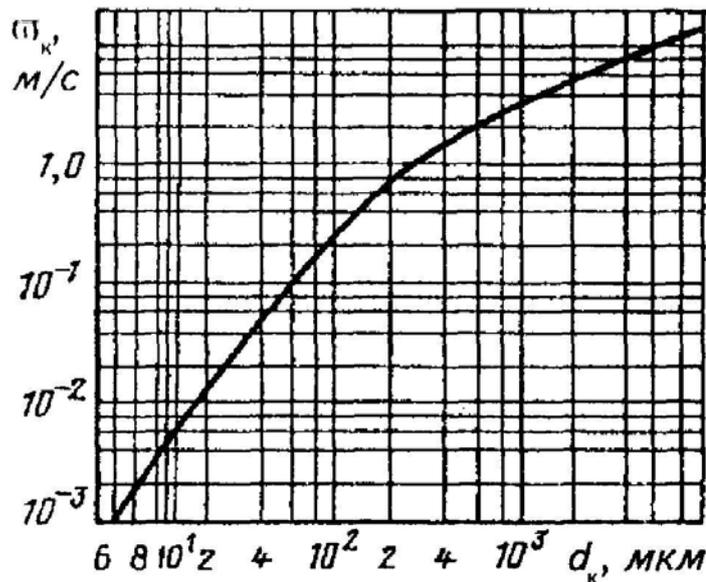


Рис. 6.2. Скорость осаждения капель в полых газопромывателях.

7) По найденным парциальным (фракционным) коэффициентам очистки и заданному фракционному составу дисперсных загрязнителей определяют полный коэффициент очистки  $\varepsilon_{общ}$ , используя формулу (6.12), и обосновывают возможность применения полого скруббера или отказ от него.

$$\varepsilon_{общ} = \sum_{i=1}^N \varepsilon_{\phi i} \frac{g_i}{100}, \quad (6.12)$$

где  $g_i$  - массовая доля  $i$ -й фракции пыли.

**Пример 6.1.** Определить эффективность очистки пылегазового потока (воздуха) в полом скруббере и конечную концентрацию пыли в очищаемом воздухе по следующим исходным данным.

Расход очищаемого газа  $V_T = 60000 \text{ м}^3/\text{час}$ ; температура газа  $t = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

начальная концентрация пыли  $C_H = 20 \text{ г/м}^3$ ; плотность частиц пыли  $\rho_{\text{ч}} = 2800 \text{ кг/м}^3$ ; загрязнитель: пыль смеси известняка и шлака; содержание  $\text{SiO}_2 - 28\%$ ; требуемая степень очистки: до ПДК ( $2 \text{ мг/м}^3$ ).

Дисперсный состав пыли:

$d$ , мкм	1,6	2,5	4,0	6,3	10
$g$ , %	94	82,5	58	20	0,5

*Решение.*

1. Определяем необходимую эффективность очистки по формуле:

$$\varepsilon = \left[ 1 - \frac{C_{\text{к}}}{C_{\text{н}}} \right] \cdot 100 \%$$

где  $C_{\text{к}}$  – концентрация пыли после очистки ( $C_{\text{к}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3$ );  $C_{\text{н}}$  – начальная концентрация пыли.

$$\varepsilon = \left[ 1 - \frac{0,002}{20} \right] \cdot 100 \% = 99,99 \%$$

2. Пересчитаем дисперсный состав из интегрального вида в дифференциальный по фракциям:

$$\begin{aligned} d_1 &= (1,6 + 0) / 2 = 0,8 \text{ мкм}; & g_1 &= 100 - 94 = 6 \%; \\ d_2 &= (1,6 + 2,5) / 2 = 2,05 \text{ мкм}; & g_2 &= 94 - 82,2 = 11,5 \%; \\ d_3 &= (2,5 + 4) / 2 = 3,25 \text{ мкм}; & g_3 &= 82,5 - 58 = 24,5 \%; \\ d_4 &= (4 + 6,3) / 2 = 5,15 \text{ мкм}; & g_4 &= 58 - 20 = 38 \%; \\ d_5 &= (6,3 + 10) / 2 = 8,15 \text{ мкм}. & g_5 &= 20 - 0,5 = 19,5 \%. \end{aligned}$$

3. Рассчитаем медианный диаметр частиц  $d_m$  по формуле:

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^5 (g_i \cdot d_i)}{\sum_{i=1}^5 g_i}, \text{ мкм.}$$

$$d_m = \frac{(0,8 \cdot 6) + (2,05 \cdot 11,5) + (3,25 \cdot 24,5) + (5,15 \cdot 38) + (8,15 \cdot 19,5)}{6 + 11,5 + 24,5 + 38 + 19,5} = \frac{462,625}{99,5} = 4,65 \text{ мкм.}$$

4. Далее рассчитаем стандартное отклонение по формуле:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^5 g_i (d_m - d_i)^2}{\sum_{i=1}^5 g_i}, \text{ МКМ.}$$

$$\sigma = \frac{6(4,65 - 0,8)^2 + 11,5(4,65 - 2,05)^2 + 24,5(4,65 - 3,25)^2 + 38(4,65 - 5,15)^2 + 19,5(4,65 - 8,15)^2}{99,5} = 4,8.$$

5. Определяем основные размеры полого скруббера.

Принимаем: скорость газов в скруббере  $w = 1$  м/с, перепад давления  $\Delta P = 200 \dots 250$  Па, величина удельного орошения  $m = 1 \cdot 10^{-3}$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, диаметр капель  $d_k = 1 \cdot 10^{-3}$  м, скорость осаждения капли  $w_k = 1,1$  м/с (рис. 6.2).

Средняя площадь скруббера в сечении, перпендикулярном направлению потока газов:

$$F = V_r/v = 60000/3600 \cdot 1 = 16,667 \text{ м}^2.$$

Радиус аппарата определяем по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{F}{\pi}} = \sqrt{\frac{16,667}{3,14}} = 2,304 \text{ м.}$$

Диаметр аппарата:  $D = 2 R = 4,608$  м.

Высота аппарата:  $h = 2,5 \cdot D = 11,52$  м.

6. Так как полученные размеры аппарата слишком велики, принимаем к установке 4 полых скруббера, тогда:

- площадь одного аппарата будет равна:  $F_1 = F/4 = 16,667/4 = 4,167$  м<sup>2</sup>;

- радиус аппарата:

$$R_1 = \sqrt{\frac{F_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4,167}{3,14}} = 1,16 \text{ м};$$

- диаметр аппарата:  $D_1 = 2 R_1 = 2,32$  м;

- высота аппарата:  $h_1 = 2,5 \cdot D_1 = 2,5 \cdot 2,32 = 5,8$  м.

7. Определяем расход жидкости на орошение:

$$L = m \cdot V_r = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 16,667 = 0,0167 \text{ м}^3/\text{с.}$$

8. Определяем инерционные параметры  $\psi_i$  для фракций частиц заданного состава:

$$\Psi_i = d_i^2 \cdot \rho_c \cdot v \cdot C_i / (18 \cdot \mu \cdot L);$$

$$\Psi_1 = (0,8 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2800 \cdot 1,25 / (18 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}) = 0,008.$$

$$\Psi_2 = (2,05 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2800 \cdot 1,1 / (18 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}) = 0,046.$$

$$\Psi_3 = (3,25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2800 \cdot 1,01 / (18 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}) = 0,176.$$

$$\Psi_4 = (5,15 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2800 \cdot 1 / (18 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}) = 0,267.$$

$$\Psi_5 = (8,15 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2800 \cdot 1 / (18 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3}) = 0,669.$$

9. Определяем коэффициенты захвата частиц определенных фракций для противоточного орошения в скруббере:

$$\eta_i = \frac{\psi_i^2}{(\psi_i + 0,35)^2}$$

$$\eta_1 = 0,008^2 / (0,008 + 0,35)^2 = 0,000499.$$

$$\eta_2 = 0,046^2 / (0,046 + 0,35)^2 = 0,0135.$$

$$\eta_3 = 0,107^2 / (0,107 + 0,35)^2 = 0,0548.$$

$$\eta_4 = 0,267^2 / (0,267 + 0,35)^2 = 0,187.$$

$$\eta_5 = 0,669^2 / (0,669 + 0,35)^2 = 0,43.$$

10. Определяем значения парциальных коэффициентов очистки для скрубберов с противоточным орошением:

$$\varepsilon_{\phi} = 1 - \exp \left[ - \frac{3 \cdot L \cdot \eta_i \cdot (v + w_k) \cdot h}{2 \cdot V \cdot d_k \cdot w_k} \right];$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\phi 1} &= 1 - \exp \left( - \frac{3 \cdot 0,0167 \cdot \eta_i \cdot (1 + 1,1) \cdot 5,8}{2 \cdot 16,67 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1} \right) = 1 - \exp (- \eta_1 \cdot 20,8) = \\ &= 1 - \exp (- 0,000449 \cdot 16,63) = 0,01. \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{\phi 2} = 1 - \exp (- \eta_2 \cdot 20,8) = 1 - \exp (- 0,0135 \cdot 16,63) = 0,245.$$

$$\varepsilon_{\phi 3} = 1 - \exp (- \eta_3 \cdot 20,8) = 1 - \exp (- 0,0548 \cdot 16,63) = 0,68.$$

$$\varepsilon_{\phi 4} = 1 - \exp (- \eta_4 \cdot 20,8) = 1 - \exp (- 0,187 \cdot 16,63) = 0,98.$$

$$\varepsilon_{\phi 5} = 1 - \exp (- \eta_5 \cdot 20,8) = 1 - \exp (- 0,43 \cdot 16,63) = 0,99.$$

11. Определяем общий коэффициент очистки полого скруббера с противоточным орошением по формуле:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^5 \eta_{\phi_i} \frac{g}{100};$$

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \frac{0,01 \cdot 6}{100} + \frac{0,245 \cdot 11,5}{100} + \frac{0,68 \cdot 24,5}{100} + \frac{0,98 \cdot 38}{100} + \frac{0,99 \cdot 19,5}{100} = 0,76.$$

12. Определяем концентрацию пыли в газовом потоке после очистки в полом скруббере при общей эффективности очистки  $\eta_{\text{общ}} = 76\%$ .

$$C_k = C_n (1 - \varepsilon_{\text{общ}}) = 20 \cdot (1 - 0,76) = 4,8 \text{ г/м}^3.$$

*Вывод.* Степень очистки воздуха от пыли в полом скруббере явно недостаточна, поскольку требуется очистить воздух до конечной концентрации  $2 \text{ мг/м}^3$ . Следовательно, необходимо использовать более эффективный аппарат для пылеочистки или предусмотреть многоступенчатую схему очистки.

## 6.2. Орошаемые циклоны с водяной пленкой

Эффект действия *орошаемого циклона* по сравнению с обычным циклоном усиливается тем, что пыль, отбрасываемая под действием центробежных сил к стенкам циклона, в значительной мере поглощается водяной пленкой и превращается в шлам. В результате предотвращается вторичный унос пыли, выделившейся из потока.

В циклонах с водяной пленкой опасность взрыва и возгорания пыли практически устраняется.

Орошаемый циклон типа ЦВП (рис. 6.3) состоит из цилиндрического корпуса с коническим днищем и воздухоотводящим патрубком и воздухоподводящей улитки. Запыленный воздух подводится по касательной к корпусу со скоростью около 20 м/с. Поверхность стенок аппарата орошается водой с помощью сопел, расположенных равномерно в верхней части циклона. Сопла находятся также во входном патрубке и предназначены для смыва отложений пыли. Давление воды перед соплами 2...2,5 кПа. Удельный расход воды - 0,05...0,3 л/м<sup>3</sup>. Одиночные циклоны с водяной пленкой рассчитаны на очистку 1...20 тыс. м<sup>3</sup>/ч запыленного газа и во всем диапазоне производительности обеспечивают достаточную степень очистки.

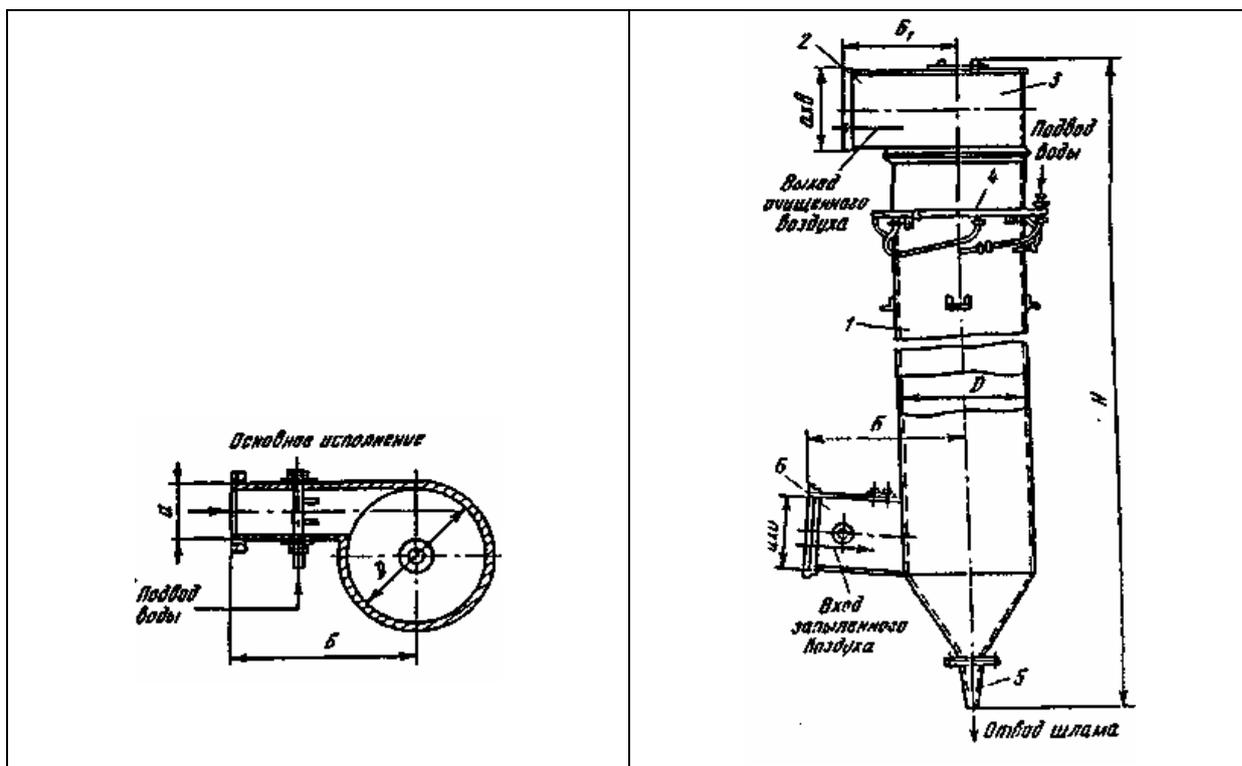


Рис. 6.3. Циклон с водяной пленкой ЦВП:

1 - корпус; 2 - выходной патрубок; 3 - улитка; 4 - коллектор;  
5 - конусный патрубок (гидрозатвор); 6 - входной патрубок.

Циклон с водяной пленкой типа ЦВП можно использовать для очистки низкотемпературных газов с любым видом нецементирующейся пыли, кроме схватывающейся и реагирующей с водой. Он может быть применен в качестве каплеуловителя в установках с трубами Вентури.

Общая эффективность ЦВП - до 90 %, фракционная эффективность улавливания частиц размером 5...10 мкм до 90...95 %.

Основные характеристики газопромывателей ЦВП приведены в табл. 6.4 и 6.5.

Таблица 6.4

Характеристика циклонов с водяной пленкой

Исполнение циклона	Скорость воздуха, м/с				Гидравлическое сопротивление, Па		Коэффициент гидравлического сопротивления	
	наименьшая*	наибольшая**	наименьшая*	наибольшая**	наименьшее	наибольшее	относенный к $v_{вх}$ , $\xi_{вх}$	относенный к $v_0$ , $\xi_0$
Основное	16	25,6	4,5	7,05	360	915	2,3	30
Для работы с повышенной скоростью	32	44	4,5	6,0	940	1780	1,5	78

\*Во входном отверстии циклона  $v_{вх}$ .

\*\*Условная средняя в поперечном сечении циклона  $v_0$ .

Таблица 6.5.

Основные размеры орошаемых циклонов ЦВП.

Тип циклона	Размеры, мм					Общая масса, кг
	$D$	$B$	$B_1$	$H$	$a \times b$	
ЦВП-3	315	445	283	2436	110×195	63,9
ЦВП-4	400	505	360	3014	140×250	106,7
ЦВП-5	500	640	450	3684	175×310	161
ЦВП-6	630	765	565	4554	220×390	237
ЦВП-8	800	1025	720	5699	280×495	369,7
ЦВП-10	1000	1335	900	7044	350×620	569,5

Гидравлическое сопротивление циклонов ЦВП зависит от расхода газа и конструкции аппарата. На рис. 6.4 приведена номограмма для определения гидравлического сопротивления ЦВП различных типоразмеров в зависимости от расхода газа.

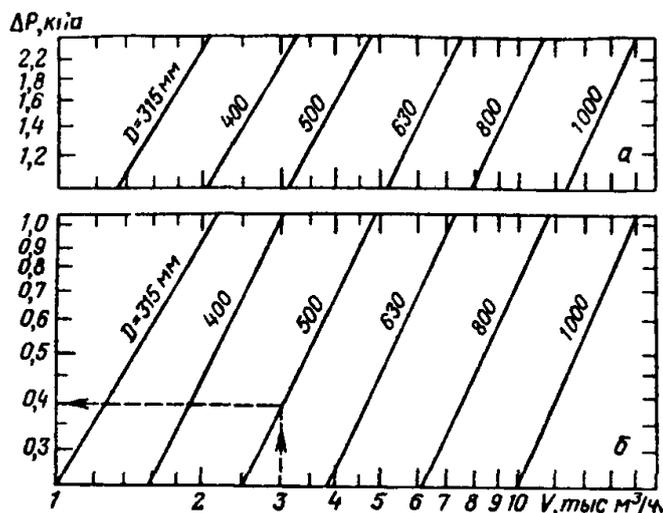


Рис. 6.4. Номограмма для определения гидравлического сопротивления  $\Delta P$  циклона ЦВП в зависимости от расхода газа  $V$  и диаметра аппарата  $D$ .

Степень очистки газа в циклоне ЦВП можно определить на основе двух графиков, приведенных на рис. 6.5 и 6.6.

По рис. 6.5 определяют диаметр частиц пыли, улавливаемых на 50%, в зависимости от гидравлического сопротивления аппарата. График, приведенный на рис. 6.6, построен для определенных условий:  $\rho_4^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$ ,  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu_2^3 = 1,83 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , поэтому для иных условий величина диаметра частиц, уловленных на 50% ( $d_{50}$ ), уточняется по зависимости:

$$d_{50}^{\text{д}} = d_{50}^{\text{э}} \left( \frac{\rho_4^3 \mu_2^{\text{д}}}{\rho_4^{\text{э}} \mu_2^3} \right)^{0,5}, \quad (6.13)$$

где  $d_{50}^{\text{д}}$ ,  $d_{50}^{\text{э}}$  – диаметры частиц, уловленных на 50% соответственно в действительных и эталонных условиях.

Степень или эффективность фракционной очистки определяется по номограмме (рис. 6.6).

Для этого сначала определяют параметр  $\sigma$ , а по кривой распределения  $D(d)$ , построенной в логарифмически вероятностных координатах на основе свойств интеграла вероятности:

$$\ln \sigma = \ln(d_m/d_{16}) = \ln(d_{84}/d_m) \quad (6.14)$$

где  $d_m$  - медианный размер частиц нормального распределения, который представляет собой такой размер, при котором масса частиц крупнее  $d_m$  равна количеству частиц мельче  $d_m$ ;  $d_{16}$  и  $d_{84}$  - размеры частиц, соответствующие ординатам 16 и 84% кривой  $D(d)$ .

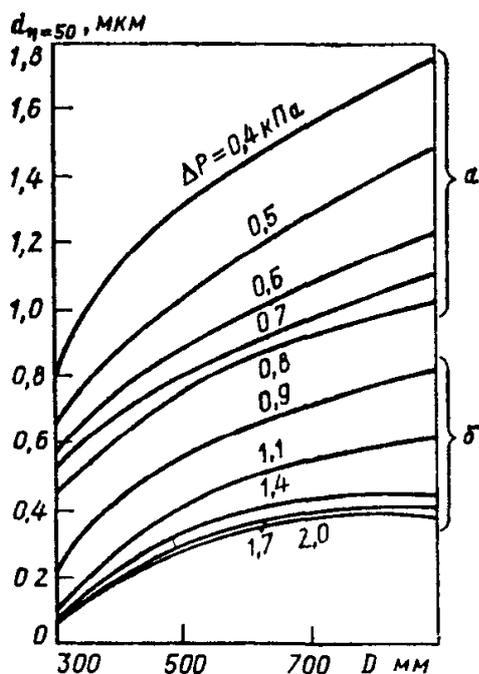


Рис. 6.5. Зависимость диаметра частиц пыли, улавливаемых на 50%  $d_{\eta=50}$ , от гидравлического сопротивления  $\Delta P$  и диаметра циклона ЦВП в основном (а) и скоростном (б) исполнении.

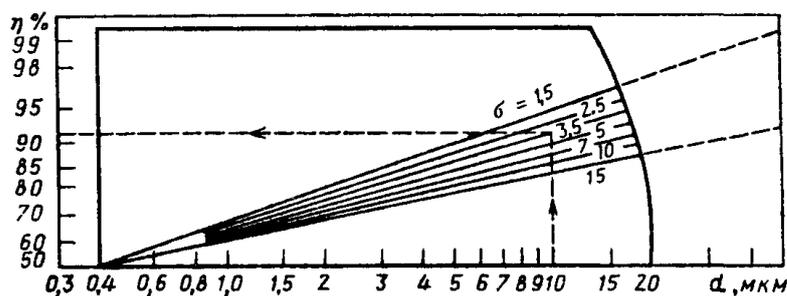


Рис. 6.6. Номограмма для определения степени очистки в циклонах ЦВП

Затем из координаты  $d_{\eta=50}^0$  на оси абсцисс номограммы (см. рис. 6.6) проводят прямую под углом, соответствующим найденному по формуле

(6.14) значению  $\sigma$ . Таким образом, номограмма является как бы подготовленной к работе.

Для определения степени фракционной очистки необходимо для каждого среднего диаметра фракции найти по линии  $\sigma$  соответствующую ординату степени очистки.

Общую степень очистки для всего состава пыли находят по формуле:

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta R \varepsilon_i, \quad (6.15)$$

где  $\Delta R_i$  - массовая доля фракции  $i$ -го размера;  $\varepsilon_i$  - степень очистки пыли от частиц  $i$ -го размера;  $n$  - число узких фракций в составе пыли.

Следует иметь в виду, что рассмотренный метод расчета эффективности очистки разработан для пылей с  $d_{\eta=50} = 5...32$  мкм, поэтому распространять метод на очень тонкие пыли ( $d_{50} < 3$  мкм) не следует.

Кроме того, метод разрабатывался для полностью смачиваемых пылей, поэтому для несмачиваемых пылей полученное значение  $d_{\eta=50}$  для основного и скоростного ЦВП следует увеличить соответственно в 2,2 и 1,9 раза, а при смачивании 25...75% - в 1,5 и 1,4 раза.

Циклоны-газопромыватели типа СИОТ работают при повышенных скоростях газового потока (14...20 м/с). В отличие от циклонов ЦВП скоростные промыватели СИОТ имеют внутри дополнительные завихрители, что позволяет их использовать для очистки больших объемов газов (до 300 тыс. м<sup>3</sup>/ч) без снижения эффективности.

Газопромыватели типа СИОТ имеют неплохую степень очистки и рассчитаны на улавливание смачиваемой не волокнистой не схватывающейся пыли при начальной запыленности до 5 г/м<sup>3</sup>. В скоростных промывателях СИОТ частицы пыли крупнее 5 мкм улавливаются более чем на 99%.

Основные характеристики аппаратов приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6.

Технические характеристики газопромывателей СИОТ

Показатели	Номер газопромывателя								
	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Производительность, м <sup>3</sup> /с, при скорости									
	14м/с	3,5	4,9	6,9	9,7	13,9	20,8	27,8	38,9
20м/с	4,9	6,9	9,7	13,9	20,8	27,8	38,9	55,6	77,8
Диаметр входа, мм	560	665	790	940	1120	1330	1580	1880	2240

Внутренний диаметр аппарата, мм	1344	1596	1896	2256	2688	3192	3792	4512	5400
Максимальный расход воды, л/с	0,56	0,78	1,1	1,5	2,1	3,1	4,3	6,1	8,6

Циклоны-промыватели СИОТ при прочих равных условиях имеют габаритные размеры в 2,5...3 раза меньше, чем габаритные размеры скруббера, эффективность тех и других аппаратов примерно одинакова.

Расчеты характеристик циклонов с водяной пленкой ЦВП и степени очистки обрабатываемых газов по вероятностному методу проводятся в следующем порядке.

1. По располагаемому перепаду давления выбирают вид исполнения аппарата. Циклон в основном исполнении имеет меньшее сопротивление (линия 1, значения  $\Delta p_1$  на графике рис. 6.7;  $\zeta = 30$ , чем циклон с уменьшенным входным сечением (линия 2, значения  $\Delta p_2$  на графике рис.6.7;  $\zeta = 75$ ). По заданному расходу газов выбросов находят из графика рис. 6.7 диаметр аппарата и соответствующую величину потери давления.

2. По графику рис. 6.8 находят величину  $d_{50}$ . Значение  $\lg \sigma_{\zeta}$  принимают равным 0,838.

3. По формуле (4.38) определяют параметр осаждения  $x$  и из таблицы 4.1 находят полный коэффициент очистки.

4. Обосновывают необходимость применения газопромывателя ЦВП или приводят причины отказа. Следует принять во внимание, что содержание дисперсных частиц в обрабатываемых газовых выбросах не должна превышать 2 г/м<sup>3</sup>. При более высоких концентрациях циклоны с водяной пленкой рекомендуются использовать как вторую ступень очистки с установкой на первой ступени сухого пылеотделителя.

Расчеты параметров центробежного газопромывателя СИОТ выполняют аналогично предыдущему.

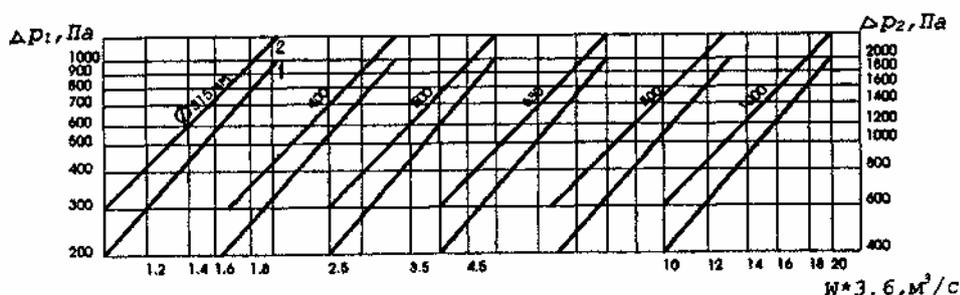


Рис. 6.7. Зависимость перепада давления от расхода газа в

газопромывателе ЦВП:

1 – циклон в основном исполнении; 2 – циклон с уменьшенным входным сечением.

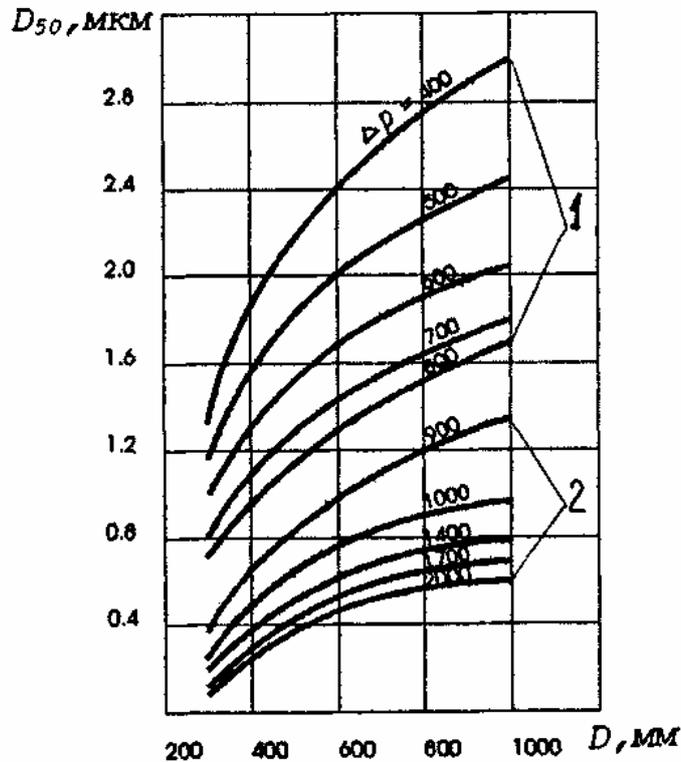


Рис.6.8. Зависимость  $d_{50}$  от диаметра газопромывателя ЦВП:

1 – циклон в основном исполнении; 2 – циклон с уменьшенным входным сечением.

### 6.3. Пенные пылеуловители

Пенные пылеуловители представляют собой аппараты, корпус которых разделен решеткой с равномерно расположенными мелкими отверстиями (рис. 6.9). Запыленный поток поступает под решетку, очищенный удаляется из верхней части корпуса. Вода поступает на решетку сверху. В зависимости от конструкции пылеуловителя вода с поверхности решетки отводится через отверстия в решетке и частично через слив, либо только через отверстия. Диаметр отверстий в решетке 3...8 мм. Живое сечение 0,15...0,25 м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

Пенные аппараты относятся к низконапорным пылеуловителям, это одно из больших преимуществ данных аппаратов перед другими конструкциями. По способу отвода жидкости с решетки их подразделяют на два основных типа: с переливными решетками и с провальными решетками. Аппараты с переливными решетками не нашли широкого распростране-

ния, так как наблюдается зарастание решетки в ходе процесса пылеулавливания. Большое распространение получили аппараты второго типа.

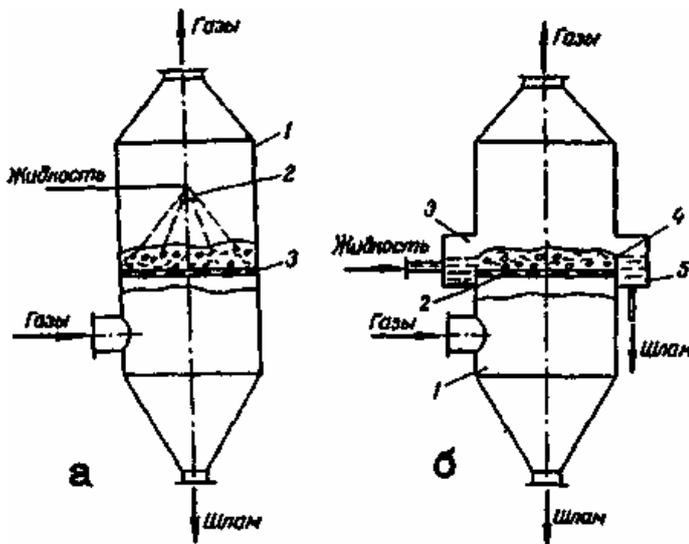


Рис. 6.9. Схемы пенных пылеуловителей:

- a* - пенный пылеуловитель с провальной тарелкой: 1 - корпус; 2 - оросительное устройство; 3 - тарелка; *б* - пенный пылеуловитель с переливной тарелкой: 1 - корпус; 2 - тарелка; 3 - приемная коробка; 4 - порог; 5 - сливная коробка.

Для очистки газов чаще всего используются провальные щелевые и дырчатые тарелки. Диаметр отверстий дырчатых тарелок принимают в пределах 3...8 мм, а относительное свободное сечение (отношение площади отверстий к площади тарелки)  $f_{ce} = 0,15...0,25$ .

Отверстия разбиты по равностороннему треугольнику. Шаг между отверстиями  $\delta$  определяют из соотношения:

$$\delta = d_0 \sqrt{\frac{0,91}{f_{ce}}} \text{ м}, \quad (6.16)$$

где  $d_0$  - диаметр отверстия, м.

Щелевые тарелки могут выполняться решетчатыми, трубчатыми или колосниковыми. Трубчатые и колосниковые конструкции изготавливают сварными из трубок, прутков или пластин. Ширину щели в тарелке  $b$  принимают 4...5 мм, свободное сечение  $f_{ce}$  - (0,2...0,25).

Оптимальная толщина дырчатых и щелевых тарелок 4...6 мм. Удельное орошение для очистки газов от пыли принимают в пределах 0,4...0,6 литров на 1 м<sup>3</sup> газов.

Для создания устойчивого пенного слоя на решетке необходимо поддерживать скорость газа в свободном сечении аппарата в пределах  $0,8 \dots 2,2$  м/с, при этом минимальная скорость газов, необходимая для создания устойчивого пенного режима на тарелке, составляет порядка 1 м/с.

В новейших пенных аппаратах с провальными решетками применяют так называемые стабилизаторы пенного слоя, что позволяет повысить скорость газа до 4 м/с.

На рис. 6.10 приведен общий вид пенного аппарата со стабилизатором слоя (ПАСС). В качестве стабилизатора рекомендуется использовать сотую решетку высотой  $h_{ст} = 60$  мм с ячейками размером от  $35 \times 35$  до  $45 \times 45$  мм.

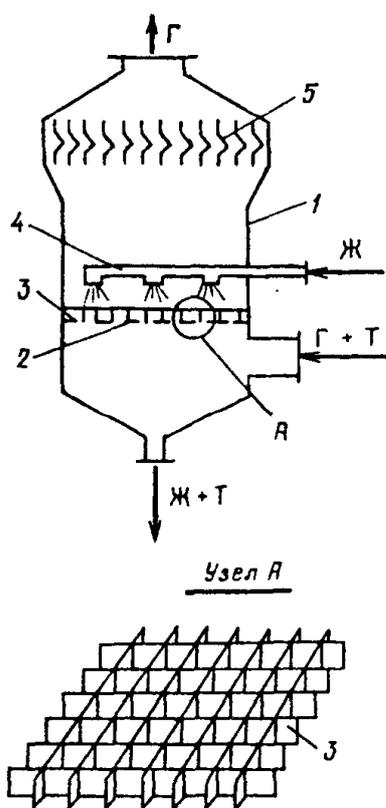


Рис. 6.10. Пенный аппарат ПАСС со стабилизатором слоя пены:  
 1 – корпус; 2 – провальная тарелка; 3 – стабилизатор пены; 4 – ороситель;  
 5 – брызгоуловитель.

На рис. 6.11 приведены зависимости высоты слоя пены от скорости движения газа в свободном сечении аппарата. Из графиков видно, что ста-

билизатор позволяет увеличить высоту слоя почти в 2,5 раза во всем диапазоне скоростей.

Решетки промышленных аппаратов ПАСС могут быть дырчатыми с отверстиями величиной  $d_0 = 5...8$  мм и живым сечением от 14 до 22%, а также трубчатыми с трубами диаметром 20...32 мм и промежутками между ними  $d_r = 3,0...6,5$  мм при живом сечении  $S_0 = 13,0...18,2$  %. Аппараты с трубчатыми решетками обозначаются ПАСС-Т, а с дырчатыми - ПАСС-Д. Разработан нормализованный ряд аппаратов ПАСС с корпусами круглого сечения на расход газа  $V = 2,5...64$  тыс. м<sup>3</sup>/ч (табл. 6.7).

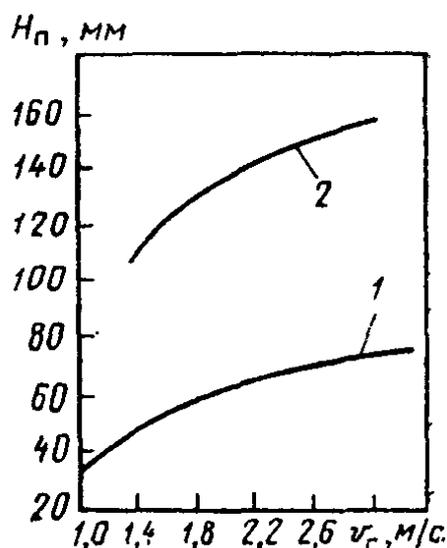


Рис. 6.11. Зависимость высоты слоя пены от скорости газа в аппарате без стабилизатора (1) и со стабилизатором (2).

Расчет гидравлического сопротивления пенных аппаратов со стабилизатором слоя может быть проведен по зависимости:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_p + \Delta P_{\text{п}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_a \quad (6.17)$$

где  $\Delta P_p, \Delta P_{\text{п}}, \Delta P_{\sigma}, \Delta P_a$  - потери напора соответственно сухой решетки, слоя пены, за счет сил поверхностного натяжения, корпуса аппарата.

Величина  $\Delta P_p$  (в Па) может быть найдена по формуле:

$$\Delta P_p \approx 1,82(v_z^0)^2 \rho_z / 2, \quad (6.18)$$

где  $v_z^0$  - скорость газа в отверстиях решетки, м/с.

Таблица 6.6

## Нормализованный ряд аппаратов типа ПАСС

Тип аппарата	Расход газа, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Скорость газа в своб. сечении аппарата, м/с	Основные размеры аппарата, мм			
			высота $H$	диаметр $D$	диаметр выходного патрубка $D_1$	диаметр входного патрубка $D_2$
ПАСС-Т(Д)-3	2,5- 3,4	2,9	3670	600	285	100
ПАСС-Т(Д)-4	3,4- 4,5	2,85	3790	700	355	100
ПАСС-Т(Д)-5	4,5- 6,2	2,96	3910	800	400	100
ПАСС-Т(Д)-7	6,2- 8,4	3,05	4160	920	450	100
ПАСС-Т(Д)-10	8,4- 11,7	2,94	4300	1100	500	100
ПАСС-Т(Д)-14	11,7- 16,5	2,95	4860	1300	560	100
ПАСС-Т(Д)-20	16,5-23,2	3,12	5300	1500	630	100
ПАСС-Т(Д)-30	23,2-32,6	3,05	6050	1800	800	150
ПАСС-Т(Д)-40	32,6-45,7	3,14	6710	2100	900	150
ПАСС-Т(Д)-55	45,7-64,0	3,10	7630	2500	1020	150

Потеря напора (в Па) за счет слоя пены на решетке:

$$\Delta P_{\Pi} = 0,447 H_{\Pi} \rho_{ж} g / (v_2^0)^{0,5}, \quad (6.19)$$

где  $H_{\Pi}$  - высота слоя пены, м;  $\rho_{ж}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $v_2^0$  — скорость газа в отверстиях решетки, м/с.

В уравнении (6.18) высота слоя пены (мм) может быть найдена по зависимости:

$$H_{\Pi} = 4,8 v_2^{0,79} m^{0,2} / (d_0^{0,14} S_0^{1,9}), \quad (6.20)$$

где  $m$  - плотность орошения, л/м<sup>3</sup> газа;  $d_0$  - диаметр отверстий решетки, мм;  $S_0$  - относительная площадь свободного сечения решетки, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

Потерю напора (в Па) под действием сил поверхностного натяжения рассчитывают по формуле:

$$\Delta P_{\sigma} = 4\sigma / d_0, \quad (6.21)$$

где  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения, н/м.

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата рассчитывают по зависимости:

$$\Delta P_a = \xi_a v_2^2 \rho_2 / 2, \quad (6.22)$$

где  $\xi_a = 25...28$  - коэффициент гидравлического сопротивления корпуса аппарата.

Степень фракционной очистки (в %) может быть рассчитана по зависимости:

$$\eta_{\phi} = 1001 - 87,1(1,37 - d_T^{0,1}) / (H_{\Pi}^{0,9} v_z^{0,25}), \quad (6.23)$$

где  $d_T$  - средний эквивалентный размер частиц фракции, мкм;  $H_{\Pi}$  - высота слоя пены, мм;  $v_z$  - скорость газа в сечении аппарата, м/с.

Общую степень очистки следует определять по уравнению (3.7) или (3.10)..

**Пример 6.2.** Рассчитать пенный аппарат для очистки технологических газов, удаляемых после сушилки с кипящим слоем и содержащих фосфоритовую пыль. Общий расход газа 20 000 м<sup>3</sup>/ч, температура газа 75°С, температура орошающей воды 25°С, начальная концентрация пыли 2 г/м<sup>3</sup>, дисперсный состав пыли  $d_{\text{ч}}$ :

$d_{\text{ч}}$ , мкм	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	>30
$\Delta R$ , %	24	26	17	6	13	14

Принимаем за базовую конструкцию аппарат типа ПАСС, а скорость газа в сечении аппарата из условий устойчивости слоя пены  $v_z^0 = 3$  м/с.

Площадь сечения корпуса аппарата

$$S = V / (3600 v_z^0) = 20000 / (3600 \cdot 3) = 1,85 \text{ м}^2.$$

Диаметр корпуса аппарата

$$D_0 = (4S/\pi)^{0,5} = (4 \cdot 1,85 / 3,14)^{0,5} = 1,54 \text{ м}.$$

Примем действительный диаметр корпуса равным 1500 мм, тогда действительная скорость газа в сечении аппарата

$$v_z = v_z^0 D_0^2 / D^2 = 3 \cdot 1,54^2 / 1,5^2 = 3,15 \text{ м/с}.$$

Расход жидкости принимаем с учетом оптимальной работы аппарата при плотности орошения  $L_0 = 1 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ :

$$L_{\text{жс}} = L_0 S_0 = 1 \cdot 1,77 = 1,77 \text{ м}^3 / \text{ч},$$

где  $S_0 = 0,785 D_0^2 = 1,77 \text{ м}^2$ .

Живое сечение дырчатой решетки  $S_p$  вычисляем при высоте слоя пены 100 мм, диаметре отверстий 5 мм и плотности жидкости 1000 кг/м<sup>3</sup>.

$$\begin{aligned} S_p &= 1,37 v_z^{0,458} L_0^{0,152} / (H_{\Pi}^{0,61} d_0^{0,085} \rho_{\text{жс}}^{0,61}) = \\ &= 1,37 \cdot 3,15^{0,48} \cdot 1^{0,152} / (0,1^{0,61} \cdot 0,005^{0,085} \cdot 1000^{0,61}) = 0,21. \end{aligned}$$

Проверяем действительную высоту слоя пены по уравнению (6.20):

$$\begin{aligned} H_{\Pi} &= 4,8 v_z^{0,79} m^{0,2} / (d_0^{0,14} S_0^{1,9}) = \\ &= 4,8 \cdot 3,15^{0,79} \cdot 0,05^{0,2} / [5 \cdot 10^{-3}]^{0,14} \cdot 0,21^{1,9} = 101 \text{ мм}, \end{aligned}$$

где

$$m = L_0 / V_z = 1000 / 20000 = 0,05 \text{ л/м}^3.$$

Шаг между отверстиями в случае ромбической разбивки

$$l = d_{0m} (0,91/S_0)^{0,5} = 0,005(0,91/0,21)^{0,5} = 0,01 \text{ м} = 10 \text{ мм.}$$

Полное гидравлическое сопротивление аппарата:

$$\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_{\Pi} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_a,$$

где величины  $\Delta P_p, \Delta P_{\Pi}, \Delta P_{\sigma}, \Delta P_a$  определяют по формулам (6.18), (6.19), (6.21), (6.22):

$$\Delta P_p = 1,82v_z^2 \rho_z / (S_0 \cdot 2) = 1,82 \cdot 3,15^2 \cdot 1,02 / (0,21 \cdot 2) = 43,9 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{\Pi} = 0,447 H_{\Pi} \rho_{ж} g / (v_{\Pi}^0)^{0,5} =$$

$$= 0,447 \cdot 0,101 \cdot 1000 \cdot 9,81 / (3,15/0,21)^{0,5} = 114 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{\sigma} = 4\sigma/d_0 = 4 \cdot 6,3 \cdot 10^{-2} / (5 \cdot 10^{-3}) = 50,4 \text{ Па};$$

$$\Delta P_a = \xi_a v_z^2 \rho_z / 2 = 27 \cdot 3,15^2 \cdot 1,02 / 2 = 137 \text{ Па};$$

$$\Delta P = 43,9 + 114 + 50,4 + 137 = 345 \text{ Па.}$$

Фосфоритовая пыль гидрофобна, поэтому степень фракционной очистки определяем по формуле для плохо смачиваемых пылей:

$$\eta_{\phi} = 100[1 - 87,1(1,37 - d_{\tau}^{0,1}) / (H_{\Pi}^{0,9} v_z^{0,25})].$$

В результате вычислений получаем следующие фракционные степени очистки при  $H_{\Pi} = 101$  мм и  $d_{cp} = (d_{\tau 1} + d_{\tau 2})/2$ :

$d_{\tau}$ , мкм	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30
$\eta_{\phi}$ , %	79,34	89,32	93,96	97,46	100	100

Общая степень очистки:

$$\eta = (79,34 \cdot 24 + 89,32 \cdot 26 + 93,96 \cdot 17 + 97,46 \cdot 6 + 100 \cdot 13 + 100 \cdot 14) / 100 = 90,6 \text{ \%}.$$

Остаточная концентрация пыли в газе на выходе из аппарата

$$c_{\text{вых}} = c_z (100 - \eta) / 100 = 2(100 - 90,6/100) = 0,188 \text{ г/м}^3.$$

Судя по полученному результату, степень очистки технологических газов в пенном аппарате не слишком высока и практически одинакова со степенью их очистки в высокоэффективном циклоне. Ввиду общего недостатка всех мокрых способов очистки - образования загрязненных стоков, применение циклона в данном случае более целесообразно.

#### 6.4. Ударно-инерционные пылеуловители

В промышленности широко распространены ударно-инерционные пылеуловители (называемых в литературе также газопромывателями ударного действия, импакторными и брызгальными скрубберами, скрубберами с самораспылением или с самогенерацией капель, ротоклонами типа *N*).

В скрубберах ударно-инерционного действия смесь обрабатываемых газопылевых выбросов с промывочной жидкостью создается в результате удара газового потока о поверхность жидкости, при этом газовый поток резко меняет направление движения, а частицы пыли по инерции отбрасываются на поверхность жидкости и захватываются ею. Образующиеся при ударе капли имеют размеры до 400 мкм. Вся энергия, необходимая для создания смеси, подводится газовым потоком.

Наиболее простой по конструкции *импакторный пылеуловитель* ударно-инерционного типа показан на рис 6.12, а. Он представляет собой вертикальную колонну, в нижней части которой находится слой жидкости. Запыленные газы со скоростью 20 м/с направляются сверху вниз на поверхность жидкости. При резком изменении направления движения газового потока (на 180°) взвешенные в газе частицы осаждаются на поверхности воды, а очищенные газы направляются в выходной газопровод. Аппараты этого типа удовлетворительно работают только при улавливании частиц размером более 20 мкм. Шлам из пылеуловителя удаляется периодически или непрерывно через гидрозатвор. Для удаления уплотненного осадка со дна применяют смывные сопла.

Среди мокрых пылеуловителей ударного действия можно выделить еще два наиболее распространенных в промышленности аппарата: *статический пылеуловитель типа ПВМ* (рис 6.14, б), и *скруббер Дойля*, показанный на рис 6.12, в.

В промывателе типа ПВМ (пылеуловители вентиляторные мокрые) загрязненные газы подаются непосредственно в корпус аппарата, а приобретают необходимую скорость для образования смеси уже в целевом канале. Схема движения газового потока в камере этого аппарата приведена на рис. 6.12, б. Осаждение пыли в ударно-инерционных скрубберах происходит в 2 стадии. Крупные фракции пыли из-за инерции не могут повернуть после удара вместе с потоком газа. Мелкие фракции, увлекаемые газом, улавливаются каплями жидкости и вследствие образования газожидкостной смеси отделяются от потока после прохождения импеллерной щели или на сепараторе уноса. Аппараты ПВМ рассчитаны на следующие производительности по очищаемому воздуху: 3000, 5000, 10000, 20000 и 40 000 м<sup>3</sup>/ч.

В скруббер Дойля газ на очистку поступает через трубы, в нижней части которых установлены конусы, увеличивающие скорость газовых потоков (до 35...55 м/с). С этой скоростью газовый поток ударяется о поверхность жидкости, создавая завесу из капель. Уровень жидкости в скруббере на 2...3 мм ниже кромки газоподводящей трубы. Гидравлическое сопротивление составляет 1,5 кПа.

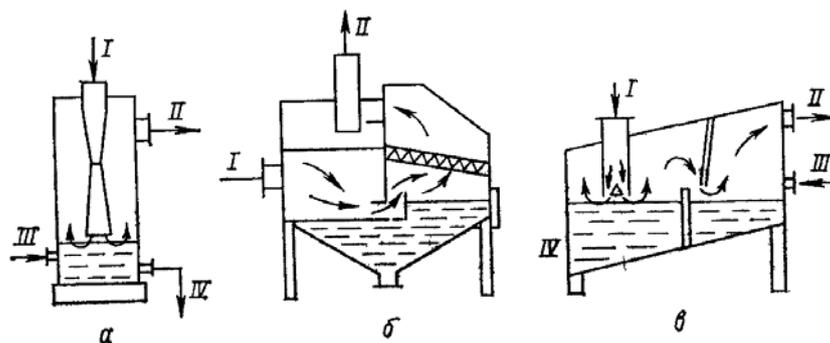


Рис. 6. 12. Скрубберы ударно-инерционного действия:  
*a* – импакторный скруббер; *б* – газопромыватель типа ПВМ; *в* – скруббер Дойля.

Степень очистки в импакторных скрубберах сопоставима с распылительными скрубберами при одинаковом перепаде давлений. Такие аппараты ударного действия, как высокоскоростные скрубберы Дойля, способны улавливать частицы пыли субмикронных размеров, но требуют значительной энергии для создания достаточного перепада давлений в потоке очищаемых газов.

Фракционную степень очистки воздуха в пылеуловителе ПВМ определяют, исходя из известного дисперсного состава по кривой фракционной эффективности (рис. 6.13) Зависимости на рис 6.13 построены для частиц пыли плотностью  $\rho_{\text{ч}} = 2600 \text{ кг/м}^3$ . При улавливании пылей с плотностью  $\rho_{\text{ч}}'$ , отличной от  $2600 \text{ кг/м}^3$ , пересчитывают диаметр частиц по формуле

$$d_{\text{ч}}' = d_{\text{ч}} \sqrt{\frac{2600}{\rho_{\text{ч}}'}} \quad (6.24)$$

где  $d_{\text{ч}}'$  — условный диаметр частицы, который следует брать на оси абсцисс графика.

Общую степень очистки в пылеуловителе ПВМ можно определить по формуле (3.7) или (3.10).

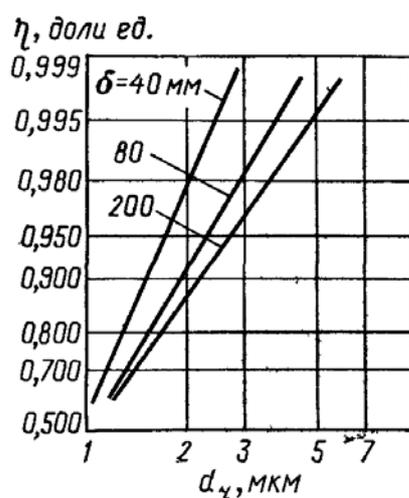


Рис. 6.13. Коэффициенты очистки для пылеуловителя типа ПВМ при различных уровнях воды  $\delta$ .

Технические характеристики ударных промывателей ПВМ приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8.

Технические характеристики газопромывателей ПВМ

Показатели	Типоразмер промывателя				
	3	5	10	20	40
Номинальная производительность по обрабатываемому газу, м <sup>3</sup> /с	0,83	1,39	2,78	5,56	11,11
Марка вентилятора	ЦП 13-50 N 3,2	ЦП 7-40 N 5	ЦП 7-40 N 6	ЦП 7-40 N 8	Ц 4-76 N 10
Объем воды в промывателе, м <sup>3</sup>	0,45	0,65	1,45	2,2	5,5
Масса пылеуловителя (без воды и электродвигателя), кг	754	1208	1998	3050	4737
Габариты, мм: длина	1250	1650	2500	2510	4750
ширина	1300	1359	1514	2314	2416
высота	2848	3080	3412	3680	4110
Длина одной перегородки, м	0,8	1,21	2,0	2,0	4,0-
Число перегородок, шт.	1	1	1	2	2

Достаточно распространены и так называемые *ротоклоны* типа *N* (рис. 6.14), отличающиеся от промывателей ПВМ более сложной формой импеллеров (щелей) или схемой перемещения потоков. Эти аппараты рассчитаны на очистку от 3 до 40 тыс. м<sup>3</sup>/ч запыленного газа.

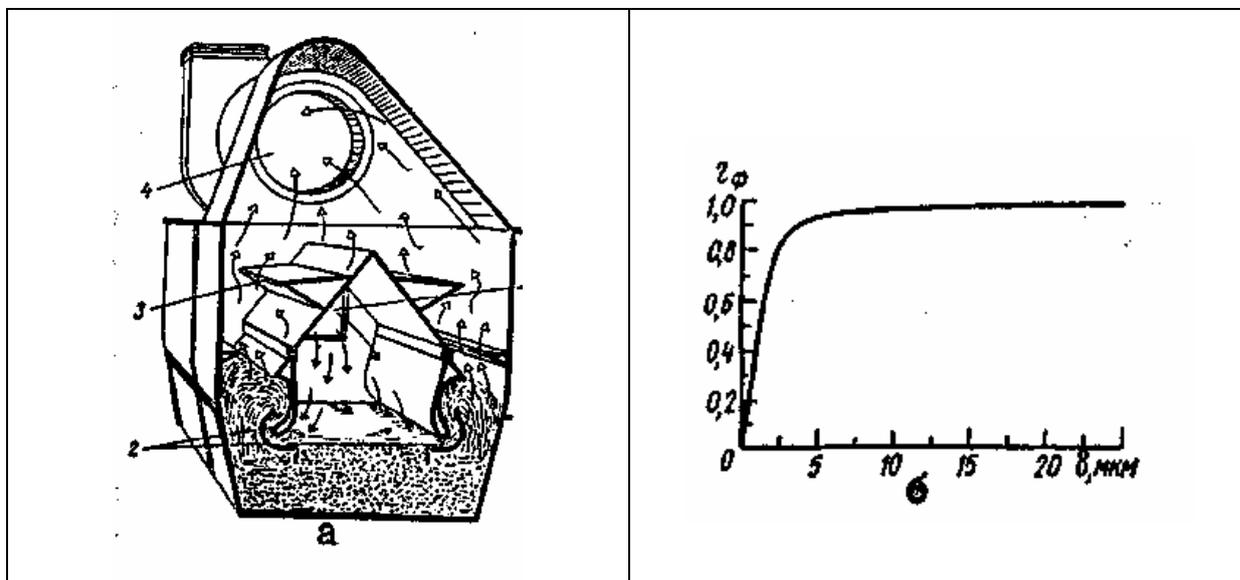


Рис. 6.14. Ротоклон типа *N*: *a* - схема ротоклона: 1 - устройство для подвода газов; 2 - направляющие лопатки; 3 - каплеотбойник; 4 - устройство для отвода газов; *б* - график фракционной эффективности ротоклона.

Запыленный поток поступает в приемную камеру и затем проходит через импеллер. Нижняя часть корпуса заполнена водой, уровень которой поддерживается автоматически. Воздух, проходя импеллер со скоростью 15...16 м/с, в соответствии с его конфигурацией неоднократно изменяет направление движения. Часть воды увлекается воздухом (газом), образуя сплошной водо-воздушный (газовый) поток.

Частицы пыли задерживаются, выпадают на дно в виде шлама и периодически удаляются. Ротоклон допускает колебание расхода очищаемого воздуха (газа) в пределах  $\pm 15\%$ . Расход воды невелик, он не превышает 0,03 л/м<sup>3</sup>. Гидравлическое сопротивление аппарата составляет 1000...1500 Па.

Удельный расход воды при периодическом сливе шлама и температуре газа не выше 40 °С составляет  $5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, а при непрерывном - примерно 20 г на 1 г уловленной пыли. Основным достоинством этих аппаратов является очень малый расход воды. В диапазоне гидравлических сопротивлений 1,6...2,0 кПа эти пылеуловители по степени очистки приближаются к скоростным промывателям СИОТ и ЦВП, а при гидравлическом

сопротивлению 2,0...2,5 кПа превышают эффективность указанных конструкций, но она все же ниже, чем у скрубберов Вентури.

Гидравлическое сопротивление (Па) ударно-инерционных пылеуловителей ротоклонного типа рассчитывается по формуле:

$$\Delta P = 10(\Delta H + V^{0,5}), \quad (6.25)$$

где  $\Delta H$  - перепад высот между уровнями жидкости в ротоклонах, мм;  $V$  - расход газа на 1 пог. м длины перегородки, м<sup>3</sup>/ч.

При улавливании среднедисперсных пылей  $\Delta H$  поддерживают в пределах 20...60 мм, а при высокодисперсных - от 60 до 200 мм. Расход газа на 1 пог. м длины перегородки устанавливают в пределах 2...7,5 тыс. м<sup>3</sup>/ч.

Фракционную степень очистки в ротоклонных пылеуловителях можно определить в зависимости от размера улавливаемых частиц по графику (рис. 6.15), а, общую степень очистки - по формуле (3.7) или (3.10).

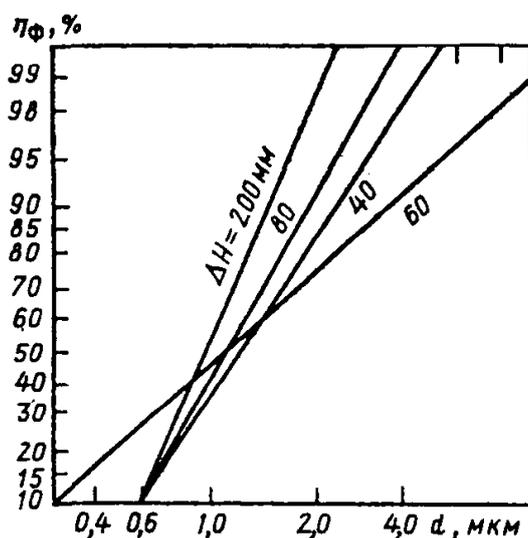


Рис. 6.15. Зависимость фракционной степени очистки  $\eta_\phi$  от размера частиц  $d_t$  в ротоклонах типа  $N$ .

Аппараты с самораспылением выгодно отличаются от других типов мокрых скрубберов низким потреблением воды. Для поддержания ее постоянного уровня в ванне необходимо лишь компенсировать потери со шламами, унос капель через сепаратор - каплеуловитель, испарение с поверхности и испарение диспергированной жидкости.

По имеющимся данным ротоклоны типа  $N$  применяются в литейном производстве (очистка воздуха от выбивных решеток, от установок для сушки песка и глины, для очистки от механических примесей), а также для очистки выбросов при производстве асбеста, при полировке металла, об-

жиге известняка. Эффективность очистки находилась в пределах 89,0...99,4 %.

*Мокрый пылеуловитель РИСИ.* Аппарат предназначен для тонкой очистки воздуха, поступающего от аспирационных или технологических систем. Он может быть установлен на второй ступени очистки после пылеуловителя, обеспечивающего грубую или среднюю очистку (рис. 6.16). После эффективной двухступенчатой очистки воздух может быть направлен на рециркуляцию.

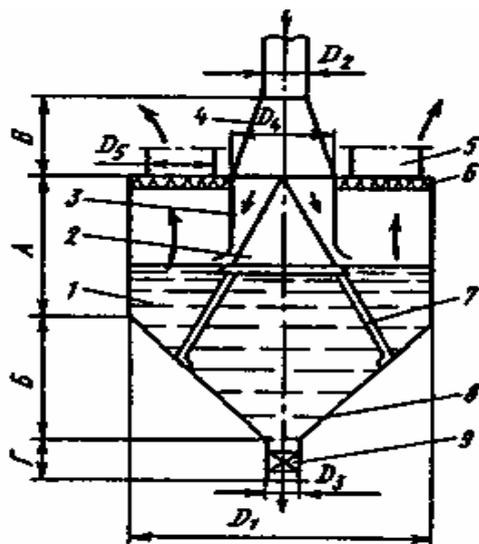


Рис. 6.16. Мокрый пылеуловитель РИСИ:

1 - цилиндрическая камера; 2 - конус-рассекатель; 3 - отражатель; 4 - диффузор; 5 - патрубок для отвода воздуха; 6 - каплеуловитель; 7 - лапки для крепления; 8 - бункер конической формы; 9 - патрубок для стока шлама.

Пылеуловитель состоит из цилиндрической камеры с коническим бункером в ее нижней части для осаждения шлама. Внутри камеры расположены конус-рассекатель и цилиндрический отражатель, имеющие на концах плавные переходы к поверхности воды. Этим обеспечивается плавное соприкосновение запыленного потока с водной поверхностью под определенным углом. В верхней части аппарата установлены каплеуловитель и патрубки для выхода очищенного воздуха. Для удаления шлама служит патрубок.

При соприкосновении запыленного потока с водной поверхностью частицы пыли, находящиеся в потоке, смачиваются водой и оседают на дно бункера. Обеспыленный воздух удаляется наружу.

При применении мокрого пылеуловителя на второй ступени его устанавливают за вентилятором, т. е. на нагнетательной линии вентилятора.

Степень очистки воздуха в мокром пылеуловителе составляет 99,9 %, гидравлическое сопротивление - 400 Па.

Расход воды в аппарате незначителен — несколько литров в час, так как вода расходуется лишь на испарение с поверхности и унос влаги с воздухом. Шлам удаляется один раз в несколько месяцев. В холодное время года при установке пылеуловителя вне помещения производится теплоизоляция корпуса и подогрев с помощью водонагревателя или подача пара или горячей воды в небольшом количестве в аппарат.

Разработаны такие аппараты на производительность 600...10000 м<sup>3</sup>/ч. Характеристика пылеуловителя приведена в табл. 6.9.

Таблица 6.9.

Характеристика мокрых пылеуловителей РИСИ

№ пылеуловителя	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Размеры, мм									Масса без воды, кг
					I	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	
1	до 600	300	300	200	100	500	100	80	200	100	21,4
2	до 1500	350	350	200	100	600	200	80	300	100	49,2
3	до 3500	400	400	300	200	900	300	100	400	180	63,1
4	до 7000	500	500	400	200	1200	400	100	500	280	98,4
5	до 10000	700	700	600	200	1500	500	100	600	315	175

Расчеты характеристик скрубберов ударного действия типа ПВМ с определением степени очистки обрабатываемых газов по вероятностному методу выполняют в следующем порядке.

1. По заданному расходу газовых выбросов, м<sup>3</sup>/с, используя таблицу 6.8, подбирают типоразмер промывателя и определяют расход газов  $V/l$ , м<sup>3</sup>/(см), на 1 м длины перегородки (см. рис. 6.12, б). Ориентировочно величину удельного расхода можно принимать в пределах (0,6...2,5) м<sup>3</sup>/(см).

2. Рассчитывают гидравлическое сопротивление промывателя по эмпирической формуле:

$$\Delta p = g \left[ 10^3 \Delta l + 90 \left( \frac{V}{l} \right)^{0,5} \right], \text{ Па} \quad (6.26)$$

где  $\Delta l$  - расстояние от низа перегородки до верхнего уровня воды, м (см. рис. 6.12, б).

При улавливании мелкодисперсных пылей значение  $\Delta l$  принимают не менее (60... 100) мм, а верхний предел может достигать 200 мм и более. Для среднедисперсных пылей придерживаются значений  $\Delta l$  в пределах (20...60) мм. По величине сопротивления уточняют требуемый напор вентилятора.

3. По формуле (4.38) определяют степень очистки газов в пылеуловителе, исходя из следующих опытных данных:

$d_{50} = 1,5$  мкм;  $\lg \sigma_{\eta} = 0,3$  при  $\Delta l = 40$  мм;  $0,24$  при  $\Delta l = 80$  мм;  $0,17$  при  $\Delta l = 200$  мм и  $0,13$  при  $\Delta l = 300$  мм.

Для других значений  $\Delta l$  величину  $\lg \sigma_{\eta}$  можно находить интерполированием. Степень очистки в других типах импакторных промывателей (ротоклонах, скруббере Дойля и т.д.) также определяется по опытным данным.

4. Обосновывают необходимость применения газопромывателя типа ПВМ или причины отказа.

**Пример 6.4.** Рассчитать степень очистки в газопромывателе типа ПВМ газовых выбросов содорегенерационного котлоагрегата (СРКА) целлюлозно-бумажного комбината. Медианный диаметр частиц  $d_m = 1,1$  мкм, дисперсия  $\sigma = 1,7$ , плотность  $\rho = 2740$  кг/м<sup>3</sup>. Концентрация пыли в газах  $4,1$  г/м<sup>3</sup>. Пыль характеризуется склонностью к образованию крупных агломератов и сильной слипаемостью; смачиваемость 100%, водный раствор пыли коррозионно не активен. Количество газовых выбросов составляет 18 тыс.м<sup>3</sup>/ч или 5 м<sup>3</sup>/с. Температура газов 140°C.

Расчеты выполняем в следующем порядке:

1. Принимаем в соответствии с данными таблицы 6.8 промыватель ПВМ-20 с двумя перегородками длиной по 4 м. Удельный расход газов на 1 м длины перегородки составит:

$$V/l = 5/4 = 1,25 \text{ м}^3/(\text{с м}).$$

что находится в пределах рекомендуемых значений.

Поскольку необходимо обрабатывать мелкодисперсную пыль, принимаем расстояние  $\Delta l = 0,2$  м. По формуле (6.26) определяем гидравлическое сопротивление промывателя:

$$\Delta p = 9,81(1000 \cdot 0,2 + 901,25^{0,5}) \cong 2950 \text{ Па}.$$

Принимаем к установке вентилятор ЦП7-40 №8 с электродвигателем АО 2-82-4 мощностью 55 кВт, обеспечивающий подачу до 6,5 м<sup>3</sup>/с и давление до 3300 Па.

3. Определяем параметр осаждения  $x$  по формуле (4.38) при  $d_m = 1,1$  мкм;  $\sigma = 1,7$ ;  $d_{50} = 1,5$  мкм;  $\lg \sigma_{\eta} = 0,17$ :

$$x = \frac{\lg \frac{1,1}{1,5}}{\sqrt{0,17^2 + \lg^2 1,7}} = -0,472.$$

Полный коэффициент очистки составит:  $\eta = 31,9\%$ .

4. Хотя по ряду показателей (низкая коррозионная активность, 100%-ная смачиваемость, низкий расход воды в аппарате) выбор газопромывателя ПВМ представляется обоснованным, расчеты степени очистки показывают, что подобные аппараты малоэффективны при улавливании мелкодисперсной пыли.

### 6.5. Скоростные пылеуловители (скрубберы Вентури)

Среди мокрых пылеуловителей наибольшей эффективностью очистки газов (воздуха) от мелкодисперсной пыли обладают установки с трубой Вентури (СПУ Вентури).

Более высокая эффективность пылеулавливания по сравнению с полыми газопромывателями достигается в скрубберах Вентури созданием развитой поверхности контакта фаз, что требует и значительно более высоких энергозатрат. Образование тонкодисперсного аэрозоля происходит при этом как за счет механической диспергации промывочной жидкости, так и вследствие интенсивного испарения капель при резком падении давления в горловине. Очевидно, это приводит также к повышению влажности газа и интенсификации капиллярной конденсации влаги на поверхности частиц пыли. Последняя причина может служить объяснением того, что степень очистки пыли в скрубберах Вентури слабо зависит от ее смачиваемости.

Под СПУ Вентури понимают аппарат, состоящий из трубы-распылителя для измельчения жидкости под действием воздушного (газового) потока, движущегося с большой скоростью, и каплеуловителя (рис. 6.17). Основная часть скруббера — сопло Вентури 2, в конфузорную часть которого подводится запыленный поток газа и через центробежные форсунки 1 жидкость на орошение. В конфузорной части сопла происходит разгон газа от входной скорости ( $w = 15 \dots 20$  м/с) до скорости в узком сечении сопла  $40 \dots 200$  м/с и более. Процесс осаждения частиц пыли на капли жидкости обусловлен массой жидкости, развитой поверхностью капель и высокой относительной скоростью частиц жидкости и пыли в конфузорной части сопла. Эффективность очистки в значительной степени зависит от равномерности распределения жидкости по сечению конфузорной части сопла. В диффузоре трубы происходит рост давления и снижение скорости потока до  $15 \dots 20$  м/с, что способствует коагуляции мелких частиц. Из диффузора газовый поток выносит капли жидкости с осевшими на них частицами пыли в каплеуловитель 3, где происходит сепарация взвешенных

частиц. Для улавливания пыли после трубы Вентури возможно использование скрубберов, циклонов с водяной пленкой, циклона-промывателя СИОТ и др. В этих аппаратах осуществляется улавливание предварительно скоагулированных пылевых частиц. Каплеуловитель обычно выполняют в виде прямоточного циклона.

Характерным элементом для данного устройства является труба Вентури (рис. 6.17, 6.18), где происходит контакт воздушного (газового) потока, содержащего во взвешенном состоянии пылевые частицы, с тонкораспыленной водой.

По величине гидродинамического сопротивления труб Вентури различают низконапорные и высоконапорные скрубберы. Низконапорные скрубберы с сопротивлением распылителя до 5 кПа применяются для улавливания пыли с размерами частиц более 20 мкм.

Эффективное улавливание мелких частиц требует более высоких энергозатрат. Скрубберы с высоконапорными трубами Вентури могут осаждать частицы размером 0,5 мкм и выше. Скорость потока в высоконапорных трубах приближается к скорости звука, а их сопротивление достигает нескольких десятков кПа.

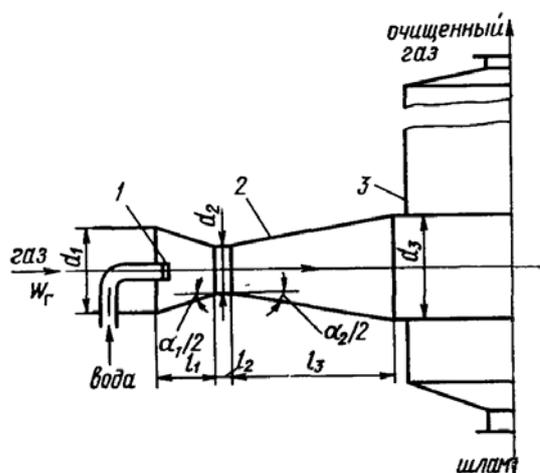


Рис. 25. Скруббер Вентури

Рис. 6.17. Скруббер Вентури:  
1 — форсунка; 2 — сопло Вентури;  
3 — каплеуловитель.

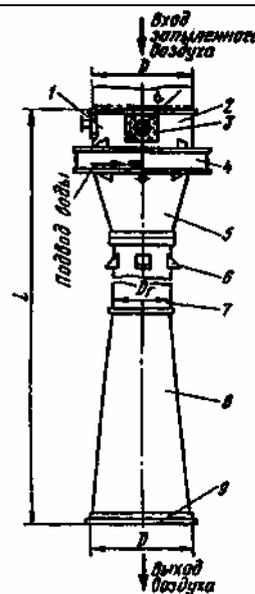


Рис. 6.18. Труба Вентури:  
1 — лаз герметический; 2 — цилиндр;  
3 — смывное приспособление;  
4 — камера; 5 — конфузور;  
6 — опора; 7 — горловина; 8 —  
диффузор; 9 — фланец.

Для труб Вентури оптимальными считаются следующие геометрические характеристики (см. рис. 6.17): угол сужения конфузора  $\alpha_1 = 15^\circ \dots 28^\circ$ , длина горловины  $l_2 = 0,15 d_2$ , угол раскрытия диффузора  $\alpha_2 = 6^\circ \dots 8^\circ$ .

Скрубберы Вентури могут различаться устройством каплеуловителей, конструкциями и способами установки труб, способами подвода жидкости. Каплеуловители могут быть выносными или размещаться в одном корпусе с трубой. Трубы могут иметь круглое, кольцевое или прямоугольное (щелевое) сечение горловины. Трубы с круглым сечением применяют для небольших расходов, а трубы со щелевым или регулируемым кольцевым сечением - для больших. При необходимости трубы компонуются в группы и батареи.

Вода в горловину трубы может подаваться через форсунки различных конструкций, установленные центрально или периферийно, или стекать в виде пленки по стенкам конфузора (рис. 6.19, а, б, в). Худшие показатели по дроблению капель и, следовательно, по степени очистки имеют бесфорсуночные трубы Вентури (рис. 6.19, г). В то же время они допускают использование оборотной неочищенной жидкости, что может быть важным при совместном улавливании газообразных и дисперсных примесей (например, при нейтрализации кислых газов известковым молоком).

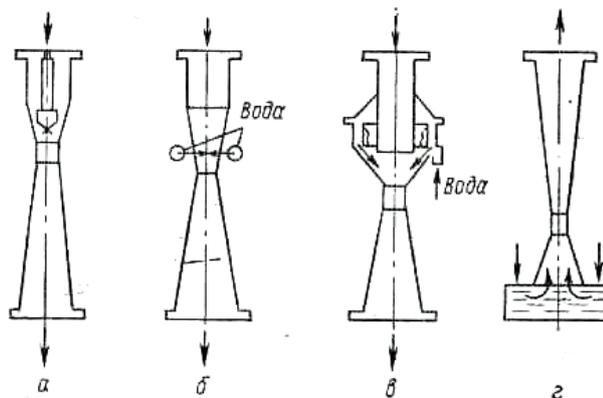


Рис. 6.19. Конструкции труб-распылителей:

а – центральный (форсуночный) подвод жидкости; б – периферийное орошение; в – пленочное орошение; г – бесфорсуночное орошение.

Расход воды, распыляемой в СПУ, колеблется в широких пределах и составляет от 1 до 80 л на  $100 \text{ м}^3$  очищаемого воздуха. Расход зависит от вида улавливаемой пыли, ее концентрации в очищаемом воздухе, а также от конструкции СПУ. Для распыления воды перед форсунками необходим напор 200...300 кПа.

Эффективность улавливания частиц 5 мкм составляет 99,6 %.

СПУ Вентури применяют для улавливания пылей и возгонов черной и цветной металлургии, пылей пищевых производств, не изменяющих своих свойств при контакте с водой, например, сахарной и др. при начальной концентрации пыли в весьма широком диапазоне -  $0,05 \dots 100 \text{ г/м}^3$ .

Главным преимуществом СПУ Вентури является простота устройства и малые габаритные размеры установки.

Среди низконапорных скрубберов Вентури широкое распространение получили так называемые коагуляционные мокрые пылеуловители (КМП), которые представляют собой аппарат с совмещенной трубой - коагулятором и циклоном ЦВП. Общий вид аппарата представлен на рис. 6.20.

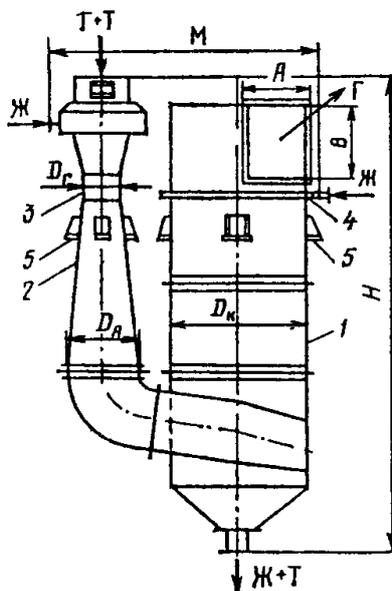


Рис. 6.20. Коагуляционный мокрый пылеуловитель КМП:  
 1 – сепарационная камера; 2 – труба Вентури;  
 3 – горловина; 4 – водяной коллектор; 5 – опоры.

За определяющий размер КМП принят диаметр горловины  $D_g$  трубы-коагулятора, который в ряду размеров меняется от 250 до 1000 мм. Данные аппараты могут работать в широком диапазоне расходов газа ( $7 \dots 230$  тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$ ) при скорости газа в горловине  $40 \dots 70$  м/с. Гидравлическое сопротивление при этом составляет  $12 \dots 35$  кПа, а удельный расход воды  $0,2 \dots 0,6$  л/ $\text{м}^3$  газа. Технические характеристики типовых КМП приведены в табл. 6.10.

Таблица 6.10

## Технические характеристики мокрого пылеуловителя КМП

Тип аппарата	Расход газа, тыс. м <sup>3</sup> /ч	Размеры, мм						
		$D_z$	$D_o$	$D_k$	$H$	$M$	$A$	$B$
КМП-2,5	6,5-14,5	250	450	1000	3350	2300	350	620
КМП-3,2	11-24	320	560	1200	4990	2800	410	750
КМП-7,0	17-33,5	400	700	1500	5630	3540	530	930
КМП-5,0	26-60	500	900	1900	7260	3960	670	1180
КМП-6,3	40-92	630	1120	2300	8650	4670	810	1430
КМП-7,1	50-120	710	1250	2700	9496	5220	950	1680
КМП-8,0	64-150	800	1400	3000	10086	5810	1250	1860
КМП-10	97-235	1000	1800	3000	10086	5810	1250	1860

Расчет степени очистки воздуха от пыли в КМП основан на экспериментально установленной зависимости диаметра частиц, уловленных на 50%, от удельной мощности контактирования  $E_{жс}$ , т.е. мощности, которая затрачивается только на контактирование газа с жидкостью при расходе газа  $V = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Удельная мощность контактирования  $E_{жс}$  зависит от расхода газа и орошающей жидкости, гидравлического сопротивления и типоразмера аппарата КМП. Номограмма для определения величины  $E_{жс}$  приведена на рис. 6.21.

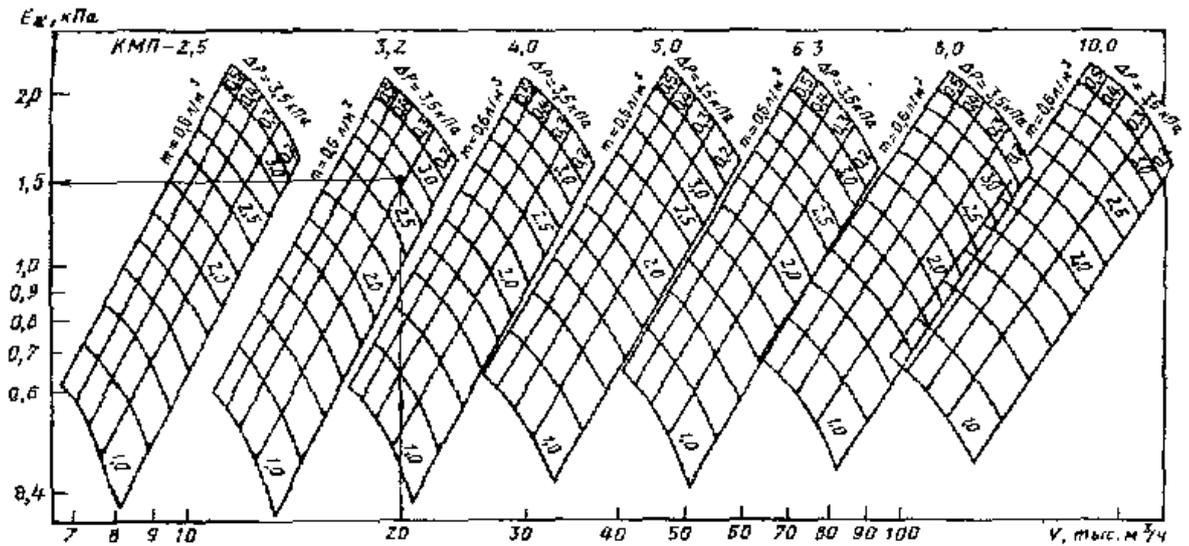


Рис. 6.21. Номограмма для определения удельной мощности контактирования КМП.

Затем по величине  $E_{ж}$  определяют значение медианного диаметра частиц, улавливаемых на 50%, т.е.  $d_{\eta=50}^{\circ}$ . При необходимости по уравнению (6.13) уточняют величину  $d_{\eta=50}^{\circ}$ , т.е. находят  $d_{\eta=50}^{\circ}$ . После этого на оси абсцисс откладывают отрезок  $OA$  от начала координат до значения  $d_{\eta=50}^{\circ}$  (рис. 6.22).

Построив в логарифмически вероятных координатах кривую распределения  $D(d)$ , по формуле

$$\ln \sigma = \ln(d_m/d_{16}) = \ln(d_{84}/d_m) \quad (6.27)$$

находят значение параметра  $\sigma$  и наносят эту линию на номограмму (рис. 6.22). Затем откладывают на оси абсцисс номограммы средние величины диаметров частиц каждой фракции  $d_i^{cp}$ , из координат которых вычитаются отрезки  $OA$ , а из полученных точек абсцисс восстанавливают ординаты до линии  $\sigma$ , которые показывают степень очистки каждой фракции. Общую эффективность очистки рассчитывают по уравнению

$$\varepsilon_{общ} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta R_i \eta_i \quad (6.28)$$

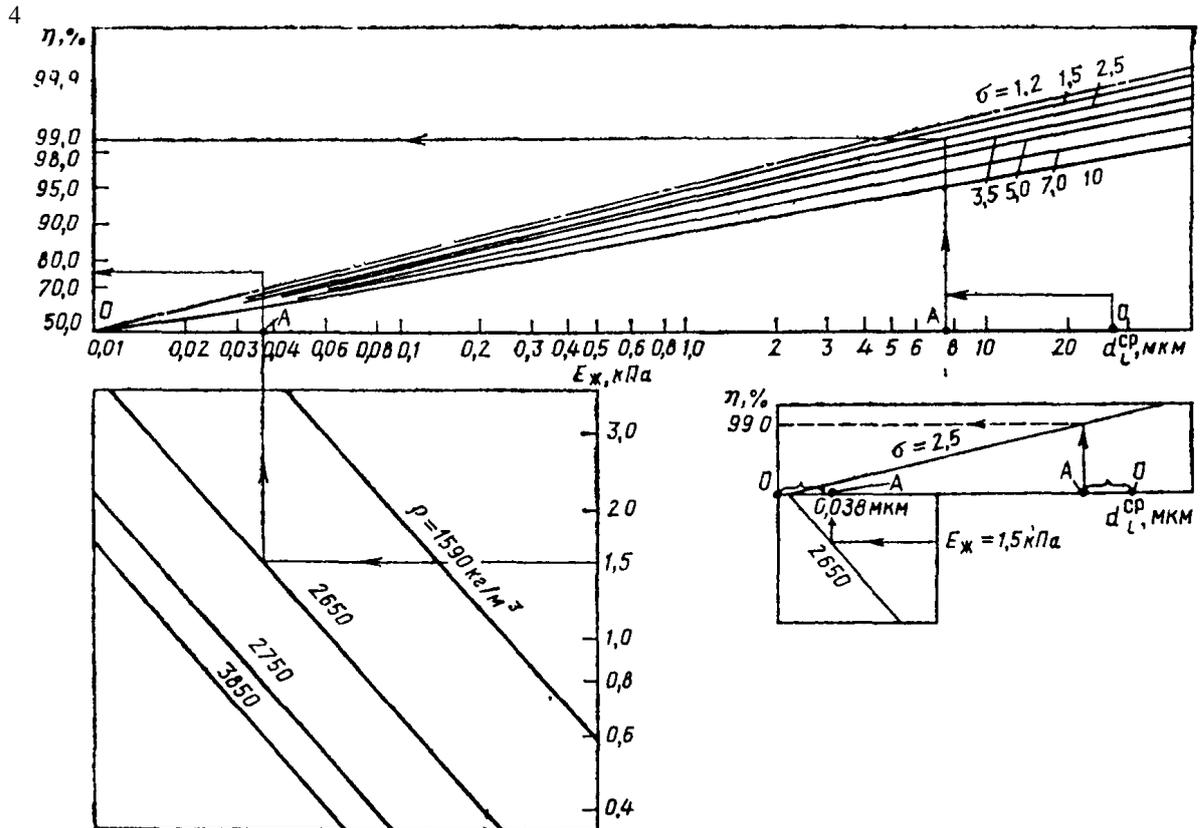


Рис. 6.22. Номограмма для определения степени очистки в КМП (плотность частиц кокса –  $1590 \text{ кг/м}^3$ , кварца –  $2650 \text{ кг/м}^3$ , известняка –  $2750 \text{ кг/м}^3$  и агломерата –  $3850 \text{ кг/м}^3$ ).

Гидравлическое сопротивление скрубберов Вентури, необходимое для пользования номограммой, рассчитывают следующим образом. Обычно оно суммируется из потерь напора в трубе Вентури и каплеуловителе, причем основная часть потерь приходится на трубу Вентури.

Гидравлическое сопротивление трубы Вентури при подаче в нее орошающей жидкости описывается уравнением:

$$\Delta P_{op} = \Delta P_2 + \Delta P_{жс}, \quad (6.29)$$

где  $\Delta P_2$  - гидравлическое сопротивление трубы Вентури без орошения, Па;  $\Delta P_{жс}$  - гидравлическое сопротивление трубы Вентури, обусловленное вводом орошающей жидкости. Па.

Потерю напора сухой трубы определяют по зависимости:

$$\Delta P_2 = \xi_c v_2^2 \rho_2 / 2, \quad (6.30)$$

где  $\xi_c$  - коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы Вентури;  $v_2$  - скорость газа в горловине (обычно принимается по температуре и давлению на выходе из трубы Вентури), м/с;  $\rho_2$  - плотность газов (при тех же условиях),  $\text{кг/м}^3$ .

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi_c$  для труб Вентури с круглой и прямоугольной горловинами длиной  $0,15 \cdot D_3$  ( $D_3$  - эквивалентный диаметр горловины) принимают в пределах  $0,12 \dots 0,15$ . При длине горловины в пределах  $0,15 D_3 \leq l_2 \leq D_3$  этот коэффициент рассчитывают по зависимости:

$$\xi_c = 0,165 + 0,034(l_2/D_3) - (0,06 + 0,028l_2/D_3)M, \quad (6.31)$$

где  $M = v_2/v_{36}$  - число Маха;  $v_{36}$  - скорость звука в газе, м/с.

Выражение (6.31) справедливо при скорости газа в горловине до 150 м/с, причем обе скорости берутся по температуре и давлению газов на выходе из трубы Вентури.

Гидравлическое сопротивление труб Вентури, обусловленное орошающей жидкостью, рассчитывают по формуле:

$$\Delta P_{жс} = \xi_{жс} (v_2^2 \rho_{жс} / 2) m, \quad (6.32)$$

где  $\xi_{жс}$  - коэффициент гидравлического сопротивления, обусловленный вводом жидкости;  $m$  - удельный расход орошающей жидкости,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Величину коэффициента  $\xi_{жс}$  следует определять по выражению:

$$\xi_{жс} = A \xi_c [(v_{жс}/v_2)(\rho_2/\rho_{жс})]^{1+B}, \quad (6.33)$$

где  $v_{жс}$  - скорость капель жидкости на выходе из горловины трубы Вентури (обычно в 1,5...3 раза меньше  $v_2$ , меньшие значения берут для высоких скоростей газа), м/с.

Значения коэффициента  $A$  и показателя степени  $(1+B)$  в формуле (6.33) приведены в табл. 6.11.

Таблица 6.11

Значения коэффициента  $A$  и показателя степени  $(1+B)$

Способ подвода орошающей жидкости в трубу Вентури	Скорость газа в горловине, м/с	Длина горловины $l_2$ , м	$A$	$1+B$
Центральный и пленочный подвод	>80	$(2,15-12,0)$	$1,68(l_2/D_3)^{0,045}$	$1-1,12(l_2/D_3)^{0,045}$
	<80	$D_3$	$3,49(l_2/D_3)^{0,266}$	$1-0,98(l_2/D_3)^{0,266}$
Центральный подвод перед конфузоров или орошение площади над батареей труб	40...150	0,150,	0,215	-0,54

Периферийный подвод в конфузоре	>80	0,150.	13,4	0,024
	<80		1,4	-0,316
Центральный подвод в конфузоре трубы с кольцевым сечением горловины	30...150	-	0,08	-0.502
Центральный подвод в конфузоре трубы оптимальной конструкции	40-150	0,15	0.63	-0.3

Гидравлическое сопротивление каплеуловителя рассчитывают аналогично расчету ЦВП. Определив значения удельной мощности контактирования  $E_{ж}$  по номограмме (см. рис. 6.21), определяют степень или эффективность очистки частиц различного размера. Метод расчета степени очистки по номограмме 6.21 аналогичен расчету по номограмме на рис. 6.6 для определения степени очистки в циклонах ЦВП. Значение размера частицы, улавливаемой на 50% ( $d_{\eta=50}$ ), находится на нижней части номограммы в зависимости от найденного значения  $E_{ж}$  и плотности частиц.  $(l_z/D_z)^{0,045}$ .

Степень очистки газов в скруббере Вентури можно рассчитать по полуэмпирической формуле:

$$\eta = 100(1 - e^{-c m \sqrt{Stk}}), \quad (6.34)$$

где  $Stk$  — критерий Стокса:

$$Stk = \frac{d_q w_z \rho_q}{18 \cdot \mu_z d_k},$$

$m$  — удельный расход орошающей жидкости, л/м<sup>3</sup>;  $c$  — коэффициент, учитывающий геометрические соотношения частей трубы Вентури; зависит от длины  $l_{эф}$ :

$l_{эф}$ , м	0,1	0,2	0,3	0,4
$c$	1,25	1,45	1,52	1,56

Эффективная длина горловины  $l_{\text{эф}}$  равна сумме длин горловины  $l_{\text{г}}$  и начального участка диффузора  $l'$ . При угле раскрытия диффузора  $\alpha = 6^\circ$  величина  $l' = 0,476 \cdot d_{\text{г.экв}}$  ( $d_{\text{г.экв}}$  — эквивалентный диаметр горловины).

Величину  $d_{\text{к}}$  (в мкм), характеризующую средний диаметр капель жидкости, можно определить по эмпирической формуле:

$$d_{\text{к}} = \frac{4860}{w_2} + 16,3 \cdot m^{1,5}. \quad (6.35).$$

Гидравлическое сопротивление  $\Delta p_{\text{ап}}$  классического скруббера Вентури определяется как сумма (в Па):

$$\Delta p_{\text{ап}} = \Delta p_{\text{тр}}^{\text{оп}} + \Delta p_{\text{ку}}, \quad (6.36)$$

где  $\Delta p_{\text{тр}}^{\text{оп}}$  — гидравлическое сопротивление орошаемой трубы Вентури, Па;  $\Delta p_{\text{ку}}$  — гидравлическое сопротивление каплеуловителя, Па.

Величина  $\Delta p_{\text{тр}}^{\text{оп}}$  равна:

$$\Delta p_{\text{тр}}^{\text{оп}} = (\zeta_{\text{тр}}^{\text{с}} + \zeta_{\text{тр}}^{\text{ж}}) \cdot \rho_{\text{г}} \cdot w_{\text{г}}^2 / 2, \quad (6.37)$$

где  $\zeta_{\text{тр}}^{\text{с}}$ ,  $\zeta_{\text{тр}}^{\text{ж}}$  — коэффициенты гидравлического сопротивления сухой трубы Вентури и вызванного вводом жидкости.

Разработано 10 типоразмеров скрубберов Вентури с кольцевыми регулируемыми сечениями (рис. 6.23), позволяющих очищать запыленные газы при расходе 2...500 тыс. м<sup>3</sup>/ч и гидравлическом сопротивлении от 4 до 12 кПа.

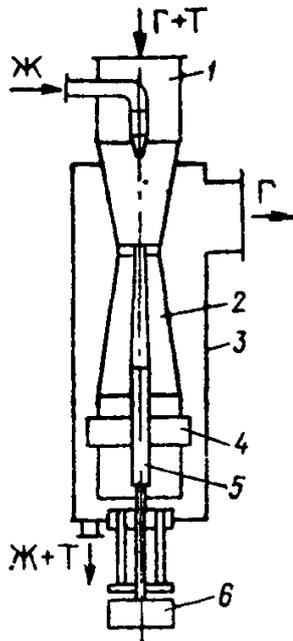


Рис. 6.23. Скруббер Вентури с кольцевой горловой и коническим обтекателем:

1 — патрубок для пыли; 2 — труба-коагулятор; 3 — сепарационная камера; 4 — завихритель; 5 — шток регулирующий; 6 — механизм управления штоком.

Технические характеристики скрубберов Вентури с кольцевым регулируемым сечением приведены в табл. 6.12.

Таблица 6.12

Технические характеристики скрубберов Вентури с кольцевым регулируемым сечением

Тип аппарата	Расход газа, тыс м <sup>3</sup> /ч	Диаметр горловины, мм	Диаметр каплеуловителя, мм	Скорость газа в каплеуловителе, м/с
СВ-150/90-800	2 - 7	150	800	1,4-5,0
СВ-210/120-1200	7-15	210	1200	2,3-5,0
СВ-300/180-1600	15 - 30	300	1600	2,5-5,0
СВ-400/250-2200	30 - 50	400	2200	3,0-5,0
СВ-900/820-1600	50 - 80	900	1600	6,9-11,0
СВ-1020/920-2000	80 - 120	1020	2000	7,1-10,6
СВ-1150/1020-2400	120 - 180	1150	2400	7,4-11,0
СВ-1380/1220-2000	160 - 240	1380	2000	7,1-10,6
СВ-1620/1420-2400	240 - 340	1620	2400	7,4-10,4
СВ-1860/1620-2800	340 - 500	1860	2800	7,1-11,3

В скрубберах четырех первых номеров регулирование расхода газа обеспечивается с помощью конических обтекателей с углом раскрытия 7°, а для остальных - эллиптическими обтекателями, позволяющими регулировать скорость газа в горловине от 85 до 145 м/с. Скрубберы последних трех типоразмеров имеют сдвоенные циклонные каплеуловители.

Расчет скрубберов Вентури с кольцевым регулируемым сечением аналогичен расчету КМП.

**Пример 6.5.** Определить степень очистки в скруббере Вентури с кольцевым регулируемым сечением запыленного кварцевой пылью воздуха (15000 м<sup>3</sup>/ч) с конечной температурой 40°C. Выбрать тягодутьевое оборудование для нормальной работы аппарата, если орошение скруббера производится с периферийным подводом воды в конфузур. Состав пыли приведен ниже:

$d_t$ , мкм	0-3	3-10	10-15	15-20
$\Delta R$ , %	10	16	46	18

Определяем гидравлическое сопротивление трубы Вентури:

$$\Delta P_{0p} = \Delta P_z + \Delta P_{ж},$$

где  $\Delta P_z$  и  $\Delta P_{ж}$ , - определяют по формулам (6.30) и (6.32).

Принимаем скорость движения газа в горловине 100 м/с, тогда диаметр горловины

$$D_1 = [4V_z / (3600v_{z1})]^{0,5} = 4 \cdot 15000 / (3600 \cdot 100) = 0,408.$$

Принимаем диаметр горловины равным 0,4 м, тогда действительная скорость газа в горловине

$$v_z = v_{z1} D_1^2 / D^2 = 100 \cdot 0,408 / 0,4 = 102 \text{ м/с.}$$

Длину горловины примем равной 0,15  $D$ , т.е. 0,06 м, тогда

$$\Delta P_z = \xi_c v_z^2 \rho_z / 2 = 0,14 \cdot 102^2 \cdot 1,125 / 2 = 819 \text{ Па.}$$

Потеря напора под действием присутствующих в потоке капель жидкости:

$$\Delta P_{жс} = \xi_{жс} (v_z^2 \rho_{жс} / 2) m,$$

где

$$\xi_{жс} = A \xi_c [(v_{жс} / v_z)(\rho_z / \rho_{жс})]^{1+B}.$$

Из табл. 6.11 находим значения  $A = 13,4$  и  $1+B = 0,024$ . Скорость капель жидкости принимаем  $v_{жс} = v_z / 2 = 102 / 2 = 51$  м/с, плотность орошения  $m = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{м}^3$ , тогда

$$\xi_{жс} = 13,4 \cdot 0,1 [(51/102)(1,125/1000)]^{0,024} = 1,57;$$

$$\Delta P_{жс} = (1,57 \cdot 102^2 \cdot 1000 / 2) \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 3267 \text{ Па;}$$

$$\Delta P_{оп} = 819 + 3267 = 4183 \text{ Па.}$$

Определяем гидравлическое сопротивление пылеуловителя. В качестве пылеуловителя можно использовать циклон ЦВП в скоростном исполнении, тогда по диаграмме (рис. 6.4) и расходу газа определяем потерю напора для аппарата  $D = 1000$  мм:

$$\Delta P_{\kappa} = 130 \text{ Па.}$$

Общее гидравлическое сопротивление аппарата

$$\Delta P = \Delta P_{оп} + \Delta P_{\kappa} = 4183 + 130 = 4313 \text{ Па.}$$

По общему гидравлическому сопротивлению и расходу газа в качестве тягодутьевого оборудования выбираем воздуходувку ТВ-250-1,12, обеспечивающую расход  $15\ 000 \text{ м}^3 / \text{ч}$  при напоре 0,12 МПа и мощности электродвигателя 100 кВт.

Расчет степени очистки газа от пыли в скруббере Вентури основан на установлении зависимости диаметра частиц, уловленных на 50%, от удельной мощности контактирования  $E_{жс}$ . Величину  $E_{жс}$  рассчитывают по зависимости:

$$E_{жс} = \Delta P_{жс} + \Delta P m,$$

где  $\Delta P$  - давление в водоподводящем патрубке оросителя трубы Вентури (примем  $\Delta P = 0,4$  МПа), откуда

$$E_{жс} = 3267 + 4 \cdot 10^5 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 3427 \text{ Па.}$$

По величине  $E_{ж}$  на номограмме (рис. 6.22) определяем диаметр частиц, уловленных на 50%. Для кварцевой пыли  $d_{\eta=50} = 0,012$  мкм.

Уточним значение диаметра частиц, улавливаемых на 50%:

$$d_{\eta=50}^{\partial} = d_{\eta=50}^{\partial} [\rho_{\tau}^{\partial} \mu^{\partial} / (\rho_{\tau}^{\partial} \mu^{\partial})]^{0,5} = \\ = 0,012 [2,65 \cdot 1,71 \cdot 10^{-5} / (2,65 \cdot 1,83 \cdot 10^{-5})]^{0,5} \approx 0,012 \text{ мкм.}$$

Откладывая на оси абсцисс номограммы (рис. 6.22) отрезок от начала координат до точки  $A$ , с учетом величины отрезка  $OA$  определяем фракционную степень очистки для частиц среднего размера  $d_{cpi} = (d_{in} + d_{ик})/2$ . Она составит:

$d_{cpi}$ , мкм	1,5	6,5	12,5	197,5
$\eta_{\phi i}$ , %	95	98,5	99,1	99,3

Общая степень очистки воздуха в скруббере:

$$\eta_{общ} = \sum_{i=1}^{i=n} (\Delta R_i \eta_{\phi i} / 100) = (10 \cdot 95 + 16 \cdot 98,5 + \\ + 46 \cdot 99,1 + 18 \cdot 99,3) / 100 = 88,7 \text{ \%}.$$

Для использования в промышленности на базе оптимальной конфигурации трубы Вентури (рис. 6.24) разработан типоразмерный ряд высоконапорных скрубберов Вентури ГВПВ. Основные характеристики аппаратов этого ряда приведены в табл. 6.13. В качестве каплеуловителей для них используются малогабаритные прямоточные циклоны (рис. 6.25). Техническая характеристика типоразмерного ряда каплеуловителей приведены в табл. 6.14.

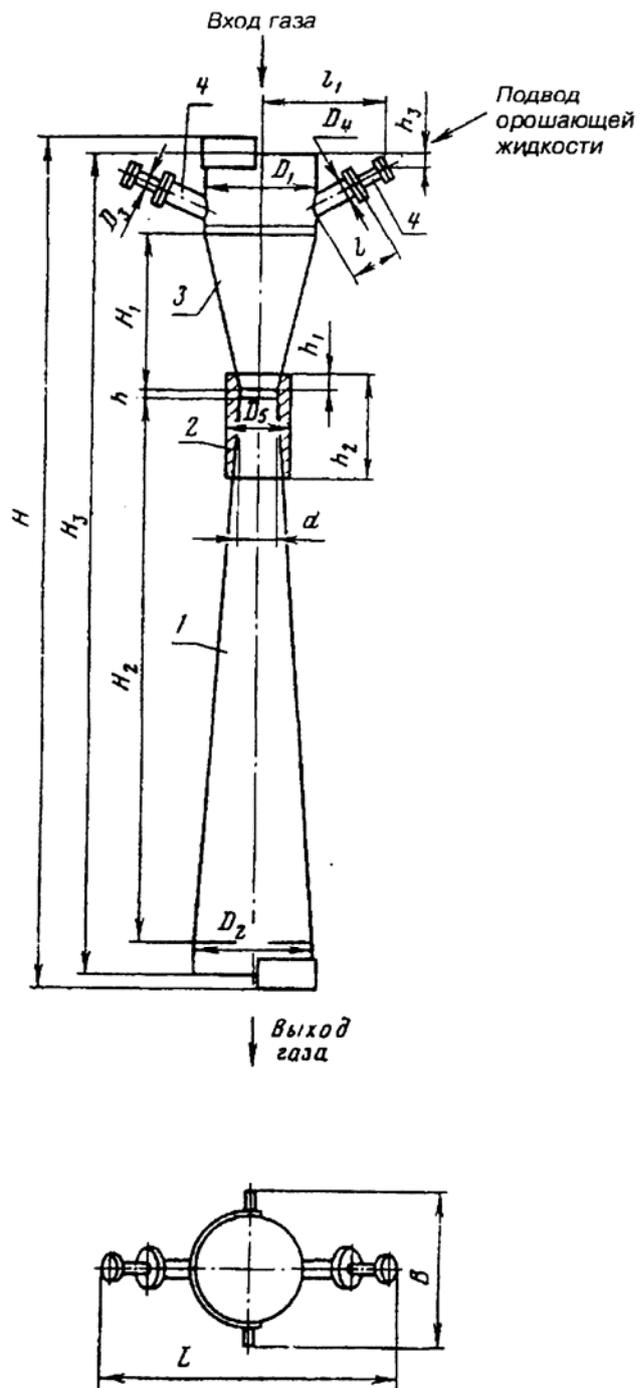


Рис. 6.24. Труба Вентури типа ГВПВ:  
 1 – диффузор; 2 – горловина; 3 – конфузор; 4 – подвод орошающей  
 жидкости.



Таблица 6.13

## Основные характеристики скрубберов Вентури типа ГВПВ

Типоразмер аппарата ГВПВ	Площадь сечения горловины трубы Вентури, м <sup>2</sup>	Диаметр горловины $D$ , м	Производительность (по выходным параметрам газа), м <sup>3</sup> /с	Расход жидкости на орошение, л/с	Давление жидкости перед форсункой, кПа	Габариты, мм	Масса, кг
1	2	3	4	5	6	7	8
0,006	0,006	85	0,47...0,97	$\frac{0,33...1,89}{0,6...1,39}$	$\frac{180...370}{80...410}$	$445 \times \frac{560}{575} \times 1850$	$\frac{64}{70}$
0,010	0,010	115	0,86...1,81	$\frac{0,6...1,39}{1,33...3,5}$	$\frac{80...410}{63...400}$	$540 \times \frac{670}{685} \times 2500$	$\frac{117}{120}$
0,014	0,014	135	1,15...2,33	$\frac{0,8...1,33}{1,33...1,94}$	$\frac{80...410}{60...700}$	$575 \times \frac{700}{720} \times 2940$	$\frac{148}{150}$
0,019	0,019	155	1,55...3,15	$\frac{1,08...3,55}{3,61...6,31}$	$\frac{80...980}{420...710}$	$645 \times \frac{785}{795} \times 3140$	
0,025	0,025	180	2,08...4,20	$\frac{1,44...3,61}{3,61...8,33}$	$\frac{150...980}{80...450}$	$775 \times \frac{925}{985} \times 3790$	$\frac{244}{257}$
0,030	0,031	200	2,59...5,25	$\frac{1,81...3,61}{3,61...10,50}$	$\frac{60...250}{100...910}$	$790 \times \frac{1325}{1355} \times 4025$	$\frac{305}{310}$
0,045	0,045	240	3,83...7,78	$\frac{2,71...8,33}{8,33...15,56}$	$\frac{60...570}{110...390}$	$880 \times 1420 \times 4620$	$\frac{400}{420}$
0,060	0,062	280	5,18...10,50	$\frac{3,61...8,33}{8,33...21,0}$	$\frac{100...570}{110...710}$	$1075 \times 1630 \times 5425$	$\frac{535}{560}$
0,080	0,080	320	6,52...13,22	$\frac{4,21...12,5}{12,5...26,44}$	$\frac{75...570}{110...500}$	$1545 \times 1480 \times 5940$	$\frac{645}{675}$

1	2	3	4	5	6	7	8
0,100	0,107	370	9,01...18,28	$\frac{6,28...12,5}{12,5...36,56}$	$\frac{80...320}{63...540}$	$\frac{1835}{1860} \times \frac{1835}{1860} \times 7240$	$\frac{935}{975}$
0,140	0,138	420	11,50...23,33	$\frac{8,0...12,5}{12,5...46,67}$	$\frac{130...320}{63...880}$	$\frac{2015}{2060} \times \frac{2015}{2060} \times 8140$	$\frac{1160}{1200}$

Орошение в трубе Вентури производится через цельнофакельные форсунки, устанавливаемых над конфузуром под углом к оси трубы  $60^\circ$ . Аппараты предназначены для очистки газов с температурой до  $400^\circ\text{C}$  и начальной запыленностью до  $30 \text{ г/м}^3$ . Содержание взвеси в жидкости, подаваемой на орошение, не должно превышать  $500 \text{ мг/л}$ .

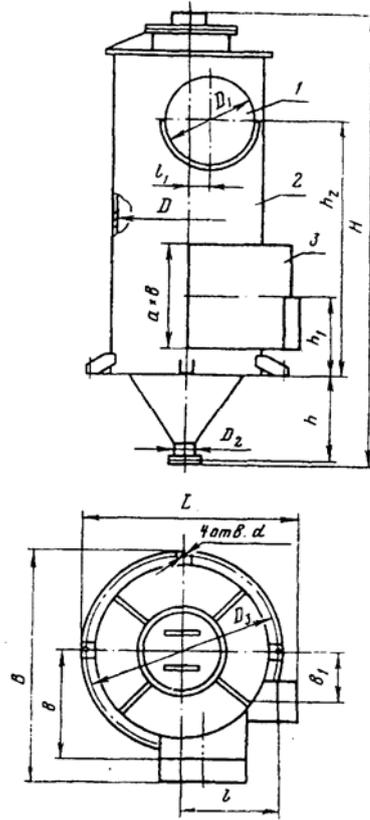


Рис. 6.25. Малогабаритный прямоточный циклон типа КЦТ.

Таблица 6.14.

Техническая характеристика типоразмерного ряда каплеуловителей

Типоразмер каплеуловителя	Диаметр аппарата, мм	Производительность, $\text{м}^3/\text{ч}$	Размеры, мм
КЦТ-400	400	1700	670 × 670 × 1210
КЦТ-500	500	3100—3890	770 × 770 × 1750
КЦТ-600	600	3890—5600	870 × 870 × 2000
КЦТ-700	700	5600—7625	970 × 970 × 2220

КЦТ-800	800	7625—9960	1070× 1070× 2462
КЦТ-900	900	9960—12600	1180× 1180× 2754
КЦТ-1000	1000	12600—15560	1270× 1270× 3004
КЦТ-1200	1200	15560—22410	1480× 1480× 3557
КЦТ-1400	1400	22410—30500	1670× 1670× 4107
КЦТ-1600	1600	30500—39840	1870× 1870× 4607
КЦТ-1800	1800	39840—50420	2390× 2130× 5208
КЦТ-2000	2000	50420—62245	2570× 2320× 5758
КЦТ-2200	2200	62245—75315	2770× 2520× 6408
КЦТ-2400	2400	75315—84000	2970× 2720× 6908

Расчеты параметров скрубберов Вентури с определением степени очистки по энергетическому методу выполняют в следующем порядке.

1. Выбирают тип скруббера, по заданному расходу газовых выбросов подбирают по таблицам 6.10, 6.12, 6.13 типоразмер аппарата и выписывают его технические характеристики. Затем по расходу и диаметру горловины трубы вычисляют скорость газового потока в горловине.

2. Принимают коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы Вентури  $\zeta_c$  в пределах 0,12...0,15, а при необходимости (при  $l/D > 0,15$ ) рассчитывают его по формуле

$$\zeta_c = 0,165 + 0,034M(l/D)[0,06 + 0,28(l/D)], \quad (6.38)$$

где  $D$  - диаметр круглой или эквивалентный диаметр прямоугольной горловины трубы Вентури, м;  $M$  - число Маха, которое подсчитывают как отношение скорости газа в горловине к скорости звука, принимаемых по температуре и давлению на выходе из трубы.

3. Учитывая конструкцию скруббера, способ подвода орошающей жидкости в трубу, скорость газового потока и соотношение длины горловины к диаметру, подбирают необходимое уравнение (из формул 6.39-6.44) и определяют величину  $\zeta_{op}$ .

Величину  $\zeta_{op}$  для аппаратов с центральным или пленочным орошением (рис. 6.19, а, в) при соотношении  $l/D$  в пределах 0,15...12 и скорости газового потока в горловине более 80 м/с определяют по формуле:

$$\zeta_{op} = \zeta_c 1,68(l/D)^{0,29} (L/V)^p, \quad (6.39)$$

а при скорости менее 80 м/с - по формуле:

$$\zeta_{op} = \zeta_c 3,49(l/D)^{0,27} (L/V)^q, \quad (6.40)$$

где  $L, V$  - расходы орошающей жидкости и обрабатываемого газа (по параметрам входа в трубу),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $p = 1 - 1,12(l/D)^{-0,045}$ ;  $q = 1 - 0,98(l/D)^{0,026}$  - показатели степени.

Для аппаратов с периферийным подводом орошающей жидкости в конфузоре перед горловиной (рис.6.19, б) величину  $\xi_{\text{оп}}$  при соотношении  $l/D = 0,15$  и скорости газов более 80 м/с определяют по формуле:

$$\zeta_{\text{оп}} = \zeta_c 13,4(L/V)^{0,024}, \quad (6.41)$$

а при скорости менее 80 м/с - по формуле:

$$\zeta_{\text{оп}} = \zeta_c 1,4(L/V)^{-0,316}. \quad (6.42)$$

Для одиночных труб Вентури с центральными форсунками, установленными перед конфузуром или батареей труб, орошаемых с предварительным дроблением потока жидкости, при соотношении  $l/D = 0,15$  и скорости газов в пределах 40...150 м/с величину  $\xi_{\text{оп}}$  определяют по формуле:

$$\zeta_{\text{оп}} = \zeta_c 0,215(L/V)^{-0,54}. \quad (6.43)$$

Для аппаратов с центральным подводом орошающей жидкости, оптимальным соотношением конструктивных параметров труб и скоростью газов в пределах 40...150 м/с величину  $\zeta_{\text{оп}}$  определяют по формуле:

$$\zeta_{\text{оп}} = \zeta_c 0,63(L/V)^{-0,3}. \quad (6.44)$$

4. По величине  $\zeta_c$  вычисляют гидравлическое сопротивление сухой трубы Вентури  $\Delta p_c$ . При вычислении сопротивления сухой трубы Вентури  $\Delta p_c$ , Па, по формуле  $\Delta p_c = \zeta_c w_g^2 \rho_g / 2$  скорость газов в горловине трубы  $w_g$  м/с и плотность газов  $\rho_g$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , принимают по температуре и давлению на выходе из трубы, а для подсчета сопротивления скрубберов Вентури - приближенно по параметрам газов на выходе из скруббера.

Затем вычисляют добавочное сопротивление  $\Delta p_{\text{оп}}$  по выражению

$$\Delta p_{\text{оп}} = \zeta_{\text{оп}} \frac{w_g^2 \cdot \rho_{\text{жс}}}{2} \cdot \frac{L}{V}, \quad (6.45)$$

и затем – полное сопротивление орошаемой трубы Вентури

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_{\text{оп}}. \quad (6.46)$$

5. Задаются величиной удельного орошения по опытным данным для аналогичного состава дисперсных выбросов, а при их отсутствии принимают ее в пределах 0,5...1,5 л/м<sup>3</sup>.

6. Определяют ориентировочный размер капель орошающей жидкости по эмпирическому соотношению:

$$d_k = \frac{0,0585}{w_{г.к}} (10^3 \sigma / \rho_{\text{жс}})^{0,5} + 1,884 \left[ \frac{\mu_{\text{жс}}}{(10^3 \sigma \cdot \rho_{\text{жс}})^{0,5}} \right]^{0,45} \cdot \left( \frac{L}{V} \right)^{1,5}, \quad (6.47)$$

где  $w_{г.к}$  - скорость газов относительно капли, м/с, которую принимают равной скорости газового потока в горловине трубы;  $\mu_{\text{жс}}$  - коэффициент динамической

вязкости жидкости, Па·с;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м (для воды при 20°C  $\mu_{ж} = 10^{-3}$  Па·с,  $\sigma = 72,8 \cdot 10^{-3}$  Н/м). Результаты определения размера капель по уравнению (6.47) следует рассматривать как оценочные.

Полному коэффициенту осаждения частиц в аппаратах придается вид экспоненциальной функции энергозатрат:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-B \cdot A^k), \quad (6.48)$$

где  $A$  - удельные энергозатраты на осаждение частиц загрязнителя, Дж/м<sup>3</sup>;  $B$  и  $k$  - эмпирические величины.

Степень очистки связывают с числом единиц переноса (параметром, характеризующим процессы в массообменных аппаратах) следующим соотношением:

$$N = \ln(1 - \varepsilon_{общ})^{-1}. \quad (6.49)$$

7. По формуле (6.8) определяют инерционный параметр  $\psi$  для каждой фракции заданного состава дисперсных загрязнителей:

$$\psi_i = d_i^2 \cdot \rho_{ч} \cdot w \cdot C_i / (18 \cdot \mu \cdot D).$$

8. По формуле (6.9) находят коэффициенты захвата частиц определенных фракций каплями орошающей жидкости:

$$\varepsilon_i = \frac{\psi_i^2}{(\psi_i + 0,35)^2}.$$

9. Приняв найденные значения коэффициентов захвата за парциальные коэффициенты очистки, подсчитывают по формуле (6.12) полный коэффициент очистки:

$$\varepsilon_{общ} = \sum_{i=1}^N \varepsilon_{\phi_i} \frac{g_i}{100}.$$

Точность полученного таким образом значения степени очистки газов невысока. Другие способы расчетов коэффициентов очистки в скрубберах Вентури по вероятностному методу также недостаточно точны.

**Пример 6.6.** Рассчитать параметры скруббера Вентури по вероятностно-энергетическому методу для очистки выбросов целлюлозно-бумажного комбината. Медианный диаметр частиц  $d_m = 1,1$  мкм, дисперсия  $\sigma = 1,7$ , плотность  $\rho = 2740$  кг/м<sup>3</sup>. Концентрация пыли в газах 4,1 г/м<sup>3</sup>. Пыль характеризуется склонностью к образованию крупных агломератов и сильной слипаемостью. Смачиваемость пыли 100%. Количество газовых выбросов составляет 18 тыс.м<sup>3</sup>/ч или 5 м<sup>3</sup>/с. Температура газов 140°C. Плотность газов при заданной температуре выбросов  $\rho_{г} = 0,929$  кг/м<sup>3</sup>.

Расчеты выполняем в следующем порядке.

1. Принимаем скруббер Вентури с кольцевым сечением горловины марки СВ. Предварительно, по заданному расходу 5 м<sup>3</sup>/с, выбираем типоразмер

скруббера СВ 300/180-1600. Учитывая, что предельно допустимая концентрация нетоксичной пыли в воздухе населенных мест ПДК составляет  $0,15 \text{ мг/м}^3$ , примем содержание пыли на выходе из очистного устройства в пределах (10...15) ПДК (порядка  $1,5...2 \text{ мг/м}^3$ ), что может быть обеспечено степенью очистки, равной

$$\varepsilon_{\text{общ}} = \frac{4100 - 2,0}{4100} \cdot 100 = 99,95\%.$$

Суточный выброс пыли при этой степени очистки составит:

$$2 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 3600 \cdot 24 = 1 \text{ кг}.$$

2. Определяем из таблицы 6.1 необходимое число единиц переноса:

$$N = 7,601.$$

3. Ввиду отсутствия эмпирических сведений по заданному виду пыли принимаем параметры  $B$  и  $k$  из таблицы 6.2 по пыли печей производства черного щелока с предварительным увлажнением:

$$B = 1,32 \cdot 10^{-3}; \quad k = 0,861.$$

4. Вычисляем по уравнению  $N = 1,32 \cdot 10^{-3} A^{0,861}$  требуемую для очистки долю энергозатрат:

$$A = \left( \frac{7,601}{1,32 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/0,861} = 23300 \text{ Дж/м}^3$$

или 23300 кДж на  $1000 \text{ м}^3$  очищаемых газов.

5. Считая пренебрежимыми в формировании осаждения пыли затраты энергии на введение жидкости в трубу Вентури, примем, что основная доля энергии затрачивается в трубе Вентури, а меньшая - в каплеуловителе.

6. Из таблицы 6.14 выписываем характеристики центробежного каплеуловителя с коническим завихрителем для трубы СВ 300/180-1600: скорость газов в свободном сечении каплеуловителя  $w_k = 2,5...5 \text{ м/с}$ ; диаметр каплеуловителя 1600 мм. При подсчете сопротивления каплеуловителя  $\Delta p_{\text{кв}}$  принимаем, что охлаждение газов в скруббере Вентури невелико.

Коэффициент сопротивления каплеуловителя принимаем из таблицы 6.15. Значения  $\zeta$  в ней отнесены к скорости в поперечном сечении сепараторов.

Таблица 6.15.

Коэффициенты сопротивления циклонов-каплеуловителей

Тип каплеуловителя	$\zeta_{\text{кв}}$
Циклон ЦН-24 с разрывом выхлопной трубы	70
Прямоточный циклон типа ЦВП	30
Малогабаритный прямоточный циклон типа КЦТ	18
Центробежный каплеуловитель с цилиндрическим завихрителем	5
То же, с коническим	4

Итак, сопротивление каплеуловителя при скорости газового потока 3 м/с и значении  $\zeta_{\text{кв}}$  будет равно:

$$\Delta p_{\text{к}} = 4 \cdot 3^2 \cdot 0,929 / 2 = 16,7 \text{ Па},$$

а возможное сопротивление трубы Вентури составит:

$$\Delta p = A - \Delta p_{\text{кв}} = 23283 \text{ Па}.$$

7. Полученная величина сопротивления трубы слишком велика. Установка газодувок или компрессоров приведет к значительным эксплуатационным и материальным затратам. Наибольшее давление порядка 8...10 кПа при заданной подаче могут создать вентиляторы типа ВЦ 12-49-01 Московского вентиляторного завода, часто используемые в установках газоочистки. Максимальное число единиц переноса, которое можно обеспечить технически приемлемыми средствами, составит для принятого вида пыли:

$$N = 1,32 \cdot 10^{-3} (10000)^{0,861} = 3,669.$$

По-видимому, полученный результат ближе к реальности и с точки зрения максимально достижимого числа единиц переноса в трубе Вентури. Хотя формально по энергетическому методу (формулы 6.48...6.49) число единиц переноса может возрасти неограниченно при увеличении энергозатрат, опыт показывает существование определенного максимума  $N$  для каждого типа аппарата мокрой очистки. Невысокое значение  $N$  объясняется тем, что обработка газов в трубе Вентури происходит по прямоточной схеме.

Расчитанному значению  $N = 3,669$  соответствуют степень очистки  $\varepsilon_{\text{общ}} = 97,5\%$ , конечная концентрация пыли  $102,5 \text{ мг/м}^3$  (что в 700 раз выше ПДК<sub>сс</sub>) и суточный выброс 44 кг. Кроме того, при обработке заданного расхода газа образуется до  $18 \text{ м}^3/\text{ч}$  загрязненных стоков. Таким образом, из-за низкой степени осаждения пыли и необходимости очистки значительного количества воды обработку выбросов заданного состава в скруббере Вентури нельзя считать оптимальным способом.

8. Если вариант обработки газов в скруббере Вентури принимается, то дальнейший расчет продолжают в следующем порядке.

Принимают коэффициент сопротивления сухой трубы Вентури  $\zeta_c = 0,15$ , определяют добавочный коэффициент  $\zeta_{\text{оп}}$ , используя одну из формул (6.39-6.44) для соответствующих характеристик скруббера. Затем из формулы (6.45) находят скорость газов в горловине скруббера  $w_{\text{г}}$ , принимая равным требуемому сопротивлению трубы Вентури, найденному в п.6.

9. По расходу и скорости обрабатываемого газового потока определяют площадь сечения и диаметр (или эквивалентный диаметр) горловины трубы Вентури и уточняют ее типоразмер.

## 7. Электрическая очистка газов

Под электрической очисткой газа понимают процесс, при котором твердые частицы удаляются из газообразной среды под воздействием электрических сил.

Фундаментальным отличием процесса электростатического осаждения от механических методов сепарации частиц является то, что в этом случае осаждающая сила действует непосредственно на частицы, а не создается косвенно воздействием на поток газа в целом. Это прямое и чрезвычайно эффективное использование силового воздействия и объясняет такие характерные черты электростатического метода, как умеренное потребление энергии и малое сопротивление потоку газа. Даже мельчайшие частицы субмикрометрового диапазона улавливаются эффективно, поскольку и на эти частицы действует достаточно большая сила. Принципиальных ограничений степени очистки нет, поскольку эффективность может быть повышена путем увеличения продолжительности пребывания частиц в электрофильтре.

Энергия, потребляемая в электрофильтре, складывается из энергии, расходуемой генератором тока высокого напряжения, и энергии, необходимой для преодоления гидравлического сопротивления при прохождении газа через электрофильтр. Гидравлическое сопротивление электрофильтра при его правильной эксплуатации не превышает 100...150 Па, т. е. значительно ниже, чем у большинства других пылеуловителей. Энергия, подводимая к обрабатываемым газам при электроосаждении, расходуется преимущественно на оказание непосредственного воздействия на осаждаемые частицы. Этим обусловлены многие преимущества процесса электрофильтрации.

Электрофильтр относится к наиболее эффективным пылеулавливающим аппаратам. Эффективность очистки достигает 99,9 % в широких пределах концентраций (от нескольких мг до 200 г/м<sup>3</sup>) и дисперсности частиц (до долей мкм) и невысокой затрате электроэнергии (около 0,1...0,5 кВт·ч на 1000 м<sup>3</sup> газов). Электрофильтр может обеспыливать влажную и коррозионноактивную газовую среду с температурой до 500°С. Производительность электрофильтров достигает сотен тысяч м<sup>3</sup>/ч очищаемого газа.

К недостаткам электрофильтров относится их высокая чувствительность к поддержанию параметров очистки, высокая металлоемкость и большие габариты, а также высокая требовательность к уровню монтажа и обслуживания.

Применение электрофильтрации имеет ряд ограничений. Электрофильтр не может быть использован для улавливания пылей, обладающих очень высоким электрическим сопротивлением. Нельзя направлять в электрофильтры взрывоопасные газовые выбросы, в том числе и такие, кото-

рые могут стать взрывоопасными в процессе обработки. Не следует использовать электроочистку, если осаждение взвешенных частиц может сопровождаться электрохимическими реакциями с выходом токсичных продуктов и тем более - добавлять таковые (например,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_4$  и др.) для интенсификации процесса электрофильтрации.

Электрофильтры, как более сложное и дорогостоящее оборудование, обеспечивающее тонкую очистку воздуха, обычно компонуют с другими пылеулавливающими устройствами, устанавливаемыми на начальных ступенях очистки. В результате повышается экономичность использования электрофильтров и обеспечивается более полная очистка.

### 7.1. Принцип действия электрофильтров

В электрофильтре очистка газов от твердых и жидких частиц происходит под действием электрических сил. Частицам сообщается электрический заряд, и они под действием электрического поля осаждаются из газового потока.

Общий вид электрофильтра приведен на рис. 7.1.

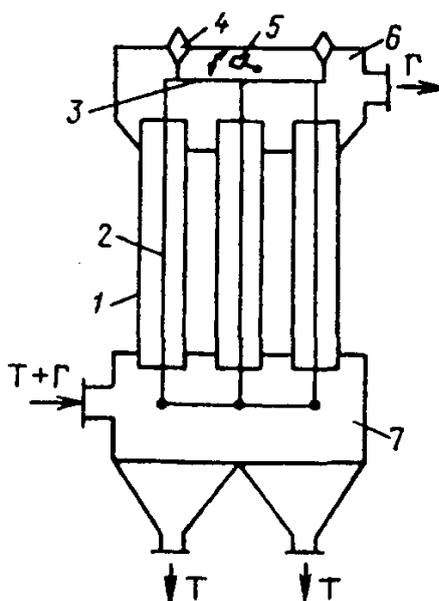


Рис. 7.1. Электрофильтр: 1 – осадительный электрод; 2 – коронирующий электрод; 3 – рама; 4 – высоковольтный изолятор; 5 – встряхивающее устройство; 6 – верхняя камера; 7 – сборник пыли.

Процесс обеспыливания в электрофилт্রে состоит из следующих стадий: пылевые частицы, проходя с потоком газа электрическое поле, получают заряд; заряженные частицы перемещаются к электродам с противоположным знаком; осаждаются на этих электродах; удаляется пыль, осевшая на электродах.

Зарядка частиц - первый основной шаг процесса электростатического осаждения. Большинство частиц, с которыми приходится иметь дело при промышленной газоочистке, сами по себе несут некоторый заряд, приобретенный в процессе их образования, однако эти заряды слишком малы, чтобы обеспечить эффективное осаждение. На практике зарядка частиц достигается пропусканием частиц через корону постоянного тока между электродами электрофилтра. Можно использовать и положительную и отрицательную корону, но для промышленной газоочистки предпочтительнее отрицательная корона из-за большей стабильности и возможности применения больших рабочих значений напряжения и тока, но при очистке воздуха используют только положительную корону, так как она дает меньше озона.

Основными элементами электрофилтра являются коронирующий и осадительный электроды. Первый электрод в простейшем виде представляет собой проволоку, натянутую в трубке или между пластинами, второй - представляет собой поверхность трубки или пластины, окружающей коронирующий электрод (рис. 7.2).

На коронирующие электроды подается постоянный ток высокого напряжения 30...60 кВ. Коронирующий электрод обычно имеет отрицательную полярность, осадительный электрод заземлен. Это объясняется тем, что корона при такой полярности более устойчива, подвижность отрицательных ионов выше, чем положительных. Последнее обстоятельство связано с ускорением зарядки пылевых частиц.

После распределительных устройств обрабатываемые газы попадают в проходы, образованные коронирующими и осадительными электродами, называемые межэлектродными промежутками. Сходящие с поверхности коронирующих электродов электроны разгоняются в электрическом поле высокой напряженности и приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа. Сталкивающиеся с электронами молекулы газов ионизируются и начинают ускоренно двигаться в направлении электродов противоположного заряда, при соударении с которыми выбивают новые порции электронов. В результате между электродами появляется электрический ток, а при некоторой величине напряжения образуется коронный разряд, интенсифицирующий процесс ионизации газов. Взвешенные частицы, перемещаясь в зоне ионизации и сорбируя на своей поверхности ионы, приобретают в конечном итоге положительный или отрицательный заряд и начинают под влиянием электрических сил двигаться к электроду противополож-

ного знака. Частицы сильно заряжаются на первых 100...200 мм пути и смещаются к заземленным осадительным электродам под воздействием интенсивного поля короны. Процесс в целом протекает очень быстро, на полное осаждение частиц требуется всего несколько секунд. По мере накопления частиц на электродах их стряхивают или смывают.

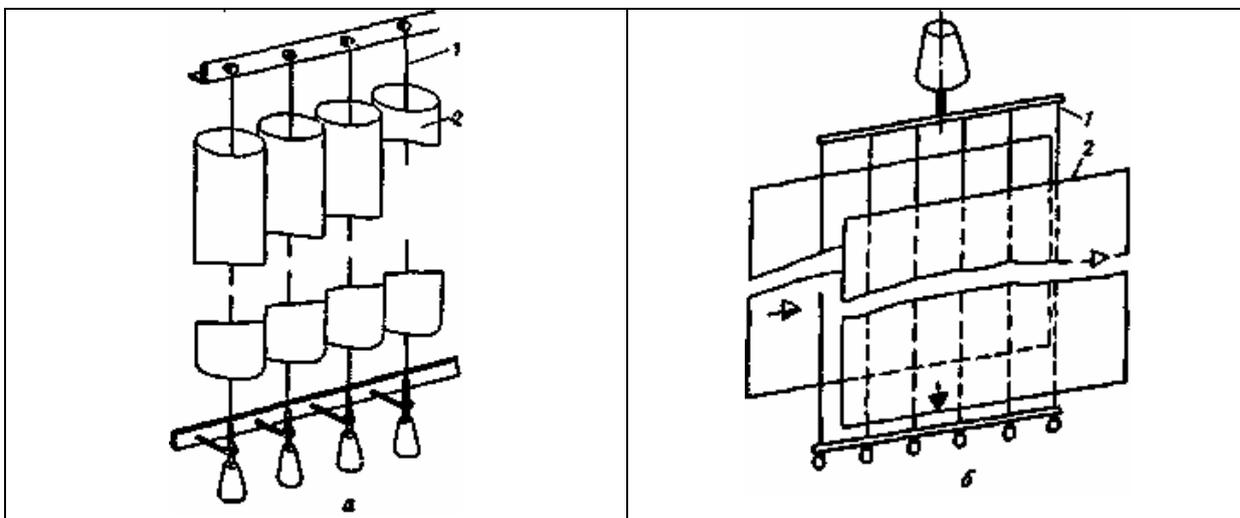


Рис. 7.2. Конструктивная схема электродов:  
*а* - электрофильтр с трубчатыми электродами; *б* - электрофильтр с пластинчатыми электродами; 1 - коронирующие электроды; 2 - осадительные электроды.

Коронный разряд характерен для неоднородных электрических полей. Для их создания в электрофильтрах применяют системы электродов типа точка (острие) - плоскость, линия (острая кромка, тонкая проволока) - плоскость или цилиндр.

В поле короны электрофильтра реализуются два различных механизма зарядки частиц. Наиболее важна зарядка ионами, которые движутся к частицам под действием внешнего электрического поля. Вторичный процесс зарядки обусловлен диффузией ионов, скорость которой зависит от энергии теплового движения ионов, но не от электрического поля. Зарядка в поле преобладает для частиц диаметром более 0,5 мкм, а диффузионная — для частиц мельче 0,2 мкм; в промежуточном диапазоне (0,2...0,5 мкм) важны оба механизма.

Заряд частицы, достигаемый за время  $t$ , определяется следующим уравнением:

$$q = 12 \pi \varepsilon_0 E_0 r_x^2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \left( \frac{t}{t + \frac{4 \varepsilon_0}{N_0 e K}} \right), \quad (7.1)$$

где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая постоянная частицы по отношению к диэлектрической постоянной вакуума;  $\varepsilon_0$  - проницаемость вакуума, равная  $8,55 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $E_0$  - напряженность электрического поля;  $r_x$  - радиус частицы;  $K$  - подвижность газовых ионов;  $e$  - заряд электрона;  $N_0$  - ионная плотность;  $t$  - время.

Уравнение (7.1) может быть переписано в более краткой форме, если учесть, что заряд достигает предельного значения  $q_s$ , определяемого как

$$q_s = 12 \pi \varepsilon_0 E_0 r_x^2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \right) \quad (7.2)$$

и что величина  $\frac{4 \varepsilon_0}{N_0 e K}$  имеет размерность времени. Эта величина называется временной постоянной зарядки и обозначается символом  $t_0$ . Подставляя в (7.1)  $q_s$  и  $t_0$  получаем упрощенное выражение:

$$q = q_s \frac{t}{t + t_0}. \quad (7.3)$$

Около 90 % заряда частица получает через отрезок времени, равный  $10 t_0$ .

На практике напряженность поля обычно лежит в пределах 300...600 кВ/м, но может превышать 1000 кВ/м в специальных системах. Ионная плотность имеет порядок  $10^{13} \dots 10^{14}$  м<sup>-3</sup>, но в специальных случаях может быть значительно выше.

Временная постоянная зарядки  $t_0$  составляет 0,11 секунд при относительно малой ионной плотности  $10^{13}$  м<sup>-3</sup> и уменьшается до 0,001 с при высоком значении плотности  $10^{15}$  м<sup>-3</sup>. Если принять время  $10 t_0$  для практически полного завершения зарядки, то при умеренной плотности ионов  $10^{14}$  м<sup>-3</sup> время зарядки составит 0,1 с. Это время соответствует длине пути газа в осадителе, равной 0,1...0,2 м, так что зарядка протекает на незначительном расстоянии от входа в электрофильтр.

Напряженность поля, в котором возникает корона, называют начальной или критической. Ее величина во многом зависит от параметров обрабатываемых газов и может составлять для стандартных условий порядка (15...20) кВ/см. Критическое напряжение на электродах  $U_{кр}$ , при котором появляется коронный разряд, зависит от их геометрии. При известной критической напряженности поля  $E_{кр}$ , В/м, величину  $U_{кр}$ , В, для системы из цилиндрического осадительного и размещенного центрально проволочного коронирующего электродов можно подсчитать по формуле:

$$U = E R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (7.4)$$

а для системы пластинчатых осадительных и проволочных коронирующих электродов - по формуле:

$$U = E R_1 \left( \frac{\pi l_1}{l_2} - \ln \frac{2\pi R_1}{l_2} \right), \quad (7.5)$$

где  $R_1, R_2$  - радиусы коронирующего и цилиндрического осадительного электродов, м;  $l_1$  - расстояние между коронирующим и пластинчатым осадительным электродом, м;  $l_2$  - расстояние между соседними коронирующими электродами, м.

Обычно для промышленных электрофильтров значения  $R_1$  составляют порядка 0,001...0,002 м,  $R_2$  и  $l_1$  - 0,1...0,15 м,  $U_{кр} = 20...30$  кВ.

Скорость дрейфа (перемещения) взвешенных частиц возрастает с напряженностью поля, однако при определенном значении напряжения на электродах наступает пробой газового промежутка и возникает дуга. Поэтому оптимальным значением напряжения на электродах считается максимально близкое к пробойному.

Так как электрическая прочность газового промежутка при отрицательной короне выше, чем при положительной, в системах очистки промышленных выбросов подают на коронирующий электрод отрицательное напряжение выпрямленного тока. Однако в отрицательной короне образуется значительное количество озона, который может инициировать в атмосфере множество реакций, приводящих к ее вторичному загрязнению. Электрофильтры для систем вентиляции и кондиционирования воздуха работают только с положительной короной.

Степень очистки газов от дисперсных примесей в электрофильтрах зависит практически от всех параметров газов и взвешенных частиц, от конструктивных характеристик аппаратов, режимов эксплуатации и ряда других факторов. Из свойств дисперсных частиц наиболее очевидно проявляется влияние удельного электрического сопротивления (УЭС), оптимальное значение которого находится в пределах ( $10^6...10^9$ ) Ом·м. Низкоомные частицы легко заряжаются в электрическом поле, однако с приближением к электроду с противоположным знаком перезаряжаются, и между ними начинают действовать силы отталкивания. Это служит причиной вторичного уноса низкоомных частиц, даже успевших осесть на электрод. Еще менее благоприятные процессы возникают при очистке высокоомных пылей. Оседая на электроды, они образуют неоднородный электроизоляционный слой. По месту наиболее слабой изоляции напряженность поля становится максимальной. Это способствует образованию короны с противоположным знаком ("обратной короны"), резко ухудшающей работу электрофильтра.

В наибольшей мере процесс улавливания пыли в электрофильтре зависит от электрического сопротивления пыли. По величине сопротивления пыли делят на три группы:

- пыль с малым удельным электрическим сопротивлением. УЭС  $< 10^4$  Ом·м. Эта пыль, соприкасаясь с осадительным электродом, мгновенно теряет заряд и приобретает заряд в соответствии со знаком электрода. В результате между частицей и электродом возникает отталкивающая сила, направляющая частицу в газовый поток. Если отталкивающая сила преодолевает силу сопротивления среды, возникает вторичный унос, снижающий эффективность улавливания пыли в электрофильтре;

- пыли с УЭС в пределах  $10^4 \dots 10^{10}$  Ом·м без каких-либо осложнений осаждаются на электродах и удаляются;

- пыли со значительным УЭС  $> 10^{10}$  Ом·м. Улавливание этих пылей в электрофильтре представляет наибольшую сложность. Из-за медленной разрядки частиц, оседающих на электроде, на последнем накапливается слой отрицательно заряженных частиц. Возникающее электрическое поле слоя начинает препятствовать дальнейшему осаждению частиц. Эффективность электрофильтра снижается. Возможно явление обратной короны, при котором значительно увеличивается потребляемый ток при снижении напряжения на электродах. Пыли этой группы часто образуют на электродах прочный изолирующий слой, трудно поддающийся удалению. Высоким удельным электрическим сопротивлением обладают пыли магнезита, гипса, оксиды свинца и цинка PbO, ZnO, сульфид свинца PbS.

Снижение УЭС пыли достигается добавкой к газу ряда реагентов, например, сернистого ангидрида, аммиака, хлоридов кальция и натрия и др. Такой же результат дает добавление в газ электропроводных частиц сажи или кокса.

Высокое сопротивление ряда пылей может быть понижено охлаждением пылегазового потока ниже  $130^\circ\text{C}$  или его нагреванием свыше  $350^\circ\text{C}$ .

Определенное влияние на степень осаждения частиц оказывают их концентрация и дисперсный состав. На входе в электрофильтр частицы могут иметь собственный электростатический заряд, который при их большом количестве (т.е. при высокой счетной концентрации) может заметно влиять на параметры осаждения частиц, снижая напряженность электрического поля в аппарате вплоть до запыления короны. Теоретически наименьший размер улавливаемых частиц в электрофильтрах не ограничен. Однако практически не все частицы в них улавливаются. При очень высокой концентрации высокодисперсных частиц (обычно субмикрометрового диапазона) наступает подавление тока короны объемным электрическим зарядом. Это приводит к тому, что концентрация ионов становится слишком низкой, чтобы обеспечить достаточную зарядку частиц.

Скорость дрейфа частиц в электрическом поле в значительной мере зависит от размеров частиц. Эта зависимость имеет сложный характер ввиду различия механизмов перемещения частиц разных размеров. Считается, что в диапазоне размеров менее 0,1...0,3 мкм скорость перемещения частиц в электрическом поле уменьшается с их укрупнением, в диапазоне от 0,3 до 20 мкм - увеличивается с увеличением диаметра и затем вновь несколько снижается.

Из параметров газового потока наибольшее влияние на осаждение оказывают влажность и температура. Со снижением температуры уменьшается вязкость газов, вследствие чего они оказывают меньшее сопротивление перемещению взвешенной частицы к электроду. С понижением температуры растет устойчивость коронного разряда, что позволяет работать при более высокой напряженности электрического поля. Кроме того, с охлаждением обрабатываемого потока растет его относительная влажность, что ведет к понижению УЭС частиц вследствие их увлажнения.

Очень важным фактором, связанным практически со всем процессом электроосаждения, является скорость газового потока. От нее непосредственно зависят время пребывания частиц в аппарате и его габариты.

При слабом течении газа, слишком большой скорости газа или плохих условиях удержания может происходить унос осажденных частиц. Частицы, унесенные с осадительного электрода, в случае отрицательной короны приобретут положительный заряд вследствие эмиссии. Эти частицы могут не подвергаться перезарядке или перезарядиться только частично. В любом случае частицы будут вынесены из электрофильтра, что существенно снизит эффективность улавливания. При скоростях потока более (1...1,5) м/с резко растет вторичный унос пыли с электродов. Очень важно в связи с этим обеспечить равномерное распределение потока по сечению аппарата с тем, чтоб локальные скорости в межэлектродных промежутках ненамного отличались от средней скорости.

Определенное влияние на эффективность обработки газов оказывают конструктивные особенности тех или иных типов электрофильтров.

Электрофильтры работают как под разрежением, так и под избыточным давлением. Система пылеулавливания, в которой применен электрофильтр, может быть полностью автоматизирована.

## **7.2. Конструкции электрофильтров**

Аппараты для очистки газов этим методом называют электрофильтрами. Основными элементами электрофильтров являются: газоплотный корпус с размещенными в нем коронирующими электродами, к которым подводится выпрямленный ток высокого напряжения, и осадительными заземленными электродами, изоляторы электродов, устройства для равномерного рас-

пределения потока по сечению электрофильтра, бункера для сбора уловленных частиц, системы регенерации электродов и электропитания.

Конструктивно электрофильтры могут быть с корпусом прямоугольной или цилиндрической формы. Внутри корпусов смонтированы осадительные и коронирующие электроды, а также механизмы встряхивания электродов, изоляторные узлы, газораспределительные устройства.

Часть электрофильтра, в которой размещены электроды, называют активной зоной (реже - активным объемом). В зависимости от числа активных зон известны электрофильтры однозонные и двухзонные. В однозонных электрофильтрах коронирующие и осадительные электроды в пространственном отношении, конструктивно не разделены, В двухзонных электрофильтрах имеется четкое разделение. Для санитарной очистки запыленных выбросов используют однозонные конструкции с размещением коронирующих и осадительных электродов в одном рабочем объеме. Двухзонные электрофильтры с отдельными зонами для ионизации и осаждения взвешенных частиц применяют в основном при очистке приточного воздуха. Связано это с тем, что в ионизационной зоне происходит выделение озона, поступление которого не допускается в воздух, подаваемый в помещения.

В зависимости от направления движения газа электрофильтры подразделяют на горизонтальные и вертикальные. Вертикальные аппараты занимают в плане значительно меньше места, но при прочих равных условиях коэффициенты очистки в них ниже. Активная длина поля вертикального электрофильтра совпадает с активной высотой его электродов.

По мере осаждения пыли на электродах понижается эффективность пылеулавливания. Во избежание этого явления и поддержания оптимальной эффективности электрофильтров электроды периодически очищают от пыли встряхиванием или промывкой. Соответственно электрофильтры подразделяются на сухие и мокрые.

К мокрым относят аппараты, улавливающие жидкие или значительно увлажненные твердые частицы, а также электрофильтры, электроды которых очищаются самотеком (конденсатом уловленного жидкого аэрозоля) или посредством смывки осевших частиц жидкостью. К сухим относят электрофильтры, улавливающие сухие твердые частицы, которые удаляют с электродов посредством встряхивания через определенные промежутки времени.

Все мокрые электрофильтры, нашедшие применение в промышленности, имеют вертикальную компоновку. Сухие аппараты могут быть как вертикальными, так и горизонтальными. Преимущественное применение среди сухих электрофильтров имеют аппараты с горизонтальным ходом газа -

горизонтальные многопольные аппараты, в которых очищаемый газ проходит последовательно через несколько электрических полей.

В зависимости от формы осадительных электродов известны электрофильтры трубчатые и пластинчатые (рис. 7.2). Трубчатые электрофильтры состоят из большого числа элементов, имеющих круглое или сотообразное сечение. По оси трубчатого элемента расположен коронирующий электрод. В пластинчатом электрофильтре имеется большое количество параллельных пластин. Между ними находятся натянутые коронирующие электроды.

Формы осадительных и коронирующих электродов могут быть самыми разнообразными. Коронирующие электроды могут набираться из тонких круглых или толстых шестигранных стержней, стальных пилообразных полос, профилированных лент с игольчатой выштамповкой. Иногда применяются и другие формы. Осадительные электроды сухих фильтров выполняют в виде профилированных пластин, желобов, реже - коробок с круглыми или сложными вырезами для лучшего удержания осажденной пыли от вторичного уноса. В мокрых электрофильтрах проблема вторичного уноса несущественна, поэтому электроды выполняют в виде наборов прутков и гладких пластин, что позволяет легко смывать осадок.

Электроды сухих фильтров встряхивают соударением или при помощи специальных ударно-молотковых механизмов. Соударения применяют в основном для встряхивания коробчатых электродов. Остальные типы коронирующих и осадительных электродов встряхивают ударами вращающихся молотковых механизмов по наковальням, прикрепленным к этим электродам.

Промывка электродов в мокрых электрофильтрах может производиться периодически или непрерывно. Для периодической промывки подают большое количество воды или другой промывной жидкости на электроды (в активную зону) при отключенном напряжении. На время промывки секции подачу газа прекращают.

Переток неочищенного газа мимо активной зоны даже в небольшом количестве может заметно ухудшить степень очистки. В горизонтальных фильтрах неактивные зоны расположены над и под электродной системой (включая бункера), а также в промежутках между крайними осадительными электродами и корпусом. В вертикальных пластинчатых фильтрах неактивны промежутки между осадительными электродами и корпусом. В вертикальных трубчатых аппаратах неактивные зоны можно устранить полностью. В пластинчатых конструкциях зазоры необходимы для встряхивания электродов и соблюдения пробойных промежутков. Поэтому в таких электрофильтрах предусматривают клапаны (щитки), создающие лабиринтное уплотнение и снижающие перетоки газа.

Скорость очищаемого газа в активной зоне является одной из основных характеристик электрофильтра. Наибольшую величину электрического заряда частицы размером до 1 мкм получают за время нахождения в электрическом поле около 1 с. Скорость принимают в зависимости от конструкции электрофильтра. Так, в сухих электрофильтрах ее значение находится обычно в пределах 0,8...1,7 м/с. Должно быть обеспечено равномерное распределение скорости очищаемого газа по сечению аппарата. Для выравнивания скоростного поля в электрофильтре устанавливают решетки, направляющие лопатки, перфорированные пластины.

Широкое распространение в промышленности получили электрофильтры типа УГ, ЭГА и др. Эти аппараты применяют на тепловых электростанциях, в черной и цветной металлургии, химической промышленности, на предприятиях строительных материалов.

Для промышленной газоочистки из аппаратов отечественного производства могут быть рекомендованы электрофильтры общего назначения типов ЭГА, ЭГТ (горизонтальные сухие), УВ, ЭВВ (вертикальные сухие), а также ряд специализированных типов электрофильтров.

Электрофильтры серии ЭГА предназначены для обеспыливания неагрессивных невзрывоопасных газовых выбросов с температурой до 330°C. Корпуса аппаратов стальные, имеют прямоугольную форму. Корпус аппарата стальной теплоизолированный, имеет прямоугольную форму и рассчитан на разрежение до 4 кПа, в аппарате имеется 3 электрических поля, расположенных последовательно по ходу газа. Осадительные электроды представляют собой плоские полотна, набранные из прутков, а коронирующие - проволочные (диаметр проволоки 2,2 мм), натянутые при помощи грузов между осадительными. Длина одного активного поля 2,5 м, ширина 5,97 м (ширина корпуса 6,0 м), высота 7,74 м, расстояние между соседними осадительными электродами 260 мм. Уловленная пыль удаляется с электродов механическим встряхиванием посредством ударов молотков по накопительным осадительным и рамам подвеса коронирующих электродов. Аппараты ОГП изготавливались четырехпольными с активной высотой 4,5 м, длиной 1,5 м, шириной поля 2,17 (ОГП-4-8) и 3,98 м (ОГП-4-16), а ширина корпуса составляла 2,20 и 4,0 м. Допустимое разрежение в аппарате 1,5 кПа.

Электрофильтры серии ЭГТ (рис. 7.3) предназначены для очистки неагрессивных, невзрывоопасных газов с температурой до 450°C.

Их основное отличие от аппаратов предыдущих серий заключается в конструкции осадительных электродов, которые аналогичны применяемым в электрофильтрах серии ЭГА. Высота коронирующих электродов 8040 мм. Корпус аппарата рассчитан на разрежение до 4 кПа. Маркировка электрофильтров серии ЭГТ означает: электрофильтр горизонтальный высокотемпературный; первое число после букв указывает номер (габарит) типоразмерного ряда; второе - количество полей, третье - длину одного поля, м; четвертое - площадь активного сечения, м<sup>2</sup>.



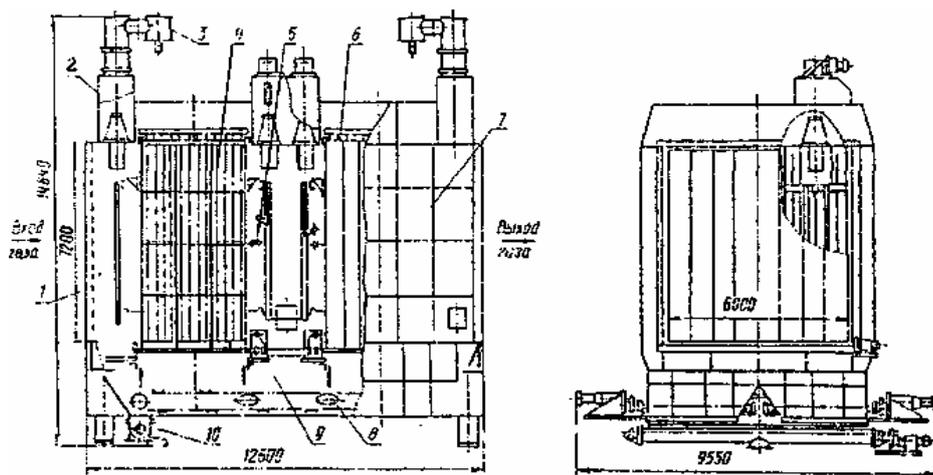


Рис. 7.4. Электрофильтр ЭГ2 - 2 - 4 - 37 СРК:

1 - газораспределительная решетка; 2 - изоляционная коробка; 3 - защитная коробка для подвода тока; 4 - коронирующий электрод; 5 - механизм встряхивания коронирующих электродов; 6 - осадительный электрод; 7 - корпус; 8 - скребковый конвейер; 9 - механизм встряхивания осадительных электродов; 10 - шнековый конвейер.

Электрофильтры типа УГМ (рис. 7.5) используются для обеспыливания неагрессивных и невзрывоопасных технологических газовых выбросов с температурой до 250°C. Аппараты односекционные, с двумя электрическими полями по ходу газов. Корпуса электрофильтров прямоугольные, теплоизолированные, рассчитаны на разрежение до 4 кПа. Осадительные электроды представляют собой плоские полотна, набранные из пластинчатых элементов специального профиля. Расстояние между соседними осадительными электродами 275 мм. Коронирующие электроды составлены из ленточно-игольчатых элементов, натянутых в трубчатых рамах. Высота электродов 3000 мм, ширина корпуса 1500 мм (УГМ-2-3,5) и 3000 мм (УГМ-2-7). Пыль с электродов удаляется механическим встряхиванием. Маркировка электрофильтров обозначает: унифицированный горизонтальный малогабаритный; первое число - количество полей, второе - площадь активного сечения, м<sup>2</sup>.

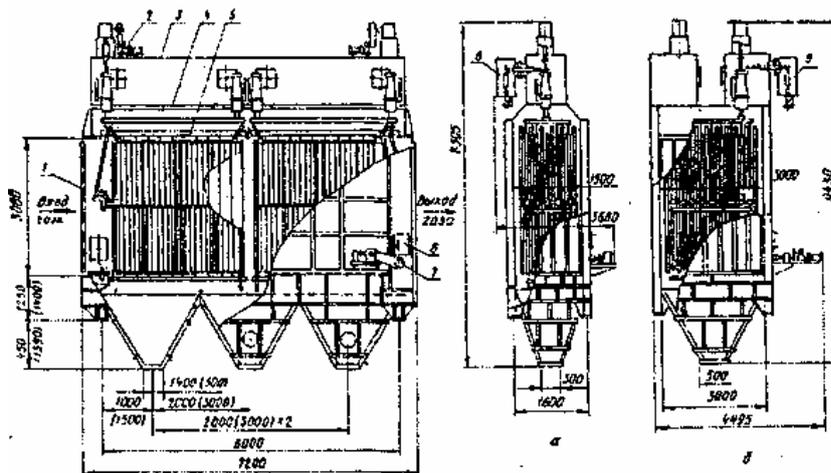


Рис. 7.5. Электрофильтры типа УГМ (исполнение корпуса - П):  
 а - электрофильтр УГМ-2 - 3,5; б - электрофильтр УГМ-2 - 7;  
 1 - газораспределительная решетка; 2 - механизм встряхивания коронирующих электродов; 3 - корпус; 4 - осадительный электрод; 5 - коронирующий электрод; 6 - люк обслуживания; 7 - механизм встряхивания осадительных электродов; 8 - защитная коробка для подвода тока.

Электрофильтры ЭГ-КЭН предназначены для обеспыливания газов, содержащих высокоомные дисперсные частицы с УЭС в пределах  $10^8 - 10^{10}$  Ом м. Степень очистки газов в них может достигать 99,75%. Электрофильтры изготавливаются двух типоразмеров с маркировкой ЭГ-2-3-3,8-17-0,4 КЭН и ЭГ-2-4-2,5-77-05 КЭН, которая означает: электрофильтр горизонтальный; первое число после букв обозначает типоразмерный (габаритный) номер, второе - количество полей, третье - активную длину поля, м, четвертое - площадь активного сечения,  $m^2$ , пятое - модификацию; аббревиатура "КЭН" означает "комбинированные электроды НИИОГаз". Аппараты имеют высоту электродов 6000 и 7150 мм, ширину 3200 и 11810 мм, производительность при скорости газов в 1 м/с - 16,7 и 77,8  $m^3/c$ , допустимые пределы температур 330 и 250°C соответственно. Гидравлическое сопротивление электрофильтров составляет 200 Па, максимально допустимое разрежение - 5 кПа. Расстояние между соседними осадительными электродами 300 мм. Коронирующие электроды набираются из профилированных лент и создают электрическое поле со сложным характером изменения напряженности. Уловленная пыль удаляется механическим встряхиванием электродов.

Ряд конструктивных характеристик горизонтальных электрофильтров, предназначенных для сухой очистки газов от пылей, приведен в табл. 7.1.

Таблица 7.1.

## Конструктивные характеристики горизонтальных электрофильтров.

Марка и типоразмер электрофильтра	Площадь активного сечения, м <sup>2</sup>	Общая площадь осаждения, м <sup>2</sup>	Габариты, м		
			длина	ширина	высота
ЭГА1-10-4-4-2	11	430	9,26	4,84	10,41
ЭГА1-10-4-6-2		645	11,82		11,41
ЭГА1-10-4-6-3		967	17,28		11,41
ЭГА1-10-6-4-2	16,5	635	9,26	4,89	12,41
ЭГА1-10-6-4-3		952	13,44		13,41
ЭГА1-10-6-6-2		952	11,82		13,41
ЭГА1-10-6-6-3		1430	17,28		
ЭГА1-14-7,5-4-3	28,7	1656	13,44	6,15	13,91
ЭГА1-14-7,5-4-4		2210	17,62		14,91
ЭГА1-14-7,5-6-2		1656	11,82		14,91
ЭГА1-14-7,5-6-3		2485	17,28		
ЭГА1-20-7,5-4-3	41	2366	13,44	7,95	15,41
ЭГА1-20-7,5-4-4		3157	17,62		
ЭГА1-20-7,5-6-2		2366	11,82		
ЭГА1-20-7,5-6-3		3550	17,28		
ЭГА1-20-9-6-2	49	2827	11,82		16,91
ЭГА1-20-9-6-3		4243	17,28		
ЭГА1-20-9-6-4		5660	22,74		

Вертикальные сухие электрофильтры типа УВ (рис. 7.6) могут применяться для обеспыливания неагрессивных и невзрывоопасных технологических газовых выбросов с температурой до 250°C. Электрофильтры однополюсные, используются при низкой запыленности (до 30 г/м<sup>3</sup>), в пределах оптимальных значений удельного сопротивления пыли. В частности, они находят применение при очистке аспирационного воздуха электролизных цехов алюминиевых заводов.

Электрофильтры могут быть одно-, двух- или трехсекционными. Корпуса прямоугольные, теплоизолированные. Секции аппаратов разделены сплошными перегородками. Ширина секции аппаратов УВ 2×24 и УВ 3×24 составляет 6,1 м, остальных - 4,25 м. Движение газов в каждой секции организовано снизу вверх. Разрежение в аппарате до 3,5 кПа. Осадительные электроды выполнены в виде пластинчатых полотен. Расстояние между соседними осадительными электродами 275 мм. Коронирующие электроды представляют собой трубчатые рамы, в которых натянуты ленточно-зубчатые элементы. Активная длина поля (высота электродов) 7,5 м. Удаление пыли с электродов осуществляется встряхиванием. Маркировка электрофильтра означает: унифицированный вертикальный; первое число после букв - количество секций, второе - площадь активного сечения одной секции, м<sup>2</sup>.

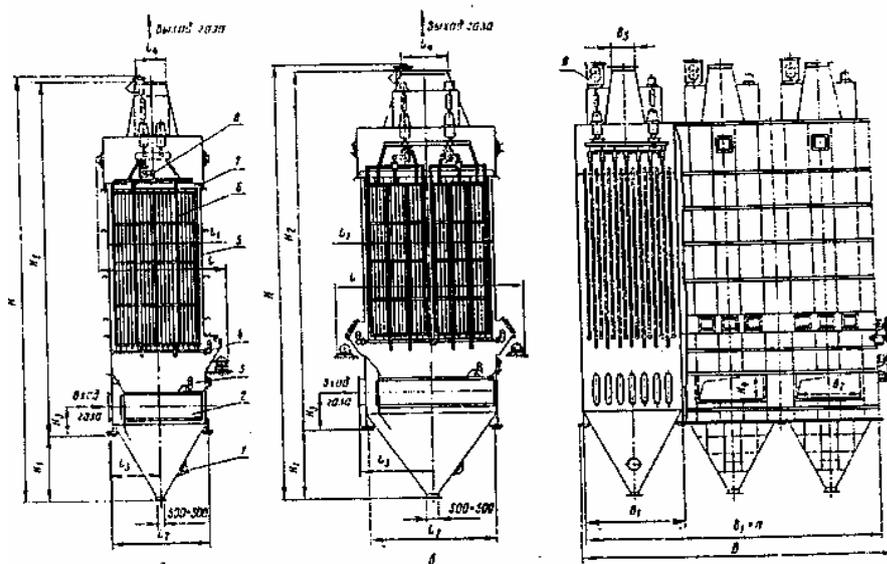


Рис. 7.6. Электрофильтры типа УВ:

*а* - электрофильтры УВ 2×10, УВ 1×16 и УВ 2×16; *б* - электрофильтры УВ 2×21, УВ 3×21; 1 - люк обслуживания; 2 - газораспределитель; 3 - механизм встряхивания газораспределителя; 4 - механизм встряхивания осадительных электродов; 5 - корпус; 6 - коронирующий электрод; 7 - осадительный электрод; 8 - механизм встряхивания коронирующих электродов; 9 - защитная коробка для подвода тока.

Некоторые конструктивные характеристики сухих вертикальных электрофильтров приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2.

Конструктивные характеристики сухих вертикальных электрофильтров

Марка электро- фильтра	Площадь активного сечения, м <sup>2</sup>	Общая площадь осаждения, м <sup>2</sup>	Габариты, м		
			Длина	Ширина	Высота
УВ2×21,6	1200	5,75	6,69	20,15	
УВ3×32,4	1800	5,75	9,69	20,15	
УВ2×16	900	5,75	5,19	20,15	
УВ2×16 32	1800	5,75	9,69	20,15	
УВ2×24 48	2640	8,15	9,69	21,7	
УВ3×24 72	3960	8,15	14,19	21,7	

Мокрые электрофилтры ЭВМ (рис. 7.7) предназначаются для улавливания туманов и капель серной кислоты с концентрацией (5...20) % об. в присутствии следов оксидов мышьяка, селена, соединений фтора. Электрофилтры выполняются вертикальными однополюсными и односекционными. Корпус стальной цилиндрический, футеруется изнутри на месте монтажа кислотоупорными материалами.

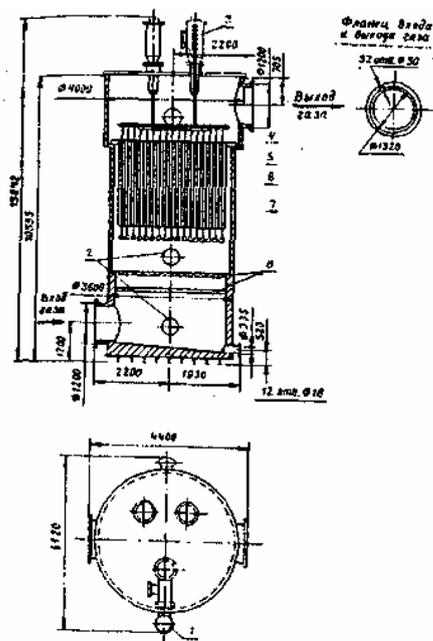


Рис. 7.7. Мокрый электрофилтр типа ЭВМ:

- 1 - защитная коробка для подвода тока; 2 - люк обслуживания; 3 - изоляционная коробка; 4 - коронирующий электрод; 5 - осадительный электрод; 6 - корпус; 7 - футеровка корпуса; 8 - газораспределительная решетка.

Осадительные электроды выполнены из полимерных токопроводящих пластин, имеющих повышенную теплопроводность. Коронирующие электроды изготавливают из освинцованного провода. Маркировка электрофилтра означает: электрофилтр вертикальный мокрый.

Степень улавливания диспергированного вещества при концентрации на входе от 3 до 5% в пересчете на 100%-ю серную кислоту и двухступенчатой очистке достигает 99,7%. Допускается работа электрофилтра под разрежением до 6 кПа. Температура очищаемого газа 20...45°C. При скорости газового потока 1 м/с пропускная способность составляет 6,8 м<sup>3</sup>/с, а сопротивление аппарата - около 100 Па. Площадь активного сечения 6,8 м<sup>2</sup>, площадь осаждения 218 м<sup>2</sup>. Активная длина поля (высота электродов) 3,5 м, диаметр аппарата 3,6 м.

### 7.3. Подбор и расчет электрофильтров

При выборе типа электрофильтра исходят из расхода, физико-химических параметров газа и дисперсной примеси, а также условий размещения фильтра. Основные рекомендации могут быть сведены к следующему. Мокрые аппараты имеют более высокие коэффициенты очистки из-за уменьшения вторичного уноса, однако им присущи и общие недостатки мокрых способов: необходимость обработки или удаления загрязненных стоков и шлама, коррозия металлических узлов аппаратов, усложнение эксплуатации очистного устройства и т.д. Поэтому для осаждения твердых примесей сухие аппараты предпочтительнее мокрых. Из конструкций сухих электрофильтров вертикальную компоновку применяют при недостатке производственной площади, низкой начальной запыленности и не слишком мелкодисперсной пыли, так как время пребывания в них намного меньше, чем в горизонтальных.

Осаждение частиц в электрофильтрах происходит под действием кулоновских или электрических сил на частицы. Эти силы заставляют частицы двигаться к осадительным электродам со скоростью, определяемой равенством электрической силы и силы гидродинамического сопротивления. Скорость осаждения возрастает вместе со скоростью миграции частиц, поэтому последняя должна иметь максимальное значение.

Модели улавливания зависят от характера течения газа в осадителе. В простейшем случае частицы переносятся ламинарным потоком. В этом случае скорость движения частиц к осадительному электроду можно рассчитать, используя законы классической механики и электростатики:

$F_e = q \cdot E$  - закон Кулона электростатического взаимодействия;

$$F_c = \frac{6 \pi \mu r_q w}{1 + A \frac{\lambda}{r_q}} \text{ - закон сопротивления Стокса-Кенингема.}$$

Записывая  $F_e = F_c$  и решая уравнение, получаем для скорости миграции

$$w = \frac{q \cdot E}{6 \pi \mu r_q} \left( 1 + A \frac{\lambda}{r_q} \right), \quad (7.6)$$

где  $q$  - заряд частицы;  $E$  - осаждающее поле;  $\mu$  - вязкость газа;  $r_q$  - радиус частицы;  $\lambda$  - средняя длина пробега молекул окружающего газа;  $A$  - безразмерный параметр, величина которого для атмосферного воздуха составляет  $\approx 0,86$ .

Полное улавливание происходит тогда, когда самая медленная частица имеет достаточно времени для того, чтобы пройти путь от коронирующего электрода до осадительного. Условия идеального ламинарного течения никогда не реализуются на практике, хотя к ним можно приблизиться в некоторых типах двухступенчатых осадителей. В одноступенчатых

фильтрах, обычно используемых в промышленности, течение газа носит сложный турбулентный характер.

У малых частиц, представляющих наибольший интерес для электрофильтрации, скорость миграции много меньше скорости газа в осадителе. Движение частиц в этих условиях определяется в первую очередь полем турбулентного течения и лишь во вторую очередь - электрическими силами. Частицы осаждаются тогда, когда они приближаются к осадительному электроду и заносятся в ламинарный пограничный слой, где электрические силы вынуждают их двигаться к осадительной поверхности.

Степень очистки газов и другие эксплуатационные характеристики электрофильтра могут быть достоверно определены только при наличии точной информации об опыте эксплуатации подобных конструкций в аналогичных условиях. При отсутствии необходимых сведений (отсутствие аналога, сложность или дороговизна поиска и получения информации) можно определить степень очистки расчетом. Однако расчетных методик, дающих надежные результаты, нет. Поэтому информация, полученная расчетным путем, может использоваться как предварительная и оценочная.

Осаждение частиц в условиях турбулентного потока можно рассмотреть на основе вероятностного подхода, который ведет к экспоненциальной формуле для вероятности захвата частицы, двигающейся в поле электрофильтра. Формула для эффективности улавливания  $\varepsilon$  имеет вид:

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(-A_{oc} \frac{w_d}{v}\right), \quad (7.7)$$

где  $A_{oc}$  - поверхность осаждения фильтра, м<sup>2</sup>;  $w_d$  - скорость миграции (дрейфа) частиц, м/с;  $v$  - скорость течения газа, м/с.

Это уравнение теоретически применимо только к монодисперсным частицам, скорости миграции которых не превышают 10...20 % скорости течения газа.

Под скоростью дрейфа понимают результирующую скорость движения взвешенных частиц в активной зоне электрофильтра. Степень очистки может быть подсчитана достаточно достоверно, если известна скорость дрейфа, найденная опытным путем, например, из опыта эксплуатации подобных электрофильтров при идентичных параметрах выбросов, в аналогичных условиях и т.д.

Теоретическую степень очистки газов  $\varepsilon$  в электрофильтре можно рассчитать по следующим формулам (в %):

- для пластинчатого электрофильтра

$$\varepsilon = 100 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{w_d l}{v \delta}\right) \right], \quad (7.8)$$

- для трубчатого электрофильтра

$$\varepsilon = 100 \left[ 1 - \exp \left( \frac{-2 \cdot w_d l}{v R} \right) \right], \quad (7.9)$$

где  $w_d$  — скорость движения частиц к осадительным электродам (скорость дрейфа частиц), м/с;  $v$  — скорость газов в активном сечении электрофильтра, т. е. в свободном сечении для прохода газов, м/с,  $l$  — активная длина электрофильтра, т. е. протяженность электрического поля в направлении хода газов (в вертикальных электрофильтрах совпадает с высотой электродов), м;  $R$  — радиус трубчатого осадительного электрода, м;  $\delta$  — расстояние между коронирующим электродом и пластинчатым осадительным электродом (межэлектродный промежуток), м.

В пределах применимости формулы Стокса скорость  $w_d$  рассчитывается по следующим формулам (в м/с):

- для частиц диаметром  $d_p \geq 1$  мкм

$$w_d = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} E^2 d_p}{2\mu}; \quad (7.10)$$

- для частиц диаметром  $d_p \leq 1$  мкм

$$w_d = \frac{0,17 \cdot 10^{-11} E C_K}{\mu}, \quad (7.11)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля в электрофильтре, В/м;  $d_p$  — диаметр частицы, м;  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости газа, Па·с;  $C_K$  — поправка Кенингема—Милликена;  $C_K = 1 + \frac{2A\lambda}{d_p}$  ( $A$  — численный коэффициент, равный 0,815...1,63;  $\lambda$  — длина среднего свободного пробега молекул газа, м;  $\lambda = 10^{-7}$  м).

Для упрощенных расчетов используется модифицированная формула

$$\varepsilon = 1 - \exp(-K_v A \beta^{0,42}), \quad (7.12)$$

где  $K_v$  - параметр вторичного уноса;  $A$  - безразмерный параметр, величина которого зависит от соотношения площадей активной и неактивной зон электрофильтра;  $\beta$  - безразмерный параметр, зависящий от соотношения электрических и аэродинамических сил.

В случае полидисперсных частиц можно прибегнуть к интегрированию с использованием известной или гипотетической функции распределения частиц по размерам для расчета эффективности электрофильтра. Пусть  $\gamma(x)$  будет функцией распределения по размерам, т. е.  $\gamma(x) dx$  - доля частиц, имеющих размер от  $\gamma(x)$  до  $\gamma(x + dx)$ . Тогда эффективность определяется уравнением

$$\varepsilon = 1 - \int_0^{\infty} \gamma(x) \exp \left[ \frac{A_{oc} w_d(x)}{v} \right] dx, \quad (7.13)$$

которое можно решить аналитически для ряда случаев, представляющих практический интерес. Наиболее важный случай - логарифмически нормальное распределение в условиях, когда преобладает полевая зарядка.

Эффективность осаждения заряженных частиц в электрофильтрах зависит от ряда факторов: электрической проводимости и размера взвешенных частиц, скорости газов, их температуры и влажности, состояния поверхности осадительных электродов и т. д.

Важнейшим фактором, влияющим на размеры электрофильтров, является время, необходимое для того, чтобы улавливаемая частица достигла осадительного электрода  $\tau_{oc}$ . Эту величину определяют по соотношению:

$$\tau_{oc} = \delta/w_{\delta}, \quad (7.14)$$

где  $\delta$  - расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м;  $w_{\delta}$  - скорость дрейфа (средняя условная скорость движения частиц по направлению к осадительным электродам), м/с.

Время осаждения  $\tau_{oc}$  должно быть всегда меньше общего времени пребывания частиц в воздушном потоке, проходящем через электрофильтр ( $\tau_{п}$ ), т.е. условие нормальной работы электрофильтра имеет вид:

$$\tau_{oc} \leq \tau_{п} \quad (7.15)$$

Величина  $\tau_{п}$  может быть выражена следующим образом:

$$\tau_{п} = l/v \quad (7.16)$$

где  $l$  - путь движения запыленного газа в аппарате, м;  $v$  - средняя расходная скорость движения газа в фильтре, м/с.

В электрофильтрах улавливают частицы размером несколько микрон, поэтому без большой погрешности можно допустить, что скорость движения частиц с потоком газа равна средней расходной скорости газа в аппарате. Тогда, приравняв правые части уравнений (7.14) и (7.16), получим выражение для определения предельной величины средней расходной скорости сквозь фильтр:

$$v = w_{\delta} l/\delta. \quad (7.17)$$

Для частиц размером  $d_{ч} = 2...50$  мкм теоретическим путем было получено следующее уравнение для расчета скорости дрейфа:

$$w_{\delta} = 0,059 \cdot 10^{-10} E^2 d_{ч}/\mu, \quad (7.18)$$

где  $E$  - напряженность электрического поля осаждения, В/м;  $\mu$  - динамическая вязкость газа при рабочей температуре, Па·с.

Однако на практике скорость дрейфа обычно оказывается в полтора-два раза ниже теоретической. Тогда необходимая площадь (в м<sup>2</sup>) активного сечения электрофильтра может быть найдена по зависимости:

$$S = (1,5...2)[V/(3600 \cdot w_{\delta})]\delta/l. \quad (7.19)$$

По рассчитанной величине площади активного сечения подбирают серийно выпускаемый электрофильтр той или иной серии.

Степень очистки (в %) может быть рассчитана по уравнению:

$$\varepsilon = [1 - \exp(-w_0 \cdot f)]100, \quad (7.20)$$

где  $f$  - удельная поверхность осаждения электрофильтра,  $\text{м}^2/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ .

В общем случае для любого электрофильтра

$$f = F/V, \quad (7.21)$$

где  $F$  - общая площадь осадительных электродов,  $\text{м}^2$ ;  $V$  - расход очищаемых газов,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

При установке электрофильтров приходится определять их число и подбирать тип агрегатов электрического питания. Оптимальный режим в электрофильтре достигается при питании каждого электрического поля от отдельного электроагрегата. Таким образом, число агрегатов соответствует числу полей в электрофильтре. Типоразмер электроагрегата определяется средней силой тока, потребляемой одним полем электрофильтра, которую подсчитывают как произведение удельного тока короны на площадь поверхности осаждения одного поля:

$$I_{cp} = iF_1, \quad (7.22)$$

где  $i$  - удельная сила тока на  $1 \text{ м}^2$  поверхности осаждения (для пластинчатых электродов ее принимают равной  $0,30 \dots 0,40 \text{ мА/м}^2$ );  $F_1$  - поверхность осаждения одного поля,  $\text{м}^2$ .

Потребляемая мощность электрофильтра (в кВт):

$$N = U \cdot I_{cp} \cdot K_\phi \cdot \cos \varphi / (1,41 \cdot \eta \cdot 10^3) + \sum N_i, \quad (7.23)$$

где  $U$  - максимальное выпрямленное напряжение, кВ;  $K_\phi$  - коэффициент формы кривой тока (принимают  $K_\phi = 1,2 \dots 1,5$ );  $\cos \varphi$  - коэффициент мощности электроагрегата ( $0,80 \dots 0,90$ );  $1,41$  - коэффициент перехода от амплитудного значения напряжения к эффективному;  $\eta$  - КПД электроагрегата;  $\sum N_i$  - мощности, потребляемые механизмами встряхивания и нагревательными элементами изоляторных коробок, кВт.

**Пример 7.1.** Подобрать серийную конструкцию электрофильтра для очистки отходящего запыленного сушильного агента после барабанной сушилки, если сушильный агент имеет температуру  $120^\circ\text{C}$ , размер частиц в потоке газа лежит в диапазоне  $5 \dots 40 \text{ мкм}$ , объем очищаемого потока газа равен  $60000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , степень очистки его должна быть не ниже  $99,8 \%$ .

Определяем величину скорости дрейфа частиц размером  $5$  и  $40 \text{ мкм}$ . Напряженность электрического поля в ходе очистки примем равной  $30 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}$ , что характерно для электрофильтров сухой очистки:

$$w_0(5) = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot d_q / \mu =$$

$$= 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot (30 \cdot 40^4)^2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} / 2,25 \cdot 10^{-5} = 0,118 \text{ м/с};$$

$$w_o(40) = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot (30 \cdot 40^4)^2 \cdot 40 \cdot 10^{-6} / 2,25 \cdot 10^{-5} = 0,944 \text{ м/с}.$$

Скорость газа в активном сечении  $v_r = 1 \text{ м/с}$ .

Определяем время, необходимое для осаждения частиц размером 5 мкм, так как они имеют в 8 раз меньшую скорость дрейфа. Предварительно выбираем электрофильтр типа ЭГА с расстоянием между коронирующим и осадительным электродами 150 мм, путем движения запыленного потока в электрофильтре равным  $l = 8,5 \text{ м}$ . Расчет  $\tau_{oc}$  проводим по формуле (7.14):

$$\tau_{oc}(5) = \delta / w_o(5) = 0,150 / 0,118 = 1,27 \text{ с}.$$

Определяем необходимую величину активного сечения электрофильтра:

$$S = V_z / (3600 \cdot w_z) = 60000 / (3600 \cdot 1,0) = 16,65 \text{ м}^2.$$

По найденной величине активного сечения из каталога выбираем электрофильтр ЭГА-1-12-6-5-2 (1 – количество секций; 12 – количество газовых проходов; 6 – высота электродов, м; 5 – количество элементов в осадительном электроде; 2 – количество электродных полей) с фактической площадью активного сечения  $19,8 \text{ м}^2$  и площадью осаждения  $F_{oc} = 952 \text{ м}^2$ .

Удельная поверхность осаждения электрофильтра:

$$f = \frac{F_{oc}}{V_z / 3600} = \frac{952}{60000 \cdot 3600} = 57,2 \text{ м}^2 / (\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

Степень очистки сушильного агента в данном электрофильтре определяем по уравнению:

$$\varepsilon = [1 - \exp(-w_z f)] \cdot 100\% = [1 - \exp(-0,118 \cdot 57,2)] \cdot 100\% = 99,88\%.$$

Полученная величина степени очистки выше заданной, поэтому выбранный тип электрофильтра обеспечит необходимую степень пылеочистки.

Проверяем необходимое условие осаждения частиц в данном электрофильтре. Средняя скорость движения в электрофильтре с горизонтальным движением потока запыленного газа лежит в пределах  $0,5 \dots 1 \text{ м/с}$ . Для проверки необходимого условия осаждения примем верхний предел скорости движения газового потока, тогда

$$\tau_{п} = l / v_z = 8,5 / 1,0 = 8,5 \text{ с}.$$

Таким образом,  $\tau_{oc} < \tau_{п}$  что говорит о том, что фильтр выбран правильно.

Вычисление ориентировочной степени очистки выбросов в сухих электрофильтрах от пыли, имеющей средние значения УЭС, по формуле (7.12), можно выполнять в следующем порядке.

1. Величину  $K_v$  при встряхивании осадительных электродов находят из выражения:

$$K_y = 1 - 0,275 \cdot v^{0,35} h^{0,54} \exp(-1,72 \cdot m_s), \quad (7.24)$$

где  $v_o, h, m_s$  - относительные скорость газа, высота и пылеемкость осадительных электродов, вычисляемые как отношения действительных значений указанных характеристик к базовым, принимаемым соответственно 1 м/с, 8 м и 1 кг/м<sup>2</sup>.

Рекомендуемые скорости движения газов для отечественных марок электрофильтров находятся в пределах 1...1,3 м/с и указаны в каталогах, также, как и размеры осадительных электродов. Если известен интервал времени между встряхиваниями, то можно по расходу газов и начальной запыленности оценить пылеемкость электродов. Действительные значения интервалов между регенерациями и пылеемкостью электродов можно установить лишь опытным путем при эксплуатации электрофильтра. Неточность их оценки является одной из основных причин снижения надежности расчетов. Для оценки величины пылеемкости электродов у отдельных видов электрофильтров можно воспользоваться данными табл. 7.3.

Таблица 7.3.

Пылеемкость электродов электрофильтров

Типы и типоразмеры электрофильтров	Количество		Скорость газов, м/с	Начальная запыленность, г/м <sup>3</sup>	Интервалы между встряхиваниями, мин
	полей	элементов в осадительном электроде			
ЭГА1-20, ЭГА	3	4	1	90	8
1-30, ЭГА 1-40	2	6	-"	-"	8
ЭГА (все остальные типоразмеры)	2	4	1	90	8
	2	6	-"	-"	12
	3	4	-"	-"	12
	4	4	-"	-"	16
	3	6	-"	"	18
	4	6	-"	"	24
ЭГГ	3	-	1	40	30
	4	-	-"	"	40
УГТ1-40-3	3	-	1	50	24
ЭГ-КЭН	3	-	1	90	18
	4	-	-"	-"	16
ЭГ2-2-4-37СРК	2	-	1	7	60...120
УГМ	2	-	1	60	12
УВ	-	-	1	15	30
ЭВВ	-	-	1	20	30

При расчете степени очистки дымовых газов энергетических парогенераторов от золы с УЭС в пределах  $\rho = (10^6 \dots 10^{10})$  Омм величины пылеемкости осадительных электродов можно принимать по графику рис. 7.8.

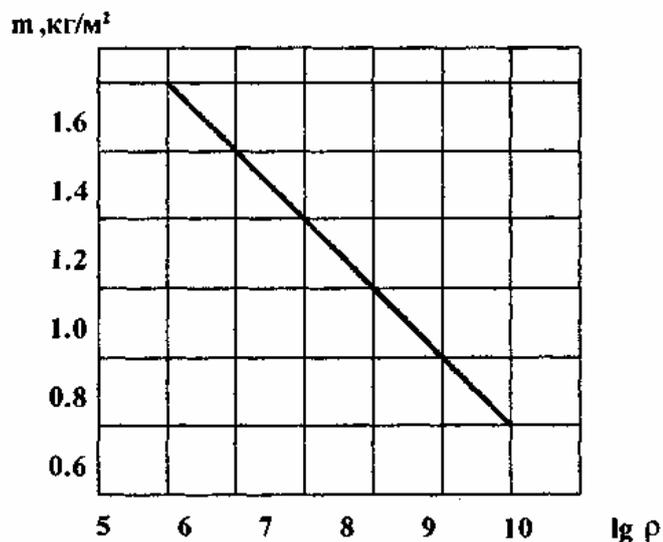


Рис. 7.8. Пылеемкость осадительных электродов

2. Величину конструктивного параметра  $A$  можно принимать по данным таблиц 7.4 или 7.5, составленных для значений относительных площадей  $f_{омн}$  (отношения площади активной зоны к площади поперечного сечения корпуса) соответственно. Для электрофильтров марок ЭГА, ЭГТ и подобных им горизонтальных конструкций  $f_{омн}$  можно принять равной 0,9. Значение  $f_{омн} = 1$  подходит для трубчатых вертикальных электрофильтров с незначительными зазорами между внешней поверхностью осадительных электродов и корпусом, а также для горизонтальных электрофильтров с клапанами для перекрытия боковых, верхних и нижних промежутков между активной зоной и корпусом.

Таблица 7.4.

Значения параметра  $A$  для конструкций электрофильтров с  $f_{\text{омн}} = 0,9$ .

$k/\sigma$	1,0	1,25	1,50	1,75	2,0
0	1,970	1,824	1,710	1,605	1,514
0,05	2,080	1,970	1,850	1,730	1,660
0,10	2,160	2,060	1,970	1,865	1,774
0,15	2,235	2,140	2,055	1,970	1,870
0,20	2,299	2,210	2,129	2,078	1,990
0,25	2,340	2,265	2,185	2,125	2,055
0,30	2,370	2,305	2,230	2,185	2,120
0,35	2,400	2,340	2,275	2,225	2,185
0,40	2,425	2,374	2,315	2,260	2,234
0,50	2,465	2,420	2,370	2,325	2,300
0,60	2,495	2,450	2,415	2,385	2,360
0,70	2,515	2,487	2,450	2,420	2,330
0,80	2,530	2,516	2,480	2,445	2,416

Окончание табл. 7.4

$k/\sigma$	2,50	3,0	3,50	4,0	4,50	5,0
0	1,330	1,200	1,078	0,986	0,900	0,843
0,05	1,480	1,366	1,280	1,206	1,150	1,114
0,10	1,620	1,520	1,450	1,394	1,360	1,329
0,15	1,745	1,635	1,585	1,542	1,485	1,475
0,20	1,885	1,800	1,730	1,663	1,625	1,586
0,25	1,950	1,878	1,825	1,750	1,715	1,690
0,30	2,025	1,965	1,910	1,850	1,825	1,800
0,35	2,095	2,045	1,990	1,940	1,905	1,880
0,40	2,170	2,120	2,050	2,020	1,975	1,946
0,50	2,250	2,200	2,160	2,130	2,090	2,060
0,60	2,290	2,260	2,240	2,210	2,190	2,160
0,70	2,330	2,290	2,260	2,230	2,1%	2,170
0,80	2,370	2,313	2,270	2,243	2,200	2,177

Таблица 7.5.

Значения параметра  $A$  для конструкции электрофильтров с  $f_{\text{омн}} = 1$ .

$k/\sigma$	1,0	1,10	1,25	1,35	1,50	1,75
0	3,625	3,450	3,275	3,100	2,920	2,650
0,05	3,898	3,710	3,556	3,400	3,225	2,950
0,10	4,125	3,985	3,810	3,625	3,475	3,250
0,15	4,340	4,185	4,025	3,835	3,690	3,470
0,20	4,451	4,375	4,210	4,040	3,880	3,690
0,25	4,695	4,435	4,375	4,200	4,040	3,865
0,30	4,820	4,690	4,540	4,380	4,205	4,035
0,35	4,960	4,825	4,670	4,500	4,345	4,195
0,40	5,070	4,945	4,790	4,635	4,480	4,340
0,45	5,140	5,040	4,900	4,750	4,590	4,470
0,50	5,215	5,120	4,975	4,840	4,685	4,595
0,55	5,270	5,190	5,055	4,935	4,805	4,700
0,60	5,315	5,240	5,125	5,005	4,890	4,790
0,65	5,365	5,290	5,180	5,070	4,955	4,865
0,70	5,410	5,330	5,230	5,125	5,020	4,930
0,75	5,450	5,365	5,270	5,180	5,075	4,970
0,80	5,475	5,400	5,300	5,220	5,120	5,000

Окончание табл. 7.5

$k/\sigma$	2,0	2,25	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
0	2,400	2,200	1,950	1,690	1,450	1,269	1,165
0,05	2,744	2,620	2,430	2,200	1,995	1,840	1,730
0,10	3,086	2,915	2,800	2,541	2,350	2,200	2,070
0,15	3,300	3,140	3,030	2,900	2,610	2,470	2,330
0,20	3,486	3,350	3,225	3,023	2,840	2,697	2,590
0,25	3,670	3,555	3,430	3,240	3,025	2,897	2,800
0,30	3,870	3,725	3,515	3,435	3,225	3,090	2,980
0,35	4,025	3,895	3,790	3,610	3,410	3,285	3,165
0,40	4,180	4,050	3,933	3,741	3,560	3,460	3,330

0,45	4,325	4,195	4,055	3,880	3,700	3,590	3,485
0,50	4,440	4,320	4,215	4,000	3,830	3,700	3,610
0,55	4,560	4,445	4,325	4,125	3,950	3,830	3,720
0,60	4,665	4,540	4,430	4,225	4,045	3,930	3,825
0,65	4,750	4,630	4,525	4,330	4,142	4,045	3,930
0,70	4,815	4,700	4,610	4,420	4,230	4,130	4,015
0,75	4,880	4,760	4,660	4,500	4,290	4,170	4,070
0,80	4,910	4,780	4,690	4,560	4,330	4,229	4,135

Значение параметра  $A$  подбирают по дисперсии пыли заданного состава и коэффициенту  $k$ , определяемому выражением:

$$k = 0,55 \cdot 10^{-4} T \frac{1 + \frac{10}{E}}{d_m}, \quad (7.25)$$

где  $T, p$  - температура, К, и давление, Па (абс.), газового потока;  $d_m$  - медианный диаметр частиц загрязнителя, м;  $E$  - напряженность электрического поля у осадительного электрода, В/м.

Напряженность  $E$  поля у осадительного электрода зависит от напряжения на электродах, их размеров, формы, состояния (запыленности, влажности, наличия дефектов и т.д.), от параметров выбросов и множества других факторов. Для трубчатого электрофильтра с коронирующим проволочным электродом, установленным строго по оси цилиндрического осадительного, величину  $E$  ориентировочно можно вычислить по формуле:

$$E = \frac{U}{\delta \ln \frac{D_1}{D_2}}, \text{ В/м}, \quad (7.26)$$

где  $U$  - разность потенциалов на электродах, В;  $D_1, D_2$  - соответственно внутренний диаметр осадительного и диаметр коронирующего электродов, м;  $\delta$  - расстояние от поверхности коронирующего электрода до внутренней поверхности осадительного электрода, равно  $\frac{D_1}{2} - \frac{D_2}{2}$ , м.

Если действительная величина  $U$  неизвестна, определяют  $E$  по максимально возможному напряжению, при котором еще не образуется дуга, а для высокоомных пылей - обратная корона. Первое значение можно принимать в пределах (40...50) кВ, второе - (30...40) кВ. Для определения ориентировочной величины  $E$  в электрофильтрах с проволочными коронирующими и плоскими осадительными электродами также можно использовать формулу (7.26), приняв за  $\delta$  расстояние между осадительным и коронирующим (или половину шага между оса-

дительными) электродами и подставив вместо  $D_1$  величину шага между осадительными электродами.

В большинстве современных электрофильтров применяются игольчатые, зубчатые и другие сложные формы коронирующих элементов. Собранные из них электроды создают в активной зоне неоднородное электрическое поле с аperiodическим градиентом напряжения. Напряженность такого поля меняется от нуля до максимума по всем направлениям, и результаты ее вычисления могут рассматриваться лишь как оценочные.

3. Величину параметра  $\beta$  находят из соотношения:

$$\beta = \frac{\varepsilon_0 E^2 d_m l}{v k_p \mu \delta}, \quad (7.27)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - электрическая постоянная;  $l$  - активная длина электрофильтра,  $\delta$  - расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м;  $k_p$  - коэффициент равномерности газового потока,  $k_p = 0,93$ .

Коэффициент динамической вязкости газа  $\mu$  Па·с, находят из справочных данных, учитывая состав и параметры состояния газовой фазы выбросов.

Значение  $k_p$  можно принимать 0,85 для горизонтальных конструкций с большим числом газовых проходов и 1,0 для вертикальных одноходовых конструкций.

Погрешность по проскоку  $\varepsilon_v$ , т.е. по уносу пыли из электрофильтра, которая может быть представлена в виде:

$$\varepsilon_v = \exp(-K_y A \beta^{0,42}), \quad (7.28)$$

не превышает 20%.

**Пример 7.2.** Определить эффективность электрофильтрации отбросных газов содорегенерационного котлоагрегата (СРКА) целлюлозно-бумажного комбината и параметры работы электрофильтра. Количество газов  $V = 5$  м<sup>3</sup>/с, исходная запыленность  $C_{вх} = 4,1$  г/м<sup>3</sup>, рабочая температура газов  $t = 140$  °С, динамическая вязкость газов при рабочей температуре  $\mu = 6,48 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

Выбираем из действующих каталогов электрофильтр ЭГ2-2-4-37 СРК, специально предназначенный для очистки выбросов СРКА. По маркировке определяем некоторые из необходимых конструктивных параметров: количество полей - 2 (вторая цифра), активная длина каждого поля 4 м (третья цифра), площадь активного сечения  $f = 37$  м<sup>2</sup>. Общую площадь осаждения (2256 м<sup>2</sup>) и габариты электрофильтра (12,6×9,55×14,84 м) принимаем по таблице 7.1. По каталожному описанию скорость газов до 1 м/с, температура 130...250°С, запыленность на входе до 7 г/м<sup>3</sup>, разрежение до 3 кПа, гидравлическое сопротивление аппарата 200 Па. Степень очистки при этих условиях предположительно может достигать 98%.

Осадительные электроды электрофильтра плоские, коронирующие выполнены в виде трубчатых рам с ленточно-игольчатыми или зубчатыми

элементами. Высота электродов  $h = 7200$  мм, расстояние между осадительными электродами 300 мм. Регенерация производится механическим встряхиванием. Ввиду отсутствия других сведений об интервале между встряхиваниями, принимаем интервал в 4 часа, ориентируясь на данные таблицы 7.3.

Предполагая, что по габаритам аппарат можно разместить на производственной площадке, сопоставим его характеристики с заданными параметрами обрабатываемых газов. Исходная запыленность  $C_{\text{вх}}$  составляет  $4,1 \text{ г/м}^3$ , а количество газов  $V = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ , что находится в пределах допустимого для выбранного типа электрофильтра. Заданная температура газов ( $140^\circ\text{C}$ ) также соответствует показателям аппарата. В данном случае важен не только верхний, но и нижний температурный предел вследствие повышенной влажности обрабатываемых газов и возможной конденсации паров при температурах ниже  $130^\circ\text{C}$ . Можно констатировать, что по техническим параметрам выбранный тип аппарата удовлетворяет заданным условиям, что позволяет перейти к расчету полного коэффициента очистки.

1. Подсчитываем скорость газов в активном сечении:

$$v = V / f = 5 / 37 = 0,135 \text{ м/с}.$$

Определим ориентировочную величину пылеемкости электродов  $m$  как количество пыли, осевшее на площади  $2256 \text{ м}^2$  за время между регенерациями 14400 с (4 часа) при расходе газа  $V = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ , начальной запыленности  $C_{\text{вх}} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  и степени улавливания 98%:

$$m = 5 \cdot 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 14400 \cdot 0,98 / 2256 = 0,128 \text{ кг/м}^2.$$

Тогда относительная пылеемкость составит:

$$m_s = m / 1 = 0,128.$$

Вычисляем по формуле (7.24) величину коэффициента вторичного уноса:

$$K_y = 1 - 0,275 \cdot 0,135^{0,35} \cdot 0,9^{0,51} \exp(-1,72 \cdot 0,128) = 0,897.$$

2. Напряженность поля у осадительного электрода вычислим по формуле (7.26), внося в нее необходимые поправки на геометрические характеристики электродов (рис. 7. 9): принимаем за  $D_1$  шаг между осадительными электродами  $a = 0,3$  м; за  $b$  расстояние между концами игл или зубьев коронирующих электродов ( $b = 0,03$  м); за  $\delta$  расстояние от конца иглы до осадительного электрода ( $\delta = 0,015$  м).

Расчет ведем на максимальное напряжение  $U = 50$  кВ:

$$E = 50 \cdot 10^3 / [(0,15 - 0,015) \ln(0,3 / 0,03)] = 160,85 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

Вычисленное значение  $E$  близко к характеристикам поля в электрофильтрах с игольчатыми коронирующими электродами.

Относительная скорость газов составит:

$$v_o = v / 1 = 0,135,$$

а относительная длина электродов будет равна:

$$h_o = h/8 = 7,2/8 = 0,9 .$$

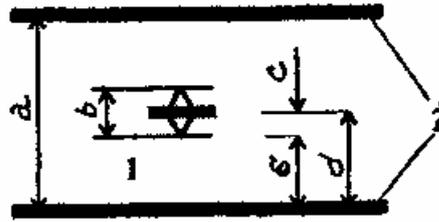


Рис. 7. 9. Схема расположения электродов:  
1- ленточно-игольчатый или зубчатый; 2 - осадительный.

Подсчитываем коэффициент  $k$  по формуле (7.25) при температуре газа  $T = 140 + 273 = 413$  К, абсолютном давлении в электрофильтре  $p = 101325 - 3000 = 98325$  Па и среднем размере дисперсных частиц  $d_m = 1,1 \cdot 10^{-6}$  м:

$$k = 0,55 \cdot 10^{-4} \cdot 413 \cdot [(1/98325) + (10/160850)] / (1,1 \cdot 10^{-6}) = 1,49 .$$

Принимаем величину  $f_{omn} = 0,9$  и из таблицы 7.4 при заданной  $\sigma = 1,7$  и максимальном значении  $k$ , которое имеется в таблице, находим параметр  $A = 2,452$ .

3. Аппарат ЭГ-2-2-4-37 СРК имеет порядка 20 газовых проходов (ширина активной зоны 6000 мм, расстояние между осадительными электродами 300 мм).

По формуле (7.27) определяем параметр  $\beta$ :

$$\beta = 8,85 \cdot 10^{-12} (160,85 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,110^{-6} \cdot 8 / (0,135 \cdot 0,936 \cdot 4810^{-6} \cdot 0,15) = 3,308 .$$

4. Используя формулу (7.12), подсчитываем коэффициент очистки:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-0,897 \cdot 2,452 \cdot 3,308^{0,42}) = 0,9736 .$$

Величина полного коэффициента очистки, найденная расчетным путем, оказалась достаточно близкой к каталожной. Отличие расчетного проскока (2,64%) от каталожного (2%) составляет порядка 25%.

## 8. Совершенствование процессов и аппаратов для пылегазоочистки

Требования к эффективности процессов очистки аэрозолей, особенно пылеулавливания, постоянно повышаются по мере ужесточения нормативных требований к чистоте атмосферного воздуха и воздуха в помещениях производственных и гражданских зданий, а также с появлением новых технологий, применением новых материалов и, следовательно, с поступлением в воздух соответствующих выбросов.

Современные санитарно-технические средства обработки технологических газовых выбросов не обеспечивают их полного обезвреживания или вос-

становления первоначального качества воздуха, использованного в производственном цикле. Поэтому отработанные газы всегда вносят в атмосферу часть отходов производства. Тем не менее, при определении задач проектирования и подборе средств очистки необходимо исходить из идеальной модели, придерживаясь принципа запрета на изменение качества атмосферного воздуха в процессе производства.

На этапе подбора вариантов и поиска средств очистки нет необходимости стремиться к достижению технической простоты или экономической целесообразности решения. Творческий поиск решений становится все более необходимым проектировщикам, так как в последнее время все чаще приходится разрабатывать нетиповые устройства, или же основательно дорабатывать существующие установки по причине их низкой эффективности, морального устаревания или несовпадения параметров технологических процессов ввиду большого разнообразия последних.

Простые методы обработки выбросов современных производственных процессов скорее всего не обеспечат надлежащей степени очистки, предотвращающей ощутимый ущерб окружающей среде. Так, например, простые пылеуловители - осадительные камеры, жалюзийные решетки, циклоны могут быть удачно применены в двухступенчатой схеме очистки для предварительной обработки выбросов. Однако следовало бы отказаться от использования мультициклонов в качестве единственного средства очистки дымовых газов парогенераторов электростанций. Объемы выбросы теплоэнергетических установок достигают 400...500 м<sup>3</sup>/с, и поэтому проскок загрязнителя в 1...2% может представлять серьезную опасность окружающей среде, в то время как мультициклоны обеспечивают степень очистки не более, чем на 85... 90%.

При постановке задачи проектирования должны быть охвачены все загрязнители, которые могут присутствовать в выбросах, для чего необходимо тщательно проанализировать состав выбросов, выделив нейтральную часть и компоненты, которые могут нанести ущерб окружающей среде.

Наиболее сложны для очистки выбросы, загрязнители которых представляют многофазную систему. Поскольку большинство современных очистных аппаратов не приспособлено для одновременного обезвреживания дисперсных и гомогенных загрязнителей, то в общем случае подобные выбросы должны пройти последовательно 4 стадии обработки: предварительную и тонкую очистку от аэрозоля и затем предварительное и окончательное обезвреживание газообразного загрязнителя. В частности, если газообразный загрязнитель хорошо растворяется в воде, может быть организована предварительная обработка выбросов мокрыми способами, которая позволит понизить концентрации как дисперсных, так и гомогенных загрязнителей.

При обработке выбросов, содержащих твердые аэрозольные загрязнители, низких величин проскока (1...2% и менее) можно достичь, как правило,

только двухступенчатой очисткой. Для предварительной очистки могут быть применены жалюзийные решетки и циклонные аппараты (иногда для небольших выбросов - пылесадительные камеры), а для окончательной - пористые фильтры, электрофильтры или мокрые пылесадители.

Жидкие аэрозоли (туманы) могут быть скоагулированы посредством изменения параметров состояния (охлаждения и повышения давления) с целью осаждения в последующем с использованием как правило мокрых способов улавливания в мокрых скрубберах, пористых и электрических фильтрах, в абсорберах.

Мокрые способы очистки твердых и жидких аэрозолей имеют существенный недостаток - необходимость отделения уловленного загрязнителя от улавливающей жидкости. По этой причине мокрые способы следует применять только при отсутствии других методов очистки, отдавая предпочтение способам с минимальным расходом жидкости.

Существует несколько направлений совершенствования пылеуловителей и систем пылеулавливания с целью повышения эффективности очистки воздуха (газов) от пыли.

### **8.1. Специализация аппаратов.**

Универсальных пылеуловителей, т. е. способных эффективно улавливать все виды пылей, не существует. Аппарат эффективен лишь по отношению к определенным видам пыли. При улавливании пылей с другими свойствами он не эффективен и даже может произойти нарушение его работы. Перспективными являются аппараты, специально разработанные для улавливания пылей с определенными свойствами.

Например, наиболее перспективными областями применения тканевых фильтров являются:

- тонкая очистка сбрасываемых в атмосферу топочных газов от золы на тепловых электростанциях, сжигающих каменные угли с низким содержанием серы;

- применение фильтров с высокой производительностью, в которых используется импульсный метод регенерации в цементном производстве, на предприятиях черной и цветной металлургии, в производстве абразивов и других отраслей промышленности, где имеются высокие концентрации тонкодисперсных пылей;

- использование тканевых фильтров для одновременного улавливания газообразных загрязнителей ( $\text{SO}_2$ , HF и др.) за счет нанесения сорбирующих порошков на поверхность рукавов с целью обеспечения работоспособности фильтров и санитарной очистки газов.

## 8.2. Предварительная обработка аэрозолей.

Для обеспечения эффективной очистки отработанного воздуха и газов необходимо в каждом конкретном случае произвести подготовку подлежащих очистке газоздушных выбросов с таким расчетом, чтобы технологические параметры газов соответствовали оптимальным характеристикам газоочистных аппаратов. Подготовка отработанного газа к очистке от взвешенных частиц обычно проводят в следующих направлениях

- укрупнение размеров частиц с помощью различных механизмов коагуляции;
- снижение концентрации взвешенных частиц посредством предварительной очистки газов в простых неэнергоёмких аппаратах;
- охлаждение запыленных газов;
- увлажнение запыленных газов в случае применения электрической или мокрой систем очистки.

Укрупненная пыль может эффективно улавливаться ранее применяемыми или другими, более простыми аппаратами, например, циклонами. Укрупнение пыли может производиться путем турбулизации, ионизации или акустической обработки пылегазового потока.

Характерным примером эффективной турбулизации в сочетании с увлажнением является обработка пыли в трубе Вентури.

Имеется положительный опыт применения ионизации и акустической обработки пылегазового потока. Ранее использование акустической обработки сдерживало отсутствие экономичных сирен. Ультразвуковые сирены имели низкий к.п.д., и их применение было нерентабельным. Разработка эффективных сирен слышимого диапазона позволяет более широко применять акустический метод. Ионизация не требует значительных затрат и дает хорошие результаты.

Кондиционирование (подготовка) газов перед очисткой осуществляется либо с целью интенсификации процессов в основных газоочистительных аппаратах, либо для обеспечения нормальной их эксплуатации.

Существует четыре способа кондиционирования.

1. Охлаждение газов. Верхний предел температуры определяется в основном материалами, из которых изготовлены аппараты. Для электрофильтров это материал электродов и корпуса. В некоторых типах электрофильтров температура газов определяется конструкцией коронирующей системы. Жесткая (рамная) конструкция не допускает сильного нагрева, поскольку возможно коробление. В рукавных фильтрах максимум температуры определяется термостойкостью ткани.

2. Подогрев газов применяется для исключения конденсации паров воды и кислот.

3. При увлажнении чрезмерно сухих газов улучшаются свойства промежуток между коронирующими и осадительными электродами в электрофильтрах и снижается удельное электрическое сопротивление (УЭС) пыли.

4. Введение в газовый поток специальных добавок (аммиак, серный ангидрид и др.), интенсифицирующих процесс в электрофильтрах.

В практике газоочистки находят широкое применение три первых способа.

Охлаждение газа может осуществляться путем подсоса наружного воздуха на возможно большем удалении от аппарата, который нуждается в охлаждении газа, или, если это невозможно, то сразу после места подсоса следует разместить перемешивающее устройство, например, в виде закручивателя потока, турбулизатора или циклона.

Подогрев газа может производиться путем сжигания топлива в отдельной топке с последующим вдуванием продуктов горения в поток кондиционируемого газа. При проектировании системы подогрева следует прежде всего определить допустимый интервал:

$$\Delta t = t_{\max} - t_0. \quad (8.1)$$

Здесь  $t_0$  - температура очищаемого газа, превышающая на 20...30 °С точку росы;  $t_{\max}$  - температура максимально приемлемая по конструктивно-технологическим соображениям.

Расход греющего газа, вводимого в тракт газоочистки, определяется (в м<sup>3</sup>/с) по формуле

$$q_{2,2} = Q_{o,2} \frac{t_{cm} - t_{o,2}}{t_{2,2} - t_{cm}}, \quad (8.2)$$

где  $Q_{o,2}$  - расход очищаемого газа, м<sup>3</sup>/с;  $t_{o,2}$  - его температура, °С;  $t_{cm}$  - температура газа после смешения, °С;  $t_{2,2}$  - температура горячего газа, подаваемого для подогрева, °С.

Распространенным способом кондиционирования газов является использование скрубберов полного испарения. Они в основном применяются перед электрофильтрами, реже – перед рукавными фильтрами.

Один из способов повышения степени улавливания аэрозольных частиц в мокрых пылеуловителях – использование эффекта конденсации, происходящей при охлаждении горячих газов, предварительно насыщенным водяным паром. При конденсации пар диффундирует в сторону капли и увлекает с собой наиболее мелкие частицы. Кроме того, частицы обволакиваются пленкой конденсата, благодаря чему улучшается их контакт с каплями. Конденсация водяных паров благоприятно сказывается и на эффективности мокрых пылеуловителей, поверхность осаждения в которых образуют пузырьки (тарельчатые аппараты, газопромыватели с подвиж-

ной шаровой насадкой и др.). Если предполагается использовать эффект конденсации, на тракте газоочистки предусматривается устройство для введения в горячий поток газа (аэрозоля) тонкораспыленной воды. Это может быть вертикальный полый скруббер, рассчитанный на полное испарение, горизонтальная камера с оросителем, либо орошаемый участок пылегазопровода. Тепловая нагрузка скруббера определяется по формуле

$$Q = q_{c.g} [c(t_1 - t_2) + (i_1 - i_2)]. \quad (8.3)$$

Здесь  $q_{c.g}$  - объемный расход сухих газов, м<sup>3</sup>/с;  $c$  - удельная объемная теплоемкость сухих газов, Дж/(м<sup>3</sup>·град);  $t_1$  и  $t_2$  - начальная и конечная температура газов, °С;  $i_1$  и  $i_2$  - удельная начальная и конечная энтальпия водяных паров содержащихся в газах Дж/м<sup>3</sup>;

$$i_1 = (2480 + 1,96 t_1) z'_{вл}; \quad i_2 = (2480 + 1,96 t_2) z''_{вл}, \quad (8.4)$$

где  $z'_{вл}$  и  $z''_{вл}$  - начальное и конечное влагосодержание сухих газов, кг/м<sup>3</sup>.

Массовый расход воды определяется (в кг/с) по формуле

$$q_g = \frac{Q}{k_{uc} c_g (t''_g - t'_g)}, \quad (8.5)$$

где  $k_{uc}$  - коэффициент испарения воды в среде данного газа; значения  $k_{uc}$  могут быть приняты в среднем равными 0,8...0,85.

Эффективность мокрых аппаратов при улавливании субмикронных частиц пыли может быть существенно увеличена путем предварительной зарядки взвешенных частиц. Наилучшие результаты при использовании метода электризации в мокром пылеулавливании достигаются при разноименной зарядке частиц и капель орошающей жидкости. Положительный эффект достигается при предварительной электрической зарядке улавливаемых частиц и капель орошающей жидкости путем размещения ионизатора в зоне, где начинается контакт аэрозоля с каплями. Если относительная скорость частиц и капель невелика, то параметр электростатического осаждения может превзойти параметр инерционного осаждения. Если аэрозоль пропускается через электрофильтр с последующим доулавливанием остатка в мокром аппарате, то заряд, полученный частицами в электрофильтре, заметно повышает эффективность доулавливания.

В качестве интенсификаторов пылеулавливания в некоторых случаях применяются поверхностно-активные вещества, улучшающие смачиваемость гидрофобных частиц. Смачиватели способствуют растеканию воды в виде сплошной пленки по поверхности осаждения, и поэтому частицы, ударившись о поверхность, не могут быть сдуты с нее, как с сухой стенки.

Специальными способами интенсификации работы электрофильтров можно считать мероприятия, связанные с УЭС пыли. Оптимальным считается УЭС в пределах примерно от 10<sup>5</sup> до 10<sup>10</sup> Ом·см. При меньших значениях УЭС пыль мгновенно разряжается на осадительных электродах, от-

рывается от них и вторично уносится потоком газа. Высокие значения УЭС особенно  $10^{11} \dots 10^{13}$  Ом·см, наоборот, способствуют формированию на электродах неотряхиваемого слоя пыли, что приводит к различным осложнениям, результатом которых является резкое падение степени улавливания. В большинстве случаев максимуму УЭС соответствует температура в интервале от 100 до 200 °С. Технологический процесс очистки должен быть рассчитан так, чтобы электрофильтр работал в температурном режиме, обеспечивающем максимально возможное удаление от пика УЭС.

Интенсификация электростатического пылеулавливания достигается также путем ликвидации «запирания короны», которая возникает при подаче в электрофильтр высококонцентрированного тонкодисперсного аэрозоля. Из-за малой скорости дрейфа мелкие частицы не успевают отходить от коронирующих электродов и препятствуют нормальному развитию короны. Избежать запирания короны можно применением электродов с коронирующих электродов с фиксированными точками разряда и, в основном, улавливанием части пыли для снижения концентрации аэрозоля на подходе к электрофильтру.

Одним из способов интенсификации работы электрофильтров является введение в газовый поток специальных добавок (аммиака, хлоридов натрия и калия), что позволяет снизить остаточную запыленность в 5 раз и снизить УЭС пыли в 2...6 раз.

### 8.3. Режимная интенсификация.

Суть этого способа интенсификации заключается в том, что работа газоочистительного аппарата доводится до возможно более напряженных режимов, исходя из свойств очищаемого газа и улавливаемого продукта.

Например, в горизонтальном электрофильтре в каждом поле автоматически поддерживается подпробойный режим, т.е. электрические параметры, создаваемые агрегатом питания, постоянно находятся на уровне, выше которого происходят часто повторяющиеся искровые пробои между коронирующими и осадительными электродами. Формирование электрических характеристик в разрядном промежутке можно проиллюстрировать с помощью формулы, выведенной для трубчатого электрофильтра:

$$\frac{I}{I_0} = 1 - K_{эл} \frac{S_{уд} R}{3}, \quad (8.6)$$

где  $I_0$  - ток в чистом газе (при отсутствии аэрозольных частиц);  $I$  - ток в аэрозоле;  $K_{эл}$  - коэффициент, зависящий от диэлектрических свойств частиц;  $S_{уд}$  - удельная поверхность аэрозольных частиц в единице объема;  $R$  - радиус трубчатого осадительного электрода.

В трубе Вентури режимная интенсификация может быть достигнута увеличением либо скорости газа в горловине, либо удельного расхода орошающей жидкости.

Режим циклонного процесса можно интенсифицировать, просто увеличив скорость газа в циклоне. Однако при этом энергозатраты растут пропорционально квадрату скорости газа, а степень очистки значительно медленнее. К тому же, для каждого типа циклона существует некоторый верхний предел скорости, при превышении которого энергозатраты быстро растут, а степень очистки не только не увеличивается, но в ряде случаев падает из-за вторичного уноса частиц.

Режим фильтрации аэрозоля через ткань можно сделать более напряженным, увеличив скорость фильтрации, но только до пределов, выше которых начинается «проскок» частиц через ткань. При этом возрастает гидравлическое сопротивление фильтра и снижается срок службы ткани.

#### **8.4. Конструктивно-технологическое совершенствование.**

На основании опыта эксплуатации, результатов натуральных и экспериментальных исследований выбирают оптимальное соотношение частей пылеуловителей, вводят новые элементы, способствующие более эффективному пылеулавливанию.

В конструкцию газоочистительного аппарата вносят усовершенствования, способствующие интенсификации происходящих в нем процессов, например, в электрофильтрах взамен гладких проволочных коронирующих электродов применяют игольчатые или пилообразные. Интенсивность и равномерность коронного разряда у игольчатых или пилообразных электродов значительно выше, чем у гладких.

Конструктивная интенсификация тканевой фильтрации идет по пути внедрения новых методов регенерации рукавов в рукавных фильтрах (импульсная, струйная регенерация), создания новых фильтровальных тканей с более широким диапазоном применения и лучшими фильтрующими свойствами, а также дополнения фильтрации предварительной электризацией пыли.

Интенсификация циклонного процесса в основном связана с совершенствованием конфигурации конструктивных элементов циклонов (корпуса, входного патрубка, верхней крышки, выхлопной трубы).

В мокрых методах очистки прежде всего подвергаются конструктивному усовершенствованию устройства для распыла жидкости, а также устройства, от которых зависит характер контакта очищаемого газа с жидкостью. Например, дополнение конструкции пенного аппарата стабилизато-

ром пены позволило в полтора-два раза повысить скорость газа в аппарате без ущерба для степени очистки и без нарушения структуры пенного слоя.

Равномерное распределение газов по сечению аппарата оказывает существенное влияние на эффективность работы мокрых пылеуловителей, имеющих невысокое гидравлическое сопротивление (до 400 Па), т.е. прежде всего на работу полых скрубберов. Не менее важно для нормальной работы мокрых пылеуловителей равномерное распределение газов по отдельным аппаратам при их параллельном соединении.

### 8.5. Многоступенчатая очистка.

При современных требованиях к чистоте воздуха многоступенчатая очистка в большинстве случаев не может обеспечить его необходимого обеспыливания. В основном должна применяться многоступенчатая очистка. Для этого необходим рациональный подбор пылеуловителей с учетом всех факторов: требование к качеству воздуха, свойства, ценность улавливаемой пыли и возможность ее использования, наличие энергетических, водных ресурсов, экономические показатели и др.

**Пример 8.1.** Подобрать оборудование для очистки воздуха от волокнистой пыли.

Аспирационная установка удаляет 7100 м<sup>3</sup>/ч воздуха, начальная запыленность которого  $C_{нач} = 5100$  мг/м<sup>3</sup>.

Дисперсный состав пыли приведен в табл. 8.1.

В пыли содержится 8,35 % свободного SiO<sub>2</sub>. Система работает в режиме полной рециркуляции.

*Решение.* По Санитарным нормам воздух, подаваемый после пылеулавливающего оборудования в рабочую зону, должен содержать не более 30 % предельно допустимой концентрации (ПДК) пыли в воздухе, которая составляет 4 мг/м<sup>3</sup>;  $C_{ост} = 1,2$  мг/м<sup>3</sup>.

Следовательно, требуемая степень очистки воздуха  $\varepsilon$  (в %)

$$\varepsilon = 100(C_{нач} - C_{ост}) / C_{нач} = 100(5100 - 1,2) = 99,97\% .$$

Для достижения столь высокого значения необходимо запроектировать двухступенчатую очистку воздуха. В качестве 1-ой ступени очистки воздуха в ней используется циклон с конусом-коагулятором, в качестве 2-ой — мокрый пылеуловитель. Схема установки приведена на рис. 8.1.

В табл. 8.1. приведены также данные о фракционной эффективности принятых пылеуловителей при очистке воздуха от волокнистой пыли.

Таблица 8.1

Дисперсный состав пыли и фракционная эффективность улавливания

1-ая ступень очистки			2-ая ступень очистки		
Диаметр частиц, мкм	Дисперсный состав до очистки $C_{\phi}, \%$	Фракционная эффективность улавливания $\epsilon_{1\phi}, \%$	Диаметр частиц, мкм	Дисперсный состав перед 2-ой ступенью $C_{\phi}^1, \%$	Фракционная эффективность улавливания $\epsilon_{2\phi}, \%$
0-5	0,1	90	0-5	0,01	99
5-10	1,0	95	5-10	0,05	99,6
10-20	2,0	98	10-20	0,04	99
20-30	4,5		20-40	0,075	100
30-40	4,9	99,2			
40-50	5,5		40-60	0,088	100
50-60	12,0	99,5			
50-80	18,0				
>80	52,0	100			
	$\Sigma = 100$			$\Sigma = 0,263$	

Примечания. 1) В столбце 5 дан дисперсный состав пыли перед 2-ой ступенью (в % к начальному содержанию пыли в данной фракции).

2) Итог в столбце 5, равный 0,263%, соответствует 100% пыли, поступившей на 2-ую ступень очистки.

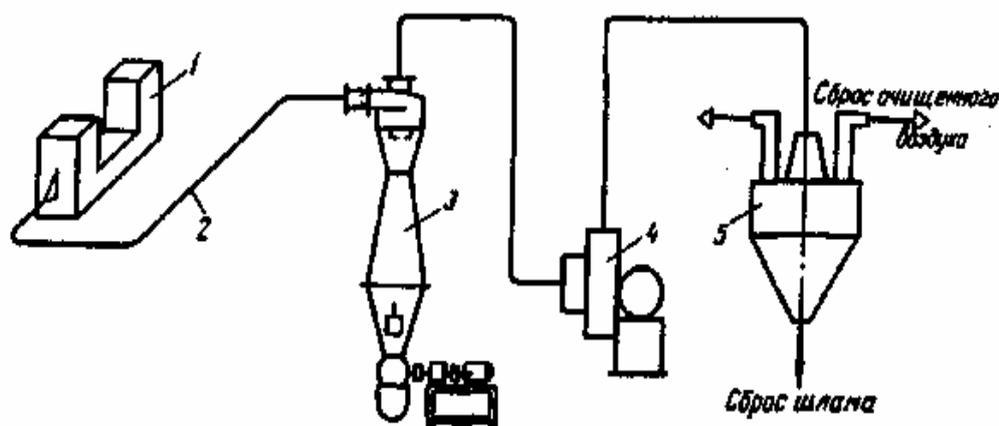


Рис. 8.1. Схема двухступенчатой очистки воздуха от пыли:

- 1 - пневмат; 2 - воздуховод; 3 - циклон с конусом-коагулятором;  
4 - вентилятор; 5 - мокрый пылеуловитель.

Эффективность очистки запыленного воздуха каждой ступенью пылеулавливающей установки  $\varepsilon_{ст.}$  определяют по формуле:

$$\varepsilon_{ст} = \frac{G_{\phi 1} \varepsilon_{\phi 1} + G_{\phi 2} \varepsilon_{\phi 2} + \dots + G_{\phi n} \varepsilon_{\phi n}}{\sum G_{\phi n}} \%, \quad (8.7)$$

где  $G_{\phi 1}, G_{\phi 2}, \dots, G_{\phi n}$  - содержание каждой фракции пыли, %;  $\varepsilon_1, \varepsilon_{\phi 2}, \dots, \varepsilon_{\phi n}$  - фракционная эффективность улавливания пыли данной фракции, %;  $\sum G_{\phi n}$  - суммарное количество пыли, %, поступившей на очистку в данной ступени.

Эффективность 1-ой ступени по формуле (8.7), по данным табл.8.1. равна:

$$\varepsilon_I = \frac{0,190 + 1,095 + 2,098 + 9,499,2 + 17,599,5 + 70 \cdot 100}{100} = 99,74\% .$$

Остаточное содержание пыли по массе в воздухе после 1-ой ступени очистки:

$$C_I = 5100 (1 - 0,9974) = 13,26 \text{ мг/м}^3 .$$

Фракционный состав пыли перед 2-ой ступенью очистки (в %) находят по формуле:

$$G_{\phi n}^I = \frac{G_{\phi n} (100 - \varepsilon_{I\phi n})}{100} \%, \quad (8.8)$$

где  $\varepsilon_{I\phi n}$  - фракционная эффективность 1-ой ступени, табл. 8.1, столбец 3.

Результаты расчета по формуле 8.8 приведены в табл. 8.1, столбец 5.

Определяем эффективность очистки воздуха 2-ой ступенью установки

$$\varepsilon_{II} = \frac{0,0199 + 0,0599,6 + 0,0499 + 0,075 \cdot 100 + 0,088 \cdot 100}{0,263} = 99,73\% .$$

Остаточное содержание пыли по массе в воздухе после 2-ой ступени очистки:

$$C_{II} = C_I (1 - \varepsilon_{II}) = 13,26 (1 - 0,9973) = 0,0358 \cong 0,04 \text{ мг/м}^3 .$$

При допустимом остаточном содержании пыли в воздухе  $C_{ост.} = 1,2 \text{ мг/м}^3$  полученное значение  $C_{II} = 0,04 \text{ мг/м}^3$  удовлетворяет требованиям.

Таким образом, пылеулавливающее оборудование для двухступенчатой очистки запыленного воздуха выбрано правильно.

Гидравлическое сопротивление установки  $H_{общ.}$  определяем по формуле:

$$H_{общ} = H_I + H_{II} ,$$

где  $H_I$  - гидравлическое сопротивление 1-ой ступени, которое вычисляется по формуле

$$H_I = \zeta \frac{\rho_z v^2}{2} .$$

Для циклона с конусом-коагулятором коэффициент гидравлического сопротивления равен 6,2. Принимаем циклон с конусом-коагулятором

производительностью  $L = 7000 \text{ м}^3/\text{ч}$  с размером входного патрубка  $225 \times 450$  мм.

Скорость воздуха на входе в циклон

$$v = \frac{7100}{3600 \cdot 0,225 \cdot 0,45} = 19,5 \text{ м/с.}$$

Принимаем плотность воздуха при температуре  $20^\circ\text{C}$  равную  $\rho_{\text{г}} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ .

Тогда

$$H_1 = 6,2 \cdot \frac{1,2 \cdot 19,5^2}{2} = 1444 \text{ Па.}$$

$H_{\text{II}}$  - гидравлическое сопротивление 2-ой ступени, по данным экспериментальных испытаний, равно  $380 \text{ Па}$ . Следовательно, общее гидравлическое сопротивление установки

$$H_{\text{общ}} = 1444 + 380 = 1824 \text{ Па.}$$

Совершенствование пылеулавливания - непрерывный процесс, являющийся составной частью технического прогресса. Он обусловлен все возрастающими экологическими и санитарно-гигиеническими требованиями и основан на достижениях во многих областях науки и техники.

## Приложение

### Краткие характеристики пылеуловителей

Конструктивные и эксплуатационные особенности аппарата	Условия применения
1	2
<i>Сухой горизонтальный электрофильтр</i>	
Конструктивно сложнее и дороже других аппаратов. Металлоемок. Требуется квалифицированное обслуживание. Резко реагирует на нерегламентные изменения состава и характеристик очищаемых газов.	В разных модификациях применим до 350-400°C. Хорошо улавливает пыли с УЭС $10^4$ - $10^{10}$ Ом см. Характерная скорость газа 0,8-1,2 м/с. время пребывания газа в активной зоне 8-20 с; остаточная запыленность 50-150 мг/м; присутствие газов конденсата недопустимо.
<i>Сухой вертикальный электрофильтр</i>	
Особенности в основном те же, что и у горизонтального фильтра, но главным отличием является только одно поле против двух или более у горизонтального.	Используется на стесненных площадках, а также для очистки взрывоопасных смесей. Характерная скорость газа 0,7-0,8 м/с. время пребывания газа в активной зоне 7-10 с. Остаточная запыленность в 1,5-2 раза выше, чем у горизонтального фильтра.
<i>Мокрый вертикальный электрофильтр</i>	
Конструктивно проще двух предыдущих поскольку не имеет механизмов отряхивания. Имеются варианты коррозионностойкого исполнения (из спецсталей или свинца). Разрабатывается вариант с электродами из пластмасс.	Применим в основном для улавливания брызг и туманов кислот либо тонких твердых частиц смеси с туманом. Температуре газа обычно ниже точки росы. Характерная скорость газа 0,7-1,0 м/с. В остальных условиях применения аналогичны предыдущим.
<i>Скруббер - электрофильтр</i>	
Комбинация из двух аппаратов в общем корпусе: нижняя зона - насадочный скруббер, верхняя - мокрый трубчатый электрофильтр. Коррозионностойкого исполнения не имеет. Конструктивно несложен, механизмов отряхивания не предусмотрено.	Применим для тонкой очистки газов (до остаточной запыленности 10-15 мг/м). Скорость газа в активной части 0,6-0,8 м/с. Целесообразна установка после обычных сухих электрофильтров в качестве хвостового доочистителя. В связи с наличием двухъярусной насадки в газораспределительных решетках не нуждается.

1	2
<i>Полый скруббер полного испарения</i>	
Комплектуется форсунками очень тонкого или тончайшего распыла, перед которыми устанавливаются дополнительные фильтры для задержки взвесей. От коррозии защищается керамикой; как вариант - с подслоем из полиизобутилена или других пластмасс.	Назначение - кондиционирование сухих газов перед подачей их в сухие электрофильтры с целью снижения УЭС пыли. При относительно невысокой температуре газа (200°С и ниже) нуждается в хорошо отлаженной автоматике регулирования расхода воды. При более высоких температурах возможно регулирование отключением части ярусов форсуночных коллекторов. Требуется эффективных встроенных газораспределительных устройств.
<i>Скруббер с неподвижной насадкой</i>	
Обычно имеет от 1 до 3 ярусов насадок. Орошение форсунками грубого или среднего распыла. В газораспределительных устройствах не нуждается. Защита от коррозии - керамика, как вариант - с подслоем из полиизобутилена или других пластмасс.	Используется для теплообмена, абсорбции и пылеулавливания (степень очистки от пыли не превышает 50-60%). Интенсивность массообмена значительно ниже, чем у барботажных аппаратов. Требуется эффективного брызгоулавливания (встроенного брызгоуловителя или самостоятельного аппарата).
<i>Скруббер с подвижной плавающей насадкой</i>	
Насадка - из легких пластмассовых шариков, помещенных между двумя решетками, нижней и верхней (ограничительной). Нужны газораспределительные устройства, иначе газ будет идти через насадку одной стороной. Орошение форсунками грубого или среднего распыла.	Область применения четко не очерчена. Может применяться для абсорбции, пылеулавливания и теплообмена в любых отраслях производства. Скорость газа около 5-6 м/с, уточняется при наладке. Интенсивность массообмена средняя между скруббером с неподвижной насадкой и барботажным аппаратом. Требуется после себя интенсивного брызгоулавливания.

1	2
<i>Пенный аппарат со стабилизатором слоя пены</i>	
Имеет одну или несколько (до трех) пено-образующих решеток. Стабилизатор (простая конструкция, не допускающая "сваливания" пены к одному краю решетки) делает структуру пенного слоя более равномерной и устойчивой.	Область применения четко не очерчена. Используется для теплообмена, улавливания пыли и абсорбции газов (паров); успешно используется также для тумано-улавливания. Наибольшее число решеток применяется для теплообмена; для пылеулавливания достаточно одной.
<i>Труба Вентури</i>	
Аппарат с ярко выраженной зависимостью степени улавливания от энергозатрат. Конструктивные варианты; с круглой или щелевидной горловиной; с форсуночным или пленочным орошением; с регулируемым и нерегулируемым сечением горловины. Характерен невысокими капитальными и весьма значительными энергозатратами. Степень улавливания зависит от затрат энергии и удельного орошения. Горловина подвержена абразивному износу, иногда изготавливается из износостойкого чугуна.	Область применения практически не ограничивается. Имеет широкое межотраслевое применение для абсорбции, кондиционирования газов, пыле- и туманоулавливания: при высокой температуре газа целесообразно устанавливать перед трубой испаритель для последующей вторичной конденсации пара на улавливаемых частицах. Скорость газа от 40-50 до 150-160 м/с, удельное орошение от 0,1 до 1,0 л/м. Требуется после себя высокоэффективного брызгоулавливания. Допускается компоновка в батарее по 2, 4, 6 и 8 труб с общим входом и выходом газа.
<i>Циклон прямоточный</i>	
Удобен для футеровки, допускает высокую (до нескольких кг/м <sup>3</sup> ) запыленность газа на входе. Конструктивно прост, не требует квалифицированного изготовления и обслуживания.	Обычно используется в качестве предварительной ступени перед последующими -аппаратами. Скорость газа (в плане) до 8 м/с, коэффициент сопротивления около 50, степень улавливания 50-60%.

1	2
<i>Циклоны НИИОГАЗ</i>	
<p>Делятся на три группы: низкоэффективные (ЦН-24), среднеэффективные (ЦН-15, ЦН-11), высокоэффективные (СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СЦН-40). Не футеруются, подвержены абразивному износу.</p>	<p>Пригодны для широкого межотраслевого применения и для решения любых задач циклонного пылеулавливания. Компонуются в группу (от 2 до 10 аппаратов в группе). Возможна последовательная установка как разных, так и одинаковых циклонов. Температура газа до 400-450°C, условная скорость от 1,5 до 5,0 м/с, коэффициент сопротивления от 75 до 500-1000 (в зависимости от типа циклона). Абсолютно недопустимы подсосы воздуха через бункер.</p>
<i>Батарейные циклоны</i>	
<p>Имеют конструктивно простые циклонные элементы, которые могут быть изготовлены из чугунного или каменного литья. Имеется много конструктивных модификаций, в том числе с рециркуляцией воздуха и его промежуточной очисткой в рецикле. Требуют тщательной герметизации во избежание беспорядочных перетоков газа в обход циклонных элементов.</p>	<p>Область применения не ограничивается. Температура газа до 400-450°C. По степени чугунного или каменного литья, улавливания не имеют преимуществ перед циклонами НИИОГАЗ, но более стойки к абразивному износу. Могут эксплуатироваться как самостоятельно, так и в качестве первой ступени перед последующими аппаратами.</p>
<i>Струйный (эжекторный) газопромыватель</i>	
<p>Принцип действия аналогичен трубе Вентури, на основное количество энергии подводится не с потоков газа, а со струями жидкости от насосов высокого давления (<math>\approx 10^6</math> Па). Энергия струй тратится частично на очистку, частично - на создание за счет эжекции тяги (напора) в сети. Степень очистки на 25-30% (отн.) ниже, чем у трубы Вентури.</p>	<p>Разработана в основном для целлюлозно-бумажной промышленности. Методика расчета составлена применительно к этой области применения. Скорость газа в горловине до 26-30 м/с, удельное орошение 8-10 л/м<sup>3</sup>. В некоторых случаях применяется в других отраслях промышленности.</p>

1	2
<i>Рукавный фильтр с обратной продувкой</i>	
<p>Конструктивно прост, что облегчает создание единичных аппаратов с большой фильтровальной поверхностью (в СССР до 24 000 м<sup>2</sup> в одном корпусе). В мировой практике обратная продувка считается устаревшим методом регенерации, поскольку она пригодна лишь для хорошо отряхиваемых пылей и не допускает высоких скоростей фильтрации (не выше 0,5-0,9 м/мин). Ткани повышенной плотности непригодны.</p>	<p>Применим для очистки от пыли больших объемов газа. Температура газа определяется термостойкостью ткани. Режимы фильтрации и регенерации достоверной расчетной основы не имеют, поэтому их следует принимать с запасом по данным аналогов или рекомендациям НИИ, а затем уточнять при наладке.</p>
<i>Рукавный фильтр с импульсной регенерацией</i>	
<p>Наиболее распространенный в России тип фильтра, однако имеет ограниченную фильтровальную поверхность в единичном аппарате (примерно на порядок меньше предыдущего). Это связано со сложностью разводки импульсных трубок по большому количеству рукавов и трудностями обслуживания воздухораспределительного хозяйства.</p>	<p>Применим во всех отраслях производства. Скорость фильтрации до 1,6-1,8 м/мин. Начальная запыленность (по паспортным данным) до 50 г/м, однако целесообразно устанавливать перед фильтром циклон, улавливающий 60-70% пыли, - это значительно удлиняет срок службы рукавов.</p>
<i>Рукавный фильтр со струйной регенерацией</i>	
<p>Обладает мощной системой регенерации, благодаря чему плотность ткани может быть значительно повышена, а скорость фильтрации - доходит до 4-4,5 м/мин при остаточной запыленности 3-5 мг/м и ниже (до 1 мг/м). Недостаток: сложная механическая система регенерации.</p>	<p>Основная область применения - тонкая очистка газов в цветной металлургии. Требуется высокой культуры обслуживания, постоянного поддержания механизма регенерации в исправном состоянии.</p>

1	2
<i>Рукавный фильтр с регенерацией встряхиванием</i>	
<p>Используется относительно редко ввиду малой эффективности регенерации. Известны три способа отряхивания; покачивание рукава без изменения натяжения и формы (для тканей, плохо работающих на излом), волнообразное (например, асбестовой промышленности), "пружинное" (колебания верха рукава в вертикальном направлении).</p>	<p>Применение межотраслевое (кроме специальных фильтров для асбестовой промышленности). Вид и артикул ткани - в его зависимости от конкретных условий применения. Скорость фильтрации до 1,0-1,3 м/с за исключением стеклоткани (до 0,45 м/мин).</p>
<i>Рукавный фильтр с регенерацией встряхиванием в сочетании с обратной продувкой</i>	
<p>Наиболее старая конструкция, до сих пор сохранившаяся в ряде модификаций. Принцип ее действия состоит в том, что одновременно с "пружинным" отряхиванием подается сухой подогретый (в специальных калориферах) воздух на обратную продувку. Эффект суммируется с эффектом продувки.</p>	<p>Применение межотраслевое, с преимущественным использованием в промышленности строительных материалов. Могут с успехом применяться за цементными мельницами, сушильными барабанами и другими источниками выбросов.</p>

## Литература

1. Охрана окружающей среды. /Под ред. С.В.Белова. - М.: Высшая школа, 1991.
2. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешников Н.С. Техника защиты окружающей среды. – М.: Химия, 1989.
3. Родионов А.И., Клушин В.Н., Систер В.Г. Технологические процессы экологической безопасности (Основы энвайронменталистики). - Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000.
4. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. В 3-х т. Т.1. – Калуга: Изд-во Н.Бочкаревой, 2003. – 917 с.
5. Тимонин А.С. Основы расчета и конструирования химико-технологического и природоохранного оборудования: Справочник: В 3 т. Т.2. Калуга: Изд-во Н.Бочкаревой, 2002.
6. Штокман Е.А. Очистка воздуха. - М.: Изд-во АСВ, 1999.
7. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. – М.: «Экопресс – 3М», 1998.
8. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. В 2-х ч. Ч.1: /Под ред. Калверта С., Инглунда Г.М. - М.: Металлургия, 1988.
9. Систер В.Г., Муштаев В.И., Тимонин А.С. Экология и техника сушки дисперсных материалов. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 1999.
10. Страус В. Промышленная очистка газов. – М.: Химия, 1981.
11. Оборудование, сооружения, основы проектирования химико-технологических процессов защиты биосферы от промышленных выбросов. /А.И.Родионов, Ю.П.Кузнецов, В.В.Зенков, Г.С.Соловьев. – М.: Химия, 1985.
12. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981.
13. Очистка промышленных газов от пыли. /Ужов В.Н. и др. М.: Химия, 1985.
14. Справочник по пыле- и золоулавливанию. /Под ред. Русанова А.А. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
15. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. — М.: Стройиздат, 1974.
16. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. — М.: Металлургия, 1986.
17. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. – Л.: Химия, 1990.
18. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1987.

- 19.Квашнин И.М., Юнкеров Ю.И. Расчет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу промышленными предприятиями. - Пенза: ПГАСА, 1998. 173 с.
- 20.Еремкин А.И., Квашнин И.М., Юнкеров Ю.И. Нормирование выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. - М.: Ассоциация строительных Вузов, 2000. - 176 с.
- 21.Арбузов В.В. Экологические основы охраны атмосферы. Учебное пособие, Пенза, МАНЭБ, 1998.
- 22.Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов.