

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ярославский государственный технический университет»

ЭКОТЕХНИКА.

АППАРАТУРА ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

Рекомендовано
научно-методическим советом университета
в качестве учебного пособия

Ярославль 2013

УДК 628.511
ББК 38.76
Э40

Авторы: канд. техн. наук Д.Е. Смирнов (гл. 4), д-р техн. наук Л.В. Чекалов (гл. 2), канд. техн. наук А.В. Сугак (гл. 6), канд. техн. наук Е.П. Смирнов (гл. 1), канд. техн. наук М.Е. Смирнов (гл. 1), канд. техн. наук Ю.И. Санаев (гл. 2), Ю.И. Громов (гл. 3), Я.Л. Гинзбург (гл. 5)

Э40 Экотехника. Аппаратура процессов очистки промышленных газов и жидкостей: учебное пособие / Д. Е. Смирнов [и др.]; под общ. ред. Л.В. Чекалова, А. В. Сугака. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2013. – 180 с.
ISBN 978-5-9914-0351-1

Рассмотрены аппаратура и процессы очистки промышленных газов и жидкостей. Приведены классификация, характеристики, методики и примеры инженерного расчета оборудования. Рассмотрены характеристики и свойства промышленных пылей и аэрозолей.

Предназначено для студентов, изучающих курсы «Процессы и аппараты химической технологии» и «Экология», а также для инженерно-технических работников, занятых в сфере защиты окружающей среды.

УДК 628.511
ББК 38.76

Рецензенты: ЗАО «СФ НИИОГАЗ» Ярославская обл., п. Семибратово;
С. В. Беляев, ведущий инженер ЗАО «НЕФТЕХИМПРОЕКТ».

ISBN 978-5-9914-0351-1

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ И АЭРОЗОЛЕЙ	6
1.1. Дисперсный (гранулометрический) состав пыли или порошка.....	13
1.1.1. Основные методы определения дисперсного состава пыли.....	17
1.2. Слипаемость пыли.....	26
1.3. Сыпучесть пыли.....	29
1.3.1. Определение динамического угла естественного откоса.....	29
1.3.2. определение статического угла естественного откоса.....	30
1.4. Гигроскопичность пыли.....	31
1.5. Смачиваемость пыли.....	32
1.6. Электрические свойства пыли.....	33
1.6.1. Удельное электрическое сопротивление.....	33
1.6.2. Электрический заряд пыли.....	35
1.7. Коагуляция пыли.....	36
1.8. Абразивные свойства пыли.....	37
1.9. Горючесть и взрываемость пыли.....	39
Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ	43
2.1. Краткая историческая справка.....	43
2.2. Область применения электрофильтров.....	43
2.3. Классификация и краткая характеристика современных электрофильтров.....	45
2.3.1. Конструкция электрофильтра.....	47
2.3.2. Коронирующие электроды.....	50
2.3.3. Осадительные электроды.....	51
2.3.4. Устройства удаления пыли, осажденной на электродах.....	53
2.4. Принцип действия электрофильтров.....	53
2.4.1. Процесс зарядки частиц.....	54
2.4.2. Движение заряженных частиц в электрическом поле.....	54
2.4.3. Осаждение частиц и регенерация электродов.....	55
2.5. Степень очистки газов электрофильтрами.....	56
2.6. Методы повышения степени очистки газов электрофильтрами.....	57
2.6.1. Технологические методы.....	58
2.6.2. Режимные методы.....	64
2.6.3. Конструктивные методы.....	69
2.6.4. Проектные методы.....	71
2.7. Пример выбора электрофильтра.....	72
Глава 3. ОЧИСТКА ГАЗОВ ФИЛЬТРАЦИЕЙ	75
3.1. Общие сведения о промышленных тканевых фильтрах.....	75
3.2. Особенности улавливания пыли тканями и иглопробивными войлоками.....	79
3.2.1. Фильтровальные тканые материалы.....	79
3.2.2. Иглопробивные войлоки.....	81

3.3. Основные показатели работы тканевых (матерчатых) фильтров....	81
3.3.1. Эффективность очистки.....	81
3.3.2. Скорость фильтрации.....	83
3.3.3. Гидравлическое сопротивление фильтра.....	83
3.3.4. Пропускная способность по очищаемому газу (производительность).....	85
3.4. Расчет тканевых фильтров.....	85
3.5. Основные показатели, определяющие свойства фильтровальных материалов.....	86
3.6. Фильтровальные материалы для тканевых фильтров.....	89
3.7. Выбор тканевых фильтров.....	93
3.8. Расчет установки для очистки отходящих от сушильного барабана газов, содержащих минеральную пыль (пример)	93
Глава 4. ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ.....	101
4.1. Жалюзийные пылеуловители.....	101
4.2. Ротационные пылеуловители.....	102
4.3. Циклонные пылеуловители.....	104
4.3.1. Противоточные осевые циклоны.....	104
4.3.2. Прямоточные осевые циклоны.....	108
4.3.3. Вихревые пылеуловители.....	112
4.3.4. Выгрузка пыли из бункера циклона.....	113
4.4. Осадительные камеры.....	115
4.5. Комбинированные пылеуловители.....	116
4.6. Расчет циклонов для очистки газов промышленных предприятий.....	119
4.6.1. Пример расчета циклона.....	126
Глава 5. «МОКРЫЕ» ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ (СКРУББЕРЫ).....	129
5.1. Полые форсуночные скрубберы.....	129
5.1.1. Порядок расчета полого скруббера.....	131
5.2. «Мокрые» аппараты циклонного типа.....	135
5.2.1. Циклон с мокрой стенкой (ЦМС).....	135
5.2.2. Батарейный циклон СЦВБ.....	141
5.3. Скрубберы Вентури.....	142
5.4. Каплеуловитель центробежный с тангенциальным подводом газа... ..	145
5.5. Гидрозатворы.....	156
Глава 6. ОБОРУДОВАНИЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	149
6.1. Характеристика сточных вод промышленных предприятий.....	149
6.2. Оборудование систем очистки сточных вод.....	150
6.3. Интенсификация процессов очистки сточных вод.....	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	165
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	166
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	173

ВВЕДЕНИЕ

Защита окружающей среды от выбросов предприятий является одной из острейших проблем для всех промышленно развитых стран мира. Предотвращение загрязнения биосферы имеет важнейшее санитарно-гигиеническое, экологическое и экономическое значение.

Книга состоит из шести разделов, посвященных характеристикам пылей и аэрозолей, и основным видам оборудования очистки промышленных газов и жидкостей. Авторы книги имели своей целью восполнить пробел в литературе по очистке газов и жидкостей и дать в одной книге основные сведения, необходимые для работ в сфере защиты окружающей среды.

В первой главе рассмотрены свойства пылей и аэрозолей, приведены сведения о приборах и устройствах для их определения. Использование материалов этой главы создает предпосылки для обоснованного выбора пылеулавливающего оборудования.

Во второй главе, посвященной электрической очистке газов, приведена краткая историческая справка о развитии электрофильтров и показана область их применения, дана их классификация. Изложены принцип действия электрофильтров и методы повышения их эффективности. Дан пример упрощенного выбора типоразмера электрофильтра.

В третьей главе, в которой рассмотрена очистка газов методом фильтрации, приведены сведения о промышленных тканевых фильтрах и их расчете. Даны основные показатели, определяющие свойства фильтровальных материалов. Приведен пример расчета фильтрующей установки очистки газов.

Четвертая глава посвящена инерционным пылеуловителям. Рассмотрены основные виды аппаратов – жалюзийные, ротационные, циклонные, осадительные камеры, комбинированные пылеуловители. Приведен расчет циклонов для промышленных предприятий.

В пятой главе рассмотрены аппараты мокрой очистки газов – полые форсуночные скрубберы, мокрые аппараты циклонного типа, скрубберы и пылеуловители. Дан пример расчета степени пылеулавливания центробежным скруббером и приведены сведения о гидрозатворах и их подборе.

В шестой главе рассмотрено оборудование очистки сточных вод промышленных предприятий, представлена его классификация и основные характеристики. Уделено внимание интенсификации процессов очистки сточных вод.

Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ И АЭРОЗОЛЕЙ

Загрязнение атмосферы стало неотъемлемой частью современной жизни, экологическая обстановка продолжает оставаться весьма сложной. Сложность экологической обстановки во многом определяется значительными выбросами пыли, достигающими многих миллионов тонн в год.

В последние десятилетия двадцатого века и начало двадцать первого века борьба с пылевыми выбросами в атмосферу активно продолжается. Одновременно наблюдается увеличение числа исследовательских работ, посвященных изучению влияния порошкообразных материалов и пыли на здоровье человека.

Так, ярославскими учеными Ю. Е. Кукушкиной и Н. Н. Тятенковой была проведена работа, состоящая в определении биологического возраста (БВ) и степени старения работников литейного цеха №3 ОАО «Автодизель» г. Ярославль. Объектом исследования послужили 214 человек в возрасте от 20 до 49 лет, разбитые на три возрастные группы.

Скорость старения каждого испытуемого определялась по разности биологического возраста (БВ) и должного биологического возраста (ДБВ). В качестве контрольной группы, у которых рассчитывался должный биологический возраст (ДБВ), входили работники медицинских учреждений.

Выявлено, что мужчины, работавшие в условиях повышенной запыленности, стареют значительно быстрее женщин. Наибольшая же скорость старения, определяемая как разность (БВ - ДБВ), была отмечена у экспериментальной группы мужчин в возрасте от 40 до 49 лет и составила 21 год. У женщин этот показатель несколько ниже и составил 8 лет. Таким образом, организм 50-летнего мужчины, выработавшего стаж в литейном производстве, соответствует организму 70-летнего [1].

Нанося ущерб здоровью людей, пыль, содержащаяся в атмосферном воздухе, одновременно наносит значительный ущерб хозяйственной деятельности человека вследствие:

- уноса ценных продуктов;
- разрушения строительных конструкций и сооружений;
- повреждения растительности и снижения урожайности сельскохозяйственных культур;
- уменьшения прозрачности атмосферного воздуха;
- выхода из строя линий электропередач;
- выхода из строя подвижного состава железных дорог;
- уменьшения срока службы двигателей внутреннего сгорания.

По химическому составу пыли можно подразделить на две основные группы:

- токсичные;
- нетоксичные.

Токсичные пыли при попадании в организм вызывают острое или хроническое отравление, нетоксичные не вызывают отравления организма даже при больших концентрациях.

Большое значение имеет размер пылинок, так как чем мельче частицы пыли, тем глубже они проникают в дыхательную систему. Если относительно крупные пылинки при вдыхании в большой степени задерживаются в верхних дыхательных путях и постепенно удаляются оттуда со слизью, то мелкая пыль, как правило, проходит в легкие и оседает их на длительный срок, вызывая поражение легочной ткани.

Пыль может также быть классифицирована по другим признакам, в том числе по происхождению, т. е. по материалу, из которого она образована. В зависимости от происхождения различают пыли естественного и промышленного происхождения. Естественная пыль образуется в результате процессов, не связанных непосредственно с процессом производства. С пылью естественного происхождения приходится сталкиваться, главным образом, при решении вопросов очистки приточного воздуха перед поступлением его в помещения, а также очистки воздуха, поступающего в двигатели внутреннего сгорания наземного транспорта.

Промышленная пыль возникает в процессе деятельности промышленных предприятий. Почти каждому виду производства, каждому материалу или виду сырья сопутствует определенный вид пыли. Значительное число технологических процессов направлено на получение различных материалов, состоящих из мелких частиц (цемент, гипс, мука и т. д.).

В зависимости от материала, из которого пыль образована, она может быть органического или неорганического происхождения. В свою очередь, органическая пыль бывает растительного (древесная, хлопковая, мучная, табачная и др.) и животного (костяная, шерстяная и др.) происхождения.

Неорганическая пыль подразделяется на минеральную (кварцевая, цементная, и др.) и металлическую (стальная, чугунная, медная, алюминиевая и др.).

Значительная часть промышленных пылей – пыли смешанного происхождения, т. е. она состоит из неорганических и органических или минеральных и металлических частей [2].

Пыль

Пыль – дисперсная система с газообразной дисперсионной средой и твердой дисперсной фазой, состоящей из частиц от квазимолекулярного до макроскопического размеров, обладающих свойством находиться во взвешенном состоянии более или менее продолжительное время, при

этом сопротивление движения частиц относительно среды подчиняется закону Стокса:

$$P = 3\pi d\mu W, \quad (1.1)$$

где P - сила сопротивления среды движущемуся телу, Н;

d - диаметр твердого тела (предполагается тело шаровидной формы), м;

μ - динамическая вязкость среды, Н с/м²;

W - относительная скорость газа (жидкости) и твердого тела, м/с.

Осевшие из потока частицы также называют пылью, однако при этом всегда подразумевается принципиальная разница между осевшей пылью и пылью – аэродисперсной системой. Поэтому в ряде случаев выделенные из воздуха частицы пыли называются уловленной, осевшей, осажденной пылью, или пылью-порошком. В дальнейшем изложении при использовании выражения "пыль" будет подразумеваться не аэродинамическая система, а ее **твердая фаза**.

Аэрозоль

Дисперсная система с газообразной дисперсионной средой и твердой или жидкой дисперсными фазами, частицы которых могут неопределенно долгое время находиться во взвешенном состоянии. Скорость оседания частиц аэрозоля весьма незначительна. Наиболее тонкие аэрозольные частицы по своим размерам приближаются к наиболее крупным молекулам, а размеры наиболее крупных достигают 0,1...1,0 мкм. Понятие «грубый аэрозоль» часто отождествляется с понятием «пыль» независимо от размера частиц [3].

Порошок, порошкообразный материал

Тонкоизмельченное твердое вещество, размеры частиц которого находятся в тех же пределах, что и размеры пылевых частиц. Осажденную пыль и порошок обычно полагают понятиями тождественными.

Поли- и монодисперсные пыли, (аэрозоли, порошки)

Пыли, аэрозоли и порошок называются полидисперсными, когда они содержат частицы различного размера, и монодисперсными, когда их частицы имеют одинаковый размер. Монодисперсных пылей, аэрозолей и порошков практически не существует. Имеются лишь некоторые порошки, по своему составу приближающиеся к монодисперсным, например ликоподий (споры грибка плауна).

Пыли является весьма сложной неоднородной системой. Пыли даже в условиях одного производства по своим характеристикам, геометрическим формам и размерам резко отличаются друг от друга, что наглядно представляют фотографии (рис. 1.1 и 1.2) различных пылей литейного производства ОАО «ЯМЗ», сделанные с увеличением в 160 раз.

На фотографиях отчетливо видно, что размеры частиц, входящих в состав одной пыли, отличаются на несколько порядков, а геометрические формы частиц самые различные.

Таким образом, одной из основных характеристик полидисперсных пылей (аэрозолей, порошков) является их дисперсный состав, позволяющий сравнить, казалось бы, несравнимое и получить в конечном результате возможность расчета пылеулавливающего оборудования.

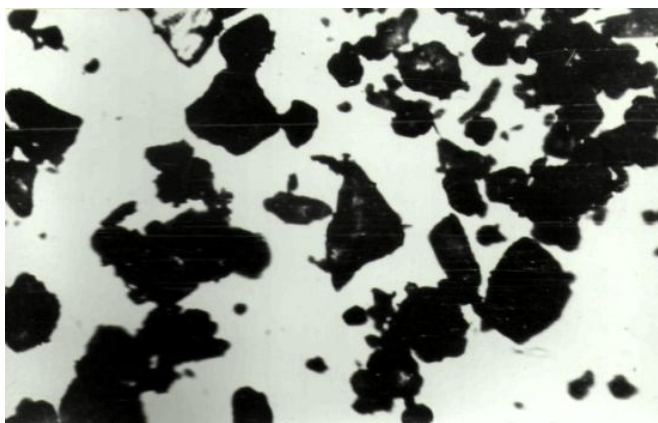


Рис. 1.1. Пыль, отходящая от смешивающих бегунов

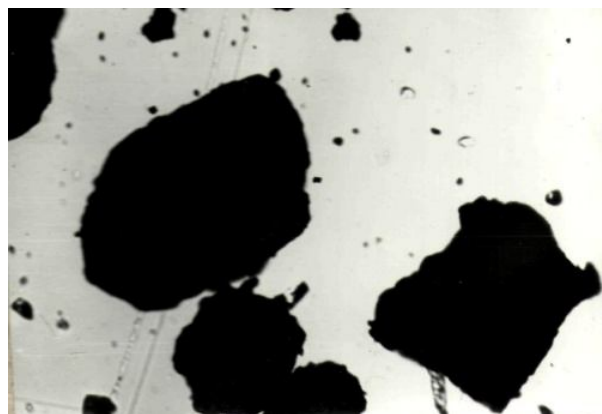


Рис. 1.2. Пыль, отходящая от выбивной решетки

В научно-технической литературе, посвященной дисперсному анализу пылей (аэрозолей, порошков) наибольшее распространение получили следующие термины, понятия и определения:

- **Концентрация пыли или (аэрозоля, порошка) по массе частиц Z , мг/м³, г/м³**

Масса частиц, содержащихся в единице объема газа или воздуха, приведенного к стандартным условиям. Концентрация пыли, содержащейся в газе или воздухе после пылеуловителя, является основным показателем его эффективности работы.

В промышленных условиях концентрация пыли (запыленность газов) определяется двумя основными методами:

- внешней фильтрации;
- внутренней фильтрации.

Следует отметить, что указанные выше методы (рис. 1.3 и 1.4) были разработаны в 70-е годы прошлого века и, несмотря на то, что указанная в них аппаратура: реометры, термометры, микроманометры к настоящему времени имеют совершенно другую конструкцию, принцип проведения замеров остался неизменным и закреплён именно в таком виде в ГОСТ Р 50820-95 [3-5].

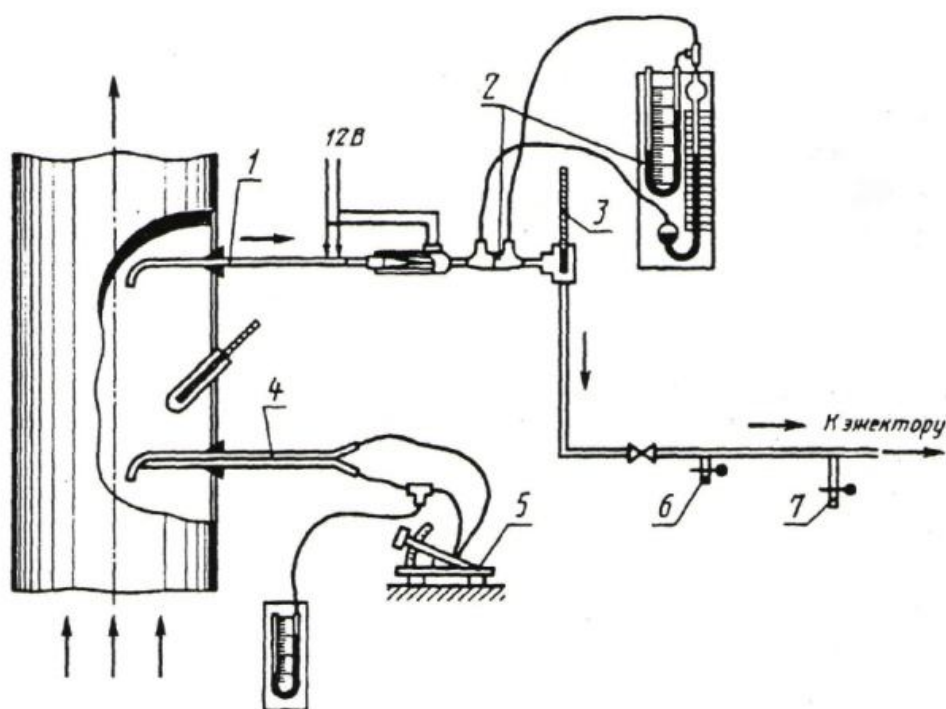


Рис. 1.3. Схема установки для определения запыленности газа методом внешней фильтрации:

1 - отборная трубка; 2 - реометр; 3 - термометр; 4 - напорная трубка;
5 - микроманометр; 6 - подсос воздуха; 7 - сброс конденсата

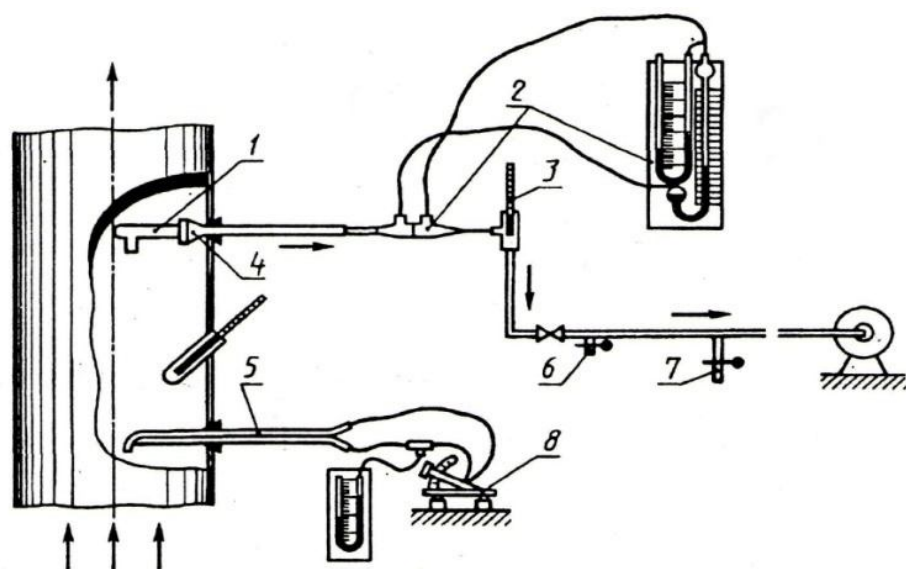


Рис. 1.4. Схема установки для определения запыленности газа методом внутренней фильтрации:

1 - патрон со стекловолокном; 2 - реометр; 3 - термометр;
4 - патронодержатель; 5 - напорная трубка; 6 - подсос воздуха;
7 - сброс конденсата; 8 - микроманометр

Концентрацию пыли в газе (Z), г/м³, приведенную к нормальным условиям, при отборе пробы в одной точке измерительного сечения вычисляют по формуле

$$Z = \frac{(m + m_1 + \Delta m) \cdot 1000 \cdot B \cdot (273 + t_p)}{V_p \cdot \tau \cdot 273 \cdot (B - P_p)}, \quad (1.2)$$

где m - масса пыли, осевшей на пылеуловителе (привес), г;

m_1 - масса пыли, осевшей в заборной трубке при внешней фильтрации, г;

Δm - поправка на изменение массы контрольных фильтров, г;

τ - время отбора пробы, мин.;

B - атмосферное давление воздуха, Па;

V_p - расход отбираемого газа по реометру, дм³/мин;

t_p - температура газа у реометра, °С;

P_p - разрежение газа у диафрагмы реометра, Па [4, 5].

- **Концентрация пыли (аэрозоля, порошка) по числу частиц (счетная) Z_n , см³**

Число частиц n , содержащихся в единице объема газа или воздуха, приведенного к нормальным условиям. Следует отметить, что счетная концентрация частиц для характеристики пыли в литературе встречается крайне редко.

- **Размер (диаметр) частицы d , мкм**

Размер, определяющий крупность частицы: диаметр, длина стороны частицы или ячейки сита, наибольший размер проекции частицы и т.п., точно характеризует только шарообразные частицы, например стеклянные микросферы, получающиеся в печах сферолизации.

- **Эквивалентный диаметр частицы d_e , мкм**

Размер частицы, не имеющей правильной геометрической формы. Применяются следующие понятия эквивалентного диаметра:

- диаметр шара, объем которого равен объему частицы;
- диаметр круга, площадь которого одинакова с площадью проекции частицы – проектированный диаметр (может быть определен по данным измерения проекции площади частицы под микроскопом).

- **Седиментационный диаметр частицы d_s , мкм**

Диаметр шара, скорость оседания и плотность которого соответственно равны скорости оседания и плотности частицы.

- **Медиана распределения массы частиц, (медианный диаметр частицы) d_{50} , мкм**

Размер частиц, при котором масса всех частиц в анализируемом порошке или пыли мельче и крупнее d_{50} составляет 50%.

- $d_{15,9}$, $d_{84,1}$, мкм

Диаметры частиц, при которых масса всех частиц меньше $d_{15,9}$ и $d_{84,1}$ составляет соответственно 15,9 и 84,1 % от общей массы частиц пыли или порошка.

- Медиана распределения в функции фракционной степени очистки в пылеуловителе $d_{n=50}$, мкм

Диаметр частиц пыли, улавливаемой в пылеуловителе на 50%.

- Седиментационная скорость, или скорость оседания частиц ω , см/с

Седиментационной скоростью называется скорость, которую развивает частица в спокойной среде под влиянием силы тяжести. Она зависит от размера частицы, её формы, структуры и плотности вещества, а также от плотности и вязкости среды.

В жидкостных седиментографах, применяемых чаще всего для определения дисперсного состава пылей в качестве дисперсионной жидкости, чаще всего применяются дистиллированная вода, спирт или глицерин.

- Динамический коэффициент формы частицы χ

Отношение сопротивления среды при движении частицы неправильной формы к соответствующему сопротивлению одинаковой по объему шарообразной частицы: $\chi = (d_3/d_s)^2$.

- Полная поверхность S_n , см², м²

Площадь граничной поверхности твердой фазы дисперсионной среды, включая поверхность открытых наружу трещин и пор.

- Внешняя поверхность S_b , см², м²

Площадь поверхности частиц, зависящая от основных их геометрических форм (без учета поверхности открытых наружу мелких трещин и пор).

Данные характеристики определяются экспериментально. Экспериментальное значение поверхности (полной и внешней) в значительной степени зависит от метода определения. Следует отметить, что данные характеристики (полная и внешняя поверхность) имеют скорее теоретическое, чем практическое значение и в литературе по пылеулавливанию и газоочистке практически не встречаются.

- Удельная поверхность S , см²/г, м²/г или см²/см³, м²/см³

Отношение площади поверхности частиц к их массе или объему.

Следует отметить, что удельная поверхность пыли является критерием для проведения сравнительных экспериментов по определению эффективности различных типов пылеуловителей в США и Великобритании. Существуют два типа подобных пылей. Поскольку эти пыли отбираются в пустыне штата Аризона, они получили название Аризона-грубая (АСС) и

Аризона-тонкая (ACF). Эти пыли соответствуют отечественным стандартным испытательным пылям №1 и №2 с удельными поверхностями соответственно $S = 1750 \text{ см}^2/\text{г}$ и $S = 5600 \text{ см}^2/\text{г}$.

- **Плотность ρ , г/см³**

Масса единицы объема частиц, не имеющих внутренних пор.

Плотность, иногда ее называют истинной плотностью, является весьма важной характеристикой пыли, без учета которой невозможно рассчитать эффективность любого инерционного аппарата: будь то пылесоса-дательная камера или высокоэффективный циклон.

В литературе можно встретить упоминание о таких характеристиках, как кажущаяся плотность ρ_t (масса единиц объема частиц, включая и объем закрытых пор) и объемная плотность ρ_o (масса единиц объема частиц, включая объем закрытых и открытых пор), однако широкого применения эти характеристики не имеют.

- **Насыпная плотность ρ_n , г/см³**

Масса единиц объема порошкообразного материала, свободно насыпанного в какую-либо емкость непосредственно после её заполнения. В объем входят внутренние поры частиц и промежуточное пространство между частицами. Следует отметить, что без знания насыпной плотности пыли невозможно точно рассчитать требуемый объем бункера для хранения уловленной пыли.

- **Насыпная плотность при встряхивании ρ_v , г/см³**

Масса единиц объема порошкообразного материала при самой плотной упаковке частиц, достигаемой путем встряхивания.

Насыпная плотность при встряхивании воспроизводима и поэтому может использоваться при сравнительной оценке насыпной плотности порошкообразных материалов.

1.1. Дисперсный (гранулометрический) состав пыли или порошка

Дисперсный состав пыли или порошка характеризуется следующими показателями:

- **Характеристика состава порошка или дисперсной фазы по размерам или скоростям оседания частиц**

Она показывает, какую долю по массе, объему, поверхности или числу частиц составляют частицы в любом диапазоне их размеров или скорости оседания. Характеристика дисперсного состава может быть задана в виде таблицы, кривой или формулы, выражающей функцию распределения или плотность распределения частиц.

- **Степень дисперсности пыли или порошка**

Качественный показатель, характеризующий «тонкость» порошка или дисперсной фазы пыли.

В качестве условных осредненных показателей принимаются удельная поверхность, средние размеры частиц – арифметические, медианный размер и другие.

- **Проход D , %**

Доля массы порошкообразного материала, прошедшего через сито с заданными размерами ячеек, от общей массы просеивания материала, выраженная в процентах.

- **Остаток R , %**

Доля массы порошкообразного материала, оставшегося на сите с заданными размерами ячеек, от общей массы просеиваемого материала, выраженная в процентах

- **Фракции пыли или порошкообразного материала ΔD или ΔR , %**

Доля массы, заключенная между двумя значениями диаметров частиц d_1 и d_2 , выраженная в процентах.

- **Дисперсия пыли, σ**

Величина, характеризует отклонение частиц пыли от среднего размера d_{50} . Дисперсия определяется соотношением

$$\sigma = \lg (d_{50}/d_{16}), \quad \sigma = \lg (d_{84}/d_{50}). \quad (1.3)$$

Чем больше значение σ , тем пыль более неравномерна по составу [3, 6, 7]. Пыль, полученная механическим измельчением в течение длительного времени распределяется по логарифмически нормальному закону, что было в свое время доказано академиком А. Н. Колмогоровым.

Существует несколько видов классификации пылей по их дисперсному составу.

В номограмме (рис. 1.5), предложенной А. И. Пирумовым, пыль по дисперсности разделена на пять групп:

I – очень крупнодисперсная пыль;

II – крупнодисперсная пыль (мелкозернистый песок для строительных растворов);

III – среднедисперсная пыль (цемент);

IV – мелкодисперсная пыль (кварц молотый пылевидный по ГОСТ 9077-59);

V – очень мелкодисперсная пыль.

Данное распределение было закреплено в ГОСТ 12.2.043-80. В литературе, посвященной практике пылеулавливания и газоочистки, встречается и другое распределение пыли по дисперсности:

- пыль размером более 100 мкм - грубая пыль;
- пыль размером более 10 мкм - средняя пыль;
- пыль размером менее 10 мкм - тонкая пыль.

Основные характеристики пылей некоторых видов производств, представлены в табл. 1.1.

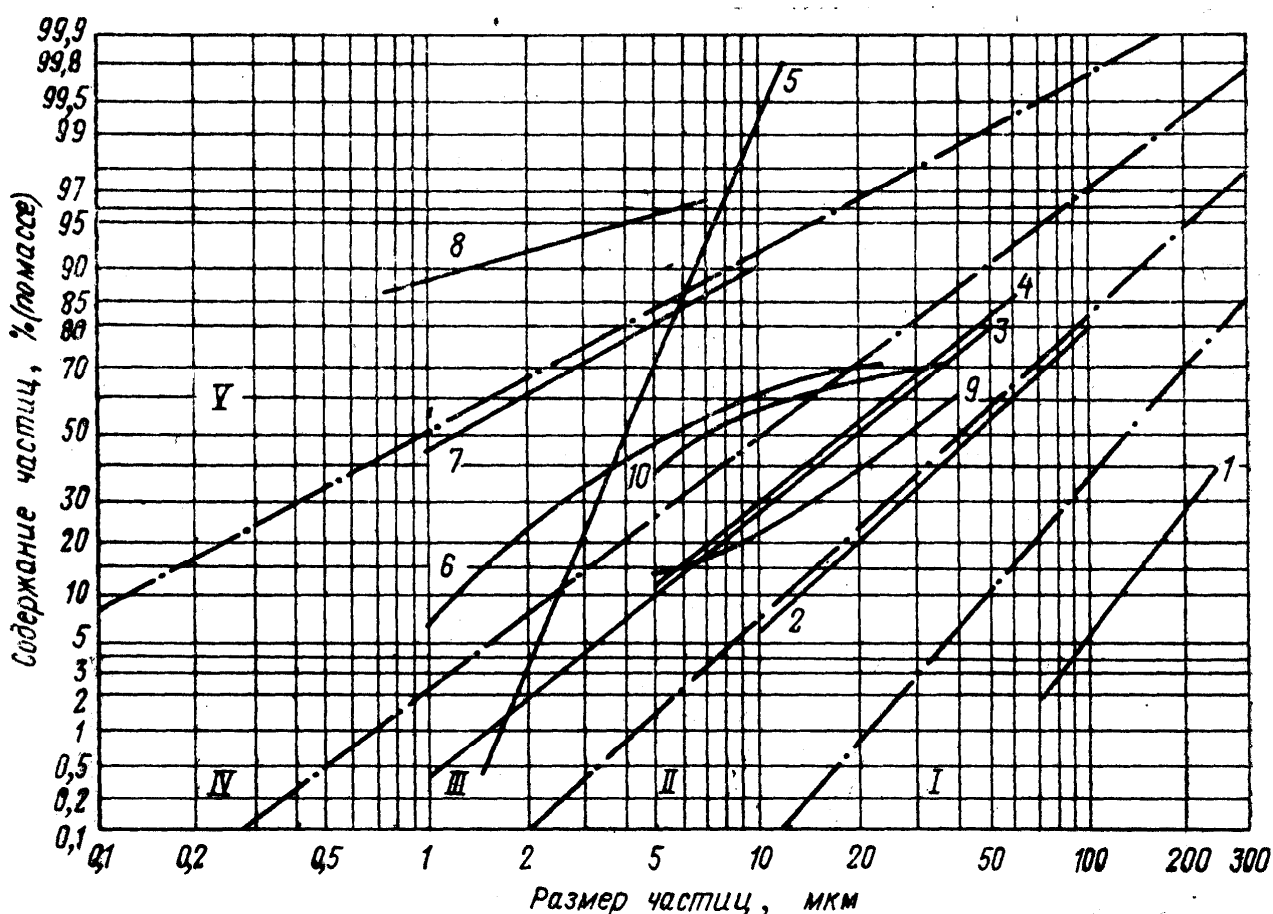


Рис. 1.5. Классификационная номограмма пылей:

- I - V - классификационные группы пылей по их дисперсности;
- 1 - уголь, измельченный в шаровой мельнице; 2 - мелкозернистый кварцевый песок; 3 - пылевидный кварц КП-3; 4 - цемент; 5 и 6 - пыли, применяемые при испытаниях лабораторией ЦНИИПромизданий;
- 7 - дым мартеновских печей; 8 - атмосферная пыль; 9 - стандартная испытательная пыль "Аризона-крупная" (США);
- 10 - то же, "Аризона-мелкая"

Таблица 1.1. Основные характеристики пылей некоторых видов производств

Производство	Источник пылеобразования	Вид пыли	Медианный диаметр частиц пыли d_{50} , мкм	Дисперсия σ	Плотность истинная ρ , кг/м ³	Плотность насыпная ρ_n , кг/м ³	Удельная поверхность S , см ² /г	Угол естественного откоса пыли (в статике) $\alpha_{ст}$
Тепловые электростанции на твердом топливе	Сжигание угля в топках	Летучая зола	15-20	2,2-3,5	2100-2700	760	4900	65-70
Предприятия строительных материалов	Сушильные барабаны, мельницы	Пыль цемента, извести	8-15	2,0-2,6	2800	800	6000	65-75
Предприятия дорожного строительства	Асфальтобетонные заводы	Пыль кварцевая	20	3,5	2700	1000	2700	60
Предприятия химической промышленности	Пр-ва тех. углерода, моющих порошков, мин. удобрений	Сажа, моющие порошки	12-100	5,0-6,5	1950	35-280	2100	60-85
Предприятия металлургии	Печи электродуговые	Возгоны	3,0	3,0	4000	760	1600	45
Предприятия машиностроения	Заточные станки	Наждачная пыль	38	1,64	4230	1600	1200	66
	Очистка чугуна литья	Грубая окалина	36	1,8	4670	1390	1640	40
	Голтовочные барабаны	Мелкая окалина	30	2,5	2700	980	1290	60
Предприятия пищевой промышленности	Распылительные сушилки	Кормовые дрожжи	100	1,75	1350	460	2400	85
		Сухое молоко	120	1,6	1300	450	3000	85
Малые отопительные котельные	Сжигание угля	Летучая зола	40	3,5	2500	900	2400	60

1.1.1. Основные методы определения дисперсного состава пыли

Дисперсный состав пыли определяют на основе лабораторных исследований. Выбор метода определяется видом пыли, требуемой точностью, наличием соответствующего оборудования.

Применяют следующие основные методы определения дисперсного состава пыли:

- ситовый анализ;
- седиментометрия;
- микроскопирование;
- по дифракции лазерного излучения;
- центробежная сепарация.

1. Ситовый анализ

Представляет собой разделение частиц на фракции путем последовательного просеивания навески пыли через лабораторные сита с отверстиями различных размеров. Ситовый анализ применяют для исследования грубой пыли, в которой масса частиц мельче 100 мкм составляет не более 10 %. Пробу пыли разделяют на фракции, последовательно просеивая её через сита с отверстиями разного размера. Под размером отверстия сита обычно понимают длину стороны квадратной ячейки. Размер ячейки сит в ГОСТ 3584-73 (6613-86) соответствует стандартам Международной организацией по стандартизации (ISO), стандарту ASTM (США), стандарту British Standard (Великобритания), стандарту DIN 4178 (Германия) и имеют ячейки от 40 до 1000 мкм.

Следует отметить, что при этом не представляется возможным определить дисперсный состав пыли в области мелких фракций, которые представляют наибольшую опасность для здоровья человека и сложность при выборе аппарата для их эффективного улавливания.

Применяют ручной и механический просевы. Ручной просев обычно используют при исследовательской работе, а также для ответственных производственных анализов. Механический просев осуществляется с помощью специальных приборов. Обычно выполняют два анализа ситовым методом. Отклонение их результатов по каждой фракции не должно отличаться более чем на 2 %.

2. Седиментометрический, (седиментационный) метод

Представляет собой разделение навески пыли на фракции путем её осаждения в жидкой или газообразной среде.

Седиментационный анализ основан на зависимости скорости осаждения однородных частиц в вязкой среде от их размеров. Используется осаждение твердых частиц в жидкости под действием гравитационных сил. В седиментационном анализе при условии, что осаждение происходит под действием гравитационных сил, могут использоваться два метода:

- метод накопления осадка. Перед началом опыта суспензия равномерно перемешана так, что в начальный момент времени любая твердая частица с равной вероятностью находится на любой высоте седиментационного объема. Седиментация происходит из каждого элемента объема среды;

- метод пофракционного оседания. Дисперсионная среда не содержит твердую фазу, а исследуемый материал в начальный момент времени вносится на ее открытую поверхность в виде небольшой порции суспензии. Эта суспензия распределяется тонким слоем на поверхности дисперсионной среды, и седиментация всех частиц начинается из этого слоя.

Дисперсный состав частиц может быть определен посредством измерения во времени на заданной высоте седиментационного объема концентрации твердой фазы, плотности суспензии и массы осадка.

Дисперсионную среду подбирают так, чтобы ее вязкость была оптимальной для проведения анализа - крупные частицы осаждаются не слишком быстро, а малые - не очень медленно. Наибольшее значение в теории седиментации имеет упомянутый ранее закон Стокса, выражающий силу сопротивления, оказываемую вязкой средой движущейся частице.

Жидкостный седиментограф конструкции НИИОГАЗа представлен на рис. 1.6.

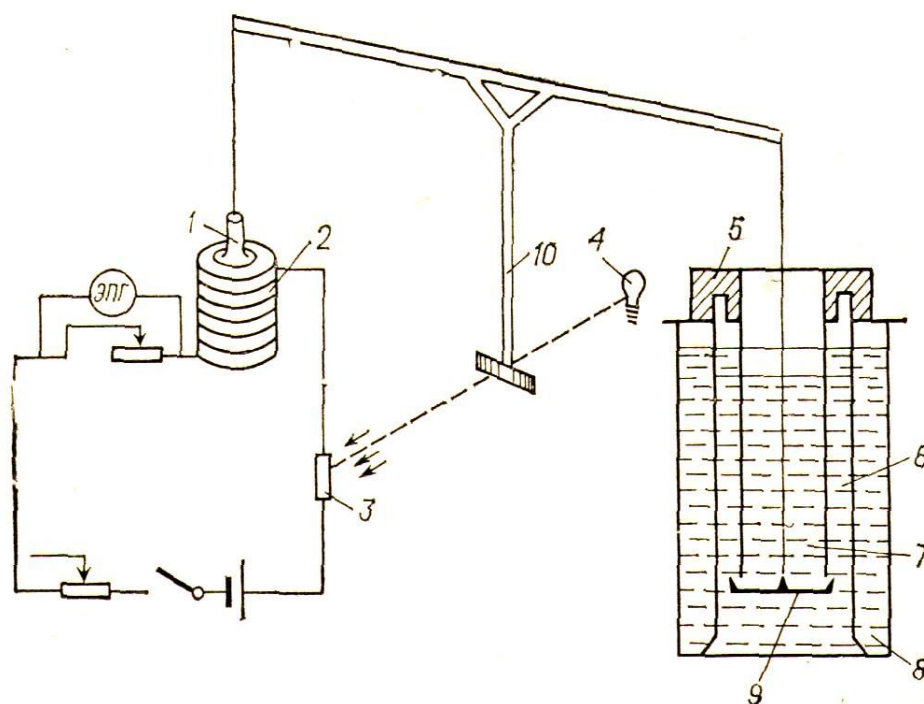


Рис. 1.6. Жидкостной седиментограф НИИОГАЗа:

1 - сердечник; 2 - соленоид; 3 - фоторезистор; 4 - лампочка;
5 - фигурный фланец; 6 - цилиндр; 7 - трубка; 8 - термостатирующий
сосуд; 9 - чашечка; 10 - стрелка

Жидкостной седиментограф (рис. 1.6.) состоит из седиментационного сосуда и регистрирующей системы.

Седиментационный сосуд представляет собой стеклянный цилиндр 6 диаметром 65 мм. На верхнюю кромку цилиндра накладывается фигурный фланец 5 с закрепленной в нем соосно с цилиндром стеклянной трубкой 7 диаметром 35 мм. Кромка свободного конца трубки отшлифована. В центре трубки проходит капроновая нить, соединяющая чашечку 9 для накопления осадка, выпадающего из суспензии, с коромыслом весов.

Регистрирующая система включает электронный потенциометр, магазин сопротивления и аналитические весы с вмонтированным в них на специальном щите фоторезистором и соединенным соосно с левой чашкой весов сердечником 1 соленоида 2.

При поджатой к нижней кромке трубки 7 чашечке 9 в сосуд 6 заливают дисперсионную жидкость, а в сосуд 7 - суспензию анализируемой пыли в дисперсионной жидкости. Для поддержания равномерной температуры суспензии при проведении анализа сосуд 6 помещают в термостатирующий сосуд 8, заполненный дистиллированной водой и соединенный резиновыми шлангами с термостатом.

Поджимное устройство от чашечки 9 отводят в сторону, и чашечка свободно повисает на капроновой нити. При выпадении осадка на чашечку равновесие весов нарушается. В результате этого стрелка 10 с диафрагмой, укрепленная в центре коромысла, отходит от среднего положения и луч света от лампочки 4, проходя через диафрагменную щель, попадает на фоторезистор 3. Сопротивление фоторезистора уменьшается, и на соленоид 2 подается большее напряжение. Сердечник 1 втягивается, возвращая весы в положение равновесия. При дальнейшем увеличении массы осадка стрелка снова отклоняется от положения равновесия – на соленоид подается еще большее напряжение, и он вновь возвращает весы в положение равновесия. Изменение напряжения и тока в соленоиде происходит до полного выпадения осадка на чашечку седиментографа и непрерывно регистрируется самописцем, вычерчивающим кривую накопления осадка анализируемой пыли.

3. Метод микроскопирования

Микроскопирование - это рассмотрение пылевых частиц с помощью оптического или электронного микроскопа, определение формы частиц, их размера и количества по фракциям.

Этот метод, кроме определения размеров пылевых частиц, их количества, позволяет изучить строение пылевых частиц, сделать миктофотографии пыли.

Размеры рассматриваемых под микроскопом частиц определяют путем сравнения их со шкалой окуляр-микрометра. Цена деления его шкалы оп-

ределяется при помощи объект-микрометра, представляющего собой шкалу длиной 1 мм, разделенную на 100 частей (цена одного деления 10 мкм). Эта шкала, выгравированная на специальном предметном стекле, рассматривается через микроскоп как объект.

Оценка размеров частиц с помощью микроскопа производится следующими основными способами:

- замером наибольшего размера каждой частицы;
- измерением каждой частицы в одном и том же направлении, т. е. определением линейной проекции частиц на некоторую общую ось;
- вычислением диаметра круга, имеющего площадь, эквивалентную проектируемой на прозрачную подложку площади частицы (так называемый проектированный диаметр);
- вычислением среднего размера по полусумме длины и ширины частицы.

Дисперсный состав пыли находят, измеряя частицы и определяя количество частиц каждой фракции. Метод микроскопии трудоемок; его применяют в основном при выполнении научных исследований [3, 5-7].

4. Метод определения размеров частиц по дифракции лазерного излучения

Метод измерений основан на измерении интенсивности углового рассеяния плоской монохроматической электромагнитной волны на частицах аэрозоля или взвеси. На основе индикатрисы рассеяния, регистрируемой многоэлементным фотоприемным устройством, решением обратной задачи рассеяния для моделей частиц сферической формы определяют средний размер частиц и счетную концентрацию [8].

В зависимости от размера частиц d и длины волны электромагнитного излучения λ , индикатриса рассеяния изменяется, причем чем меньше размеры частиц, тем более симметричным становится рассеяние под углами 0° и 180° .

Оптическая схема средства измерений, реализующего данный метод измерений (далее - лазерный дифракционный анализатор), приведена на рис. 1.7.

Мощность лазера должна быть в диапазоне от 2 до 25 мВт. Для анализа частиц размером более 30 нм рекомендуется использовать лазеры мощностью от 2 до 5 мВт, для анализа частиц меньших размеров – лазеры мощностью от 15 до 25 мВт.

Фотоприемное устройство должно состоять из набора фотодиодов либо одного фотодиода в сочетании с подвижными щелями. Элементы фотоприемного устройства должны быть расположены таким образом, чтобы предотвращать попадание отраженного от его поверхности света обратно в оптическую систему.

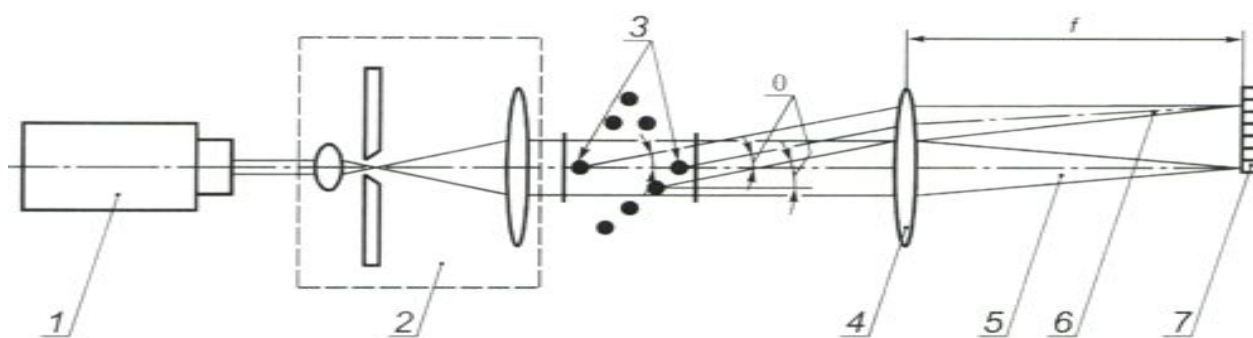


Рис. 1.7. Лазерный дифракционный анализатор:

- 1 - источник электромагнитного излучения (лазер); 2 - блок формирования луча (расширитель); 3 - частицы, взвешенные в образце;
 4 - линза; 5 - нерассеянный луч; 6 - рассеянное излучение;
 7 - многоэлементное фотоприемное устройство;
 θ - угол рассеяния; f - фокусное расстояние линзы

Проведение измерений с помощью лазерного дифракционного анализатора включает в себя следующие этапы:

- проверку фона в измерительном канале. Проверку фона допускается проводить с использованием разбавляющей жидкости и/или газа;
- измерение индикатрисы рассеяния взвеси, предусматривающее многократную регистрацию картины светорассеяния многоэлементным фотоприемным устройством за характерное время измерения, вычисление усредненного сигнала для каждого элемента;
- выбор модели вычисления размера частиц по индикатрисе рассеяния;
- вычисление среднего размера частиц по индикатрисе рассеяния.

5. Метод инерционной сепарации

Состоит в разделении пыли на фракции с помощью сил инерции в специальном аппарате. Фракции отделяются последовательно от исследуемой навески под действием центробежной силы, которая в сотни раз больше силы тяжести, на использовании которой основан метод седиментометрии. Благодаря этому время выполнения анализа методом центробежной сепарации значительно сокращается.

Разработано несколько типов приборов для дисперсионного анализа взвешенных в газовой фазе частиц без их предварительного отделения. К таким приборам относятся прямоточный анализатор пыли, трехциклонный сепаратор, импакторы, ротационный анализатор пылей РАД.

Отличительной особенностью всех этих приборов является то, что проба аэрозоля засасывается внутрь прибора изокинетически через пылезаборный носик. Разделение частиц на фракции происходит в результате постепенного возрастания сил инерции по ходу газа.

Прямоточный анализатор пыли

На протяжении нескольких лет в Семибратовском филиале НИИОГАЗа Е. И. Павловским разрабатывался анализатор дисперсности, работающий также на инерционном принципе, который получил название "Прямоточный анализатор пыли" (рис. 1.8).

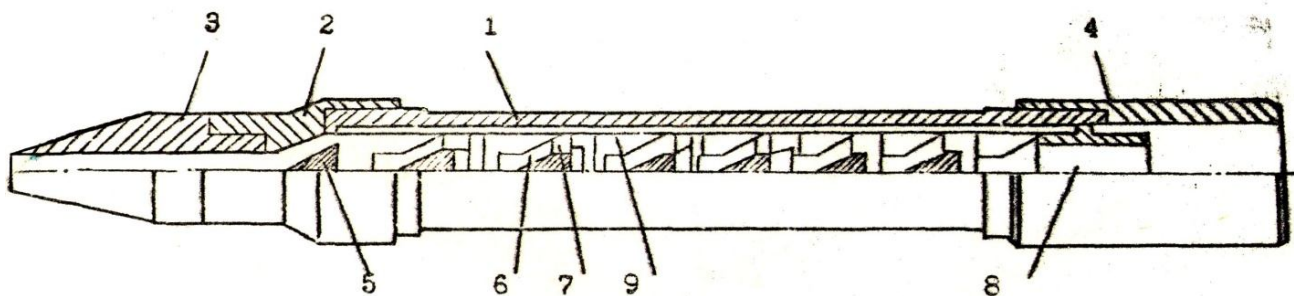


Рис. 1.8. Прямоточный анализатор пыли:

- 1 - корпус; 2 - переходная втулка; 3 - пылезаборный сменный носик;
4 - соединительная трубка; 5 - рассекатель; 6 - диффузор;
7 - закручиватель; 8 - фильтрующий элемент; 9 - стенка

Анализатор состоит из следующих элементов. Корпус 1 включает переходную втулку 2 с пылезаборным сменным носиком 3 и соединительной трубкой 4. Внутри корпуса размещены сепарирующие элементы, представляющие собой прямоточные циклоны, установленные последовательно. Сепарирующие элементы состоят из рассекателей 5, диффузоров 6, закручивателей 7. На выходе из прибора установлен фильтрующий элемент 8, набивка которого выполняется из стеклянных волокон.

Размеры анализатора:

- длина – 240 мм;
- диаметр – 21 мм;
- масса – 280 г.

Устройство работает следующим образом. Запыленный газ через калиброванный носик 3 поступает внутрь аппарата. Рассекатель 5 направляет поток частиц пыли к периферийной стенке, часть которых улавливаются, осаждаюсь в кармане, образованном диффузором 6 и стенкой 9. Мелкие частицы вместе с потоком газа уносятся в следующую ступень осаждения. Для увеличения эффективности внутри диффузоров 6 установлены закручиватели 7. На выходе из прибора запыленный газ фильтруется через фильтровальный элемент 8. Количество ступеней сепарации равно семи. Анализатор может работать при температуре до 300 °С.

Выполнение анализа включает следующие операции. В газоходе определяют скорость пылегазового потока, где предполагается производить

измерения. Расчетом из условия изокINETичности отбора газа подбирают калиброванный носик 3 нужного диаметра, установив при этом расход воздуха через ротаметр 20 литров в минуту. Затем взвешивают все осадительные элементы (циклоны) и фильтр 8. После отбора газа и осаждения пыли в устройстве вновь взвешивают осадительные элементы и фильтр.

Распределение привесов по ступеням осаждения позволяет рассчитать дисперсность пыли в потоке газа, а суммарный вес уловленной пыли на всех ступенях и фильтре позволяет получить значение запыленности газа в газоходе. Были проведены сравнительные испытания с седиментографом, импактором и ротационным анализатором. Эксперименты проводились на резиновой смеси, на кварце Люберецкого карьера, стандартной кварцевой испытательной пыли №2. Эксперименты показали высокую сходимость результатов экспериментов. Так медианные диаметры d_{50} кварца №2 составили у седиментографа, прибора РАД и прямоточного анализатора, соответственно 7,5; 8,7 и 8,9 мкм [9].

Метод трех циклонов

Для определения размера частиц, летящих в промышленных аэрозолях, С. С. Янковским и Н. А. Фуксом разработан способ с применением трех последовательно соединенных циклонов разного диаметра 50, 35 и 15 мм (рис. 1.9).

Конструкция, изображенная на рис. 1.9, иногда называется третициклонным сепаратором.

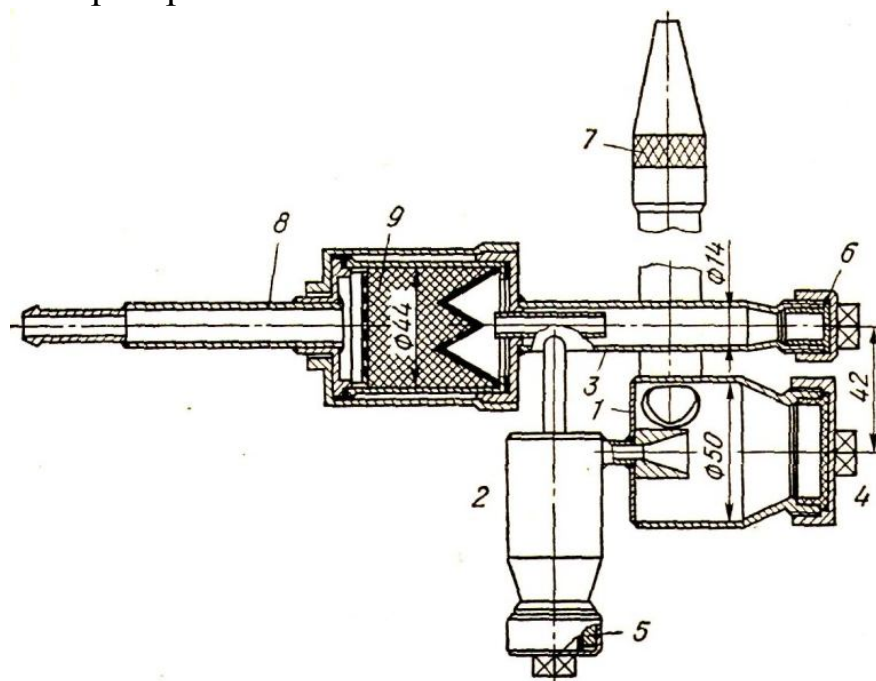


Рис. 1.9. Прибор для определения дисперсного состава пыли методом трех циклонов:

1, 2, 3 - циклоны; 4, 5, 6 - стаканчики; 7 - сменный носик;
8 - трубка для просасывания газа через прибор; 9 - стекловатный фильтр

Принцип работы прибора следующий. Перед началом эксперимента циклоны закрываются металлическими пробками. Пылегазовый поток протягивается со скоростью 10 л/мин через циклоны и фильтр при помощи воздуходувки. Диаметр наконечника заборного носика съемный и также подбирается в соответствии с правилом изокINETичности.

После окончания протягивания запыленного газа через прибор, когда в нем набрано несколько граммов пыли, его отключают, вынимают из газового потока, обстукивают каждый циклончик деревянным молотком и взвешивают пыль из каждого циклончика и фильтра. Перед применением прибор тарируют, т.е. определяют размер частиц, улавливаемых каждым циклончиком [5].

Импакторы

Принцип работы импакторов основан на избирательной сепарации частиц по размерам при пропускании пробы газа через ряд последовательно установленных сопел уменьшающегося сечения, под которыми расположены плоские или цилиндрические осадительные поверхности (подложки). Сочетание сопла и подложки принято называть ступенью (каскадом) прибора.

Конструкция одной из моделей импакторов НИИОГАЗа показана на рис. 1.10. Прибор состоит из семи ступеней, шесть из которых рассчитаны на инерционное осаждение частиц, а седьмая – на осаждение методом фильтрации. Каждая из ступеней инерционного осаждения состоит из стакана, включающего в себя одно или несколько сопел с установленной на против подложкой в виде тарелки.

Импактор работает следующим образом. Проба газа, содержащего взвешенные частицы, изокINETично просасывается через прибор с постоянным расходом. На каждой из подложек происходит инерционное осаждение частиц, причем средний размер частиц, осажденных в каждой из последующих ступеней, получается меньше, чем в предыдущих. Дисперсионные анализы, выполняемые с применением импакторов, сводятся к определению доли и размеров частиц, осевших в каждой ступени.

Для улавливания самых мелких частиц на выходе из последней ступени инерционного осаждения устанавливается фильтр. Анализируемые частицы оказываются разделенными на фракции, число которых равно общему числу ступеней импактора. Наличие в последних ступенях инерционного осаждения нескольких сопел позволяет лучше распределить осадок частиц по поверхности подложки. Для достижения необходимой эффективности столкновений частиц с поверхностью осаждения в подложки запрессовывается тонковолокнистый материал, например стеклянная или базальтовая вата [5, 6].

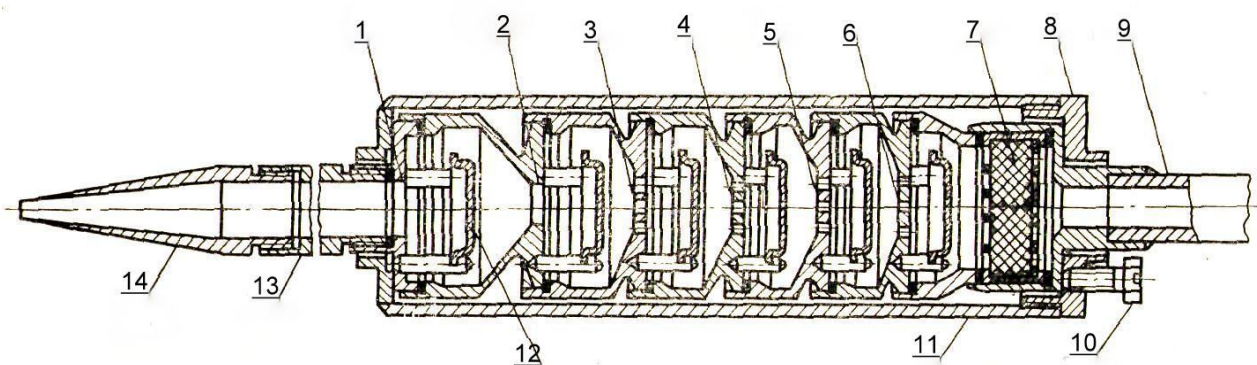


Рис. 1.10. Импактор конструкции НИИОГАЗ:

1, 2 - одиночные сопла; 3, 4, 5, 6 - сопловые решетки; 7 - фильтр;
8 - крышка; 9 - отсосная трубка; 10 - поджимной болт для уплотнения
прокладок; 11 - корпус; 12 - тарельчатая подложка;
13 - заборный носик; 14 - наконечник

Ротационный анализатор дисперсности (РАД)

К приборам ротационного принципа определения дисперсного состава промышленной пыли, можно отнести на разработанный Г.М. Скрябиным РАД. Прибор (рис. 1.11) имеет вращающийся ротор с кольцевым каналом, в котором потоку отбираемых газов сообщается вращательное движение. Под действием возникающих при этом центробежных сил анализируемые частицы осаждаются на стенки ротора. В проточной части ротора устанавливаются тонкостенные алюминиевые стаканчики, которые вместе с осадком взвешиваются на аналитических весах.

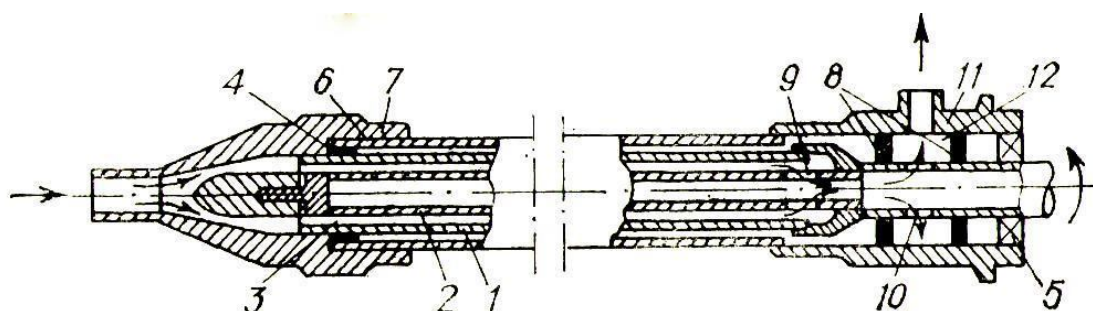


Рис. 1.11. Ротационный анализатор дисперсности РАД-1:

1, 2 - коаксиальные трубки; 3 - канал; 4, 5 - подшипники;
6 - передняя кромка корпуса; 7 - головка-обтекатель; 8 - кольцевые
уплотнения; 9, 10 - окна; 11 - штуцер; 12 - канал

Ротационный анализатор РАД-1 представляет собой центрифугу проточного типа. Пылегазовый поток просасывается по кольцевому каналу 3 ротора, образованному двумя коаксиальными трубками 1 и 2. Под действием центробежных сил частицы сепарируются из потока и оседают

на внутренней стенке трубки 2. Исходя из количества пыли, осевшей по длине канала, рассчитывают распределение частиц по массе. Количество осевшей пыли, отнесенное к единице объема отобранного газа, дает величину запыленности потока.

Ротор вращается в подшипниках 4 и 5. На передней кромке корпуса 6 посредством винтообразных направляющих фиксируется головка-обтекатель 7. В заднем конце корпуса ротора установлены кольцевые уплотнения 8, образующие герметичную камеру, которая через окна 9 и 10 в трубке 2 сообщается с проточным каналом 3. Приводом к прибору служат электродвигатели. Штуцер 11 через «абсолютный фильтр» с тканью ФПП присоединяется при помощи гибких шлангов к воздуходувке или эжектору [10, 11].

Следующим шагом после определения дисперсного состава пыли является выбор типа пылеуловителей для максимально эффективного ее улавливания, но с обязательным учетом других свойств, которые будут рассмотрены ниже.

Решение проблемы борьбы с пылью связано с обоснованным выбором типа пылеуловителей, которые могут быть инерционного, фильтрационного и электрического принципа действия. Для обоснованного выбора типа пылеуловителей, кроме рассмотренных выше дисперсности пыли, плотности частиц пыли, удельной поверхности пыли, необходимо учитывать следующие свойства пылей:

- слипаемость пыли;
- сыпучесть пыли;
- гигроскопичность пыли;
- смачиваемость пыли;
- электрические свойства пыли;
- коагуляция пыли;
- абразивные свойства пыли;
- горючесть и взрываемость пыли.

1.2. Слипаемость пыли

Взаимодействие пылевых частиц между собой называется аутогезией. Аутогенным воздействием вызывается образование конгломератов пыли. Взаимодействие пылевых частиц с поверхностями называется адгезией.

Обычно, когда речь идет о взаимодействии пылевых частиц между собой, явления аутогезии именуют **слипаемостью**. Она обусловлена силами электрического, молекулярного и капиллярного происхождения. В качестве показателя слипаемости принимают прочность пылевого слоя на

разрыв. Слипаемость пыли определяют на приборе для установления разрывной плотности пылевого слоя, по методу разъемного цилиндра в соответствии с рис. 1.12.

Для измерения разрывной прочности пылевого слоя в лабораторных условиях наибольшее распространение получил метод разъемного цилиндра с использованием прибора, разработанного в НИИОГАЗе.

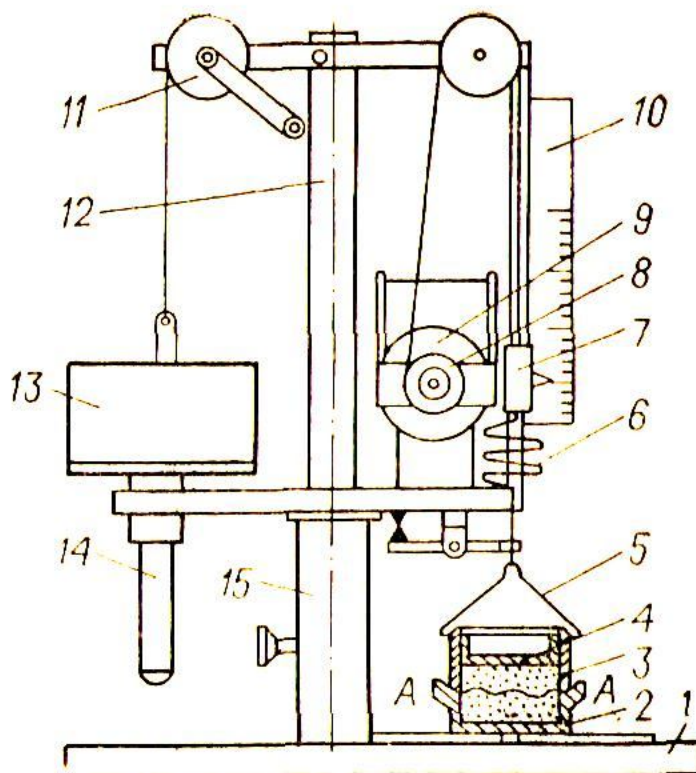


Рис. 1.12. Прибор для определения разрывной прочности пылевого слоя методом разъемного цилиндра:

- 1 - основание; 2 - стакан; 3 - цилиндр; 4 - плунжер; 5 - дужка;
6 - калиброванная пружина; 7 - ползун; 8 - барабан; 9 - электродвигатель;
10 - шкала; 11 - ручка блока; 12 - вал; 13 - груз;
14 - уплотняющий шток; 15 - втулка

Ячейка прибора состоит из стакана 2, укрепленного на основании 1, и сторцованного с ним цилиндра 3. Соосность стакана и цилиндра обеспечивается четырьмя центрирующими выступами на стакане. Внутри стакана и цилиндра засыпается исследуемая пыль, уплотняющаяся с помощью плунжера 4 под воздействием груза 13, помещаемого на площадке уплотняющего штока 14. Уплотняющее и измерительное устройство смонтированы на вращающейся опоре, состоящей из втулки 15 и вала 12. Вал может поворачиваться на 90° (на схеме для наглядности этот угол увеличен до 180°). В правом крайнем положении вала по оси цилиндра

располагается уплотняющий шток 14 с грузом. Подъем и опускание штока осуществляется поворотом ручки блока 11. В левом крайнем положении вала место над цилиндром занимает устройство, служащее для приложения к слою пыли разрывающего усилия и измерения его величины. Усилие создается растягиванием калиброванной пружины 6, один конец которой прикреплен к ползуну 7, а второй зацепляется за дужку 5 на цилиндре 3. Пружина растягивается нитью, наматываемой на барабан 8 с помощью электродвигателя 9 со скоростью 1 мм/с. Величину разрывающего усилия измеряют по шкале 10.

Основная часть прибора - разъемный цилиндр, в который засыпается исследуемая пыль. После уплотнения пыли стандартной нагрузкой 50 кПа к верхней части цилиндра прикладывают с помощью пружины постепенно нарастающее направленное вверх усилие, которое достигнув определенной величины F_k (г) разрывает пылевой столбик. Величина разрывной прочности слоя P (г/см²) рассчитывается по формуле

$$P = \frac{F_k - G_k}{S}, \quad (1.4)$$

где G_k - вес трубки с пылью, г;

S - площадь поперечного сечения слоя пыли, см².

По степени слипаемости пыли могут быть разделены на четыре группы (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Группы пыли по степени слипаемости

<i>Группа слипаемости</i>	<i>Разрывная прочность слоя пыли P, Па</i>	<i>Некоторые группы данной пыли</i>
1	Неслипающаяся, $P < 60$	Доломитовая, глиноземная, шлаковая
2	Слабослипающиеся, $P = 60 \dots 300$	Коксовая, доменная, апатитовая
3	Среднеслипающиеся, $P = 300 \dots 600$	Цементная, торфяная, металлическая, мучная
4	Сильнослипающиеся, $P > 600$	Гипсовая, волокнистые пыли (асбестовая, хлопковая, шерстяная)

Считается, что для влажной пыли степень ее слипаемости должна быть увеличена на один уровень. Эксперименты показывают, слипаемость возрастает с уменьшением размера частиц [2, 6, 7, 12].

1.3. Сыпучесть пыли

Сыпучесть характеризует подвижность частиц пыли относительно друг друга и их способность перемещаться под действием внешней силы. Иногда сыпучестью называют просто свойство подвижности частиц пыли. Сыпучесть пыли зависит от размера частиц, их влажности и степени уплотнения.

Характеристики сыпучести необходимо учитывать при определении угла наклона стенок бункеров, течек и др. устройств, связанных с накоплением и перемещением пыли и пылевидных материалов.

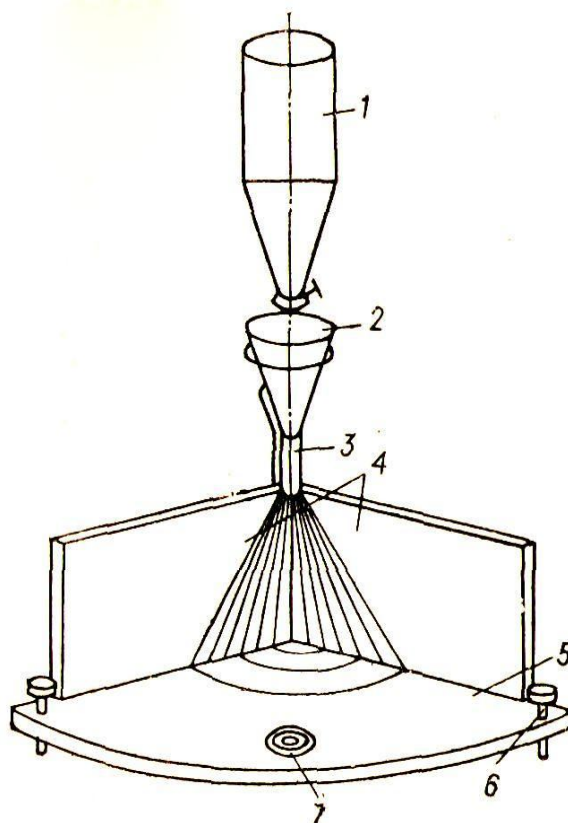
С понятием сыпучести пыли связано такое понятие, как угол естественного откоса пыли. Углом естественного откоса пыли называется угол между горизонтальной поверхностью и образующей конуса насыпанного на нее порошкообразного материала. Различают собственно угол естественного откоса α_d и угол обрушения $\alpha_{ст}$. Первая величина относится к случаю формирования откоса при падении частиц пыли на плоскость. Образование поверхности откоса отвечает состоянию динамического равновесия, поэтому α_d называется также динамическим углом естественного откоса.

Под углом обрушения $\alpha_{ст}$ понимают угол, который образуется при обрушении слоя в результате удаления подпорной стенки, его называют также статическим углом естественного откоса.

1.3.1. Определение динамического угла естественного откоса

Динамический угол естественного откоса α_d определяют при помощи прибора Меринга-Баранова, изображенного на рис. 1.13.

Рис. 1.13. Прибор Меринга – Баранова:
1 - бункер; 2 - воронка;
3 - цилиндрический канал;
4 - боковые стенки; 5 - дно;
6 - регулировочный винт;
7 - уровень



Метод заключается в определении угла между основанием и образующей конуса, полученного насыпкой уловленной пыли на горизонтальную плоскость.

Устройство для определения динамического угла естественного откоса представляет собой прямой пространственный угол, образованный тремя плоскостями. В ребре, образованном вертикальными стенками 4, имеется цилиндрический канал 3 диаметром 10 мм, ось которого совпадает с пересечением внутренних плоскостей стенок. В этот канал с помощью воронки 2 засыпается из бункера 1 анализируемая пыль. На боковые стенки 4 и дно 5 нанесены угломерные шкалы. В основание устройства вмонтированы уровень 7 и штатив для укрепления бункера.

Вращением регулировочных винтов 6 устанавливают устройство горизонтально по уровню. Устанавливают воронку так, чтобы носик воронки был продолжением канала.

Пробу пыли, подготовленную к анализу, помещают в бункер. Приоткрывают задвижку бункера так, чтобы пыль тонкой струйкой высыпалась в воронку, а из нее в угол устройства до тех пор, пока вершина конуса не достигнет верхнего среза стенок.

Величину динамического угла естественного откоса определяют по угломерным шкалам, нанесенным на боковые стенки [7].

1.3.2. Определение статического угла естественного откоса

Статический угол естественного откоса используется в качестве одного из исходных параметров при проектировании бункеров сухих пылеуловителей.

Определение этого показателя заключается в измерении угла, под которым располагается боковая поверхность сыпучего материала в результате его обрушения после удаления подпорной стенки. Устройство для измерения угла обрушения представлено на рис. 1.14.

Устройство для измерения статического угла естественного откоса (угла обрушения) состоит из сосуда 6 и камеры 4. Камера представляет собой параллелепипед (с основанием 70х40 мм и высотой 400 мм) с расположенным над ним бункером 3. Течка бункера перекрывается задвижкой 2. Камера укреплена на стойках 5 при помощи хомута 11, стержней 12 и колец 13. Высота расположения камеры фиксируется зажимными болтами 1.

Измеряют с точностью до 0,5 мм величину освободившейся верхней кромки сосуда a и высоту откоса h . Если угол откоса четко выражен, то его величину можно измерить транспортиром. По величинам a и h статический угол естественного откоса вычисляют с помощью формулы

$$\alpha_{\text{ст}} = \arctg (h/a). \quad (1.5)$$

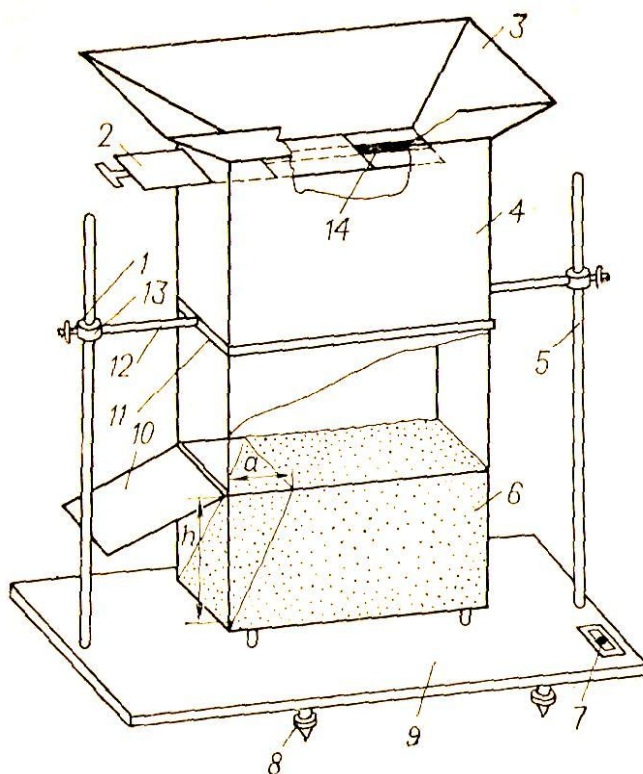


Рис. 1.14. Устройство для определения статического угла естественного откоса:

- 1 - зажимной болт; 2 - задвижка; 3 - бункер; 4 - камера; 5 - стойка;
 6 - сосуд; 7 - уровень; 8 - регулировочный винт; 9 - основание;
 10 - съемная стенка; 11 - хомут; 12 - стержень; 13 - кольцо;
 14 - щель; а - верхняя кромка сосуда; h - высота откоса

За окончательный результат принимают среднее арифметическое шести параллельных определений. Расхождение между результатами отдельных измерений и их средней арифметической величиной не должно превышать 10 % [7].

1.4. Гигроскопичность пыли

Под гигроскопичностью пыли понимают ее способность поглощать влагу из воздуха. Поглощение влаги оказывает влияние на такие свойства пыли, как электрическая проводимость слоя пыли, слипаемость, сыпучесть и другие свойства, которые необходимо учитывать при проектировании пылеуловителей. Содержание гигроскопической влаги W (%) в пробе вычисляют по формуле

$$W = \left(\frac{G_1 - G_2}{G_1 - G_0} \right) \cdot 100, \quad (1.6)$$

где G_1 - масса бюкса с влажной пылью, г;

G_2 - масса бюкса с сухой пылью, г;

G_0 - масса чистого сухого бюкса, г.

Содержание влаги в пыли чаще всего характеризуется влагосодержанием или влажностью.

Влагосодержание – отношение количества влаги в пыли к количеству абсолютно сухой пыли.

Влажность – отношение количества влаги в пыли ко всему количеству материала (сухому веществу вместе с влагой). Влага, которая удерживается на поверхности, в порах и капиллярах сыпучего материала и может быть удалена сушкой, называется гигроскопической. Количество гигроскопической влаги может быть определено по массе потерянной влаги при высушивании пробы пыли до постоянной массы в сушильном шкафу.

1.5. Смачиваемость пыли

Процесс смачивания пыли происходит в результате сложного взаимодействия молекул на границе твердой, жидкой и газообразной фаз и приводит к образованию на поверхности частиц тонкой жидкостной пленки, из которой влага проникает в частицы. На смачивании пыли распыленной жидкостью основано мокрое пылеулавливание и гидроудаление.

Смачиваемость пыли определяют методом пленочной флотации. Он заключается в том, что в сосуд с дистиллированной водой высыпают навеску пыли. Определяют количество осевшей (затонувшей) пыли. О смачиваемости пыли судят по доле затонувших частиц. По смачиваемости, промышленная пыль, в зависимости от доли затонувших частиц, подразделяется на три группы:

- плохо смачиваемая (< 30 %);
- умеренно смачиваемая (30-80 %);
- хорошая смачиваемая (> 80 %).

Дополнительной характеристикой активности пыли по отношению к жидкости служит кинетика смачивания. Этот показатель определяют методом капиллярного впитывания посредством впитывания влаги пылевым слоем при его контакте с влажной поверхностью.

Для измерения величины смачиваемости применяется прибор, состоящий из вращающегося столика, на котором укреплен сосуд с водой и бункер с вибрационным питателем над ним. Количество пыли, время ее просыпания и экспозиция во всех опытах одинаковы. Осевшую на дно сосуда в процессе опыта пыль отфильтровывают, высушивают и взвешивают [2, 7].

1.6. Электрические свойства пыли

Электрические свойства оказывают значительное влияние на поведение пылевых частиц. Основными электрическими свойствами промышленной пыли являются:

- удельное электрическое сопротивление;
- электрический заряд.

1.6.1. Удельное электрическое сопротивление

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) характеризует электрическую проводимость слоя пыли. УЭС (Ом·м) равно сопротивлению прохождения электрического тока через куб пыли со стороной, равной 1 м.

По значению УЭС пыль можно разделить на три группы:

- хорошо проводящая ($< 10^2$ Ом·м);
- со средней проводимостью ($10^2 \dots 10^8$ Ом·м);
- высокоомная ($> 10^8$ Ом·м).

Электрическое сопротивление пыли обусловлено поверхностной и внутренней (объемной) проводимостью. Вследствие адсорбции влаги и газов на частицах пыли имеется поверхностный слой, отличающийся по своим свойствам от основной массы частиц. Этот слой и обуславливает поверхностную проводимость.

Объемная (внутренняя) проводимость вызвана электронной или ионной проводимостью самой частицы и увеличивается с ростом температуры за счет увеличения энергии возбуждения электронов.

Для определения УЭС в промышленных условиях могут быть применены разработанные СФ НИИОГАЗ измерители сопротивления пыли ИСП-1.

Устройство и принцип действия ИСП-1 (рис. 1.15). Прибор состоит из измерительных 14 и коронирующего 15 электродов, помещенных в камеру 12. Измерительные электроды представляют собой пару гребенчатых пластин из нержавеющей стали, закрепленных на гребнедержателях. Гребнедержатели установлены в крышке камеры 12, изолированы друг от друга фторопластовыми изоляторами 11 и имеют в верхней части клеммы 9. Пластины крепятся так, чтобы они были расположены строго в одной плоскости, образуя гребенчатый зазор. Коронирующий электрод 15 представляет собой П-образную рамку с натянутой нихромовой проволокой диаметром 0,1...0,2 мм. Коронирующий электрод расположен над осадительным. Он крепится через изолятор к крышке камеры и имеет на выходе клемму 10. Камера снабжена заборной трубкой 17, у входного отверстия которой вставлена импульсная трубка для измерения статического давле-

ния в канале. В верхней части камеры имеется отводной патрубок 5 для вывода прошедшего через камеру газа.

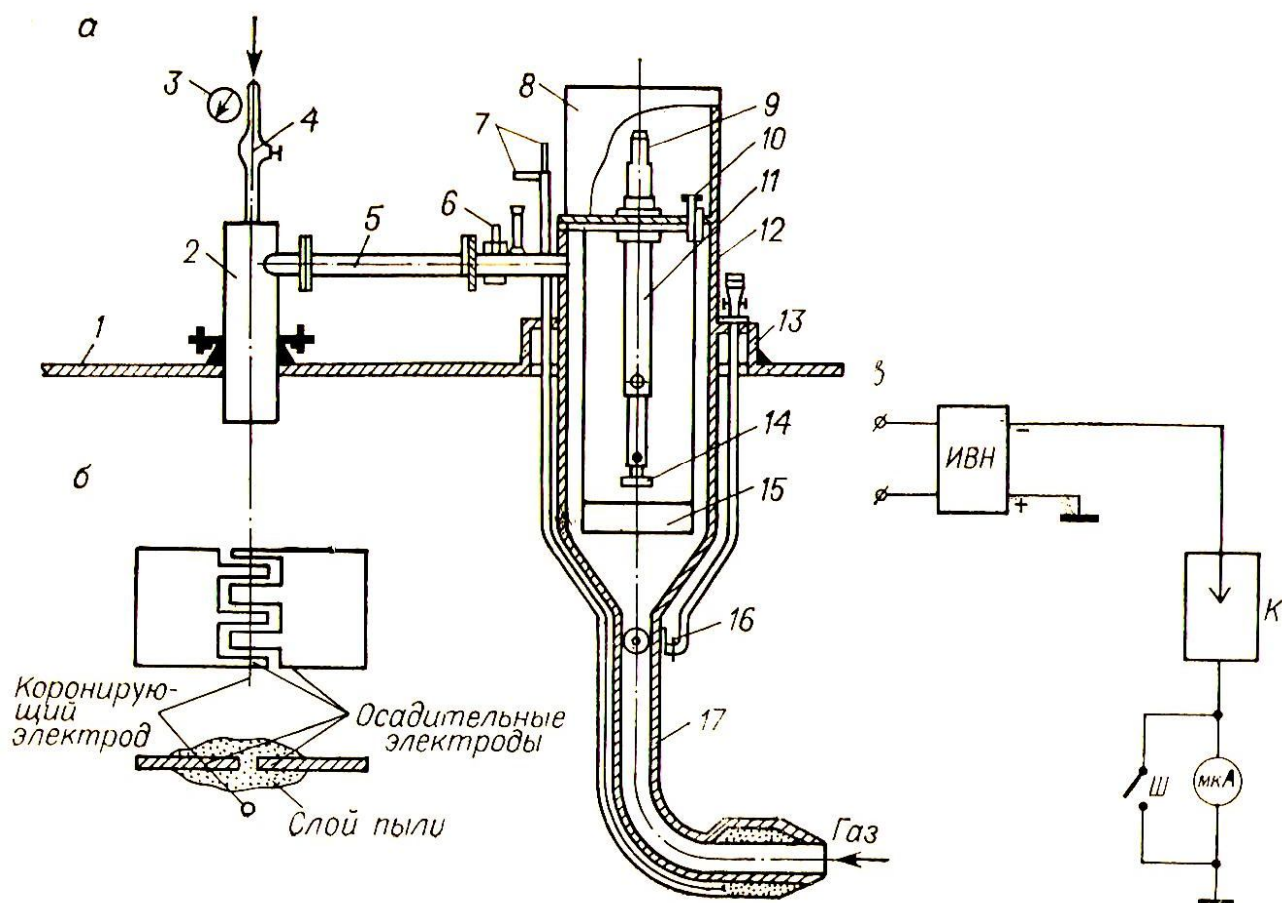


Рис. 1.15. Устройство для измерения УЭС пыли в промышленных условиях:

а - ИСП-1 и установка его в газоход; *б* - принципиальная схема измерительных электродов ИСП-1; *в* - электрическая схема ИСП-1; Ш - шунтирующий тумблер; ИВН - источник высокого напряжения; К - измерительная камера ИСП; мкА - микроамперметр; 1 - камера; 2 - эжектор; 3 - микроманометр; 4 - вентиль, 5 - отводной патрубок; 6 - шибер; 7 - импульсные трубки; 8 - экран; 9 - измерительная клемма; 10 - клемма; 11 - изолятор; 12 - крышка камеры; 13 - фланец; 14 - измерительный электрод; 15 - коронирующий электрод; 16 - заслонка; 17 - заборная трубка

Измеритель работает следующим образом. Камера 12 с вмонтированными в нее измерительными и коронирующим электродами помещается в газоход или электрофильтр. С помощью эжектора 2 запыленный газ протягивается через камеру. Клеммы 9 на гребнедержателях переключаются, и на них подается высокое напряжение положительной полярности. Тогда на заземленном коронирующем электроде возникает отрицательная

корона. Под действием коронного разряда газ ионизируется, ионы адсорбируются частицами пыли. Отрицательно заряженные частицы пыли движутся к осадительному электроду (гребенчатым пластинам) и осаждаются на них. После запыления зазора между гребенчатыми пластинами отключают высокое напряжение, снимают перемычку с клемм 9 и приступают к измерению сопротивления образовавшегося слоя пыли. Для этого к клеммам 9 подключают тераомметр (в этом случае гребенчатые пластины служат измерительными электродами).

УЭС пыли P (Ом·м) определяют по формуле

$$P = R \cdot S/b, \quad (1.7)$$

где R - сопротивление слоя пыли, измеренное тераомметром, Ом;

S - площадь сечения активной части измерительных электродов, м²;

b - зазор между измерительными электродами, м.

Для конструкции ИСП-1, разработанной в СФ НИИОГАЗ, $S/b = 0,05$ [6, 7].

1.6.2. Электрический заряд пыли

Пылевая, как и другая аэрозольная частица, может иметь один или несколько электрических зарядов или быть нейтральной. Аэрозольная система может иметь в своем составе частицы, заряженные положительно, отрицательно, нейтральные. Соотношение этих частиц определяет суммарный заряд системы.

Электрическое состояние аэрозольной системы не остается постоянным во времени. В результате взаимодействия друг с другом и с окружающей средой взвешенные частицы получают заряд, отдают его, нейтрализуются.

Электрические свойства пыли оказывают определенное воздействие на устойчивость аэрозоля, а также на характер воздействия пылевых частиц на живой организм. По данным некоторых исследователей, пылевые частицы, имеющие электрический заряд, в два раза интенсивнее задерживаются в дыхательных путях, чем нейтральные.

Взвешенные частицы ряда аэрозолей несут электрические заряды как положительного, так и отрицательного знака. Вещества, несущие положительный заряд: апатит, крахмал, мрамор, песок, сера, уголь. Отрицательный: кальций, кварцевый песок, мука, окись железа, окись магния, окись свинца, окись цинка [2, 6, 7, 12].

УЭС и электрический заряд пыли оказывают весьма существенное влияние на процесс улавливания пыли в электрофильтрах, но подробнее об этом будет сказано в следующей главе.

1.7. Коагуляция пыли

Процесс укрупнения взвешенных частиц носит название коагуляции.

Он происходит в результате взаимодействия частиц под влиянием различного рода физических факторов. Наибольшая роль в коагуляции принадлежит молекулярным силам и силам электрического притяжения.

С точки зрения обеспыливания газов коагуляция весьма полезное явление, так как благодаря укрупнению пылевых частиц повышается эффективность их улавливания. Соединение и укрупнение частиц происходит при слипании их вследствие столкновения под действием гравитационных сил, сил инерции, броуновского движения, взаимного притяжения и т. д.

Коагуляция будет происходить тем интенсивнее, чем больше вероятность столкновения пылевых частиц. Мелкие частицы в большей степени подвержены коагуляции, чем крупные. Ускоряется также коагуляция при повышении концентрации пылевых частиц в газовой среде. Усиливает коагуляцию турбулизация запыленного потока, его ионизация и акустическое воздействие. Существует несколько основных видов коагуляции.

1. Тепловая (броуновская) коагуляция

В основе броуновской коагуляции лежит броуновское движение весьма малых частиц – до 0,1 мкм. Процесс тепловой коагуляции мало зависит от природы пылевых частиц. Коагуляция происходит тем быстрее, чем больше диапазон размеров частиц, так как имеет место процесс поглощения крупными частицами мелких. Скорость тепловой коагуляции повышается с увеличением абсолютной температуры дисперсной среды и с повышением давления.

2. Градиентная коагуляция

Градиентная коагуляция обусловлена наличием градиента скорости в потоке запыленных газов. Наиболее характерным примером является течение газов около твердой стенки канала. В соответствии с законами гидравлики, частица вблизи стенки движется с меньшей скоростью, чем частица, находящаяся ближе к продольной оси канала. Действие градиентной коагуляции ограничивается в основном пристенным слоем. Поэтому она играет существенную роль при значительной длине каналов и большой поверхности, по которой происходит контакт.

3. Турбулентная коагуляция

Скорость коагуляции частиц в дисперсной среде может быть искусственно повышена путем турбулизации. Вихревое движение среды, возникающее вследствие турбулизации, увеличивает вероятность столкновения частиц и, следовательно, повышает скорость коагуляции. Вихревое движение, возникающее вследствие турбулизации, увеличивает вероятность столкновения и, следовательно, укрупнения частиц.

4. Кинематическая коагуляция

Процесс кинематической коагуляции происходит при относительном движении частиц различного размера под действием внешних сил – силы гравитации, центробежных сил и др. Частицы различного размера движутся с различными скоростями. Вследствие этого происходит их столкновение и укрупнение. Примером кинематической коагуляции является осаждение частиц пыли на каплях, находящихся под действием силы тяжести (этот процесс называют также гравитационной коагуляцией). Кинематическая коагуляция происходит также при встречном движении распыленной воды и аэрозоля в мокрых пылеуловителях.

5. Электрическая коагуляция

Известно, что пылевые частицы во многих случаях имеют электрический заряд – положительный или отрицательный. Между заряженными частицами, а также между заряженными и незаряженными частицами возникают силы взаимодействия.

Между частицами действуют следующие электрические силы взаимодействия:

- кулоновская сила притяжения или отталкивания, возникающая между двумя заряженными частицами;
- сила индукции между заряженной частицей и соседней незаряженной;
- сила взаимодействия между заряженной частицей и другими частицами с тем же знаком;
- сила внешнего электрического поля (если оно имеется).

Электрическая коагуляция используется в технике пылеулавливания, а также при искусственной ионизации газопылевых потоков с целью укрупнения пылевых частиц.

6. Акустическая коагуляция

Акустическая коагуляция пыли происходит в том случае, когда пылегазовый поток проходит через акустическое поле, создаваемое источником звука или ультразвука. При определенных параметрах поля и характеристиках пылегазового потока вследствие колебания среды значительно возрастает число столкновений между пылевыми частицами, что приводит к их слипанию, т.е. к укрупнению пыли [2].

1.8. Абразивные свойства пыли

Абразивность – способность пыли вызывать изнашивание узлов аппаратов, с которыми соприкасается пылегазовый поток. Изнашивание стенок происходит вследствие абразивных свойств частиц пыли, ударяющейся или трущейся о внутренние поверхности пылеуловителей и газохо-

дов под действием инерционных сил. Изнашивание узлов аппаратов зависит также от самих абразивных свойств пыли, а именно от их твердости, формы, размера и плотности.

Абразивные свойства пыли имеют большое значение при выборе материала и толщины стенок пылеуловителей. В особенности это касается сухих инерционных аппаратов (циклонов), стенки которых подвержены весьма интенсивному абразивному износу. В особенности быстро изнашиваются стенки циклонов в верхней части цилиндра корпуса и конической части.

Интенсивный износ также характерен для газоходов в местах поворота запыленного потока. Абразивные свойства пыли характеризуются ее коэффициентом абразивности. Метод определения коэффициента абразивности пыли K_a ($\text{м}^2/\text{кг}$) (рис. 1.16), основан на определении износа образца стали при воздействии потока частиц пыли.

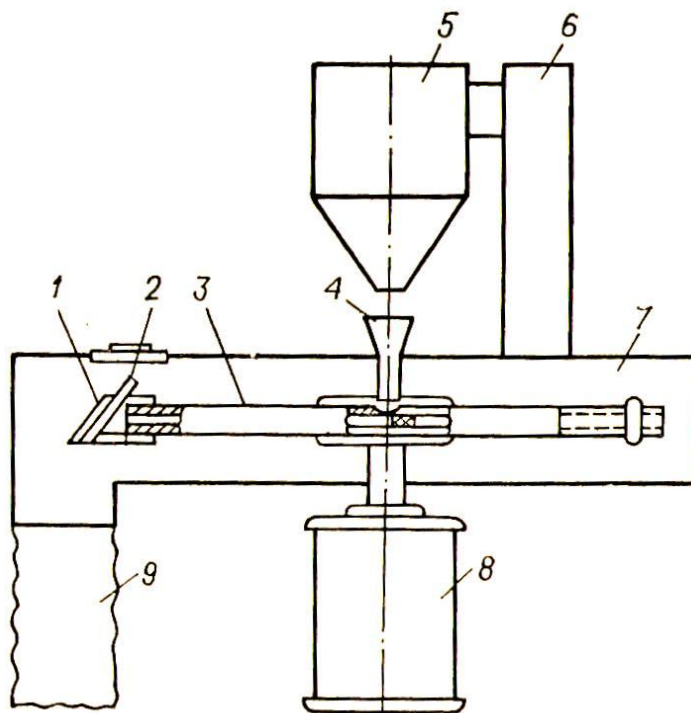


Рис. 1.16. Центробежный абразивометр:

1 - кассета; 2 - крепление образца; 3 - устройство для разгона частиц пыли; 4 - воронка; 5 - бункер; 6 - вибрационный питатель; 7 - корпус; 8 - электродвигатель; 9 - сборник пыли

Описание установки. Центробежный абразивометр состоит из кассеты 1 для крепления образца 2; устройства для разгона частиц пыли 3; вибрационного питателя 6 с бункером 5; корпуса 7; электродвигателя 8 и сборника пыли 9.

Исследуемая пыль из бункера 5 подается в воронку 4, закрепленную на крышке корпуса 7. Из воронки пыль поступает в разгонное устройство, представляющее собой трубку длиной 150 мм с внутренним диаметром 6 мм. На одном конце трубки крепится кассета 1 с образцом 2, установленным под углом 45° к оси трубки, на другом – противовес для балансировки разгонного устройства. Разгонное устройство вращается электродвигателем 8.

Во вращающейся трубке частицы разгоняются под действием центробежных сил, ударяются о поверхность образца, истирают его, а затем через проем в кассете выносятся в сборник пыли 9. Взвешиванием образца до и после опыта определяют массовый износ образца.

Коэффициент абразивности K_a вычисляют по формуле

$$K_a = B \cdot \Delta G, \quad (1.8)$$

где ΔG - потеря массы образца, кг;

B - постоянная прибора, определяемая по эталонному абразиву, для которого величина K_a известна.

По утверждению ряда исследователей износ металлических элементов вследствие абразивности пыли возрастает по мере увеличения размера частиц вплоть до 90 мкм, а затем по мере дальнейшего увеличения размера он уменьшается [6, 7, 11].

1.9. Горючесть и взрываемость пыли

Способность образовывать с воздухом взрывоопасную смесь и способность к воспламенению являются важнейшими отрицательными свойствами многих видов пыли. Такие вещества, как зерно и сахар, хотя и способны сгорать при определенных условиях, не являются взрывоопасными веществами. Будучи приведенными в пылевидное состояние, они становятся не только пожароопасными, но и взрывоопасными.

Некоторые пыли, находящиеся во взвешенном состоянии в воздухе помещений, взрывоопасны, а осевшая пыль - пожароопасна. Однако при определенных условиях осевшая пыль вновь способна переходить во взвешенное состояние, образуя взрывоопасные смеси. Может происходить как взрыв, так и горение пыли, находящейся во взвешенном состоянии. При взрыве реакция протекает значительно быстрее. Взрыв распространяется со скоростью сотни и тысячи метров в секунду.

Локальный взрыв пыли может перевести во взвешенное состояние осевшую пыль, в результате фронт взрыва расширяется. Пыль, покрывающая тонким слоем поверхность, переходит во взвешенное состояние, об-

разуя взрывоопасную смесь, которая вновь становится благоприятной средой для следующего взрыва.

Существуют следующие понятия, характеризующие горючесть и взрываемость пыли.

1. *Горение* - физико-химический процесс взаимодействия горючего вещества и окислителя, сопровождающийся выделением тепла и излучением света. С понятием горения непосредственно связаны следующие понятия:

- возгорание - начальная стадия горения, которая возникает под действием источника зажигания;

- самовозгорание - возникновение горения вещества в отсутствие источника зажигания. Самовозгорание может быть тепловым, микробиологическим и химическим. Тепловое самовозгорание происходит в результате нагрева вещества до определенной температуры. Микробиологическое самовозгорание возникает в результате жизнедеятельности микроорганизмов. Химическое самовозгорание происходит в результате химического взаимодействия веществ;

- самовоспламенение - это самовозгорание, сопровождающееся появлением пламени;

- температура самовоспламенения - самая низкая температура вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающееся возникновением пламенного горения.

2. *Взрыв* - одна из разновидностей реакции горения. Ее характерным отличием является исключительно быстрое, практически мгновенное протекание реакции в объеме. Возникновение взрыва пыли возможно только при сочетании нескольких определенных условий. Если отсутствует хотя бы одно из этих условий, взрыв не произойдет, несмотря на наличие остальных.

Этими условиями являются:

- концентрация пыли в воздухе между нижним и верхним пределами;
- наличие источника возбуждения взрыва достаточной температуры и мощности в запыленной зоне;
- питание кислородом, достаточное для обеспечения процесса горения.

3. *Нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПРП), г/м³* - это минимальное содержание пыли в воздухе, достаточное для возникновения взрыва.

НКПРП соответствует определенному среднему значению расстояния между пылевыми частицами, при котором происходит достаточно интенсивный теплообмен. При этом накапливается необходимая для взрыва тепловая энергия. НКПРП зависит от химического состава и от дисперсности пыли.

Тонкодисперсный материал имеет большую поверхность контакта с окислителем (кислородом воздуха). У материала с развитой поверхностью большая электрическая емкость, следовательно, значительная способность получать заряды статического электричества вследствие трения частиц, что увеличивает пожарную опасность вещества. Выделение из пыли летучих горючих газов также повышает ее взрываемость.

Взрыво- и пожароопасные пыли по степени опасности делят на четыре класса. Критерием является значение НКПРП и температура самовоспламенения. Наиболее взрывоопасные пыли I класса с НКПРП до 15 г/м. К первому классу относятся сера, нафталин, канифоль, сухие сливки, шрот подсолнечный, эбонитовая пыль, молоко сухое, пыль мельничная, шеллак, мясокостная мука.

На НКПРП пыли влияет наличие в ее составе минеральных добавок, не участвующих во взрывообразовании.

4. *Верхний концентрационный предел распространения пламени (ВКПРП), г/м³* - максимальное содержание пыли в воздухе, при котором взрывообразование прекращается, несмотря на наличие прочих необходимых условий.

При концентрациях больше ВКПРП кислорода становится недостаточно для реакции, и процесс прекращается. Между НКПРП и ВКПРП находится концентрация пыли в воздухе, которая является наиболее взрывоопасной. Ей соответствует наибольшее значение взрывного давления. Такое значение, естественно, имеется для каждого вида пыли.

По критерию НКПРП и температуры самовоспламенения взрыво- и пожароопасные пыли делят на четыре класса:

I класс - наиболее взрывоопасные пыли с НКПРП до 15 г/м³;

II класс - взрывоопасные пыли с НКПРП 16...65 г/м³;

III класс - наиболее пожароопасные пыли с температурой самовоспламенения в куче в токе воздуха до 250 °С;

IV класс - пожароопасные пыли, обладающие температурой самовоспламенения выше 250 °С.

НКПРП определяют на установке, схема которой показана на рис. 1.17.

Установка состоит из реакционного сосуда в виде стеклянного цилиндра 1; системы распыления, включающей распылитель 2, электромагнитный клапан 3, вентили 4 и 6, ресивер 7 с манометром 5; источника зажигания (электрической спирали) 9; блока управления 8 с программным реле.

Определение НКПРП пылевоздушных смесей производится согласно методике, сущность которой состоит в зажигании пылевоздушной смеси определенной концентрации в объеме реакционного сосуда и оценке результатов зажигания. Изменяя концентрацию пылевоздушной смеси,

устанавливают ее минимальное значение, при котором происходит воспламенение, т.е. НКПП [2, 6, 7].

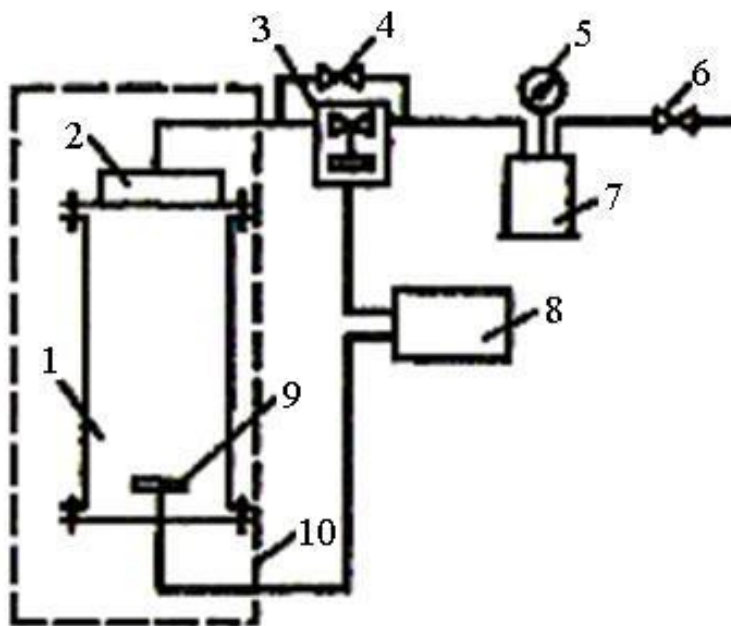


Рис. 1.17. Установка для определения нижнего концентрационного предела воспламенения пылевоздушных смесей (НКПВ):

- 1 - реакционный сосуд; 2 - распылитель; 3 - электромагнитный клапан;
4, 6 - вентили; 5 - манометр; 7 - ресивер; 8 - блок управления;
9 - источник зажигания; 10 - защитный вытяжной шкаф

Следует отметить, что наиболее системная работа по исследованию различных свойств промышленных пылей была проведена в свое время в СФ НИИОГАЗ Л. Я. Скрябиной. Результатом этой работы явилось издание в 1981 году фундаментального атласа промышленных пылей, который не потерял актуальности и в настоящее время [12, 13].

Атлас состоит из трех частей:

- часть первая: летучая зола тепловых электростанций;
- часть вторая: пыли предприятий металлургии, машиностроения и строительной промышленности;
- часть третья: пыли предприятий химической и пищевой промышленности.

К настоящему времени этот атлас стал библиографической редкостью и поэтому был переиздан Холдинговой группой "Кондор Эко – СФ НИИОГАЗ" в 2007 году [12].

Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ

2.1. Краткая историческая справка

Электрофильтры (ЭФ) – аппараты, в которых используются электрические силы для удаления твердых и жидких частиц из газов.

Успешное применение принципа электростатического осаждения пыли в промышленности относится к первым годам XX в. Это связано с именами Лоджа в Англии, Котрелла в США и Меллера в Германии. Лодж экспериментировал в области электростатического осаждения с 1880 г. и указал на возможности, связанные с промышленным использованием данного метода, в научном журнале «НЕЙЧЕ» в 1883 г.

В СССР первый ЭФ был построен в 1925 г. по проекту проф. Ю. В. Баймакова на заводе «Красный выборжец» в Ленинграде для улавливания окиси цинка из отходящих газов. Затем в 1926 г. была спроектирована и сооружена установка с ЭФ на заводе «Победа рабочих» в Ярославле также для улавливания окиси цинка.

Со времени создания первого ЭФ прошло более 120 лет. Несмотря на «солидный» возраст за последние 50-60 лет в отечественных ЭФ произведены изменения, позволившие снизить выбросы пыли из них в десятки раз. Это снижение приближает эффективность ЭФ к эффективности матерчатых фильтров.

2.2. Область применения электрофильтров

Среди других способов обеспыливания газов электрический является наиболее эффективным, а электрофильтр – самым универсальным аппаратом, т.к. сила, обеспечивающая улавливание, приложена непосредственно к частице, несущей электрический заряд. Электрофильтры применяются для обеспыливания газов тепловых электростанций, в промышленности строительных материалов, в металлургии, химической и нефтегазовой промышленности, для очистки газов тепловых двигателей и в других отраслях [10, 14-17]. Необходимо, однако, особо отметить, что универсальность принципа действия электрофильтров ни в коей мере нельзя относить к конструкции аппарата, которая для успешной реализации возможностей электрогазоочистки, должна быть индивидуальной применительно к конкретным условиям его эксплуатации.

Другими словами, конструкции электрофильтров, устанавливаемых в различных отраслях промышленности, имеют существенные отличия. А аппараты, устанавливаемые даже в одной отрасли промышленности, например, в теплоэнергетике, должны иметь индивидуальные особенности,

вплоть до конструктивных отличий, обусловленных проектными, технологическими и режимными особенностями их работы. Основные преимущества электрической очистки газов следующие:

- широкий диапазон производительности – от нескольких тысяч кубических метров в час (очистка выхлопных газов дизелей [17]) до миллионов кубических метров в час на ТЭС;
- степень очистки газов – до 99,9 % и выше;
- гидравлическое сопротивление – не более 0,2 кПа (является основной причиной низких эксплуатационных затрат);
- электрофильтры могут улавливать сухие частицы, капли жидкости и частицы тумана;
- в электрофильтрах улавливаются частицы размером от 0,01 мкм (вирусы, табачный дым) до десятков микрометров.

Преимущественная и экономически более целесообразная область применения электрофильтров – очистка больших объемов газов, отходящих от технологических агрегатов большой мощности, однако, нередко, применение электрофильтров оказывается целесообразным и при очистке малых объемов газов. Работа электрофильтров наиболее эффективна при улавливании пыли с удельным электрическим сопротивлением менее $5 \cdot 10^9$ Ом·м.

Особенностью электрофильтров является высокая чувствительность процессов электрической очистки газов к отклонениям технологического режима от проектного, а также к механическим дефектам внутреннего оборудования, которые могут являться результатом недостаточно тщательного проведения монтажных работ или неквалифицированного обслуживания при эксплуатации.

Применение электрофильтров ограничено, если очищаемый газ представляет собой взрывоопасную смесь или такая смесь может образоваться в ходе процесса в результате отклонения от нормального технологического режима, так как при работе электрофильтра даже при специальных режимах питания существует вероятность возникновения искровых разрядов. В исключительных случаях электрофильтры могут устанавливаться в условиях возможного образования взрывоопасных сред, однако при этом принимаются особые меры предосторожности, включающие специальные конструктивные решения: свободный выход газов в атмосферу, взрывные клапаны, автоматическое выключение электропитания при возникновении взрывоопасных ситуаций и др.

В тех случаях, когда удельное электрическое сопротивление осажденного слоя пыли (УЭС) чрезмерно высоко, применение электрофильтров требует использования специальных мер по снижению УЭС пыли, что удорожает стоимость пылеулавливающей установки.

Для ориентировочного сравнения аппаратов в справочной литературе приводится производительность ЭФ при условно принятой скорости газов в активном сечении электрофильтра, равной обычно 1 м/с (фактическая скорость может существенно отличаться от этой величины в большую или меньшую сторону). Степень очистки газов ЭФ зависит от многих факторов: физико-химических свойств пылегазового потока, скорости и времени пребывания газа в электрофильтре, конструкции электродов, режимов питания и встряхивания электродов, качества газораспределения и др. Степень очистки газов ЭФ неразрывно связана с технологическими и режимными условиями его работы. Величина степени очистки газов ЭФ, требуемый типоразмер, режимы его работы определяются фирмой-разработчиком аппарата по специально разработанным методикам. Для того чтобы правильно выбранный электрофильтр обеспечил проектные показатели, необходимо осуществлять его инженерное сопровождение, начиная от разработки проекта установки и изготовления аппарата и кончая монтажными и пуско-наладочными работами на объекте установки, а при необходимости и надзор при эксплуатации.

2.3. Классификация и краткая характеристика современных электрофильтров

Все электрофильтры по условиям зарядки и осаждения можно разделить на две основные группы: однозонные (зарядка и осаждение частиц происходят в одной конструктивной зоне) и двухзонные (в первой зоне происходит зарядка, во второй – осаждение частиц). Кроме этого существуют группы комбинированных аппаратов (например, циклон + электрофильтр, электрофильтр + фильтр [18], сочетания электрофильтров с мокрыми пылеуловителями и др.). Эти аппараты могут изготавливаться в одном или отдельных корпусах. Для очистки больших объемов газов применяются однозонные электрофильтры. По длине они, как правило, состоят из нескольких последовательно соединенных активных зон - полей, а при очистке очень больших объемов газа электрофильтры могут состоять из параллельно соединенных активных зон - секций. Однозонные электрофильтры по форме осадительных электродов можно классифицировать на два основных вида: пластинчатые и трубчатые. Подавляющее количество пластинчатых аппаратов – сухие, а мокрые – трубчатые. Однако известны пластинчатые мокрые и трубчатые сухие, но их количество ограничено. Пластинчатые электрофильтры разделяют по направлению движения газов в активной зоне на горизонтальные и вертикальные. Основное количество пластинчатых горизонтальных сухих электрофильтров – одноярусные. Эти аппараты имеют целый ряд разновидностей. Двухъярусные элек-

трофилтры позволяют получить увеличение активной зоны электрофилтра в стесненных условиях. Пластинчатые вертикальные электрофилтры преимущественно однопольные.

Трубчатые мокрые электрофилтры подразделяются на аппараты для неагрессивных и агрессивных газов, также могут быть предназначены для холодных и горячих газов.

В зависимости от требований к электрофилтрам и условий, в которых они эксплуатируются, они могут очень сильно отличаться по конструкции. Вариант классификации в зависимости от конструктивных и технологических условий представлен на рис. 2.1.

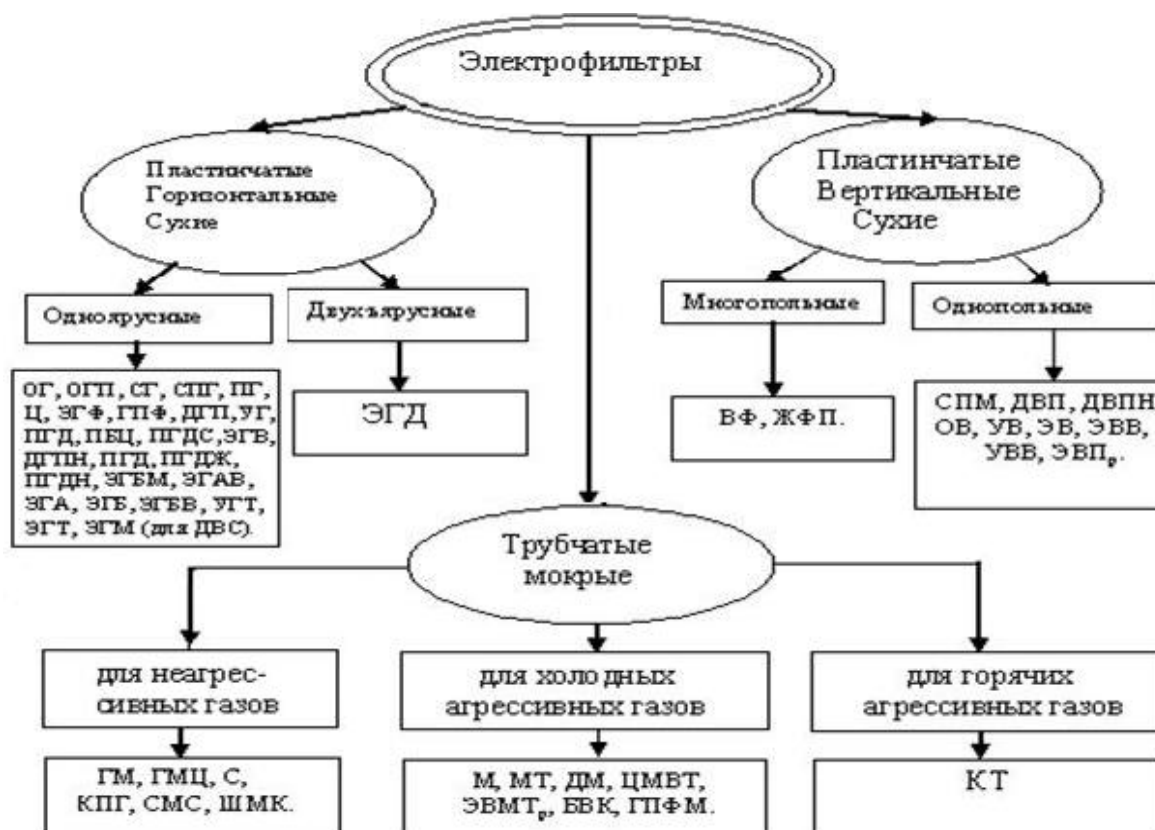


Рис. 2.1. Классификация электрофилтров по конструктивным и технологическим признакам:

ОГ, ОГП - огарковый; СГ - сажевый; СПГ, ПГ - пылевой, генераторный; Ц - цементный; ЭГФ, ГПФ - фосфорный; ПГДС-ПГДН - пылевой горизонтальный (модификации); ЭГА-ЭГБВ - электрофилтр горизонтальный (модификации); УГТ, ЭГТ - высокотемпературный; ЭГМ - для двигателей внутреннего сгорания; ЭГД - двухъярусный; СПМ - для очистки от тумана серной кислоты; ДВП-ДВПН - дымовой вертикальный; ОВ - опытный вертикальный; УВВ, ЭВВ - вертикальный, взрывобезопасное исполнение; ЭВП_р - для плазменной резки; М, ГМ - с шестигранными осадительными электродами; С - смоляной; СМС - содовый; ШМК - мокрый с шестигранными электродами кислотный; МТ - мокрый с трубчатыми осадительными электродами; ДМ - доменный мокрый; ЭВМТ_р - мокрый сернокислотный; БВК - без влияния кромок; ГПФМ - фосфорный; КТ - кислотный, для очистки газов в отделениях концентрированной серной кислоты, высокотемпературный

В настоящее время количество ЭФ в России составляет ориентировочно 5000 шт.

2.3.1. Конструкция электрофильтра

Конструкция конкретного электрофильтра зависит от технологических условий его работы, и определяется в проекте его установки. Основная часть любого электрофильтра – его активная зона, состоящая из коронирующих и осадительных электродов. В активной зоне сухих ЭФ располагаются также устройства для удаления уловленной на электродах пыли. Общий вид горизонтального ЭФ показан на рис. 2.2.

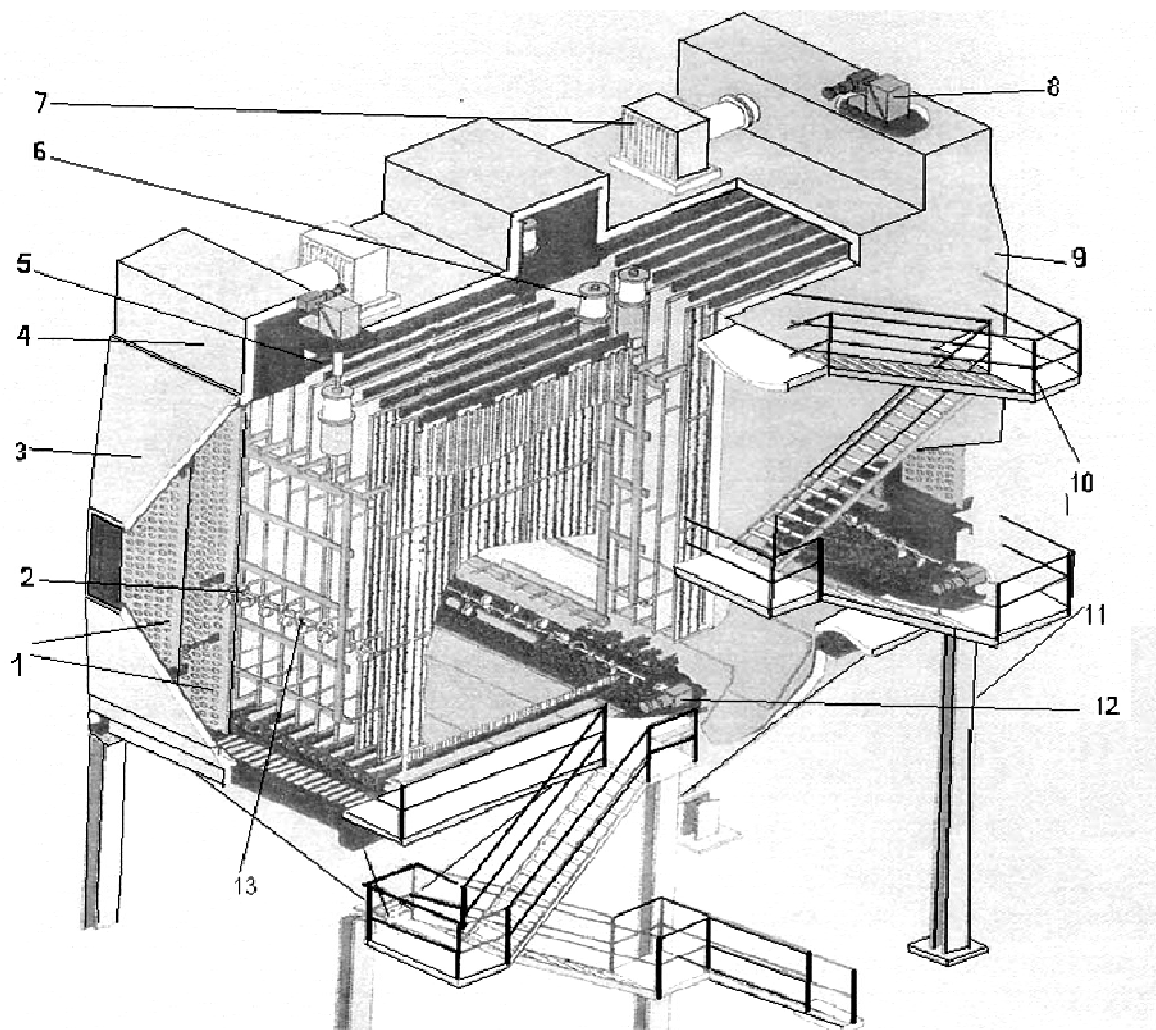


Рис. 2.2. Общий вид горизонтального электрофильтра:

1 - газораспределительная решетка; 2 - механизм встряхивания коронирующих электродов; 3 - диффузор; 4 - ригель; 5 - осадительные электроды; 6 - изолятор; 7 - повысительно-выпрямительный агрегат; 8 - привод встряхивания коронирующих электродов; 9 - корпус ЭФ; 10 - переходные площадки; 11 - стойки; 12 - привод встряхивания осадительных электродов; 13 - коронирующие электроды

Питание электрофильтров током высокого напряжения (рис. 2.3) осуществляется от сети 380 В через высоковольтный трансформатор 3 и регулятор напряжения 1 управляемым блоком 2. Отрицательный полюс выпрямителя 4 подсоединяется к коронирующим электродам 6, расположенным между осадительными электродами 7. В межэлектродном промежутке при подаче высокого напряжения, благодаря резкой неравномерности поля, происходит коронный разряд. Ток и напряжение в электрофильтре измеряются амперметром и киловольтметром.

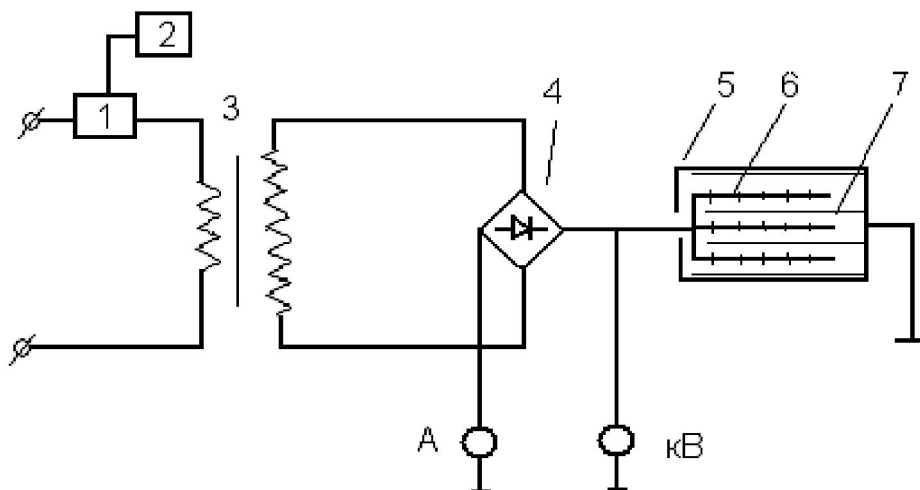


Рис. 2.3. Схема питания электрофильтра током высокого напряжения:

- 1 - регулятор напряжения; 2 - блок управления регулятором напряжения; 3 - повысительный трансформатор;
4 - выпрямитель; 5 - корпус электрофильтра;
6 - коронирующие электроды; 7 - осадительные электроды

На рис. 2.4 и 2.5 показаны схемы пластинчатого и трубчатого электрофильтров. В пластинчатых электрофильтрах газ проходит между коронирующими 5 и осадительными электродами 2 горизонтально.

Коронирующие электроды 4 изготовлены из трубчатых рам и подвешены на опорно-проходных изоляторах 6, в рамках расположены коронирующие элементы 5. Элементы осадительного электрода крепятся на балках подвеса, а в нижней части соединены полосой встряхивания 1. Для удаления уловленной на электродах пыли устанавливаются механизмы встряхивания 7 и 8.

В трубчатом электрофильтре газ проходит вертикально. В центре осадительных электродов 3 подвешиваются на балке подвеса 1 коронирующие элементы 2 с грузами 4. Удаление уловленной пыли в вертикальных трубчатых электрофильтрах происходит путем смыва с помощью жидкости.

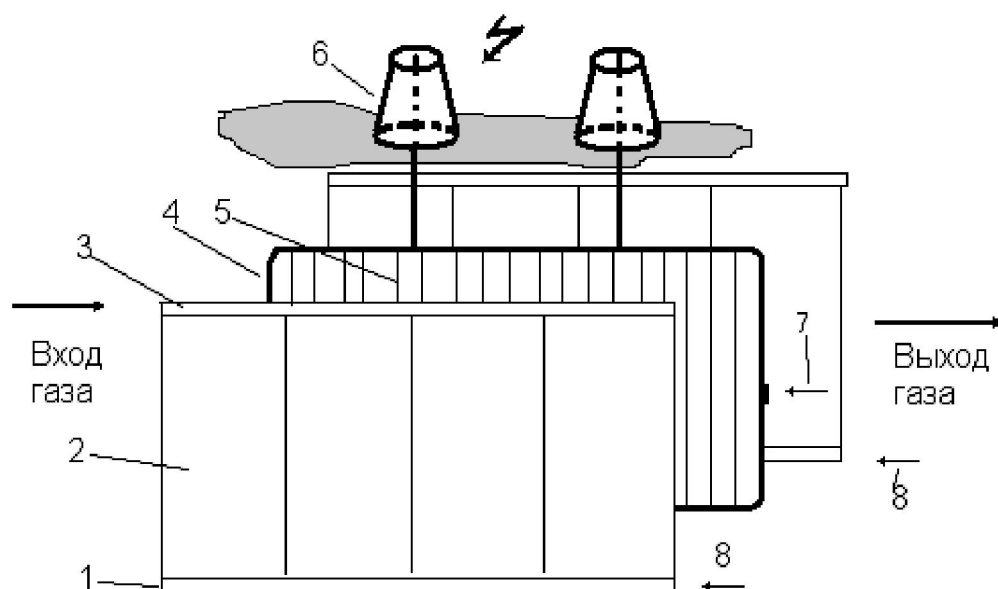


Рис. 2.4. Схема пластинчатого электрофильтра:

1 - полоса встряхивания осадительного электрода; 2 - элемент осадительного электрода; 3 - балка подвеса осадительного электрода; 4 - рама коронирующего электрода; 5 - коронирующий элемент; 6 - опорно-проходной изолятор; 7 - механизм встряхивания коронирующих электродов; 8 - механизм встряхивания осадительных электродов

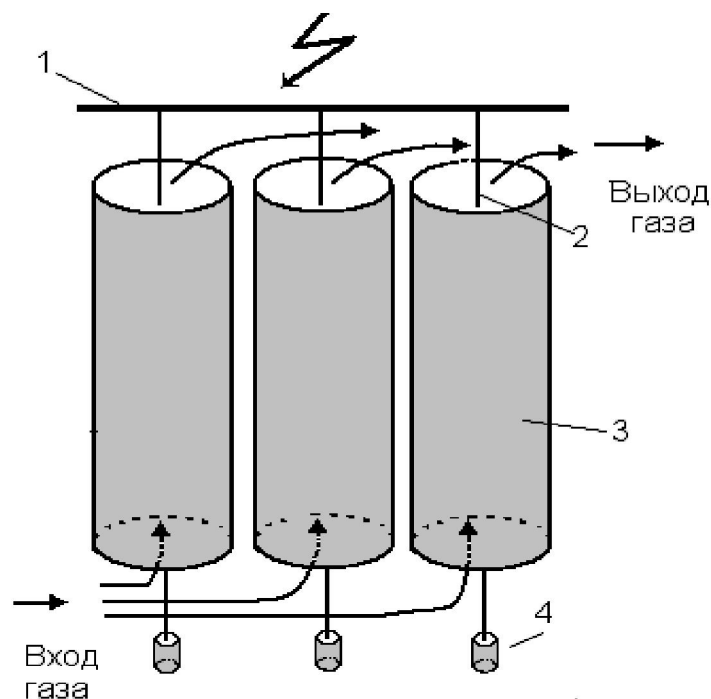


Рис. 2.5. Схема трубчатого электрофильтра:

1 - балка подвеса коронирующих элементов; 2 - коронирующий элемент; 3 - осадительный электрод; 4 - груз

2.3.2. Коронирующие электроды

Коронирующие электроды должны обеспечивать требуемые электрические параметры вольтамперной характеристики (ток, пробивное напряжение, напряжение зажигания короны). Они должны обладать невысокой металлоемкостью, температурной стойкостью, надежностью, хорошей отряхиваемостью. В отечественных промышленных электрофильтрах применялись коронирующие элементы проволочные диаметром 1,5...2,2 мм и элементы штыкового сечения размером 4x4 мм, а также коронирующие элементы, с различной степенью жесткости и расположением коронирующих шипов (игл). Наибольшее распространение получили ленточно-игольчатые и ленточно-зубчатые. В последнее время используются коронирующие элементы с малым радиусом кривизны концов коронирующих игл (рис. 2.6, тип СФ-1). Применение элементов СФ-1 позволяет снизить напряжение зажигания короны до 8...15 кВ и интенсифицировать процесс зарядки и осаждения частиц [19, 20].

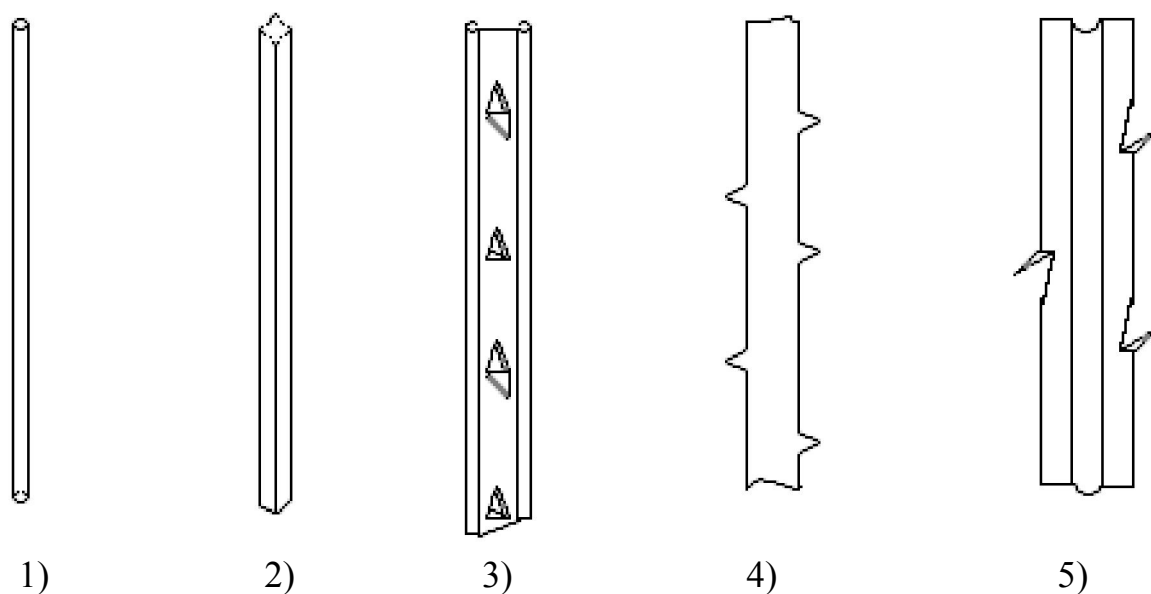


Рис. 2.6. Коронирующие электроды электрофильтров:

- 1 - провод диаметром 1,5...2,2 мм; 2 - элемент штыкового сечения;
3 - ленточно-игольчатый элемент; 4 - ленточно-зубчатый элемент;
5 - элемент типа СФ-1

Напряжение зажигания короны для электрода СФ-1 (рис. 2.7) составляет 8...15 кВ, а для ленточно-игольчатых 25...30 кВ. Токи коронного разряда у коронирующих электродов СФ-1 при одинаковых напряжениях значительно выше, что позволяет повысить эффективность электрофильтров типа ЭГАВ по сравнению с аппаратами ЭГА.

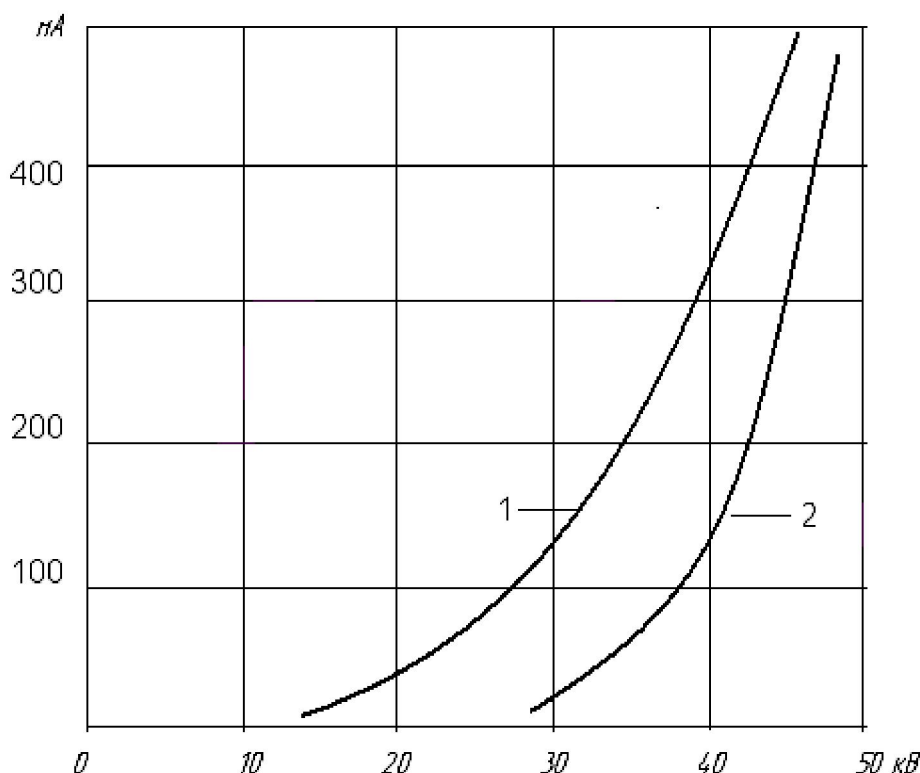


Рис. 2.7. Сравнение вольтамперных характеристик коронирующих электродов:

- 1 - коронирующий электрод СФ-1;
2 - коронирующий электрод ленточно-игольчатый

2.3.3. Осадительные электроды

На поверхности осадительных электродов улавливается основная масса (примерно 99 %) пыли содержащейся в газах. Требования к осадительным электродам можно сформулировать следующим образом:

- обеспечение поверхности осаждения, создающей электрическую равнопрочность промежутка и равномерное распределение тока короны по поверхности осадительных элементов;
- создание конструкций, обеспечивающих наиболее равномерное распределение отряхивающего импульса по всей его поверхности при встряхивании и необходимой механической прочности, при многократных циклах встряхивания;
- отсутствие температурных деформаций;
- обеспечение минимального уноса при встряхивании и осаждении пыли.

В электрофильтрах использовались различные типы осадительных электродов (рис. 2.8): сетчатые, прутковые, волнообразные, «С»-образные узкополосные. В последнее время преимущественное применение получили широкополосные осадительные электроды.

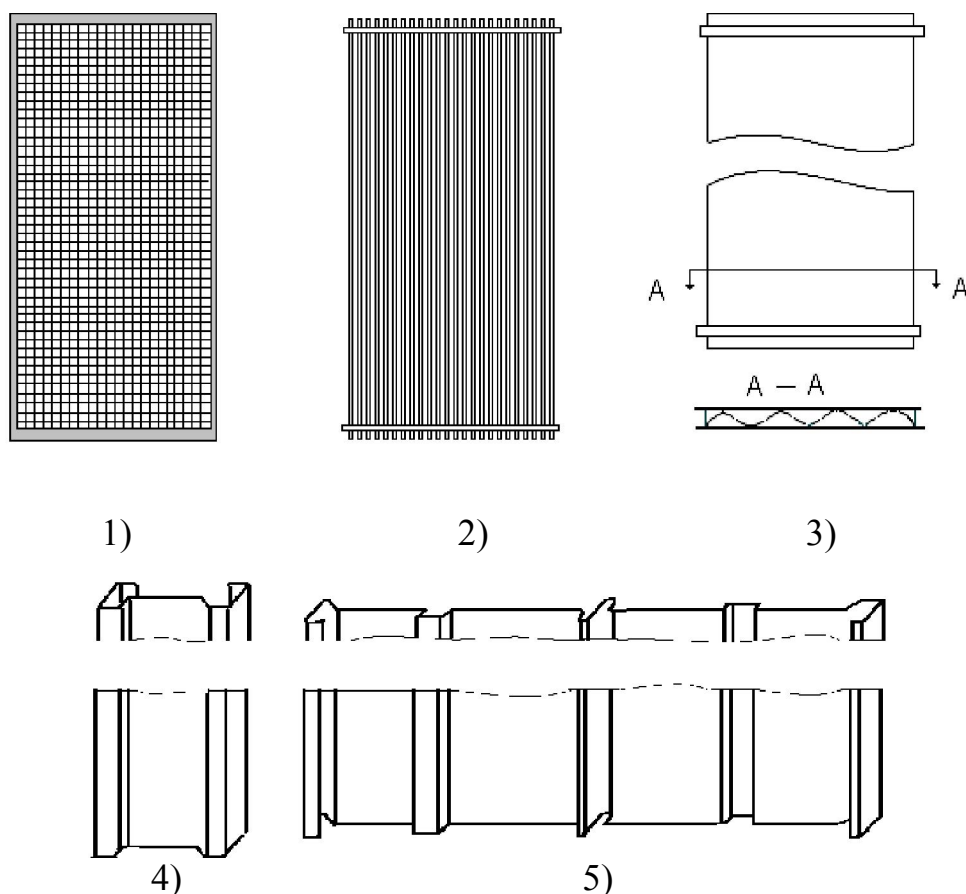


Рис. 2.8. Осадительные электроды электрофильтров:

1 - сетчатый; 2 - прутковый; 3 - волнообразный; 4 - «С»-образный узкополосный элемент осадительного электрода; 5 - широкополосный осадительный элемент типа ЭКО МК 4x160

Типичное поперечное сечение активной зоны электрофильтра приведено на рис. 2.9. Межэлектродное расстояние между коронирующими и осадительными электродами в современных электрофильтрах может составлять 150, 175, 200, 230 мм.

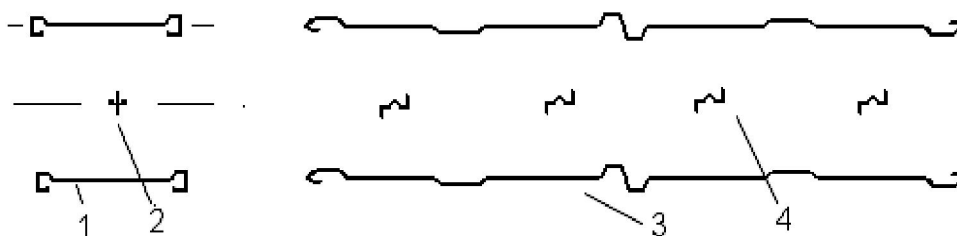


Рис. 2.9. Поперечное сечение активной зоны электрофильтра:

1 - «С»-образный узкополосный осадительный элемент; 2 - ленточно-зубчатый коронирующий элемент; 3 - широкополосный осадительный элемент ЭКО МК 4x160; 4 - коронирующий элемент СФ-1

2.3.4. Устройства удаления пыли, осаждающей на электродах

В настоящее время в электрофильтрах применяется преимущественно ударно-молотковое встряхивание. Механизм встряхивания осадительных электродов состоит из вращающегося в пылевых подшипниках вала с «опрокидывающимися» молотками. Конструкция обладает удовлетворительной надежностью. Основной ее недостаток – невозможность оперативного изменения силы удара бойка по наковальне при встряхивании осадительных электродов.

Для встряхивания коронирующих элементов используется ударно-молотковый механизм с одновременным подъемом всех молотков поля и последующим их сбросом. Сила удара в этом механизме может изменяться путем изменения угла подъема бойков. Более простой является схема механизма при боковом размещении привода и установке вала-изолятора непосредственно на входе в корпус электрофильтра. Однако эта схема также исключает оперативное регулирование силы удара бойков.

2.4. Принцип действия электрофильтров

Процесс электрической очистки газов можно разделить на стадии зарядки частиц, движения их к электродам, осаждения на электродах и регенерации электродов. Частицы, как правило, получают отрицательный электрический заряд в поле коронного разряда и движутся под действием электрического поля к заземленным электродам, оседают на них и после регенерации электродов собираются в бункерах. Небольшая часть пыли, примерно 0,5-1 % от общего количества, приобретает положительный заряд и осаждается на коронирующих электродах и также периодически удаляется. Межэлектродный промежуток электрофильтра, в котором создается поле коронного разряда и происходят процессы улавливания частиц, показан на рис. 2.10. К иглам коронирующих электродов 1 подключен отрицательный полюс источника высокого напряжения. Осадительный электрод 2 заземлен и имеет положительный потенциал. Крупные частицы двигаются по траектории 3 и оседают раньше, чем мелкие, имеющие меньший заряд. Мелкие частицы двигаются по траектории 4. Положительно заряженные частицы двигаются по траектории 5 и осаждаются на коронирующих электродах. Характер распределения пыли по длине осадительного электрода, за исключением начальной части, близок к экспоненте 6.

Для создания электрического поля в электрофильтрах применяются повысительно-выпрямительные агрегаты напряжением 80 кВ и выше с системами регулирования, обеспечивающими требуемый режим питания.

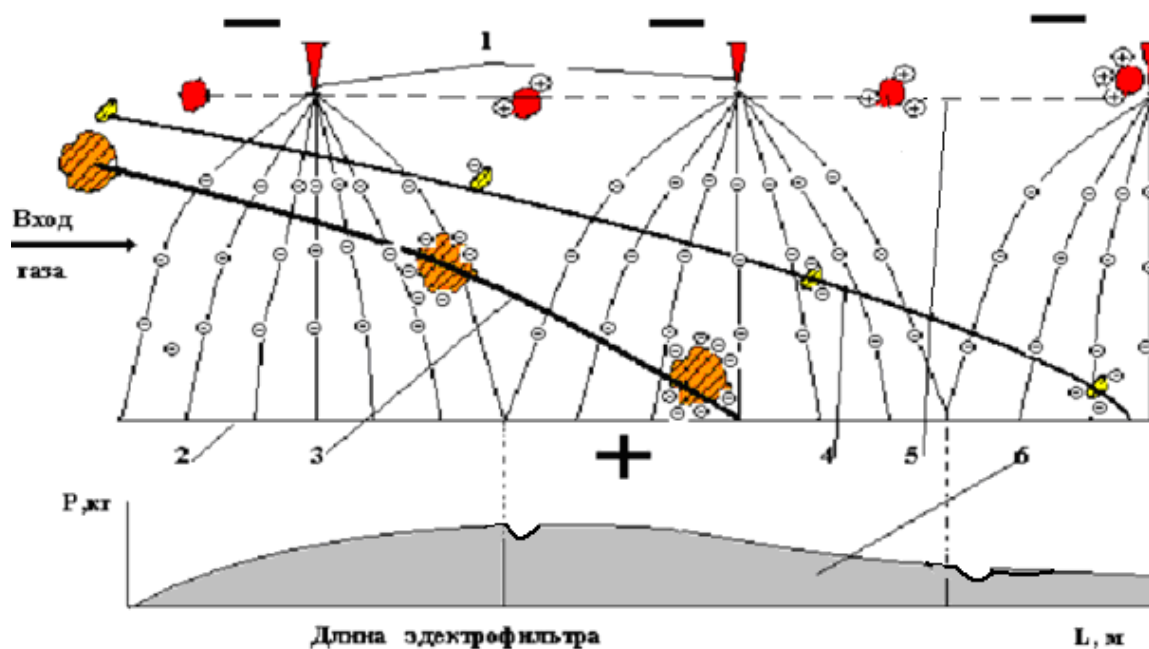


Рис. 2.10. Упрощенная схема зарядки и осаждения частиц пыли в электрофильтре:

- 1 - иглы коронирующих элементов; 2 - осадительный электрод;
 3, 4 - траектории движения крупной и мелкой отрицательно заряженных частиц пыли соответственно; 5 - траектория положительно заряженной частицы; 6 - характер распределения пыли (P , кг) по длине осадительного электрода (L , м)

2.4.1. Процесс зарядки частиц

При подаче на коронирующий электрод отрицательного потенциала высокого напряжения отрицательные ионы и электроны движутся к осадительным электродам. Небольшая часть положительных ионов, образующаяся в зоне чехла короны, движется к коронирующему электроду. Ионы на своём пути к электродам сталкиваются с частицами пыли и оседают на них. Заряженная отрицательно пыль скапливается на осадительных электродах. Величина заряда определяется напряженностью электрического поля и увеличивается с увеличением размера частиц. Она также зависит от диэлектрической проницаемости частиц. Сам процесс зарядки обусловлен ионной бомбардировкой под действием электрического поля и тепловым движением ионов. Время зарядки частиц в обычных условиях (при умеренной запыленности газа) невелико и составляет примерно 0,1 с. За это время частица заряжается примерно на 95%.

2.4.2. Движение заряженных частиц в электрическом поле

Основная сила F (в Н), движущая частицу к осадительным электродам, равняется произведению заряда q (Кл) на напряженность электрического поля E (В/м).

$$F = qE. \quad (2.1)$$

Вдоль электрофильтра частица движется под действием потока газа. Кроме этих сил на частицу действуют сила тяжести, электрический ветер и др. Однако при упрощенных расчетах ими пренебрегают. Приравнивая силу электрического поля силе сопротивления среды (газа) по закону Стокса при движении частицы к осадительному электроду в перпендикулярном к нему направлении, получают

$$F = qE = 6\pi\omega r\mu, \quad (2.2)$$

где ω - скорость дрейфа, м/с;

r - радиус частицы, м;

μ - коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Если принять показатель диэлектрических свойств частицы равным 2, напряженность зарядки равной напряженности поля осаждения частицы, то для частиц размером от 2 до 50 мкм скорость дрейфа составит

$$\omega = 0,118 \frac{E^2}{\mu} r 10^{-10}. \quad (2.3)$$

Для частиц диаметром 0,1...2 мкм в это уравнение вводится поправка Каннинггея [14]. В формуле (2.3) учтены не все силы, действующие на частицу. Кроме того, она не учитывает целый ряд процессов, происходящих в электрофильтрах. В связи с этим упрощенный расчет скорости дрейфа, как правило, подлежит уточнению с использованием экспериментальных данных.

2.4.3. Осаждение частиц и регенерация электродов

После осаждения пыли на электроды происходит стекание с неё зарядов со скоростью, зависящей от удельного электрического сопротивления слоя. При накоплении некоторого количества пыли на электродах, она должна удаляться. Удаление пыли в сухих ЭФ производят преимущественно путем ее отряхивания. Под оптимальным количеством отряхиваемой пыли следует понимать такое её количество, при котором обеспечивается минимальный ее унос при встряхивании на максимальном электрическом режиме питания, т.е. обеспечивается максимальная для данных условий степень очистки газов.

Оптимальное количество пыли перед встряхиванием электродов характеризуется оптимальной пылеемкостью, которая зависит от удельного электрического сопротивления слоя пыли.

Правильно выбранные режимы встряхивания осадительных и коронирующих электродов позволяют снизить выбросы пыли из ЭФ до трех раз по сравнению с непрерывным встряхиванием (удар по осадительному электроду наносится через 3...5 минут) электродов и, кроме того, увеличить срок службы узлов встряхивания в несколько раз.

2.5. Степень очистки газов электрофильтрами

Основная характеристика ЭФ – степень очистки газов. Величина степени очистки в значительной мере определяется типоразмером электрофильтра, его конструктивными особенностями, способом и режимом питания полей, а также зависит от физико-химических свойств газа и улавливаемых частиц. Наиболее сильное влияние на степень очистки газов в электрофильтрах оказывают удельное электрическое сопротивление пыли, скорость и распределение газов в активной зоне электрофильтра, дисперсный состав пыли. Количество методик для расчета степени очистки газов электрофильтром составляет несколько десятков. Такое количество объясняется тем, что каждая из методик предназначена для ограниченных видов конструкций и технологических условий. Методики, претендующие на универсальность, отличаются сложностью и обилием полуэмпирических коэффициентов.

Расчет степени очистки газов ЭФ

В настоящее время все способы расчета степени очистки газов ЭФ основаны на экспоненциальной зависимости (формула Дэйча):

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\omega L}{H_0 V}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\omega S}{Q}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{\omega t}{H_0}\right), \quad (2.4)$$

где L - длина активной зоны ЭФ, м;

H_0 - межэлектродное расстояние, м;

V - скорость газов в активной зоне ЭФ, м/с;

S - площадь осаждения ЭФ, м²;

Q - объем очищаемых газов, м³/с;

t - время пребывания газов в ЭФ, с.

При правильно найденном значении скорости дрейфа ω степень очистки газов будет определена с достаточной точностью. Простейший теоретический расчет скорости дрейфа можно выполнить по формуле (2.5) для размера частиц в диапазоне 2...50 мкм и диэлектрической проницаемости, равной 2.

$$\omega = 0,118 \frac{E_3 E_0 r}{\mu} 10^{-10}, \quad (2.5)$$

где E_3 - напряженность электрического поля зарядки, В/м;

E_0 - напряженность электрического поля осаждения, В/м;

Таким образом, расчет степени очистки газов в этом случае сводится к определению параметра ω по формуле (2.5) и расчету η по формуле (2.4).

Однако расчет величины скорости дрейфа по этим формулам не учитывает ряд влияющих параметров (проскок пыли через неактивные и полуактивные зоны, вторичный унос пыли при осаждении и встряхивании электродов, пробой слоя пыли и выброс частиц в межэлектродный промежуток при улавливании высокоомной пыли (обратная корона) и др. Поэтому величину скорости дрейфа, рассчитанную по формуле (2.5), уменьшали для электрофильтров предыдущих поколений в два раза. При наличии прототипа скорость дрейфа нередко выбирают на основе аналога [21].

Более точно величину ω при выборе электрофильтров определяют с помощью специальных программ на ЭВМ [22, 23]. Пример простейшего выбора электрофильтра приведен в разделе 2.7.

2.6. Методы повышения степени очистки газов электрофильтрами

Параметры, влияющие на степень очистки газов в электрофильтрах можно разделить на технологические, режимные, конструктивные и проектные.

Технологические параметры эксплуатации ЭФ имеют сильное влияние на степень очистки газов. В процессе эксплуатации они могут изменяться по различным причинам. При этом для обеспечения минимальных выбросов пыли из ЭФ необходимо отслеживать их изменение и учитывать, изменяя соответствующим образом режимы работы ЭФ.

Конструктивные параметры ЭФ, находящихся в эксплуатации, уже заданы. Необходимость их изменения может возникнуть при существенном изменении условий работы ЭФ. Для изменения конструктивных элементов требуется останов ЭФ. Этим дорогостоящим работам должны предшествовать расчеты или предварительные эксперименты, определяющие их эффективность и экономическую целесообразность.

Изменение проектных параметров электрогазоочистной установки также является дорогостоящей операцией. Эти работы, как правило, должны выполняться с участием проектной организации.

2.6.1. Технологические методы

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) слоя пыли

Одним из основных технологических параметров, определяющих степень очистки газов электрофильтрами, является УЭС, поступающих на очистку пылевых частиц. В литературе изучению влияния УЭС пыли уделено большое внимание [10, 14-16, 22-26].

Зависимость УЭС пыли от температуры, влажности, дисперсного и химического состава, и других параметров используется для повышения степени очистки газов путем подготовки газов перед электрофильтрами с целью улучшения улавливаемости пыли.

Группы пыли по величине УЭС

По величине УЭС в настоящее время принято разделять пыли на три группы:

- до 10^2 Ом·м;
- от 10^2 до 10^8 Ом·м;
- более 10^8 Ом·м.

Пыли с УЭС более 10^8 Ом·м приводят к большому падению напряжения в слое на осадительном электроде и его электрическому пробое, что резко снижает улавливаемость пыли. Кроме того, высокоомная пыль труднее отряхивается с электродов. Скорость дрейфа частиц при улавливании пылей третьей группы, как правило, не превышает 0,03...0,04 м/с. Если улавливается мелкая пыль, вызывающая запыление короны, то возможно снижение скорости дрейфа ниже 0,03 м/с.

Известные методики измерения УЭС пыли ориентированы на измерение слоя пыли, осевшей на осадительных электродах, или на измерение проб пыли, отобранных из потока газа на входе или выходе электрофильтра или из бункеров.

Поверхностное и объёмное УЭС

Электрическое сопротивление слоя определяется поверхностным R_n и объёмным R_0 сопротивлением частиц. На поверхностное сопротивление сильное влияние оказывает наличие в газе влаги, кислот. Увеличение влажности пыли от 1 до 15 % может приводить к уменьшению величины УЭС от одного до трех порядков и более [24]. Объёмное сопротивление частиц снижается при повышении температуры.

Влияние УЭС на некоторые параметры ЭФ

Влияние УЭС слоя пыли на осадительных и коронирующих электродах на скорость дрейфа можно охарактеризовать с помощью графика на рис. 2.11.

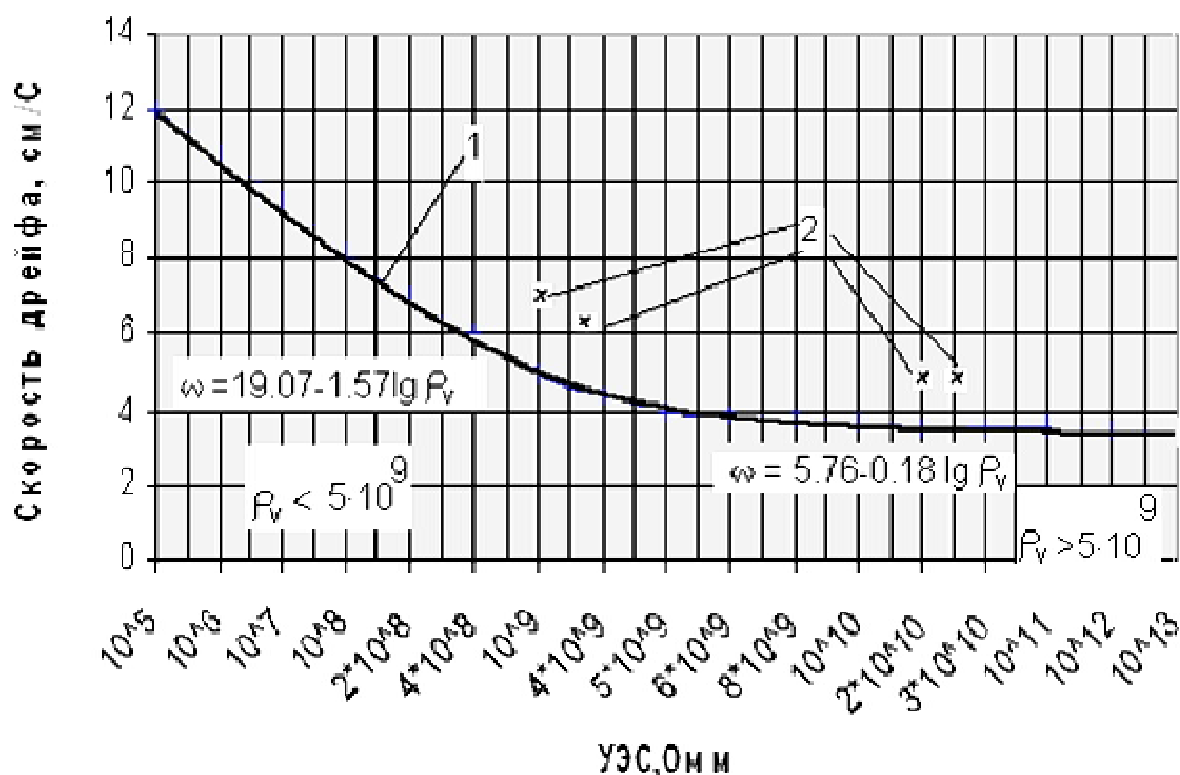


Рис. 2.11. Экспериментальная зависимость скорости дрейфа от УЭС отечественных ЭФ:

1 - электрофильтры СССР; 2 - электрофильтры ЗАО «Кондор-Эко» четвертого поколения [15]

Осаждение низкоомной пыли на коронирующих участках (концах игл) приводит к увеличению их радиуса кривизны, увеличению напряжения зажигания короны, снижению тока короны и, как следствие, к снижению степени очистки газов. Осаждение высокоомной пыли на коронирующих участках приводит к её пробое и не вызывает быстрого снижения тока короны.

При осаждении низкоомной пыли на осадительных электродах может происходить её срыв потоком газа, если скорость его больше примерно 0,5 м/с. Осаждение высокоомной пыли приводит к обратной короне на осадительном электроде.

Дисперсность улавливаемой пыли

Влияние размера частиц на степень очистки газов в электрофильтре сказывается в первую очередь через величину их электрического заряда, который определяет (при данной напряженности электрического поля) скорость их движения.

Из табл. 2.1 следует, что расчетная скорость движения частиц радиусом 1 мкм и более прямо пропорциональна их размеру, а частиц радиусом менее 1 мкм мало зависит от их размера и изменяется с изменением напряженности поля. Очевидно, что увеличение содержания мелких частиц будет снижать степень очистки газов.

**Таблица 2.1. Скорость движения заряженных частиц
в электрическом поле коронного разряда**

Радиус частицы, мкм	Скорость движения ω_n , м/с	
	$E = 15 \cdot 10^4$ В/м	$E = 30 \cdot 10^4$ В/м
0,2	0,012	0,025
0,5	0,013	0,030
1,0	0,015	0,060
5,0	0,0715	0,300
10,0	0,15	0,600

При скоростях газов в активной зоне электрофильтра, превышающих 1 м/с улавливание крупных частиц происходит преимущественно на первых полях и сопровождается эрозией слоя, что может снижать степень очистки газов.

Анализ дисперсного состава пыли, улавливаемой в промышленных электрофильтрах, при отборе проб методом фильтрации на входе и выходе и из бункеров показывает экспоненциальное распределение размеров улавливаемых частиц по длине электрофильтра.

Скорость газов

Величина скорости газов в активном сечении электрофильтра определяется с помощью пневмометрических трубок путем измерения в скорости газов в газоходах на входе и выходе ЭФ. Далее производится расчет скорости газа V (м/с) с учетом величины сечения F (м²) и объёма Q (м³/ч) газов по формуле

$$V = Q/F. \quad (2.6)$$

Для периодического контроля скорости газа в электрофильтре достаточно после снятия полей скоростей в газоходах производить измерение скоростей в контрольных точках газоходов. Зависимость степени очистки η от скорости газов V в электрофильтре хорошо изучена:

$$\eta = 1 - \exp(-k/V), \quad (2.7)$$

$$k = \frac{\omega L}{H_0},$$

где S - площадь осаждения электрофильтра, м²;

Q - производительность, м³/с;

L - длина активной зоны, м;

H_0 – межэлектродное расстояние, м.

Для конкретного электрофилтра эта зависимость может быть построена следующим образом.

Пусть, например, электрофилтр имеет длину активной зоны $L = 9,6$ м (3,2х3), межэлектродное расстояние $H_0 = 0,15$ м, экспериментально найденная при приемочных испытаниях скорость дрейфа $\omega = 0,1$ м/с. Тогда формула (2.7) будет иметь вид

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{0,1 \cdot 9,6}{0,15 \cdot V}\right) = 1 - \exp(-6,4/V),$$

а зависимость степени очистки от скорости газа будет иметь вид, представленный в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Зависимость степени очистки газов и выбросов пыли от скорости газа в активной зоне электрофилтра

Параметр	Скорость газов, V (м/с)				
	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1
Степень очистки газов η	0,9992	0,9988	0,9983	0,9977	0,9970
Выбросы пыли, $(1 - \eta)$	0,0008	0,0012	0,0017	0,0023	0,0030
Относительные выбросы пыли	0,47	0,7	1,0	1,35	1,76

Из табл. 2.2. следует, что снижение скорости газов с 1,0 до 0,9 м/с, т.е. на 10 %, снижает выбросы более чем в два раза; увеличение скорости газов с 1,0 до 1,1 м/с приводит к возрастанию выбросов в 1,76 раза.

Температура очищаемых газов

Изменение температуры очищаемых газов, поступающих на очистку в электрофилтр, оказывает влияние на степень очистки газов посредством изменения скорости газов, снижения УЭС пыли на электродах, изменения вольтамперных характеристик полей электрофилтра.

Изменение вольтамперных характеристик (далее В.А.Х.) при различных температурах приведено на рис. 2.12.

При увеличении температуры величина напряжений, при которых будет проходить электрический пробой, уменьшается по причине снижения электрической прочности межэлектродного промежутка. При температуре выше 250 °С колебания напряжения даже в небольших пределах вызывают значительное изменение тока. Экспериментально установлено, что В.А.Х. зависит от температуры газов в той мере, в какой эти параметры влияют на плотность газов. Таким образом, снижение температуры (но не ниже точки росы, что вызывает коррозию) повышает степень очистки газов.

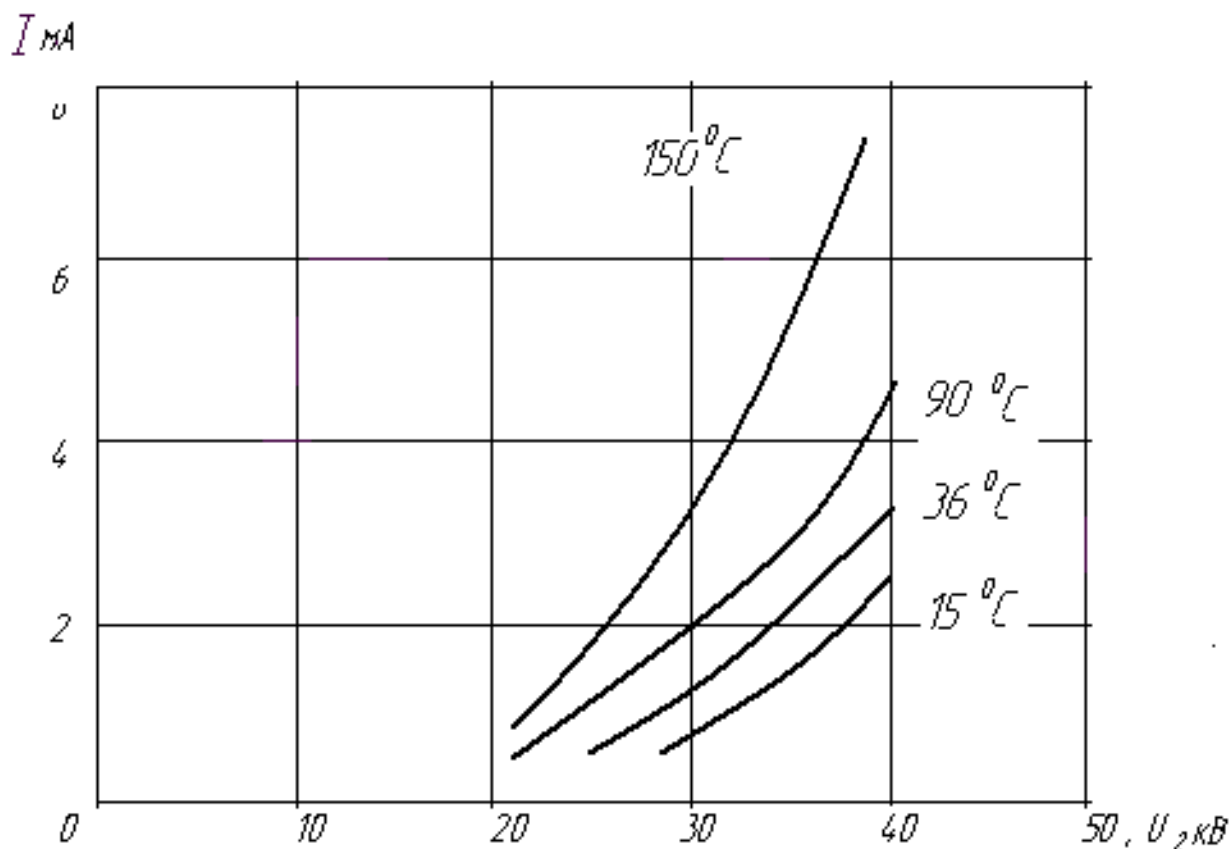


Рис. 2.12. Вольтамперные характеристики электрофилтра в зависимости от температуры газов

Влажность газов

Увеличение влажности очищаемых газов приводит к снижению тока короны в электрофилтре. Зависимость тока короны от содержания влаги имеет вид, приведенный на рис. 2.13. Повышение эффективности электрофилтров, связанное с увеличением влагосодержания газов объясняется абсорбцией влаги на частицах пыли, что приводит к снижению УЭС пыли в слое.

Содержание дисперсной фазы в очищаемых газах

Качественное влияние содержания дисперсной фазы на степень очистки газов электрофилтром можно изобразить зависимостью, приведенной на рис. 2.14.

Величина степени очистки газов электрофилтром определяется для заданных технологических условий типоразмером выбранного аппарата. При умеренной концентрации дисперсной фазы примерно в диапазоне от 5...10 до 40...90 г/м³ степень очистки может быть представлена участком В.

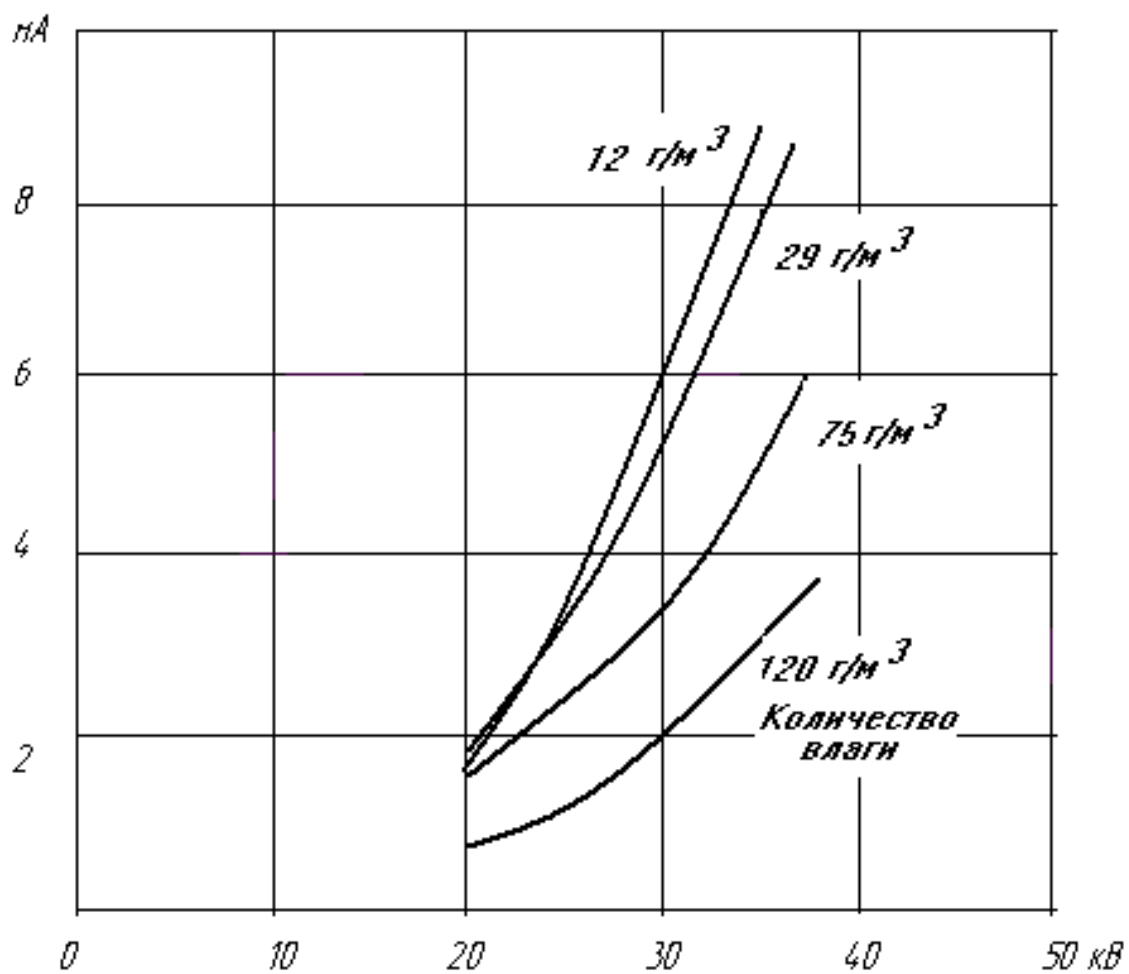


Рис. 2.13. Зависимость вольтамперных характеристик электрофильтра от влажности газа



Рис. 2.14. Характер зависимости степени очистки газов от концентрации дисперсной фазы

При малой концентрации дисперсной фазы степень очистки характеризуется участком *A*. Здесь снижение степени очистки обусловлено тем, что в большинстве технологических процессов малые концентрации пыли содержат частицы малого размера.

В случае высокой концентрации дисперсной фазы (участок *C*), снижение степени очистки газов обусловлено запирающим действием объемного заряда пылевых частиц. При этом основная часть носителей заряда осаждается на пылевых частицах. В тех случаях, когда концентрация и плотность объёмного заряда частиц распределены равномерно по сечению межэлектродного промежутка (при мелких частицах и турбулентном их перемешивании) происходит полное закиривание коронного разряда, т.е. ток ионов практически прекращается. В этом случае на начальной части активной зоны осаждение частиц резко ослаблено. Процесс закиривания короны практически прекращается после того как снижение тока будет меньше, чем на 30 %, а снижение напряженности менее 10 %. Для повышения степени очистки газов при высоком содержании дисперсной фазы применяются коронирующие электроды типа СФ-1 и предварительные ступени очистки газов.

2.6.2. Режимные методы

Питание электрофильтра током высокого напряжения

Важным этапом оптимизации питания электрофильтров должен быть выбор формы и частоты питающего напряжения. Так при улавливании высокоомной пыли (например, золы экибастузского угля) эффективным является применение специальных приставок, вырабатывающих импульсы тока со специальными параметрами.

Сущность настройки системы автоматического управления заключается в создании максимально возможного напряжения на электродах электрофильтра с обеспечением оптимальной величины тока короны. При этом подлежат настройке частота искровых пробоев, время и глубина отработки системы регулирования, ряд других параметров.

Обслуживающим персоналом предварительная настройка режима работы агрегатов питания может быть осуществлена по числу искрений в поле. Известно, что при малом количестве искрений величина напряжения может быть существенно ниже оптимального значения.

В первом приближении можно считать, что оптимальное количество искрений *I* (1/мин) зависит от УЭС пыли (ρ_V , Ом·м):

$$I = 12 \lg \rho_V. \quad (2.8)$$

Определив приближенное требуемое значение количество искрений в электрофилт্রে, (так, например, при $\rho_v = 10^8$, $I = 96$; при $\rho_v = 10^{10}$, $I = 120$) можно изменить количество искрений, например, на $\pm 10-15\%$ и путем пылегазовых измерений определить изменение выходной запыленности, таким образом, уточнить оптимальное количество искрений.

Режим встряхивания электродов

Оптимизация режимов встряхивания электродов электрофилтров до середины 80-х годов осуществлялась путем перебора различных вариантов на основании имеющегося опыта [27]. Применение расчетной методики оптимизации встряхивания осадительных электродов при эксплуатации электрофилтров показывает, что оптимизация встряхивания осадительных электродов позволяет снизить выбросы пыли из электрофилтров в 1,3-3 раза по сравнению с непрерывным режимом встряхивания [24, 26]. Кроме того, происходит значительное снижение механического износа узлов встряхивания, увеличивается межремонтный пробег и снижается объем ремонтных работ на электрофилт্রে.

Осадительные электроды

Как правило, наибольший эффект снижения выбросов имеет место при улавливании пыли, имеющей невысокое УЭС. Периодичность встряхивания осадительных электродов горизонтального электрофилтра может быть рассчитана. Интервал встряхивания τ_n (мин) для любого поля можно определить по формуле (2.9) [28]:

$$\tau_n = 16,7 \frac{S_n m_0}{Q Z_{\text{вх}} \eta_{\text{п}}}, \quad (2.9)$$

где S_n - площадь осаждения поля, м^2 ;

m_0 - пылеемкость осадительных электродов поля, $\text{кг}/\text{м}^2$,

$m_0 = 3,14 - 0,25 \lg \rho_v$;

ρ_v - удельное электрическое сопротивление улавливаемой пыли, $\text{Ом} \cdot \text{м}$;

Q - количество газов, поступающих в поле, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Z_{\text{вх}}$ - запыленность на входе в поле электрофилтра, $\text{г}/\text{м}^3$;

$\eta_{\text{п}}$ - степень очистки газов полем электрофилтра, д. ед.

При допущении равенства скорости дрейфа по полям степень очистки газов в любом поле электрофилтра будет равна

$$\eta_{\text{п}} = \sqrt[N]{1 - \eta_{\text{эф}}}, \quad (2.10)$$

где $\eta_{\text{эф}}$ - степень очистки газов электрофильтром при кратковременном отключении встряхивания электродов, д. ед.;

N - количество последовательных полей в электрофильтре.

При расчете интервалов встряхивания вертикального электрофильтра может быть применена следующая формула:

$$\tau_{\text{п}} = 16,7 \frac{m_0 L}{H V_r Z_{\text{вх}} \eta}, \quad (2.11)$$

где L - длина поля по ходу газов вертикального электрофильтра, м;

H - расстояние между коронирующим и осадительным электродом, м;

V_r - скорость газов в активном сечении, м/с;

η - степень очистки газов в электрофильтре при кратковременном отключении механизмов встряхивания, д. ед.

Коронирующие электроды

При оптимальном режиме встряхивания коронирующих электродов должен поддерживаться такой слой пыли на коронирующих элементах, при котором ток короны обеспечивает наиболее эффективное улавливание пыли в электрофильтре. С другой стороны, интенсивность и частоту встряхивания необходимо выбирать такими, чтобы обеспечить необходимый срок службы узлов встряхивания и минимальную расцентровку электродной системы.

До недавнего времени считалось, что при встряхивании коронирующих элементов электрофильтров необходимо обеспечивать максимальную чистоту их поверхности. В связи этим рекомендуемый интервал встряхивания коронирующих электродов составлял 3...5 мин. Однако частое встряхивание коронирующих электродов приводит к дополнительному уносу пыли из электрофильтра и повышенному износу узлов встряхивания, поэтому следует обоснованно выбирать интервалы встряхивания коронирующих электродов.

Ориентировочный расчет интервалов встряхивания коронирующих электродов $\tau_{\text{к}}$, мин для любого поля электрофильтра может быть выполнен по следующей формуле:

$$\tau_{\text{к}} = 0,167 \frac{L_{\text{к}} \mu_0}{Q_{\text{вх}} Z_{\text{вх}} \eta_{\text{п}}}, \quad (2.12)$$

где $\mu_0 = 13 \lg \rho_v - 77$ при $10^6 < \rho_v < 10^{12}$ Ом·м;

ρ_v - удельное электрическое сопротивление пыли, Ом·м;

$L_{\text{к}}$ - длина коронирующих электродов поля, м;

$Q_{\text{вх}}$ - количество газов на входе в поле электрофильтра, м³/с;
 $Z_{\text{вх}}$ - запыленность на входе в поле электрофильтра, г/м³;
 $\eta_{\text{п}}$ - степень очистки газов полем электрофильтра.

Режим пылеудаления из бункеров электрофильтров

Нередко производительность системы удаления пыли из электрофильтра оказывается недостаточной. Причиной этого могут быть увеличение производительности технологического агрегата, изменение физико-химических свойств топлива (например, увеличение зольности сжигаемого топлива), проектные ошибки и др. При этом, как правило, в первую очередь оказывается недостаточной пиковая производительность пылеудаляющего устройства. В этом случае производительность системы пылеудаления может быть увеличена путем применения повторнократковременного режима включения механизмов встряхивания осадительных электродов. Зная производительность пылеудаляющего устройства (гидрозатвора, винтового затвора, затвора-мигалки, шлюзового затвора и др. устройства, удаляющего пыль из бункера), количество улавливаемой полем пыли и режим встряхивания всегда можно рассчитать тот режим, при котором не будет происходить перегрузки системы пылеудаления на данном поле. На современных высокоэффективных ЭФ в первом поле ЭФ улавливается 65-80 % поступающей пыли. Поэтому устройства удаления пыли на первых полях должны быть выбраны с учетом этого фактора.

Обогрев изоляторов электрофильтров

Изоляторные коробки электрофильтров (узлы подвода к электрофильтрам высокого напряжения и крепления-подвеса коронирующих систем) – наиболее сложные элементы конструкции электрофильтров. Изоляторы работают в сложных условиях. Они должны выдерживать статическую нагрузку – вес электродной системы и динамическое воздействие механизмов встряхивания коронирующих электродов, также они подвержены действию высоких температур. Кроме того, они должны обладать высоким электрическим сопротивлением в сложных условиях воздействия пыли, кислот. В зависимости от условий, в которых находятся изоляторы, разработаны следующие основные виды изоляторных коробок [14]:

- изоляторные коробки с масляным затвором – для мокрых электрофильтров, улавливающих туманы кислот, смолу из генераторных газов, фосфор;
- изоляторные коробки с опорным обдуваемым изолятором (с обогревом и без обогрева);
- изоляторные коробки с проходным кварцевым обогреваемым изолятором;

- изоляторные коробки с подвесными обогреваемыми изоляторами;
- изоляторные коробки с газо-буферной защитой.

При работе электрофильтра основное требование к изолятору – обеспечение такой степени чистоты его поверхности, при которой практически отсутствуют утечки тока по его поверхности. Для повышения надежности ЭФ в настоящее время применяют полимерные изоляторы (например, ЛК120/35) с увеличенной длиной пути для токов утечки.

Для управления и сигнализации о работе электронагревателей изоляторных коробок электрофильтра разработаны устройства, позволяющие осуществлять местное и дистанционное включение электрических теплонагревателей (ТЭНов), сигнализировать об их включении и о снижении температуры ниже допустимой, автоматически регулировать режим работы электронагревателей.

Величина ускорений, требуемых для отряхивания пыли с электродов электрофильтров

Величина отряхивающих ускорений для сухих низкоомных пылей имеет минимальное значение. Так, например, сажа, уловленная из выхлопных газов дизеля, может быть удалена простым сдуванием слабой струей воздуха. Для удаления высокоомных пылей с осадительных электродов требуются наибольшие ускорения.

Если допустить, что основное влияние на величину требуемых для отряхивания пыли ускорений оказывает УЭС осажденной пыли, то для ориентировочного определения таких ускорений может быть применена зависимость

$$a_g \approx 20 \lg \rho_v, \quad (2.13)$$

где a_g - требуемое ускорение, g;

ρ_v - УЭС пыли, Ом·м.

Величину отряхивающих ускорений осадительных электродов можно изменить путем замены бойков механизмов встряхивания. Это трудоемкий способ. Уменьшение ускорений можно получить, применяя устройство, ограничивающее высоту падения бойков.

Возможность изменения величины отряхивающего импульса при регенерации коронирующих электродов в отечественных электрофильтрах заложена в конструкции механизма встряхивания путем изменения угла подъема молотков. Этот механизм позволяет изменять отряхивающие ускорения в достаточно широком диапазоне.

С точки зрения минимального уноса пыли при встряхивании электродов пыль должна отряхиваться за один удар бойка по электроду.

Величина оптимального импульса и их количество в настоящее время могут подбираться лишь экспериментально.

Толщина допустимого неотряхиваемого слоя на электродах (который всегда имеется при длительной эксплуатации электрофильтра) также в значительной мере определяется величиной УЭС слоя пыли.

При отряхивании коронирующих электродов при мокром способе производства цемента ($\rho_v = 10^8$ Ом·м) в соответствии с формулой (2.13) требуется отряхивающее ускорение 160g, а при сухом ($\rho_v = 10^{10}$ Ом·м) – 200g. Отсюда следует, что угол подъема коронирующих молотков в электрофильтрах сухого способа производства цемента должен быть существенно больше, чем при мокром способе, а встряхивание должно производиться реже.

2.6.3. Конструктивные методы

Правильно выбранные коронирующие элементы смогут обеспечить наибольшую эффективность улавливания пыли только при условии выполнения на стадии монтажа и поддержания при эксплуатации требуемой их центровки. В современных электрофильтрах коронирующий элемент не должен отклоняться от центрального положения более чем на ± 3 мм. Расчеты показывают, что отклонение хотя бы в одной точке каждого поля на 10 мм увеличивает выбросы пыли из электрофильтра в два раза, а расцентровка на 20 мм приводит к увеличению выбросов в четыре-пять раз.

Состояние центровки электродной системы электрофильтра контролируется с помощью В.А.Х., которые снимаются при прохождении через ЭФ воздуха в период монтажа и при прохождении газа при пуско-наладке. ВАХ, снятые при пуско-наладке на газе, являются эталонными, отклонение от них является признаком неисправности ЭФ и должно устраняться.

При уменьшении межэлектродного промежутка величина пробивного напряжения падает. Агрегат питания автоматически снижает рабочее напряжение на ЭФ. Это приводит к снижению степени очистки газов.

Высота электродной системы

Ввиду ограниченности производственных площадей нередко основным возможным направлением повышения эффективности ЭФ при их реконструкции остается увеличение высоты электродной системы.

Реализация этого направления связана с возрастанием уноса пыли при встряхивании осадительных электродов.

Примем за 1 относительный унос пыли при встряхивании в электрофильтре с высотой 12 м. Тогда на основании физического механизма уноса пыли при встряхивании электродов принимая, что величина уноса пыли при встряхивании пропорциональна времени взаимодействия падающей

пыли с пылегазовым потоком, получим следующее соотношение уносов пыли для электрофильтров, имеющих различную высоту электродной системы:

Высота электродной системы, м	18	12	9	6
Относительный унос при встряхивании	1,9	1,0	0,49	0,21

Другими словами, унос пыли при встряхивании в электрофильтре с высотой электродной системы 18 м почти в два раза больше, чем при высоте 12 м, а для электрофильтров с высотой электродов 9 м в два раза меньше, чем для аппаратов высотой 12 м.

Из табл. 2.3 следует, что для компенсации двукратного увеличения выбросов пыли при встряхивании, достаточно увеличить площадь осаждения в отношении $4,6:3,9 = 1,18$, или применить специальные устройства снижения уноса пыли при встряхивании.

Таблица 2.3. Сравнительная величина выбросов пыли из электрофильтра

<i>Высота электродов, м</i>	<i>Величина параметра Дейча, D</i>	<i>Степень очистки, $\eta = 1 - \exp(-D)$</i>	<i>Выбросы пыли при встряхивании, $(1-\eta)$</i>
12	3,9	0,998	0,002
18	4,6	0,999	0,001

Отметим, что при увеличении высоты электродной системы с 12 до 18 м площадь осаждения увеличивается в 1,5 раза. Таким образом, унос пыли при встряхивании будет с избытком компенсирован увеличением степени очистки за счет увеличения площади осаждения.

Межэлектродное расстояние в электрофильтрах

Увеличение межэлектродного расстояния H_0 при неизменных габаритах корпуса электрофильтра приводит к уменьшению площади осаждения, что в соответствии с формулой Дэйча (2.4) снижает степень очистки газов. Однако, как показывают результаты экспериментов, при увеличении H_0 происходит увеличение напряженности электрического поля у осадительного электрода. Это позволяет повысить эффективность осаждения частиц. Очевидно, что масса и, естественно, стоимость внутреннего оборудования при увеличении H_0 уменьшаются.

Расчет рационального межэлектродного расстояния может быть выполнен по формуле [29]:

$$H_0 = 55(4,4 - 0,004z)(1,3 + 0,1\lg\rho_v)(0,93 + 0,021h), \quad (2.14)$$

где z - концентрация дисперсной фазы на входе в ЭФ, г/м²;

ρ_v - УЭС слоя пыли, Ом·м;

h - высота электродной системы, м.

Целесообразность увеличения межэлектродного расстояния возрастает при увеличении высоты электродной системы более 12 м, увеличении УЭС пыли и по мере снижения концентрации дисперсной фазы в очищаемом газе.

2.6.4. Проектные методы

Газораспределительные устройства, устройства предварительной очистки газов, устройства эвакуации пыли из ЭФ, устройства кондиционирования газов, предварительной зарядки частиц и коагуляции частиц не входят в комплект собственно ЭФ. Тип и количество этих устройств определяются проектом установки электрогазоочистки и сильно влияют на степень очистки газов ЭФ.

Неравномерное распределение газов по поперечному сечению ЭФ или образование завихрений потока газа приводит к резкому снижению степени очистки газов ЭФ. Для обеспечения требуемого распределения потока газов в ЭФ разрабатываются специальные подводящие и распределительные устройства [30].

Устройства распределения газа в электрофильтрах

Внутренний объем электрофильтра можно условно разбить на три зоны:

- активная;
- полуактивная;
- неактивная.

Цель газораспределения в ЭФ – обеспечить равномерное распределение газа по его активной зоне [30]. При этом перетоки газа снизу и сверху электродов (полуактивные зоны) должны быть минимизированы, а прохождение газа через неактивные зоны (между корпусом и крайними электродами) должны быть практически полностью исключены.

Для улучшения распределения газов применяются газораспределительные решетки на входе и выходе ЭФ. При подводе и отводе газов в ЭФ в стесненных условиях в диффузорах и конфузорах устанавливают дополнительные устройства для направления потока и газораспределительные решетки с целью обеспечения одинаковой скорости газов по всему ЭФ.

Устройства предварительной очистки газов

Степень очистки газов ЭФ в значительной мере зависит от свойств улавливаемой пыли. Высокая концентрация пыли, высокое или низкое

УЭС улавливаемой пыли снижают степень очистки газов ЭФ. Поэтому нередко требуется предварительная подготовка газов перед поступлением их в ЭФ. В качестве устройств предварительной чистки газов перед электрофильтрами могут устанавливаться пылеосадительные камеры, циклоны, аппараты мокрой очистки газов, устройства увлажнения пыли, введения кондиционирующих реагентов и др. [26].

2.7. Пример выбора электрофильтра

Исходные данные

1. Объём очищаемых газов..... $Q = 300$ тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ ($83,3 \text{ м}^3/\text{с}$);
2. Запыленность газов на входе в электрофильтр..... $Z_{\text{вх}} = 20 \text{ г}/\text{м}^3$;
3. Средний радиус частиц на входе в электрофильтр..... $r = 20 \text{ мкм}$;
4. Температура газов..... $t = 140 \text{ }^\circ\text{C}$.
5. Необходимо подобрать электрофильтр, обеспечивающий выходную запыленность $Z_{\text{вых}} = 50 \text{ мг}/\text{м}^2$
6. Улавливаемая пыль не является высокоомной (при улавливании пыли с УЭС более $10^9 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ расчетная скорость дрейфа должна быть уменьшена в 1,5-2 раза).

1. Расчет требуемой степени очистки газов

$$\eta = \frac{(Z_{\text{вх}} - Z_{\text{вых}})}{Z_{\text{вх}}} = \frac{(20 - 0,05)}{20} = 99,75 \text{ \%};$$

2. Скорость дрейфа рассчитываем по формуле

$$\omega = 0,118 \frac{E_3 E_0 r}{\mu} 10^{-10} = 0,109 \text{ м}/\text{с};$$

(Принимаем напряженность поля $E_3 = E_0$ равной $3,3 \cdot 10^5 \text{ В}/\text{м}$, вязкость газа определяем по приложению А: $\mu = 0,23,5 \cdot 10^{-4} \text{ н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$).

3. Расчет требуемой площади осаждения электрофильтра:

$$S = \ln(1/(1 - \eta)) \cdot \frac{Q}{\omega} = \ln(1/(1 - 0,9975)) \cdot \frac{83,3}{0,109} = 4578 \text{ м}^2.$$

4. По приложению Б выбираем электрофильтр с ближайшей величиной площади осаждения (4608 м^2) ЭГАВ1-30-7,5-4-4. односекционный аппарат с количеством межэлектродных промежутков 30, высотой электродов - 7,5 м, количеством осадительных элементов в электроде - 4, количеством полей - 4.

5. В связи с тем, что площадь выбранного электрофильтра больше расчетной, определим степень очистки, которая будет обеспечена выбранным электрофильтром:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\omega \frac{S}{Q}\right) = 1 - \exp(-0,109 \cdot 4608/83,3) = 0,9976.$$

Выбранный электрофильтр обеспечивает требуемую степень очистки газов с незначительным превышением.

Выбор высоковольтного агрегата питания

В зависимости от величины площади осаждения поля для электрофильтров должен быть выбран соответствующий высоковольтный агрегат питания. Выбор агрегата осуществляется так, чтобы ток, потребляемый полем, был равен или меньше номинального тока агрегата питания. В практике выбора агрегатов питания принято выбирать агрегат питания из условия $0,4 \dots 1,0$ мА на 1 м^2 осадительной поверхности.

$$I = (0,4 \dots 1,0) \cdot S_{\text{поля}}.$$

В данном случае потребляемый полем ток составит

$$I = 0,5 \cdot 4608/4 = 576 \text{ мА}.$$

По приложению В выбираем высоковольтный агрегат питания на 600 мА - ОПМД-600.

Расчет интервалов встряхивания осадительных электродов электрофильтра ЭГАВ1-30-7,5-4-4.

Исходные данные:

Площадь осаждения поля $S_{\text{п}} = 1152 \text{ м}^2$;

УЭС пыли..... $\rho_v = 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

Пылеемкость осадительных электродов, m_0

$$m_0 = 3,14 - 0,25 \lg \rho_v = 3,14 - 0,25 \cdot 8 = 1,14 \text{ кг/м}^2;$$

Объём очищаемых газов $Q = 83,3 \text{ м}^3/\text{с}$;

Запыленность газов на входе в электрофильтр..... $Z_{\text{вх.}} = 20 \text{ г/м}^3$;

Степень очистки газов ЭФ..... $\eta = 0,9976$;

Степень очистки газов полем ЭФ..... $\eta_{\text{п}} = 0,779$.

$$\eta_{\text{п}} = \sqrt[N]{1 - \eta_{\text{эф}}}.$$

Интервал встряхивания осадительных электродов первого поля по формуле

$$\tau_{\text{п}} = 16,7 \frac{S_{\text{п}} m_0}{Q Z_{\text{вх}} \eta_{\text{п}}} = 16,7 \cdot 1152 \cdot \frac{1,14}{(83,3 \cdot 20 \cdot 0,779)} = 17 \text{ мин.}$$

Рассчитаем соотношение интервалов встряхивания по полям $C_{\text{ив}}$:

$$C_{\text{ив}} = (1 - \eta)^{-(n-1)/N},$$

где n - порядковый номер поля ЭФ;

N - количество полей ЭФ.

$C_{\text{ив}} = 1; 4,5; 20,4; 92$.

Интервалы встряхивания осадительных электродов по полям составят:

1 поле - 17 мин;

2 поле - 76 мин;

3 поле - 346 мин - 5,6 ч;

4 поле - 1560 мин. - 26 ч.*

* В практике эксплуатации ЭФ длительные интервалы встряхивания обычно не применяются, сокращаются в соответствии с производительностью пылеудаляющих устройств, обычно до 8...12 часов.

В заключение следует отметить, что в настоящее время преимущественная область применения однозонных электрофильтров – очистка больших объемов газов. Но ЭФ находят применение и для очистки относительно небольших объемов газов (очистка выхлопных газов дизелей, очистка газов при плазменной резке металлов, эксперименты, выполненные в ЗАО «Кондор-Эко», показали принципиальную возможность очистки выхлопных газов карбюраторных двигателей от твердых и газообразных компонентов при температуре газов ниже точки росы.

Сравнение электрофильтров с матерчатými фильтрами показывает, что ЭФ нового поколения при очистке газов от ТЭС обеспечивают выходную запыленность $20...60 \text{ мг/м}^3$, что близко к выходной запыленности матерчатых фильтров. Эффективность существующих ЭФ может быть повышена.

В будущем можно предположить следующие направления повышения эффективности электрофильтров:

- самоцентрирующиеся электроды;
- оптимизация величины встряхивающего импульса;
- чередование встряхивающих импульсов различной величины;
- импульсное и знакопеременное питание током высокого напряжения;
- самонастраивающиеся газораспределительные решетки;
- применение наряду с электрическими полями электромагнитных и магнитных полей.

Реализация этих и других возможных направлений повышения эффективности ЭФ позволит успешно решать задачу обеспечения требуемой чистоты атмосферного воздуха в районах промышленных предприятий.

Глава 3. ОЧИСТКА ГАЗОВ ФИЛЬТРАЦИЕЙ

3.1. Общие сведения о промышленных тканевых фильтрах

Процесс разделения аэродисперсных систем при их движении через пористые среды называется фильтрацией.

Процесс фильтрации характеризуется сложным взаимодействием взвешенных частиц и дисперсной среды с элементами пористой перегородки.

Простейший фильтр (рис. 3.1) представляет собой корпус, разделенный пористой перегородкой 2 на две части, в одну из которых 1 поступают очищаемые газы, а из другой 3 выходят очищенные. В разделенных частях фильтра создается разность давлений, достаточная для прохождения необходимого количества газов.

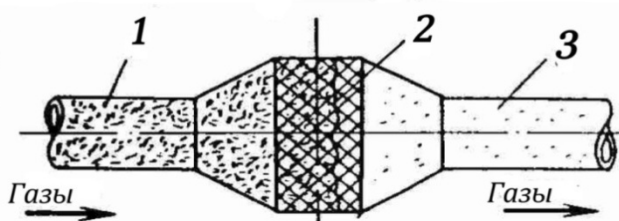


Рис. 3.1. Простейший фильтр

Скорость процесса фильтрации определяется перепадом давления, создаваемого газоотсасывающими или нагнетательными машинами (вентиляторами, газодувками, эжекторами, компрессорами и др.). Пористые перегородки могут быть плоскими, цилиндрическими, складчатыми или другой формы.

В фильтрах улавливаемые частицы накапливаются в порах, затем образуют пылевой слой на поверхности перегородки и, таким образом, становятся для вновь поступающих частиц частью фильтрующей среды. По мере накопления частиц размер пор и общая пористость перегородки неизбежно уменьшается, а сопротивление движению газов возрастает линейно [31]; поэтому в определенный момент возникает необходимость разрушения и удаления пылевого слоя (осадка), что обеспечит снижение перепада давления и сохранение начальной скорости фильтрации.

Таким образом, процесс фильтрации в большинстве случаев предусматривает периодическую регенерацию фильтров.

Процесс фильтрации через пористую перегородку, до накопления в ней пыли и создания на поверхности пылевого осадка, довольно подробно описан в отечественной и зарубежной литературе [31-34].

Первые промышленные тканевые фильтры представляют собой цилиндрические мешки длиной 7...9 м и диаметром 450 мм. Мешки (рукава) размещались рядами в кирпичном корпусе и работали под избыточным давлением при небольшой скорости 0,15...0,25 м/мин для улавливания возгонов свинца.

Регенерация рукавов осуществлялась вручную ударами по мешкам или по штангам, к которым навешивали рукава с закрытыми верхними концами. Описанные фильтры, называемые бетхаузами, были впервые запатентованы в 1886 г. [15].

Фильтры в зависимости от назначения и величины входной и выходной концентраций улавливаемой дисперсной фазы условно разделяют на 3 класса [31]:

- фильтры тонкой очистки (абсолютные фильтры);
- фильтры для очистки атмосферного воздуха (воздушные фильтры);
- промышленные тканевые (матерчатые) фильтры.

Первые два класса фильтров можно отнести к специальным фильтрам, работающим: в первом случае для ультратонкой очистки воздуха в особо чистых помещениях при входной концентрации менее 1 мг/м^3 и скорости фильтрации менее 10 см/с, в которых воздух служит рабочей средой, эти фильтры не подвергают регенерации; во втором случае воздушные фильтры используются в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха при входной запыленности пыли менее 50 мг/м^3 , часто при высокой скорости фильтрации до 2,5...3 м/с, с применением регенерации периодической или непрерывной.

Фильтры промышленные тканевые применяются для очистки промышленных газов с высокой концентрацией дисперсной фазы до 60 г/м^3 , чаще со скоростью фильтрации в пределах от 0,25 до 2,5 м/мин. Эти фильтры имеют устройства для регенерации фильтрующей перегородки, позволяющие поддерживать производительность на заданном уровне и возвращать продукты в производство, в то же время фильтры этого класса являются составной частью технологического оборудования.

Индустриализация промышленности тесно связана с разнообразием технологических процессов, образующих запыленные технологические газы и необходимостью очистки их при выбросе в атмосферу. Для этой цели наибольшее распространение получил метод фильтрации промышленных газов в тканевых фильтрах.

В настоящее время разработано и используется большое число новых конструкций тканевых фильтров, которые отличаются по следующим признакам:

1) по форме тканевых фильтровальных элементов (рукавные, плоские, клиновые и др.) и наличию в них опорных устройств (каркасов);

2) по методу регенерации ткани (встряхивание, с обратной продувкой, с вибрационным встряхиванием, с импульсной продувкой, со струйной продувкой и др.);

3) по наличию и форме корпуса для размещения ткани: прямоугольные, цилиндрические, открытые (безкамерные);

4) по числу секций в установке (однокамерные, многосекционные, модульные и др.);

5) по виду используемой ткани (тканые, иглопробивные нетканые войлоки, фетры и т.д.).

В качестве примера на рис. 3.2 и 3.3 представлены конструктивные решения каркасного рукавного фильтра с импульсной продувкой сжатым воздухом и многосекционного рукавного фильтра со встряхиванием и обратной продувкой атмосферным воздухом.

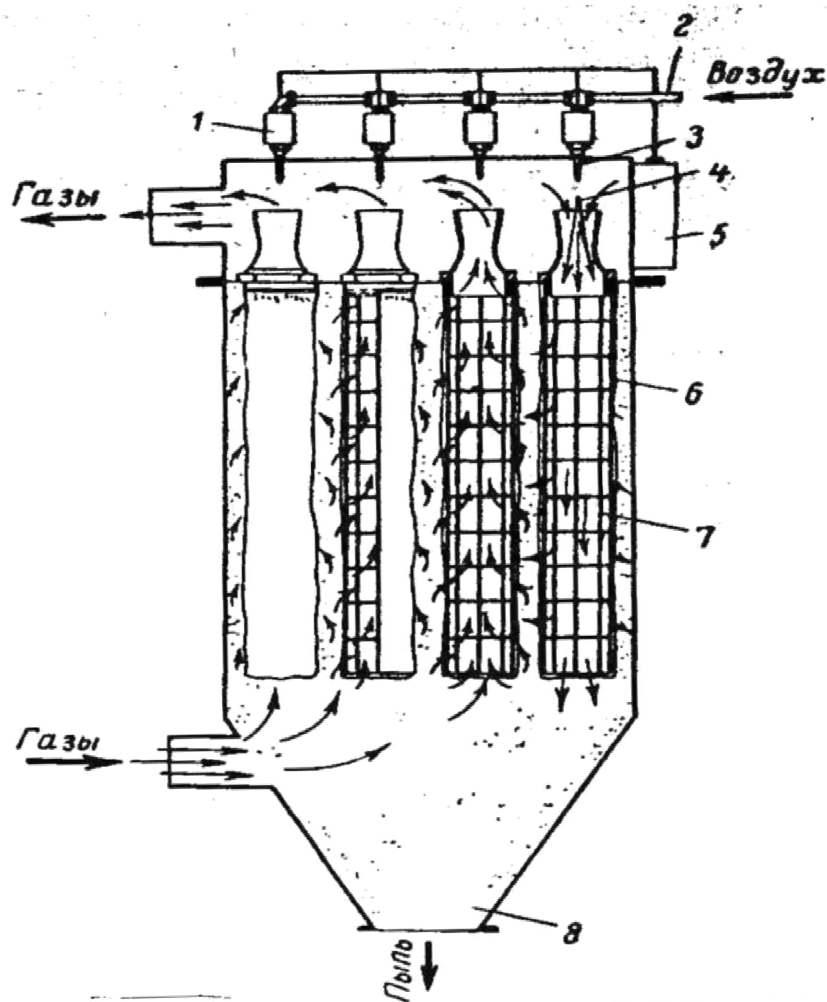


Рис. 3.2. Каркасный рукавный фильтр с импульсной продувкой:

- 1 - соленоидный клапан; 2 - труба для сжатого воздуха;
3 - сопло; 4 - струя сжатого воздуха; 5 - прибор автоматического управления регенерацией; 6 - рукав; 7 - каркас; 8 - бункер

В фильтрах с импульсной продувкой возможно увеличение нагрузки по газу до 2,5 м/мин при использовании иглопробивных фильтроматериалов (фетров, нетканых материалов), а также температуры эксплуатации до 250 °С при применении высокотемпературных фильтроматериалов.

Импульсным способом можно регенерировать сразу всю секцию, направляя сжатый воздух навстречу газам, поступающим в фильтр.

Тканевые каркасные фильтры с импульсной регенерацией широко применяются в технологических процессах цветной и черной металлургии, а также в системах пневмотранспорта, распылительной сушки, при измельчении порошков в струйных мельницах.

Регенерация рукавов в фильтрах с импульсной продувкой происходит без отключения пылегазового потока на рукава. Это позволяет исключить подвижные механизмы в конструкции аппаратов и повысить эксплуатационную надежность этих фильтров по отношению к фильтрам со встряхиванием и обратной продувкой и им подобным. Фильтры с импульсной продувкой позволяют применять более широкий диапазон различных типов фильтроматериалов и автоматизировать процесс фильтрации с использованием современных средств контроля и автоматизации.

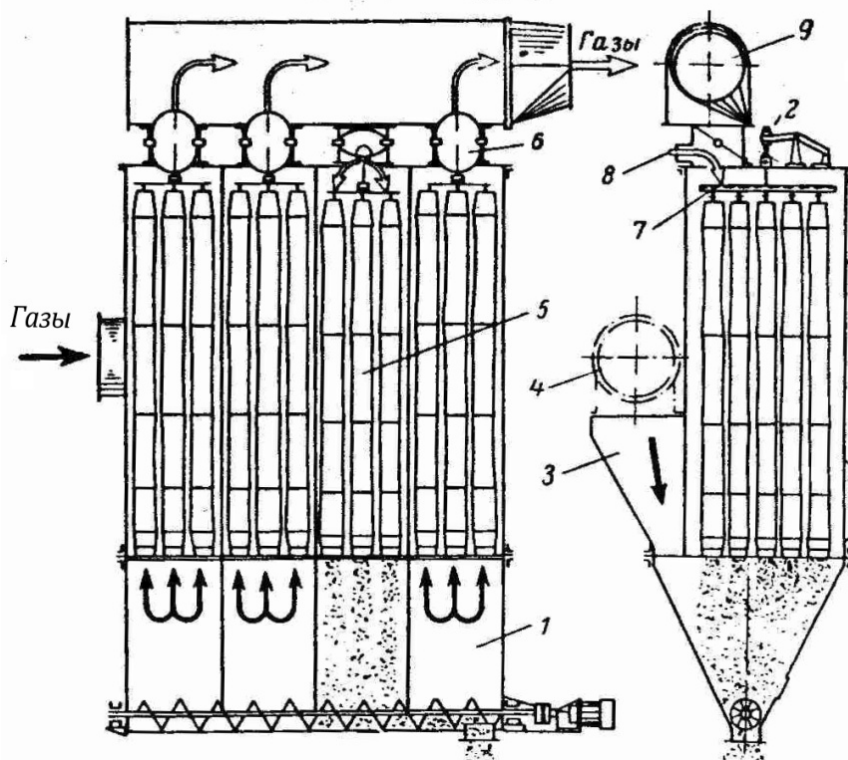


Рис. 3.3. Многосекционный рукавный фильтр со встряхиванием и обратной продувкой

- 1 - бункер; 2 - механизм встряхивания; 3 - коллектор; 4 - газоход запыленных газов; 5 - секция фильтра, находящаяся на регенерации; 6 - клапан газов; 7 - рама подвеса рукавов; 8 - продувочный клапан; 9 - выходной коллектор

В фильтрах со встряхиванием и обратной продувкой особые требования предъявляются к герметизации переключающих клапанов, качеству регулировки механизмов встряхивания, к их износу, к равномерности натяжения рукавов внутри фильтра.

3.2. Особенности улавливания пыли тканями и иглопробивными войлоками

В промышленных тканевых фильтрах применяются фильтрующие материалы двух типов: обычные ткани, изготавливаемые на ткацких станках, и войлоки (фетры) или другие нетканые материалы, полученные путем свойлачивания или механического перепутывания волокон иглопробивным методом, а также путем связывания волокон вязально-прошивным, клеевым и другими методами.

3.2.1. Фильтровальные тканые материалы

Фильтровальные тканые материалы представляют собой определенного вида переплетения нитей (пряжи), скрученных из коротких (штапельных) или филаментных (непрерывных) волокон диаметром до 40 мкм.

Более толстые (тяжелые) ткани из натуральных или синтетических волокон часто подвергаются начесыванию для придания большей пылеемкости фильтрующего материала, с целью осаждения частиц пыли в начальный период работы фильтра за счет механизмов касания, инерции, диффузии и электростатического взаимодействия на образованных внешних начесанных волокнах и расположенных на поверхностях нитей.

Волокна, находящиеся внутри крученых нитей, в осаждении частиц практически не участвуют, т.к. поток газа внутрь таких нитей не проходит из-за плотности их скручивания.

В дальнейшем, по мере накопления пыли, наблюдается процесс соосаждения частиц, в результате чего эффективность очистки резко возрастает и может образоваться сплошной слой пыли, который сам становится «вторичной» фильтрующей средой.

Осаждение пыли в поверхностном пылевом слое и внутри запыленной ткани основано на ситовом эффекте, проявляемом довольно сильно, т.к. поры в слое, образовавшиеся осажденными и улавливаемыми частицами, имеют близкие размеры [6].

В тканевых фильтрах сама чистая ткань не является высокоэффективной фильтрующей средой в прямом смысле, а в ряде случаев выполняет роль несущей подложки, т.к. служит основой для формирования и удержания фильтрующего пылевого слоя.

Таким образом, пористость фильтрующего пылевого слоя, накопленного на подложке (материале), является определяющим фактором экс-

плутационных параметров промышленных тканевых фильтров, который зависит от размеров, формы и других свойств частиц, а также от скорости фильтрации и структуры ткани, изменяясь в широких пределах.

Установлено, что фильтрация запыленными тканями происходит избирательно, причем наиболее проникающие частицы имеют диаметр 0,2...0,4 мкм, а большинство частиц размером менее 5 мкм имеют способность коагулировать с образованием прочных рыхлых агрегатов в потоке газа, в ткани и на ее поверхности. Это свойство частиц пыли дает возможность использовать даже редкие ткани в качестве эффективной фильтрующей среды [31].

С увеличением скорости фильтрации выходная концентрация пыли после фильтра довольно резко возрастает сразу же после регенерации, что иллюстрирует рис. 3.4. Кроме того, при высокой скорости фильтрации требуется слишком часто проводить регенерацию, увеличивается износ фильтроматериала и механизмов. Для обеспечения надежности работы фильтров и высокой эффективности необходимо иметь большие фильтрующие поверхности и избегать слишком глубокой регенерации, особенно это касается тканых фильтроматериалов.

При регенерации ткани значительная часть пылевого осадка удаляется с поверхности, однако внутри ткани между нитями и волокнами остается неудаленная пыль, что способствует повышению эффективности очистки.

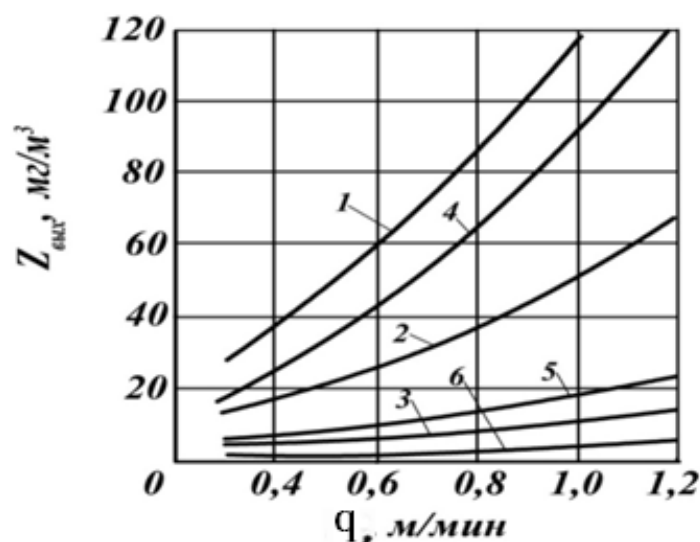


Рис. 3.4. Зависимость выходной концентрации пыли в газах от скорости фильтрации через ткань лавсановую (1;2;3) и войлок фильтровальный (4;5;6)

1, 4 - сразу же после регенерации; 2, 5 - в течение нескольких циклов «регенерация - фильтрация»; 3, 6 - в конце цикла фильтрации перед регенерацией

При регенерации запыленных тканей нельзя допускать их «перечистку». В этих случаях рекомендуется применять небольшую нагрузку по газу, обычно $0,3 \dots 1,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. Большая скорость фильтрации приводит к уплотнению пылевого слоя и к резкому увеличению сопротивления фильтра, а также к продавливанию мелких частиц пыли через поры между нитями, так называемому вторичному уносу.

3.2.2. Иголпробивные войлоки

Войлоки (фетры) или другие нетканые материалы в процессе изготовления и применения в фильтрах имеют отличительную специфику от тканых материалов.

Фетры или войлоки представляют собой плотные слои беспорядочно перепутанных коротких волокон, равномерно распределенных в объеме и обладающих поэтому высокой устойчивостью к многократным изгибам. Толщина войлоков обычно составляет $1,6 \dots 3,2 \text{ мм}$. Масса 1 м^2 материала, применяемого в фильтрах, изменяется от $0,2$ до 1 кг , а поверхность, направленная навстречу пылегазовому потоку, может иметь специальную термообработку или дополнительный тонкий слой с заданной пористостью для обеспечения повышенной регенерируемости поверхности материала и стабильного остаточного сопротивления между циклами регенерации.

Иголпробивные фильтровальные материалы используются в основном в фильтрах при импульсном способе регенерации, выходная запыленность пыли может быть очень низкая даже при небольшой входной запыленности газов $\leq 100 \text{ мг/м}^3$, при этом скорость фильтрации по отношению к тканым материалам может быть увеличена до $2,5 \text{ м/мин}$ [31].

3.3. Основные показатели работы тканевых (матерчатых) фильтров

Работу тканевых фильтров характеризуют следующие показатели:

- эффективность очистки;
- скорость фильтрации;
- гидравлическое сопротивление;
- пропускная способность по очищаемому газу (производительность).

3.3.1. Эффективность очистки

Обычно эффективность очистки (или степень очистки, или КПД) η (%) выражается в виде отношения разности запыленностей газа на входе $Z_{\text{вх}}$ (г/м^3) и выходе аппарата $Z_{\text{вых}}$ (г/м^3) к входной запыленности [15]:

$$\eta = \frac{Z_{\text{BX}} - Z_{\text{ВЫХ}}}{Z_{\text{BX}}} \cdot 100, \quad (3.1)$$

или в виде отношения количества уловленного продукта к количеству продукта, поступающего в фильтр с газовым потоком за определенный период времени [31]:

$$\eta = \frac{G_{\text{BX}} - G_{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{BX}}} = \frac{V_{\text{BX}} \cdot Z_{\text{BX}} - V_{\text{ВЫХ}} \cdot Z_{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{BX}} \cdot Z_{\text{BX}}} = 1 - \frac{V_{\text{ВЫХ}} \cdot Z_{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{BX}} \cdot Z_{\text{BX}}}, \quad (3.2)$$

где G_{BX} , $G_{\text{ВЫХ}}$ - массовый расход частиц пыли, содержащихся в газах, соответственно на входе и выходе, кг/с.

V_{BX} , $V_{\text{ВЫХ}}$ - объемный расход соответственно поступающих газов и выходящих газов из фильтра, $\text{м}^3/\text{с}$.

Чаще всего об эффективности фильтра судят по запыленности газа на выходе аппарата, т.к. степень очистки или высокий КПД еще не гарантируют обеспечение санитарных норм выбросов, особенно при большой входной запыленности. Этот факт наглядно подтверждает график на рис. 3.5, полученный экспериментальным путем на клиновом фильтре при помоле цемента.

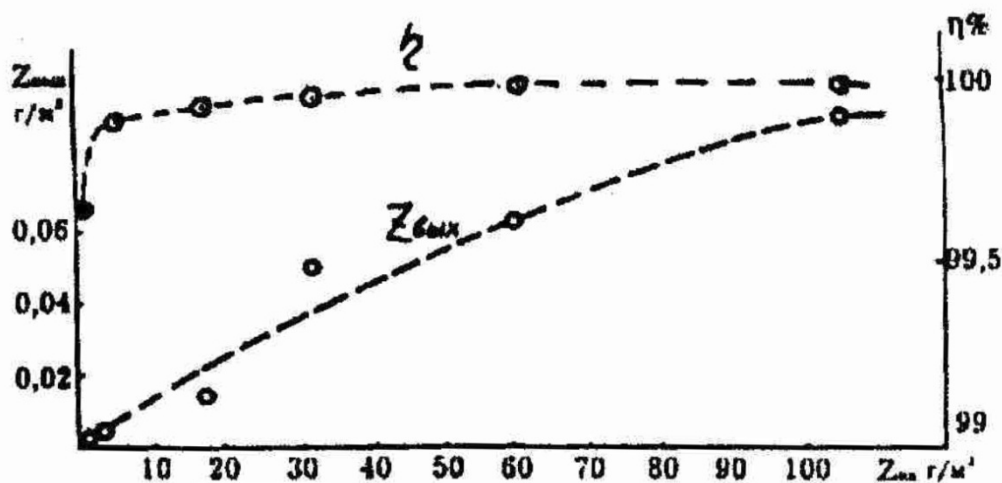


Рис. 3.5. Зависимость эффективности пылеулавливания и выходной запыленности от запыленности газа на входе в фильтр

Как видно из графика, при изменении входной запыленности от 10 до 100 $\text{г}/\text{м}^3$ эффективность пылеулавливания изменилась в виде КПД незначительно – от 99,8 до 99,9 %. В то же время выходная запыленность изменилась от 0,018 до 0,085 $\text{г}/\text{м}^3$, т.е. почти в 5 раз [15].

3.3.2. Скорость фильтрации

Под скоростью фильтрации принимают нагрузку по газу на фильтрующую поверхность фильтра q ($\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}) = \text{м}/\text{мин}$), т.е. отношение объемного расхода газов, проходящих через фильтр $V_{\text{вх}}$ ($\text{м}^3/\text{с}$), к площади фильтрующей поверхности $F_{\text{ф}}$ (м^2):

$$q = \frac{V_{\text{вх}} \cdot 60}{F_{\text{ф}}}. \quad (3.3)$$

Учитывая, что удельная газовая нагрузка является функцией многих переменных, отечественная и мировая практика эксплуатации тканевых фильтров показывает, что оптимальные газовые нагрузки в общепромышленных фильтрах наиболее часто находятся в интервале от 0,25 до 2,5 $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. Таким образом, в настоящее время точный расчет тканевых фильтров в общем виде для нового процесса не может быть выполнен [6].

Поэтому обычно для получения ориентировочных сведений используют данные эксплуатации фильтров с подходящими тканями в условиях, аналогичных условиям в рассматриваемом процессе, уточняя оптимальные условия работы путем проведения опытно-промышленных испытаний на пилотных установках [31].

3.3.3. Гидравлическое сопротивление фильтра

Гидравлическое сопротивление ΔP определяется разностью давлений на входе в фильтр и на выходе из него и имеет размерность «Н/м²» или «мм вод. ст.» Оно состоит из сопротивления корпуса $\Delta P_{\text{А}}$ фильтра, сопротивления равномерно запыленной фильтровальной ткани $\Delta P_{\text{р}}$ и сопротивления пылевого слоя $\Delta P_{\text{п.с.}}$.

Зависимость составляющих и общего сопротивления фильтра от скорости фильтрации при $Z_{\text{вх}} = 4,14 \text{ г}/\text{м}^3$ в конце цикла фильтрации представлена на рис. 3.6 [6].

Изменение сопротивления фильтра по цикличной программе в процессе его работы при различных удельных газовых нагрузках представлено на рис. 3.7. Сопротивление фильтра при этом находится в относительном не изменяющемся режиме, в допустимом для режима эксплуатационном пределе, при заданной скорости фильтрации, допуская небольшое колебание производительности.

Исходя из практических и экономических соображений, сопротивление фильтра не должно превышать 750...1800 Н/м² (75...180 мм вод. ст.) и только в особых случаях величина его может достигать 2000...2500 Н/м² (200...250 мм вод. ст.). Приведенные данные о сопротивлении фильтров получены на основании многолетней эксплуатации тканевых фильтров [31].

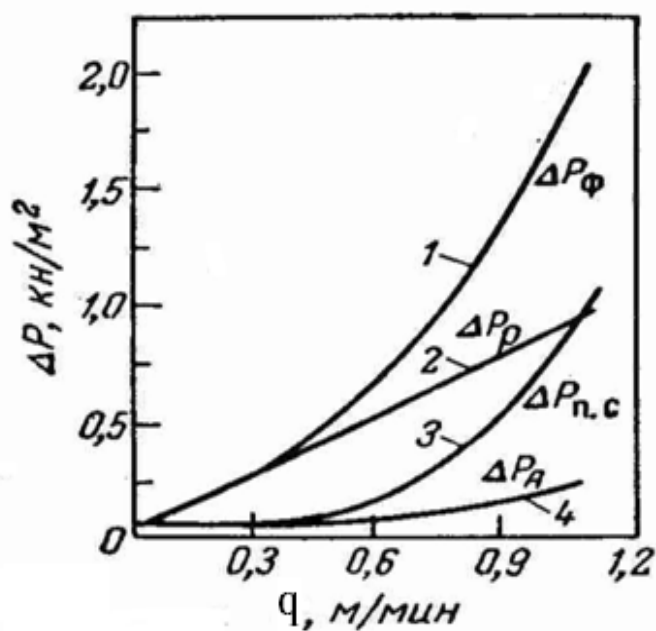


Рис. 3.6. Зависимость составляющих и общего сопротивления стеклотканевого фильтра от скорости фильтрации (при исходном запылении

$$Z_{\text{вх}} = 4,14 \text{ г/м}^3\text{):}$$

- 1 - изменение сопротивления всего фильтра ΔP_{ϕ} ;
- 2 - изменение сопротивления равномерно запыленной ткани ΔP_p ;
- 3 - изменение сопротивления пылевого слоя $\Delta P_{\text{п.с.}}$;
- 4 - изменение сопротивления корпуса аппарата ΔP_A

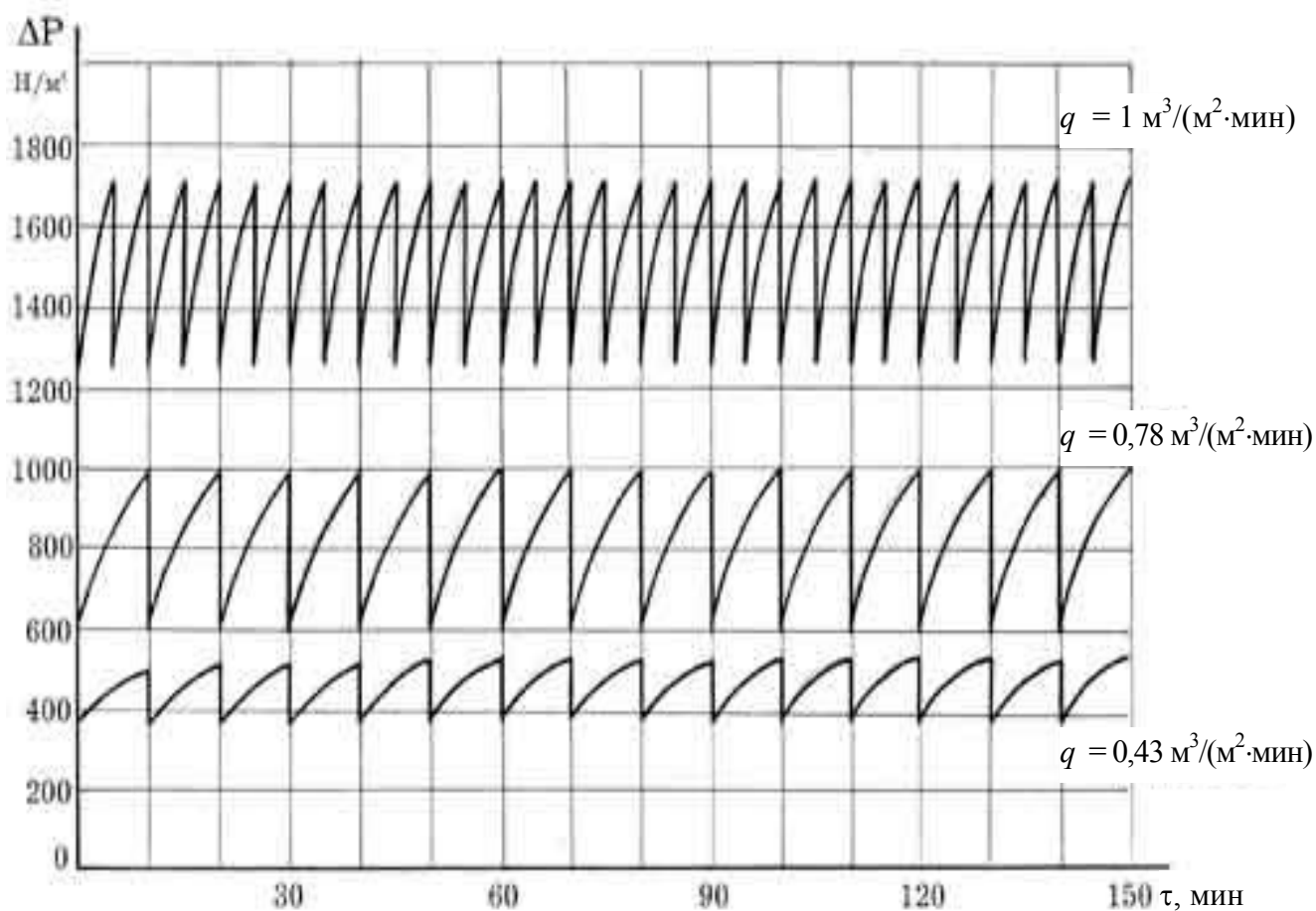


Рис. 3.7. Изменение сопротивления фильтра в процессе его работы при различных удельных газовых нагрузках по циклической программе регенерации

3.3.4. Пропускная способность по очищаемому газу (производительность)

За производительность фильтра $V_{\text{вх}}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) принимается объемный расход очищаемых газов, поступающих на вход в фильтр на очистку, предусмотренный в эксплуатационной технической характеристике фильтра:

$$V_{\text{вх}} = \frac{q \cdot F_{\text{ф}}}{60}, \quad (3.4)$$

где $F_{\text{ф}}$ - площадь фильтрации в фильтре, м^2 ;
 q - удельная газовая нагрузка, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$.

3.4. Расчет тканевых фильтров

Для приближенного расчета площади фильтрации тканевого фильтра необходимо определить общий расход запыленных газов, поступающих на ткань (с учетом подсосов на пути от источника пылевыведения до фильтровальной ткани) и расход продувочных газов или воздуха, поступающих из регенерируемой секции. Кроме того, надо знать скорость фильтрации, которую принимают на основании опыта эксплуатации в зависимости от применяемой ткани, параметров пылегазовой среды, способа регенерации и других факторов.

Общая площадь фильтрации составит [31]:

$$S = S_p + S_c = \frac{V_1 + V_2}{q} + S_c, \quad (3.5)$$

где S_p - площадь фильтрации в одновременно работающих секциях, м^2 ;
 S_c - площадь ткани в регенерируемой секции, м^2 ;
 V_1 - расход запыленного газа с учетом подсоса (в газоходе и бункере), $\text{м}^3/\text{мин}$;
 V_2 - расход продувочного газа или воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$;
 q - скорость фильтрации (удельная газовая нагрузка), $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$.

Рекомендуемые значения газовой нагрузки для различных тканей представлены в табл. 3.1:

**Таблица 3.1. Рекомендуемые значения газовой нагрузки
для различных тканей**

Ткань	Шерстяная или хлопчатобумажная	Синтетическая	Стеклянная	Иглопробивные войлоки, фетры
Нагрузка по газу, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$	0,6...1,2	0,5...1,0	0,3...0,9	0,25...2,5

Определив общую площадь ткани, находят требуемое число секций (фильтров) n в многосекционном фильтре:

$$n = \frac{S}{S_1}, \quad (3.6)$$

где S - общая площадь ткани в фильтре, м^2 ;

S_1 - площадь фильтровальных рукавов в одной секции, м^2 .

Число секций n должно быть целым числом, полученное значение округляют в сторону увеличения числа секций.

Пределы допустимых значений сопротивления фильтров не должны превышать $750 \dots 1500 \text{ Н/м}^2$ и только в особых случаях величина сопротивления может достигать $2000 \dots 2500 \text{ Н/м}^2$ [31].

Расход продувочного воздуха (газа) на регенерацию обратной продувкой составляет $1,5 \dots 1,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$, а отношение расхода продувочного воздуха к расходу воздуха (газа) при фильтрации $\approx 1,5 \dots 2$. Всё это относится только к регенерируемой секции.

Для фильтров с импульсной продувкой сжатым воздухом расход сжатого воздуха на регенерацию из опыта работы фильтров в различных промышленных условиях принимают $0,1-0,2 \%$ от количества очищаемого газа (воздуха).

При выборе ткани для определенных условий работы учитывается конструкция фильтра и способ регенерации, запыленность, свойства осаждаемой пыли, состав и температура газов, особенности технологического процесса.

На основании этих данных выбирается тип волокна или пряжи, переплетение ткани и способ её отделки.

При выборе и расчете фильтров необходимо учитывать капитальные затраты и затраты на эксплуатацию, которые будут зависеть от заданного режима работы фильтра.

Умеренная (щадящая) скорость фильтрации и сопротивление фильтра позволят значительно скомпенсировать капитальные затраты за счет более длительной работы рукавов и запасных деталей без замены и снижение стоимости обслуживания, учитывая, что стоимость фильтровальных рукавов бывает соизмерима со стоимостью конструкции фильтра.

3.5. Основные показатели, определяющие свойства фильтровальных материалов

Эффективность пылеулавливания, гидравлическое сопротивление, срок службы фильтровальных тканей во многом зависят от их структуры, способа плетения, плотности, толщины и крутки нитей.

Плотность ткани характеризует частоту расположения нитей в единице длины (количество нитей на 10 см), более плотные ткани имеют повышенные прочностные свойства, более высокий коэффициент пылеулавливания и одновременно с этим повышенное гидравлическое сопротивление в процессе фильтрования, низкую воздухопроницаемость, а следовательно, и более низкую пропускную способность при установке в рукавных фильтрах.

Одним из основных текстильных показателей, во многом определяющим фильтровальные, регенерационные и прочностные свойства фильтровальных тканей, является переплетение нитей основы и утка. Для фильтровальных тканей обычно применяются переплетения: саржевое, полотняное и сатиновое (рис. 3.8).

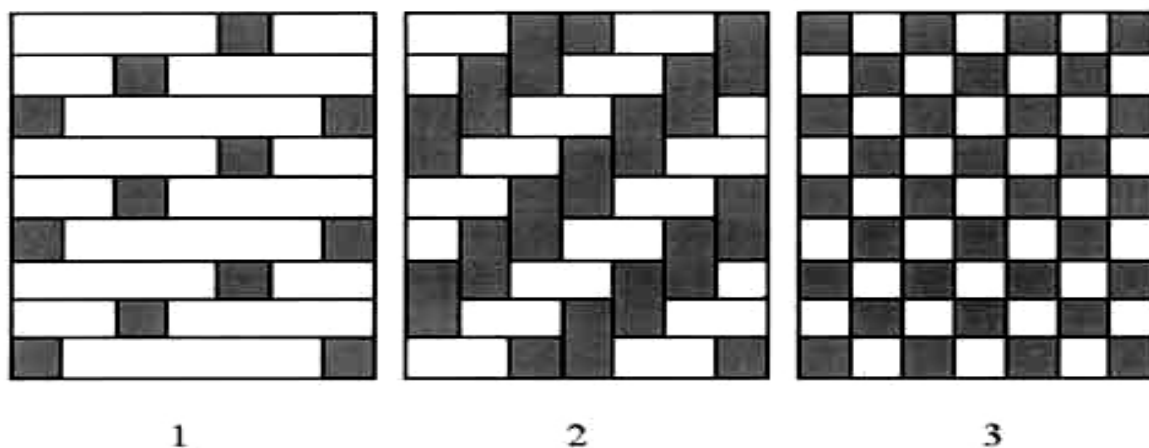


Рис. 3.8. Способы плетения фильтровальной ткани:

1 - сатиновое; 2 - саржевое; 3 - полотняное

Саржевое переплетение характеризуется наличием на поверхности ткани диагональных полос. Нити основы и утка в саржевых тканях перекрываются в соотношении 2х2, 1х3, 3х1 и имеют возможность перемещения относительно друг друга, способствуя этим эффективности регенерации. Ткани полотняного переплетения более плотные. Нити основы и утка перекрываются в них попеременно. Ткани полотняного переплетения имеют высокую эффективность пылеулавливания, но обладают большим сопротивлением вследствие плохой регенерируемости.

Сатиновые (атласные) ткани характеризуются гладкой поверхностью. Они более рыхлые, по сравнению с тканями полотняного и саржевого плетения, имеют хорошую регенерируемость. Прочностные свойства сатиновых тканей относительно невысокие. Использование их в каркасных фильтрах нежелательно, т.к. при натягивании на каркас они легко могут быть повреждены. Для повышения прочности сатиновых тканей ино-

гда повышают их плотность, но это приводит к снижению воздухопроницаемости.

Фильтровальные ткани могут быть изготовлены и из нитей, состоящих из непрерывных по длине волокон (филаментная нить), или из нитей, скрученных из коротких волокон (штапельная нить). Филаментная нить значительно прочнее штапельной. Однако по эффективности пылеулавливания штапельные ткани превосходят филаментные, имеют лучшую воздухопроницаемость и легче восстанавливают свойства в процессе регенерации.

Высокие показатели пылеотделяющих свойств при относительно низком гидравлическом сопротивлении имеют ткани, изготовленные из текстурированных нитей. Текстурированные нити получают либо специальным разрыхлением, например, сжатым воздухом, либо за счет применения специальных волокон витой формы. Для определения толщины нити принята единица текс (Т). Толщина в тексах численно равна весу 1000 метров нити в граммах. Обратная величина, т.е. отношение длины нити (м) к ее массе (г), является номером нити.

Важным показателем фильтровального материала является его воздухопроницаемость, которая определяется количеством воздуха, способным пройти через единицу площади в единицу времени при заданном напоре (разрежении). Фильтровальный материал считается хорошим, если он имеет воздухопроницаемость $150 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при сопротивлении 5 мм вод. ст. Воздухопроницаемость находится в прямой зависимости от плотности ткани.

Прочностные свойства фильтровальных материалов характеризуются такими показателями, как разрывная нагрузка, изгибоустойчивость, жесткость, стойкость к истиранию. Фильтровальные материалы с низкими показателями изгибоустойчивости не пригодны для применения в фильтрах с механическим методом отряхивания, т.к. действующие на них знакопеременные нагрузки «растяжение-сжатие» приводят к быстрому их износу. Такие ткани не рекомендуется применять для фильтров каркасных конструкций, т.к. соприкосновение и удар тканей о каркас вызывают разрушение волокон. То же самое относится и к фильтровальным материалам с низкими показателями стойкости к истиранию. Фильтроматериалы с пониженной прочностью на разрыв, как правило, не применяются в бескаркасных фильтрах с большой длиной рукавов.

Основным показателем, определяющим применимость фильтровального материала для любого технологического передела, является его пылеотделяющая способность. Последняя зависит от свойств пыли и газа, текстильных показателей ткани, условий и режимов эксплуатации, конструктивных особенностей фильтра. В настоящее время нет отработанных

приборов для определения пылеотделяющей способности фильтроматериалов. Лабораторные методы не могут полностью отразить все условия промышленной эксплуатации. Промышленная же проверка на опытных фильтрах требует значительных материальных затрат и не позволяет ставить в широком диапазоне исследования с измененными показателями физико-химических свойств пыли, газа, режимов эксплуатации. В большинстве случаев разработчики новых фильтровальных материалов для оценки пылепроникающей способности используют индивидуально созданные стенды с искусственным аэрозолем бихромата калия, масляного тумана, чаще в качестве улавливаемой пыли используется молотый кварцевый песок с медианным размером частиц 5 мкм.

Другим важным свойством фильтровальных материалов является их способность к регенерации, которая осуществляется различными способами: обратной и импульсной продувкой, простым встряхиванием, вибрацией, покачиванием и перекручиванием рукавов, воздействием звуковых колебаний, ударной волной и др.

После проведения цикла регенерации в порах и на поверхности ткани остается определенное количество пыли, создающее дополнительное гидравлическое сопротивление. После нескольких циклов регенерации (иногда нескольких десятков или сотен циклов) остаточное сопротивление обычно стабилизируется. Более плотные ткани с малыми значениями воздухопроницаемости обычно имеют большое остаточное сопротивление. Для сравнительной оценки регенерационной способности тканей целесообразно пользоваться условным показателем регенерируемости K_p [35], численно равным отношению разности конечного P_k и остаточного $P_{ост}$ сопротивлений к конечному:

$$K_p = \frac{P_k - P_{ост}}{P_k} \cdot 100. \quad (3.7)$$

Измерения показателей регенерируемости производятся в одних и тех же условиях, при одинаковых параметрах, характеризующих свойства пыли, газа, режимы фильтрования и регенерации.

3.6. Фильтровальные материалы для тканевых фильтров

К тканям, используемым в качестве фильтровальных материалов, предъявляются следующие требования:

1) высокая пылеемкость при фильтрации и способность удерживать такое количество пыли после регенерации, которое достаточно для обес-

печения высокой эффективности очистки газов от тонкодисперсных частиц;

2) сохранение оптимально высокой воздухопроницаемости в равновесно запыленном состоянии;

3) высокая механическая прочность и стойкость к истиранию при многократных изгибах, стабильность размеров и свойств при повышенной температуре и агрессивном воздействии химических примесей, находящихся в сухих и насыщенных влагой газах;

4) минимальное влагопоглощение и способность к легкому удалению накопленной пыли;

5) возможно низкая стоимость.

Применяемые материалы удовлетворяют не всем перечисленным требованиям, поэтому каждый материал используется в определенных, наиболее благоприятных для него условиях.

Некоторые из перечисленных требований зависят от свойств применяемых волокон, другие от структуры готовых материалов.

В табл. 3.2. приведены основные свойства наиболее широко используемых волокон. В табл. 3.3. представлены технические характеристики наиболее часто применяемых серийных фильтроматериалов в рукавных фильтрах [15, 36].

Для защиты от электризации фильтровальные материалы иногда пропитываются специальными электропроводящими составами, металлизируются напылением на поверхность расплавленных частиц металла, изготавливаются с добавлением волокон из токопроводящих материалов. Для улучшения пылезадерживающих свойств иногда используется двойное плетение тканей, такие ткани применяются в фильтрах с интенсивными методами регенерации.

Под воздействием высоких температур и влажности многие ткани способны к усадке. Для снижения эффекта тепловой деформации ткани термофиксируют (подвергают тепловой обработке). Термофиксированные фильтровальные материалы имеют более стабильный коэффициент пылеулавливания, более долговечны при эксплуатации. Для улучшения регенерационных свойств нетканых фильтровальных материалов из лавсановых волокон одна поверхность полотна подвергается термообработке открытым пламенем или нагретыми вальками каландра.

Для предотвращения образования трудноудаляемых отложений при улавливании гигроскопичных пылей тканям иногда придают водоотталкивающие свойства путем обработки специальными составами.

Таблица 3.2. Основные свойства текстильных волокон

Исходный полимер или сырье	Название волокна	Плотность, ρ , г/м ³	Термостойкость, °С		Химическая стойкость в различных средах				Горючесть	Предел прочности при растяжении		Разрывное удлинение, %	Стойкость к истиранию	Влагоемкость, % при 20 °С	
			при длительном воздействии	при кратковременном воздействии	кислоты	щелочи	окисляющие агенты	растворители		МН/м ²	кгс/мм ²			при $\phi=65\%$	при $\phi=90-95\%$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>
Целлюлоза	Хлопок	1520	65-85	90-95	ОП	Х	У	ОХ	да	352-510	36-52	7-8	У	7-8,5	24-27
Протеины	Шерсть	1320	95-100	120	У	ОП	У	Х	да	147-176	15-18	30-40	У	13-15	21,9
Полиамид	Капрон Номекс	1140 1380	80-90 220	120 260	ОП У	ОХ ОХ	У Х	Х Х	да нет	450-560 390-540	46-57 40-55	18-32 14-17	ОХ ОХ	3,5-4,5	7-8,5 -
Полиэфир	Лавсан	1380	130	160	Х	У-П	Х	Х	да	450-540	46-55	45-60	ОХ	0,4	0,5
Полиакрилонитрил	Нитрон	1170	120	150	Х-У	У	Х		да	255-382	26-39	20-29	У	0,9-2	4,5-5
Полиолефин	Полипропилен	920	85-95	120	ОХ	ОХ	Х	Х	да	440-510	45-52	22-25	ОХ	0	0
Поливинилхлорид	Хлорин, ацетохлорин ПВХ	1380-1470	65-70	80-90	ОХ	ОХ	ОХ	У-Х	нет	137-235	14-24	41-43	ОП-П	0,17-0,3	0,7-0,9
Политетрафторэтилен	Тефлон, полифен	2300	220	270	ОХ	ОХ	ОХ	ОХ	нет	323	33	13	У-П	0	0
Алюмоборосиликатное стекло	Стеклоанное волокно	2540	240	315	Х	У-П	ОХ	ОХ	нет	1420-1550	145-158	3-4	ОП	0,3	-

Условные обозначения: ОХ – очень хорошая; Х – хорошая; У – удовлетворительная; П – плохая; ОП – очень плохая.

Таблица 3.3. Свойства серийных фильтровальных материалов

Фильтровальный материал	Разрывная нагрузка полоски 50x100 мм, Н		Удлинение при разрыве, %		Изгибо-устойчивость, тыс. циклов		Жесткость (полоска 20x95), 10 ² Н		Воздухопроницаемость, дм ³ /м ² с	Коэффициент пылеулавливания		Условный показатель регенерируемости, %	Термостойкость, °С	Стойкость	
	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток		Кварцевый песок, d = 5 мкм	Бихромат калия			к щелочам	к кислотам
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>
Ткань лавсановая фильтровальная	2440	1360	40	26	19	17	3	5	180	0,996	0,32	12	130	Неуд.	Хор.
Ткань лавсановая фильтровальная с односторонним начесом (двойной лавсан)	6220	5780	39	39	34	31	31	23	69	0,997	0,67	47	130	Неуд.	Хор.
Ткань нитроновая	1510	1150	24	22	3	3	8	9	105	0,999	0,41	68	120	Уд.	Хор.
Ткань техническая оксалоновая	3260	3120	17	13	5	5	3	2	110	0,923	0,12	10	200	Уд.	Хор.
Ткань стеклянная фильтровальная	3280	2090	7	7	0,01	0,02	5	7	244	0,997	0,36	7	240	Хор.	Хор.
Войлок иглопробивной синтетический фильтровальный	1300	940	67	70	93	73	55	70	110	0,995	0,51	52	130	Неуд.	Хор.
Полотно иглопробивное фильтровальное антистатическое	660	1490	46	34	200	139	53	108	231	0,998	0,27	40	130	Неуд.	Хор.

3.7. Выбор тканевых фильтров

При выборе типа тканевого фильтра учитываются следующие факторы:

- характеристика очищаемых газов на входе в фильтр: объемный расход очищаемых газов в рабочих условиях и нормальных условиях, состав газов и их взрывоопасность, температура и давление, допустимые подсосы, содержание влаги, температура точки росы с указанием предельных колебаний перечисленных величин;

- свойства пыли: тип пыли (по механизму образования), распределение частиц по размерам, весовая концентрация, содержание токсичных веществ, химический состав пыли, гигроскопичность и растворимость в воде, склонность к слипанию, взрываемость и горючесть, плотность и насыпная плотность, электрические свойства, абразивность, предельно допустимые концентрации выбросов;

- характеристика источника выделения пыли: технологические сведения о процессе и применяемом оборудовании, периодичность или непрерывность процесса, места отсоса запыленных газов;

- характеристика и требования к уловленной пыли: ее ценность, возможность использования в производстве, возможность использования в других отраслях промышленности, способ выгрузки, транспортировки и упаковки.

Основные требования к фильтрам: допустимое сопротивление фильтра, задаваемая величина выходной концентрации, размер установки, требуемая площадь, место расположения, необходимое вспомогательное оборудование для кондиционирования очищаемых газов перед фильтрами, место установки вентилятора и требования к нему, климатические условия, в которых происходит эксплуатация фильтра, потребность в воде, электроэнергии, паре, сжатом воздухе и их параметры, наличие контрольно-измерительных приборов, средств автоматики и сигнализации, выполнение санитарных норм при обслуживании установки, ее ремонта и демонтажа, состояние площадки для обслуживания, возможность проведения технологического процесса при аварийной остановке фильтра, меры по технике безопасности, контрольные и эксплуатационные затраты.

3.8. Расчет установки для очистки отходящих от сушильного барабана газов, содержащих минеральную пыль (Пример)

Рассчитать установку для улавливания продукта и обеспечения санитарной охраны атмосферного воздуха.

Исходные данные

Объемный расход газов $V_{0г}$, $\text{м}^3/\text{с}$	15
Температура газов t_g , $^{\circ}\text{C}$	170
Давление газов P_g , $\text{Н}/\text{м}^2$	294 (30 мм вод. ст.)
Барометрическое давление B , $\text{Н}/\text{м}^2$	97000 (9900 мм вод. ст.)
Концентрация пыли в газах z_1 , $\text{г}/\text{м}^3$	7,5
Дисперсность частиц пыли $2r$, мкм	15
Требуемая степень очистки газов η , %	99
Плотность газов (при н.у.) ρ_0 , $\text{кг}/\text{м}^3$	1,32
Агрессивность газов (кислая)	низкая
Точка росы водяных паров, содержащихся в газах t_p , $^{\circ}\text{C}$	55

Расчет

Учитывая относительно высокую дисперсность взвешенных частиц пыли и жесткие требования к степени очистки, в качестве сравнения рассмотрим возможность применения для очистки отходящих газов два варианта установки фильтров:

- типа РФГ-VMC с обратной продувкой атмосферным воздухом (приложение Г);
- типа ФРИ с двухсторонней импульсной продувкой сжатым воздухом (приложение Д).

В качестве фильтроматериала для рукавов к фильтрам РФГ-VMC используем ткань лавсановую фильтровальную (табл. 3.3), удельную газовую нагрузку примем $0,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{мин})$, согласно табл. 3.1.

Для фильтров типа ФРИ применим войлок иглопробивной синтетический фильтровальный (табл. 3.3), удельную газовую нагрузку примем $1,25 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{мин})$, согласно табл. 3.1.

В обоих случаях, учитывая рабочую температуру для фильтроматериалов на основе лавсана не более 130°C , очищаемые газы, поступающие на фильтр, должны быть охлаждены подсосом атмосферного воздуха согласно схеме, представленной на рис. 3.9 со 170 до 120°C . Поясняющие данные к схеме для разных фильтров (РФГ и ФРИ) представлены в табл. 3.4.

По уравнению теплового баланса определяем необходимое количество атмосферного воздуха для снижения температуры очищаемых газов со 170 до 120°C (потерей тепла газов через стенки газопровода пренебрегаем).

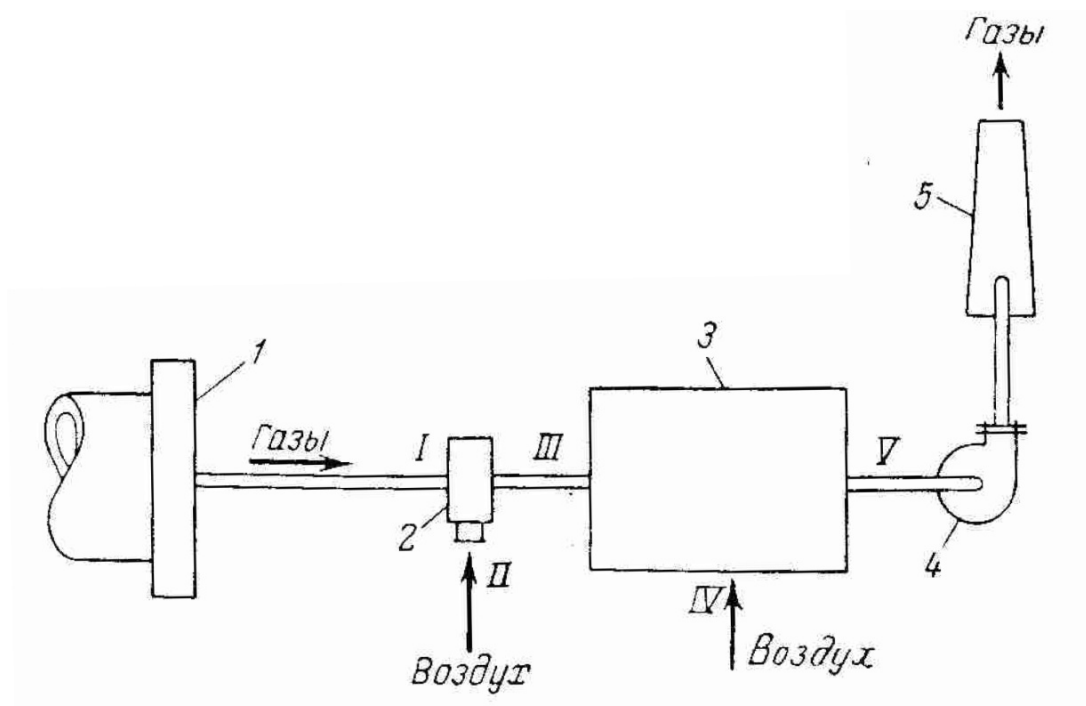


Рис. 3.9. Схема установки рукавного фильтра с предварительным охлаждением очищаемых газов путем подсоса атмосферного воздуха:

1 - сушильный барабан; 2 - смесительная камера с дроссельным клапаном;
3 - рукавный фильтр; 4 - вентилятор; 5 - дымовая труба;
I-V- расчетные участки

Таблица 3.4. Сравнительные параметры фильтров РФГ и ФРИ для установки рукавного фильтра

Параметры $\frac{\text{РФГ} - \text{VМС}}{\text{ФРИ} - 1600}$	Участок установки				
	I	II	III	IV	V
Объемный расход газов, $\text{м}^3/\text{с}$	$\frac{15}{15}$	$\frac{7,5}{7,5}$	$\frac{22,5}{22,5}$	$\frac{5,6}{3,375}$	$\frac{28}{25,875}$
Температура, $^{\circ}\text{C}$	$\frac{170}{170}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{120}{120}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{103}{108}$
Сопротивление, $\text{Н}/\text{м}^2$	$\frac{294}{294}$	-	$\frac{294}{294}$	-	$\frac{1444}{1820}$

Исходя из того, что общая энтальпия смеси воздуха и газов равна сумме их энтальпий, можно составить следующее уравнение [31]:

$$c \cdot (V_{\text{ог}} + V_{\text{ов}}) \cdot t_{\text{см}} = V_{\text{ог}} c t_{\text{г}} + V_{\text{ов}} c t_{\text{в}}, \quad (3.8)$$

где c - удельная объемная теплоемкость газов и воздуха, $c = 1,38 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$;

$V_{\text{ог}}$, $V_{\text{ов}}$ - объемный расход соответственно газов и воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

$t_{\text{в}}$ - температура атмосферного воздуха (20°C);

t_{Γ} - температура газов (170 °С);

$t_{\text{см}}$ - температура смеси газов и воздуха (120 °С).

Объемный расход атмосферного воздуха, необходимый для охлаждения газов до температуры 120 °С, находим из уравнения теплового баланса:

$$V_{\text{ов}} = \frac{V_{\text{ог}}(t_{\Gamma} - t_{\text{см}})}{t_{\text{см}} - t_{\text{в}}} = \frac{15 \cdot (170 - 120)}{120 - 20} = 7,5 \text{ нм}^3/\text{с}.$$

Общий расход газов и воздуха на входе в рукавные фильтры составит

$$V'_{\text{ог}} = V_{\text{ог}} + V_{\text{ов}} = 15 + 7,5 = 22,5 \text{ нм}^3/\text{с}.$$

Расход газов и воздуха, поступающих в рукавные фильтры, в рабочих условиях равен

$$V'_{\Gamma} = V'_{\text{ов}} \cdot \frac{(273 + t_{\text{см}}) \cdot 101325}{273 \cdot (B \pm p_{\Gamma})} = 22,5 \cdot \frac{(273 + 120) \cdot 101325}{273 \cdot (97000 - 294)} = 33,9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Необходимая рабочая поверхность фильтрации S (м²) из условия заданных скоростей для фильтров типа РФГ-VMC и фильтров типа ФРИ составит соответственно:

$$S_{\text{рфг}} = \frac{V'_{\Gamma} \cdot 60}{q_{\text{рфг}}} = \frac{33,9 \cdot 60}{0,8} = 2542 \text{ м}^2,$$

$$S_{\text{фри}} = \frac{V'_{\Gamma} \cdot 60}{q_{\text{фри}}} = \frac{33,9 \cdot 60}{1,25} = 1627 \text{ м}^2.$$

В первом случае по площади фильтрации удовлетворяет установка, состоящая из десяти рукавных фильтров РФГ-VMC однорядного исполнения с общей площадью фильтрации, равной 2800 м² (см. приложение Г).

Регенерация рукавов с обратной продувкой выполняется последовательно по одной секции одновременно в каждом выбранном фильтре, следовательно, общая рабочая площадь фильтрации в установке составит

$$S'_{\text{рфг}} = 2800 - 28 \cdot 10 = 2520 \text{ м}^2,$$

где 28 - поверхность фильтрации одной секции, находящейся в режиме регенерации в одном фильтре, м²;

10 - число секций, находящихся в режиме регенерации всей установки, шт.

Действительная рабочая скорость фильтрации в фильтрах РФГ-VMC составит

$$q'_{\text{рфг}} = \frac{V'_{\text{г}} \cdot 60}{S_{\text{рфг}}} = \frac{33,9 \cdot 60}{2520} = 0,807 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}).$$

Необходимый расход атмосферного воздуха на регенерацию всех фильтров РФГ в установке определим из отношения расхода продувочного воздуха к расходу газа при фильтрации регенерируемых секций в установке, принимаемого соотношения 1,5...2 (согласно разделу 3.4).

$$V'_{\text{рфг}} = V_{\text{рфг}}^{10} \cdot 1,5 = 3,7 \cdot 1,5 = 5,6 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $V'_{\text{рфг}}$ - расход атмосферного воздуха на регенерацию десяти секций в установке, $\text{м}^3/\text{с}$;

$$V_{\text{рфг}}^{10} = F_{\text{с}} \cdot q'_{\text{рфг}} \cdot n = 28 \cdot 0,807 \cdot 10 = 225 \text{ м}^3/\text{мин} = 3,7 \text{ м}^3/\text{с};$$

$F_{\text{с}}$ - площадь фильтрации одной секции, м^2 ;

n - число одновременно регенерируемых секций установки, шт., $n=10$.

Во втором случае таким условием, согласно приложения Д, удовлетворяет установка, состоящая из одного фильтра типа ФРИ-1600 с двухсторонней импульсной продувкой, с общей рабочей площадью фильтрации равной $S'_{\text{фри}}=1616 \text{ м}^2$. Импульсная продувка рукавов верхнего и нижнего ярусов в фильтре, по отношению одних и тех же рукавов, осуществляется одновременно по цикличной программе, обеспечивая изменение гидравлического сопротивления фильтра в заданном эксплуатационном пределе, допуская небольшое колебание производительности по очищаемому газу за счет незначительных порций воздуха на регенерацию, используя всю фильтрующую поверхность фильтра 1616 м^2 . Пример циклограммы представлен на рис. 3.7 в разделе 3.3.3.

Уточненная рабочая скорость фильтрации в фильтрах ФРИ в данном случае составит

$$q'_{\text{фри}} = \frac{V_{\text{г}} \cdot 60}{S'_{\text{фри}}} = \frac{33,9 \cdot 60}{1616} = 1,26 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}).$$

Расход сжатого воздуха на регенерацию фильтров ФРИ, исходя из опыта работы фильтров с импульсной продувкой в различных промышленных условиях, принимаем равным 0,15 % (см. раздел 3.4) от количества очищаемого газа фильтром ($\text{нм}^3/\text{с}$):

$$V'_{\text{фри}} = 0,15 \cdot V'_{\text{ог}} = 0,15 \cdot 22,5 = 3,375 \text{ нм}^3/\text{с}.$$

Эта величина потребуется для выбора необходимого компрессора с рабочим давлением 0,6 МПа для регенерации фильтров типа ФРИ в дан-

ной установке. Параметры цикличности регенерации определяются при пуско-наладочных работах при сдаче фильтров в эксплуатацию в зависимости от заданных требований в технической документации проекта установки.

Расход газов после фильтров определяют путем суммирования очищаемых газов, поступающих на вход в фильтры и поступающий воздух на регенерацию (неорганизованные присосы воздуха на фильтрах и газоходах не допускаются):

- для фильтров установки РФГ-VMC:

$$V''_{\text{рфг}} = V'_{\text{ог}} + V'_{\text{рфг}} = 22,5 + 5,6 = 28 \text{ нм}^3/\text{с}.$$

- для фильтров установки ФРИ-1600:

$$V''_{\text{фри}} = V'_{\text{ог}} + V'_{\text{фри}} = 22,5 + 3,375 = 25,875 \text{ нм}^3/\text{с}.$$

Температура газов после фильтров определяется из следующих соотношений:

- для фильтров установки РФГ-VMC:

$$\frac{V'_{\text{рфг}}}{V'_{\text{ог}}} = \frac{t'_\Gamma - t'_{\text{см}}}{t'_{\text{см}} - t'_\text{в}} = 0,25,$$

где $V'_{\text{рфг}}$ - расход атмосферного воздуха, подаваемого на регенерацию фильтров, равный $5,6 \text{ нм}^3/\text{с}$;

$V'_{\text{ог}}$ - расход очищаемого газа, поступающего на вход в фильтры после их разбавления до $t'_\Gamma = 120^\circ\text{C}$, равный $22,5 \text{ нм}^3/\text{с}$;

$t'_{\text{см}}$ - температура газов после фильтров, $^\circ\text{C}$;

$t'_\text{в}$ - температура атмосферного воздуха, 20°C .

- для фильтров установки ФРИ-1600:

$$\frac{V'_{\text{фри}}}{V'_{\text{ог}}} = \frac{t'_\Gamma - t''_{\text{см}}}{t''_{\text{см}} - t'_\text{в}} = 0,15,$$

где $V'_{\text{фри}}$ - расход сжатого воздуха, подаваемого на регенерацию фильтров, равный $3,375 \text{ нм}^3/\text{с}$;

$V'_{\text{ог}}$ - расход очищаемого газа, поступающего на вход в фильтр после разбавления до $t'_1 = 120^\circ\text{C}$, равный $22,5 \text{ нм}^3/\text{с}$;

$t''_{\text{см}}$ - температура газов после фильтра, $^\circ\text{C}$.

Подставив в уравнение соответствующие значения и решив их относительно $t'_{\text{см}}$ и $t''_{\text{см}}$, получим значение температуры газов после фильтров РФГ и ФРИ соответственно: $t'_{\text{см}} = 103^\circ\text{C}$; $t''_{\text{см}} = 108^\circ\text{C}$.

Полученные значения температур газов на входе и выходе фильтров при заданной температуре точки росы 55 °С и наличии теплоизоляции оборудования позволят исключить конденсацию паров влаги внутри фильтров.

Гидравлическое сопротивление фильтров для обоих вариантов определяем с учетом рабочих скоростей фильтрации, одинаковой производительности по газу и равной входной запыленности, принимая во внимание рекомендации раздела 3.3.3.

Гидравлическое сопротивление фильтровальной ткани в конце цикла фильтрации в фильтрах РФГ, при скорости фильтрации 0,807 м³/(м²·мин), принимаем равным 900 Н/м². Перепад давлений на входе в фильтры и на выходе принимаем равным 250 Н/м². Тогда при разрежении на входе в фильтры, равном 294 Н/м², на выходе из фильтров РФГ перепад составит

$$P'_r = 294 + 900 + 250 = 1444 \text{ Н/м}^2.$$

Гидравлическое сопротивление фильтровального иглопробивного войлока в конце цикла фильтрации в фильтре ФРИ-1600 при скорости фильтрации 1,26 м³/(м²·мин) принимаем равным 1276 Н/м². Перепад давлений на входе в фильтр и на выходе принимаем равным 250 Н/м². Тогда при разрежении на входе в фильтры, равном 294 Н/м², на выходе из фильтров ФРИ перепад составит

$$P''_r = 294 + 1276 + 250 = 1820 \text{ Н/м}^2.$$

Объемный расход газов на выходе из фильтров в рабочих условиях составит:

- для РФГ-VMC:

$$V'''_{\text{рфг}} = \frac{V''_{\text{рфг}} \cdot (273 \cdot t'_{\text{см}}) \cdot 101325}{273 \cdot (B + P'_r)} = \frac{28 \cdot (273 + 103) \cdot 101325}{273 \cdot (97000 + 1444)} = 39,7 \text{ м}^3/\text{с};$$

- для ФРИ-1600:

$$V'''_{\text{фри}} = \frac{V''_{\text{фри}} \cdot (273 \cdot t''_{\text{см}}) \cdot 101325}{273 \cdot (B + P''_r)} = \frac{25,875 \cdot (273 + 108) \cdot 101325}{273 \cdot (97000 + 1820)} = 37 \text{ м}^3/\text{с}.$$

В соответствии с найденными параметрами газов на выходе из рукавных фильтров и гидравлическим сопротивлением на участке газопроводов после фильтров должны быть подобраны вентиляторы для обеих установок газоочистки.

Эффективность пылеулавливания в данном примере определим, используя зависимость выходной концентрации пыли в газах $Z_{\text{вых}}$ от скорости фильтрации через фильтроматериал q , представленную на рис. 3.4.

По кривой 3 для рабочих скоростей фильтрации установок на базе фильтров РФГ с использованием фильтровальной лавсановой ткани, и для ФРИ при скорости фильтрации 1,26 м/мин с применением войлока фильтровального по кривой 6 определим соответствующие значения выходной запыленности $Z'_{\text{вых}} = 13 \text{ мг/м}^3$ и $Z''_{\text{вых}} = 6 \text{ мг/м}^3$.

По формуле (3.1) определим эффективность установок на базе фильтров РФГ и ФРИ:

- для РФГ:

$$\eta_{\text{рфг}} = \frac{Z_{\text{вх}} - Z'_{\text{вых}}}{Z_{\text{вх}}} \cdot 100 = \frac{7,5 - 0,013}{7,5} \cdot 100 = 99,83 \text{ \%}.$$

- для ФРИ:

$$\eta_{\text{фри}} = \frac{Z_{\text{вх}} - Z''_{\text{вых}}}{Z_{\text{вх}}} \cdot 100 = \frac{7,5 - 0,006}{7,5} \cdot 100 = 99,92 \text{ \%}.$$

Выводы:

1. По эффективности пылеулавливания заданные требования выполняются обеими установками газоочистки с эффективностью 99,83 и 99,92 %.
2. По занимаемой площади размещения фильтров установка газоочистки на базе фильтров ФРИ занимает меньшую производственную площадь, чем установка на базе фильтров РФГ-VMC, примерно в 3,6 раза.
3. По массе используемого пылеулавливающего оборудования установка на базе фильтра ФРИ имеет меньшую массу фильтров, чем установка на базе РФГ-VMC, примерно в 4,47 раза.
4. По энергозатратам на преодоление гидравлического сопротивления установка на базе фильтра ФРИ при удельной газовой нагрузке $1,26 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ по отношению к фильтрам РФГ-VMC с удельной газовой нагрузкой $0,807 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ имеет повышенные энергозатраты на 26 % при одинаковой производительности и концентрации пыли в очищаемых газах.
5. Считать наиболее выгодным вариантом для проекта установки газоочистки с применением одного рукавного фильтра ФРИ-1600.

Глава 4. ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

В настоящее время среди различных видов пылеуловителей, наибольшее распространение получили аппараты инерционного типа. Процесс пылеулавливания в них осуществляется за счет резкого изменения направления движения газопылевого потока, при этом частицы пыли, плотность которых выше плотности газа, двигаясь по инерции в прежнем направлении, попадают в пылесборник, а очищенный газовый поток выходит из аппарата.

Причиной широкого распространения пылеуловителей инерционного типа послужила простота их изготовления и эксплуатации, небольшое гидравлическое сопротивление, надежность, компактность, работоспособность при повышенных температурах, большой начальной запыленности и практически любых давлениях газа.

В данном разделе описаны конструкции пылеуловителей инерционного типа, получивших наибольшее распространение на промышленных предприятиях; представлены конструкции осадительных камер и перспективных аппаратов, в которых процесс пылеулавливания осуществляется за счет комбинирования различных способов; приведена упрощенная методика и пример расчета некоторых типов циклонов.

Разновидностью инерционного осаждения является осаждение под действием центробежной силы, благодаря которой при криволинейном движении пылегазового потока частицы отбрасываются к поверхности осаждения [37, 38].

Осаждение частиц под действием сил инерции может осуществляться в жалюзийных, ротационных и циклонных аппаратах.

4.1. Жалюзийные пылеуловители

Отделение взвешенных частиц от газа в жалюзийных пылеуловителях происходит за счет резких поворотов пылегазового потока, проходящего между лопастями жалюзи, а также рикошета частиц пыли от поверхности лопастей в направлении пылеприемника.

Схемы жалюзийных пылеуловителей представлены на рис. 4.1. Гидравлическое сопротивление аппаратов обычно не превышает значение $\Delta P = 500$ Па. Обычно жалюзийные пылеуловители применяют для улавливания пыли с размерами частиц более 20 мкм.

Следует отметить, что жалюзийные пылеуловители получили весьма широкое распространение в промышленности благодаря следующим преимуществам:

- простота конструкции;
- малые габаритные размеры;
- надежность в работе.

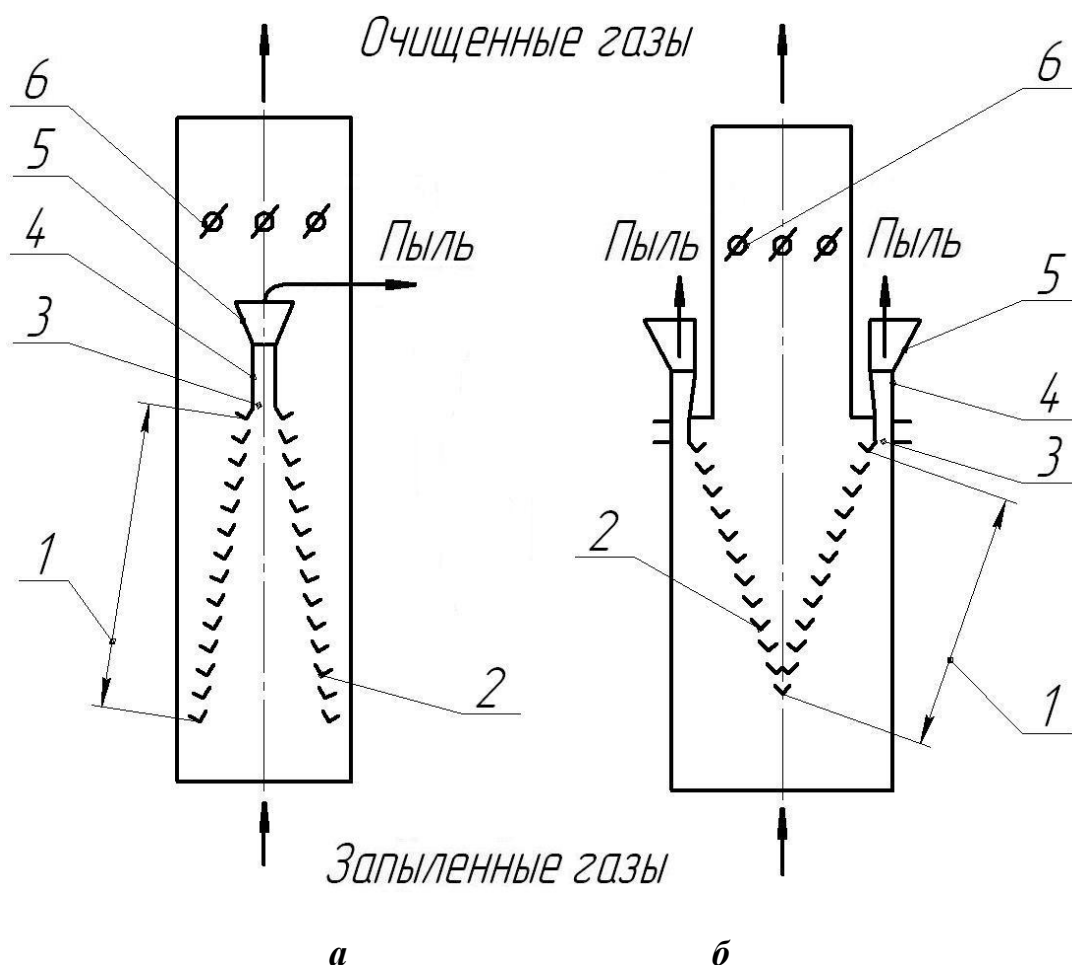


Рис. 4.1. Схемы жалюзийных пылеуловителей ВТИ:

а - с центральным пылеприемником; *б* - с боковым пылеприемником.

1 - решетка жалюзийная; 2 - лопасть; 3 - пылеприемник; 4 - диффузор;

5 - переходной патрубок; 6 - заслонка

Недостатками жалюзийных пылеуловителей являются:

- быстрый износ жалюзи;

- высокая вероятность залипания жалюзийной решетки;

- низкая эффективность при улавливании мелкодисперсной пыли [15, 39, 40]. Наибольшее распространение получили жалюзийные пылеуловители, разработанные Всероссийским теплотехническим институтом (ВТИ), Ленинградским государственным проектным институтом (Ленпромстройпроект), Московским институтом охраны труда (МИОТ), а также зарубежными фирмами «Farr», «Donaldson».

4.2. Ротационные пылеуловители

Очистка газов в ротационных пылеуловителях происходит в центробежном поле, создаваемом вращающимся рабочим колесом.

Ротационные пылеуловители могут применяться как самостоятельный агрегат пылеулавливания, а также в качестве предварительной ступени очистки газов перед высокоэффективными циклонами, тканевыми фильтрами и электрофильтрами.

Наибольшее распространение в отечественной промышленности получил ротационный дымосос пылеуловитель марки ДП (рис. 4.2), разработанный под руководством Д.Т. Карпуховича в СФ НИИОГАЗ. Принцип работы аппарата следующий. Запыленный газ поступает в улитку и под действием центробежных сил частицы перемещаются к ее стенке. Очищенный газ через патрубок и рабочее колесо поступает в выхлопную трубу, пылевой концентрат через патрубок уходит в контур рециркуляции газа. Контур рециркуляции включает в себя циклон ЦН-15 и крыльчатку, размещенную в улитке.

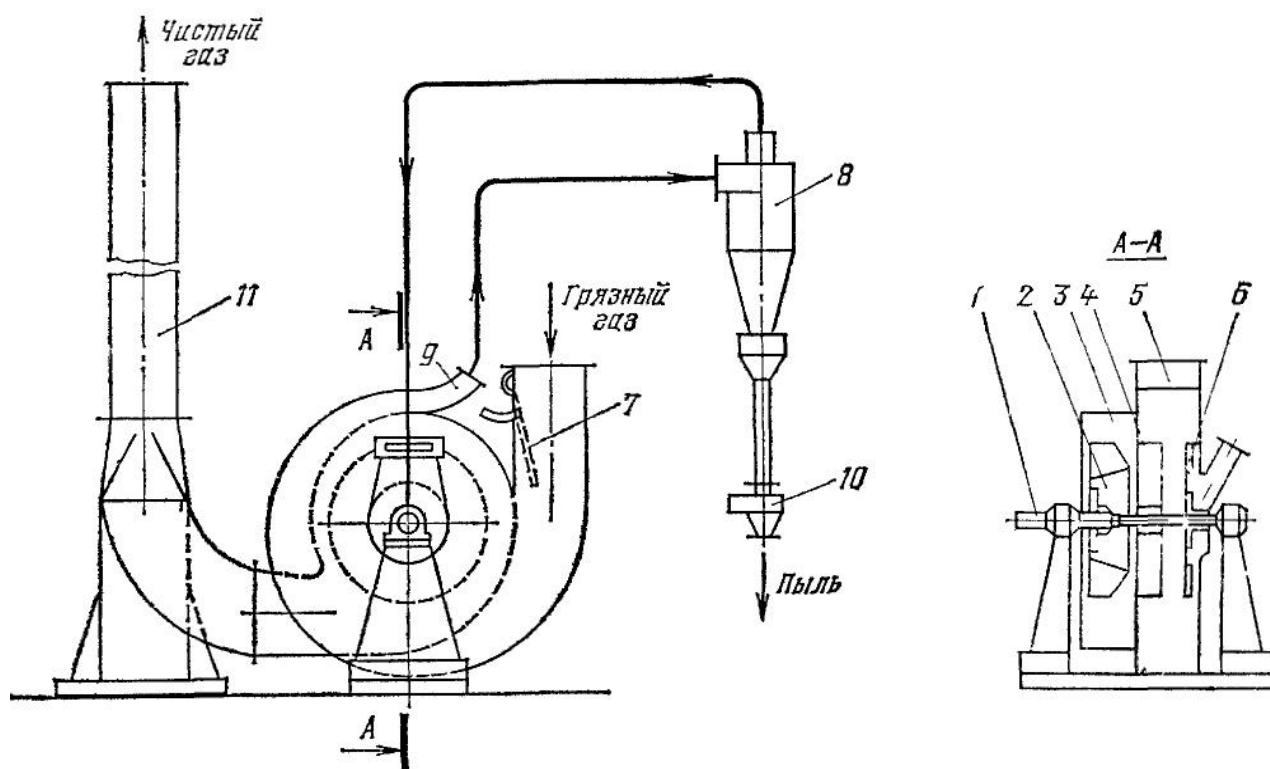


Рис. 4.2. Дымосос пылеуловитель:

- 1 - приводной вал; 2 - колесо; 3 - улитка чистого газа; 4 - патрубок;
 5 - входная улитка; 6 - дополнительная крыльчатка; 7 - регулирующая заслонка; 8 - циклон; 9 - патрубок; 10 - пылевой затвор;
 11 - выхлопная труба

Преимуществами аппаратов являются:

- сочетание функций вентилятора и пылеуловителя;
- сравнительно малые габариты.

Основными недостатками являются:

- низкая эффективность при улавливании мелкодисперсных частиц пыли (размером менее 20 мкм);
- сильный износ крыльчатки и улитки, объясняемый высокой скоростью пылегазового потока, приводит к выходу из строя пылеуловителя [15, 39-42].

4.3. Циклонные пылеуловители

Осаждение частиц в циклонных пылеуловителях осуществляется под действием инерционных сил, возникающих во вращающемся потоке газа.

Среди пылеуловителей циклоны составляют самую многочисленную группу. Они применяются практически на всех промышленных предприятиях, в том числе в металлургии, теплоэнергетике, машиностроении, химической промышленности, на транспорте и др.

Устройства, использующие принцип циклона, впервые появились еще в 1885 г. и использовались для сбора пыли [43, 44], однако актуальность исследований различных аспектов работы циклонов не утрачена до настоящего времени [45].

Циклонные аппараты получили широкое распространение в промышленности благодаря следующим преимуществам:

- сравнительно малые габариты;
- низкая металлоемкость;
- простота в изготовлении и эксплуатации;
- надежность;
- возможность успешной работы при высоких давлениях газов;
- способность работать при повышенных температурах и большой начальной запыленности.

Основным недостатком циклонных пылеуловителей является их низкая эффективность при улавливании частиц пыли размером менее 5 мкм.

Циклонные пылеуловители могут быть подразделены:

- на противоточные осевые циклоны;
- прямоточные осевые циклоны;
- вихревые пылеуловители.

4.3.1. Противоточные осевые циклоны

Принцип работы данных пылеуловителей (рис. 4.3) можно описать следующим образом. Запыленный газовый поток, попадая в аппарат через тангенциально или спирально расположенный патрубок, приобретает

вращательное движение, вследствие чего частицы пыли отбрасываются к стенке.

Двигаясь вдоль внутренних стенок цилиндрической и конической части корпуса, частицы пыли, захваченные внешним вихрем, опускаются винтообразно в бункер, где происходит осаждение пыли. Внешний вихрь, освобожденный от пыли, изменяет свое направление, переходя во внутренний, движется из бункера снизу вверх и выбрасывается в атмосферу через патрубок очищенного газа.

Бункер служит как для хранения уловленной пыли, так и для затухания первичного вихря и непосредственно участвует в аэродинамике циклонного процесса.

Проведенный рядом авторов [46, 47] анализ влияния различных конструктивных и режимных факторов на гидравлическое сопротивление и эффективность пылеулавливания позволил сформулировать основные общие принципы создания аппаратов центробежного типа.

К ним можно отнести:

- применение совершенных в аэродинамическом отношении закручивающих устройств;
- формирование рациональной структуры потока в проточной части циклона;
- выбор оптимальной для каждого конкретного аппарата интенсивности закручивания пылегазового потока.

На рис. 4.4 изображены некоторые разновидности конструкций противоточных осевых циклонов одинакового назначения. Схемы построены в одном масштабе. Существует также ряд других конструктивных модификаций, не показанных на рис. 4.4 [15, 39, 40, 48, 49].

Для очистки газов больших объемов применяются групповые циклоны, компоновка которых может включать 2, 4, 6, 8 одиночных цикло-

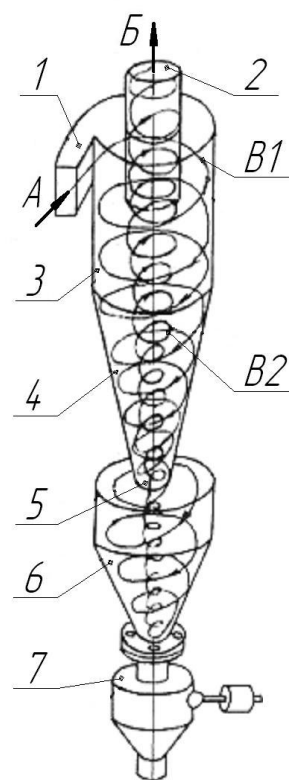


Рис. 4.3. Схема противоточного осевого циклона:

- 1 - входной патрубок; 2 - труба выхлопная; 3 - корпус циклона;
- 4 - конус; 5 - отверстие пылевывпускное; 6 - бункер; 7 - затвор.
- A - вход запыленного газа;
- B - выход очищенного газа;
- B1 - внешний вихрь;
- B2 - внутренний вихрь

Technical drawings of seven different types of anchor bolts (a-zh) used for securing structures to foundations. The drawings show various shapes, including conical, cylindrical, and hooked forms, with some having additional components like nuts or washers.

Групповые циклоны имеют подводящий коллектор, через который запыленный газ распределяется по отдельности в каждый циклон. На выходе очищенный газ собирается в общий сборник циклонов. Последний выполняется в виде камеры прямоугольной или круглой формы, а также может иметь вид улиток, которые затем соединяются с общим газоходом. Использование улиток вместо камер сокращает высоту установки группового циклона.

Следует отметить, что компоновка циклонов в группу не снижает их степень очистки. Исключением является компоновка, в которой выгрузка пыли из циклонов производится шнеком при отсутствии бункерной части.

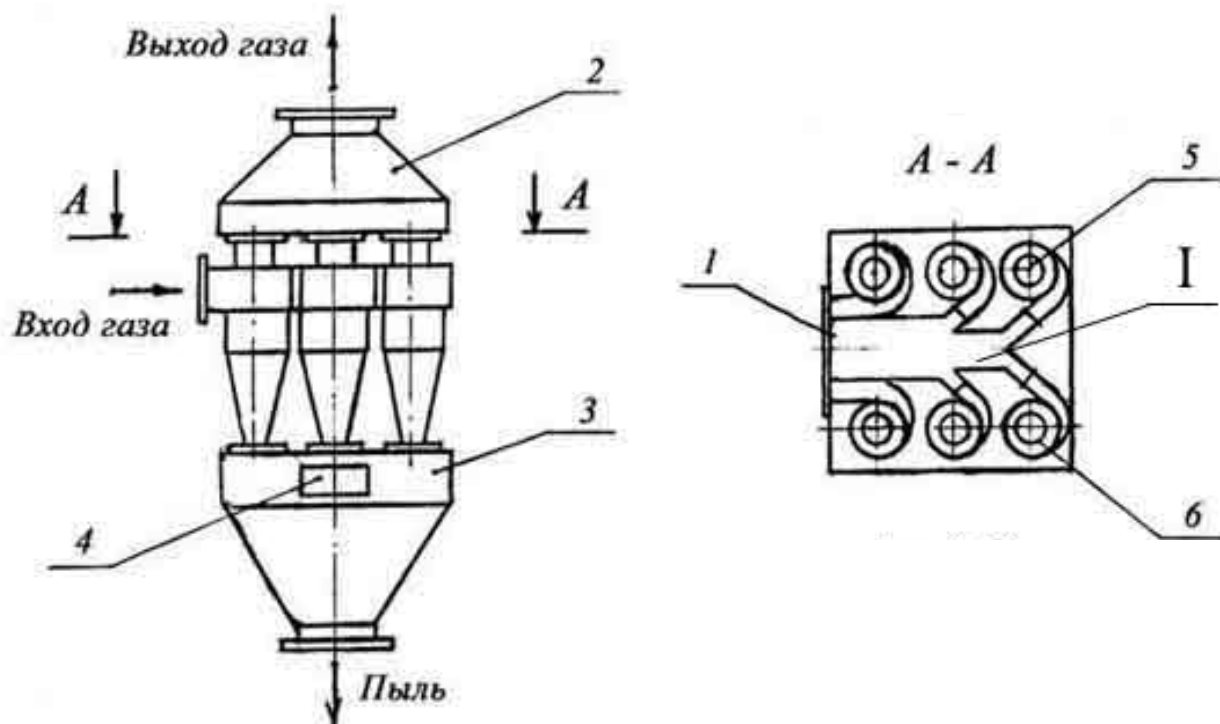


Рис. 4.5. Схема компоновки группового циклона СЦН-40 из шести элементов:

1 - коллектор грязного газа; 2 - камера чистого газа; 3 - бункер;
4 - люк; 5 - циклон левый; 6 - циклон правый

Коэффициент гидравлического сопротивления групповой компоновки циклонов, по сравнению с одиночным циклоном, повышается в среднем на 20-25 % [15].

Батарейные циклоны применяются для очистки дымовых газов тепловых электростанций, промышленных котельных, сжигающих твердое топливо, а также в других отраслях промышленности. Батарейные циклоны состоят из нескольких десятков и даже сотен циклонных элементов, параллельно установленных в одном корпусе, имеющим общий вход и выход очищаемого газа, а также общий бункер. Закручивание газа в циклонных элементах производится с помощью лопаточных завихрителей или за счет улиточного входа газа.

Схема батарейного циклона БЦ-2, имеющего циклонные элементы с розеточными закручивателями, показана на рис. 4.6. Диаметр циклонного элемента – 254 мм, условная скорость в корпусе циклона – 4...5 м/с, коэффициент гидравлического сопротивления $\xi = 80$. Степень очистки дымовых газов от летучей золы котельных со слоевым сжиганием – 70-75 %.

Принцип работы: запыленный газ через патрубок 1 поступает в камеру грязного газа 2 и распределяется по циклонным элементам 4. С помощью циклонных элементов производится очистка газа от пыли. Уловленная пыль отводится в бункер 8, далее через затвор выгружается наружу. Очищенный газ после циклонных элементов поступает в камеру чист-

того газа 3, а затем с помощью вентилятора выбрасываются через дымовую трубу в атмосферу.

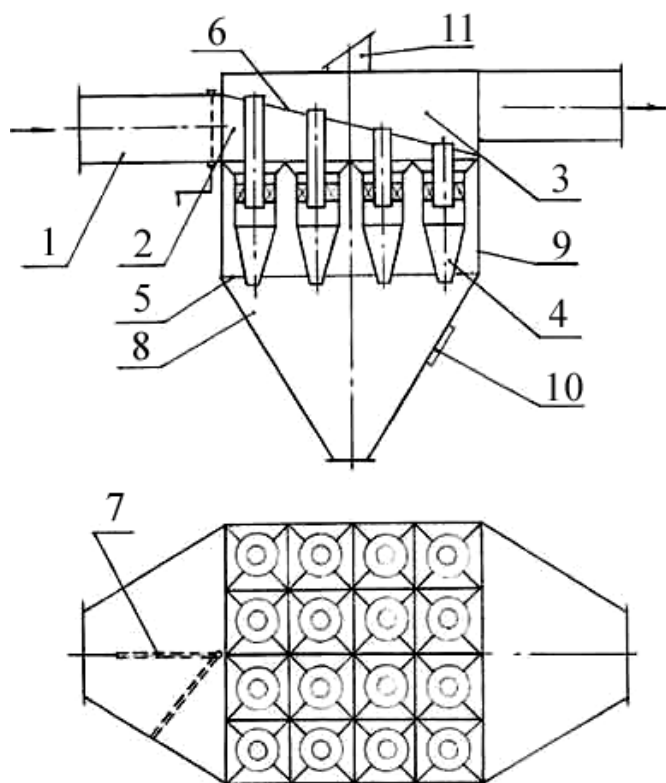


Рис. 4.6. Батарейный циклон типа БЦ-2:

1 - входной патрубок; 2 - камера грязного газа; 3 - камера очищенного газа; 4 - циклонный элемент; 5 - нижняя решетка; 6 - верхняя решетка; 7 - шибер; 8 - бункер; 9 - корпус; 10 - люк; 11 - клапан предохранительный

Камеры чистого и грязного газа, а также бункер между собой разделяются герметичными перегородками 5 и 6. На входе в камеру грязного газа располагается шибер 7, с помощью которого производится отключение части циклонных элементов в случае снижения расхода очищаемых газов.

В промышленности кроме батарейного циклона БЦ-2 применяются циклоны БЦ-512, БЦУ, ЦБР и др., в которых используются циклонные элементы различных конструкций.

Батарейные циклоны в процессе эксплуатации, по сравнению с групповыми циклонами, имеют меньшую эффективность улавливания. Это объясняется плохой равномерностью распределения запыленного потока по циклонным элементам, что приводит к большим перетокам газа в бункере между ними [15].

4.3.2. Прямоточные осевые циклоны

В прямоточных осевых циклонах пылегазовый поток не изменяет своего основного направления относительно оси аппарата, что позволяет уменьшить гидравлическое сопротивление. Они могут работать как с отводом части очищаемого газа, так и без отвода. Первые нашли применение в основном на транспорте, в качестве первой ступени очистки воздуха, поступающего в двигатели, вторые - в машиностроении, промышленности строительных материалов и энергетике.

Если история создания противоточного осевого циклона насчитывает более 130 лет, то масштабные исследования прямоточных осевых циклонов как отечественными, так и зарубежными авторами начались в 50-х годах 20-го столетия.

Схема прямооточного осевого циклона с отводом части очищаемого газа, исследованного Дэниэльсом [44] представлена на рис. 4.7. Аппарат работает следующим образом. Запыленный газ поступает на вход, где при помощи закручивателя 1 приобретает вращательное движение. Под действием центробежной силы частицы пыли перераспределяются по сечению циклона, причем концентрация частиц уменьшается у оси и значительно возрастает в пристенной зоне. Из этой зоны пыль с частью газа поступает в камеру 2, откуда с частью газа через пылеотводящий патрубок 4 отводится за пределы аппарата на доочистку. Очищенный газ собирается в камере 3 и поступает в газоход.

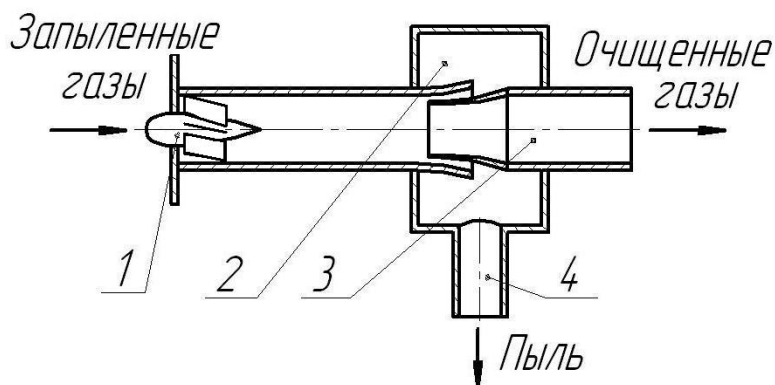


Рис. 4.7. Схема прямооточного осевого циклона с отводом части очищаемого газа, исследованного Дэниэльсом:

1 - закручиватель; 2 - камера загрязненного газа;
3 - камера очищенного газа;
4 - пылеотводящий патрубок

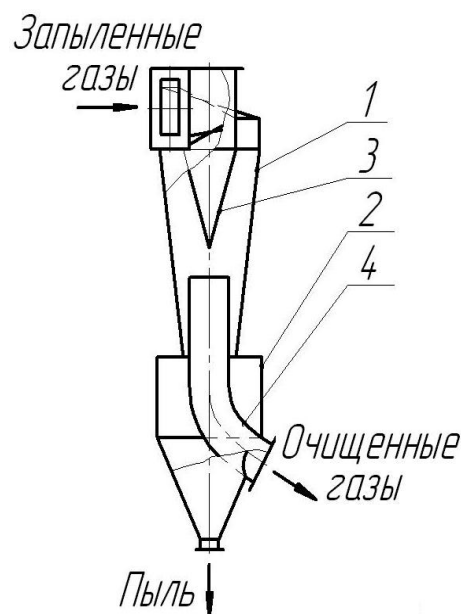


Рис. 4.8. Схема циклона НВГК:

1 - корпус; 2 - бункер;
3 - обтекатель;
4 - выхлопная труба

Конструкция закручивателя, который в значительной мере определяет эффективность, и гидравлическое сопротивление прямооточного циклона может быть самой различной. Единой точки зрения на то, каким должен быть оптимальный закручиватель в прямооточном циклоне не существует. Так в зарубежной практике находят применение тринадцать типов закручивателей [44].

В химической промышленности и машиностроении находят применение в основном одиночные и групповые прямооточные осевые циклоны больших диаметров. Так в производстве кремнефтористого натрия применен циклон НВГК, схема которого представлена на рис. 4.8. Эффектив-

ность пылеулавливания двух параллельно работающих циклонов НВГК диаметром 350 мм составила $\eta = 98,5 \%$ при гидравлическом сопротивлении $\Delta P = 600$ Па.

В настоящее время разработаны конструкции циклонов, сочетающие в себе положительные свойства противоточного и прямоточного циклонов. Схема группового циклона ВПЦ, разработанного для термического цеха производства коробок передач ОАО «Автодизель», представлена на рис. 4.9, по результатам замеров степень очистки газа от пыли составляет $\eta = 96\%$, коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta_{\Pi} = 104$.

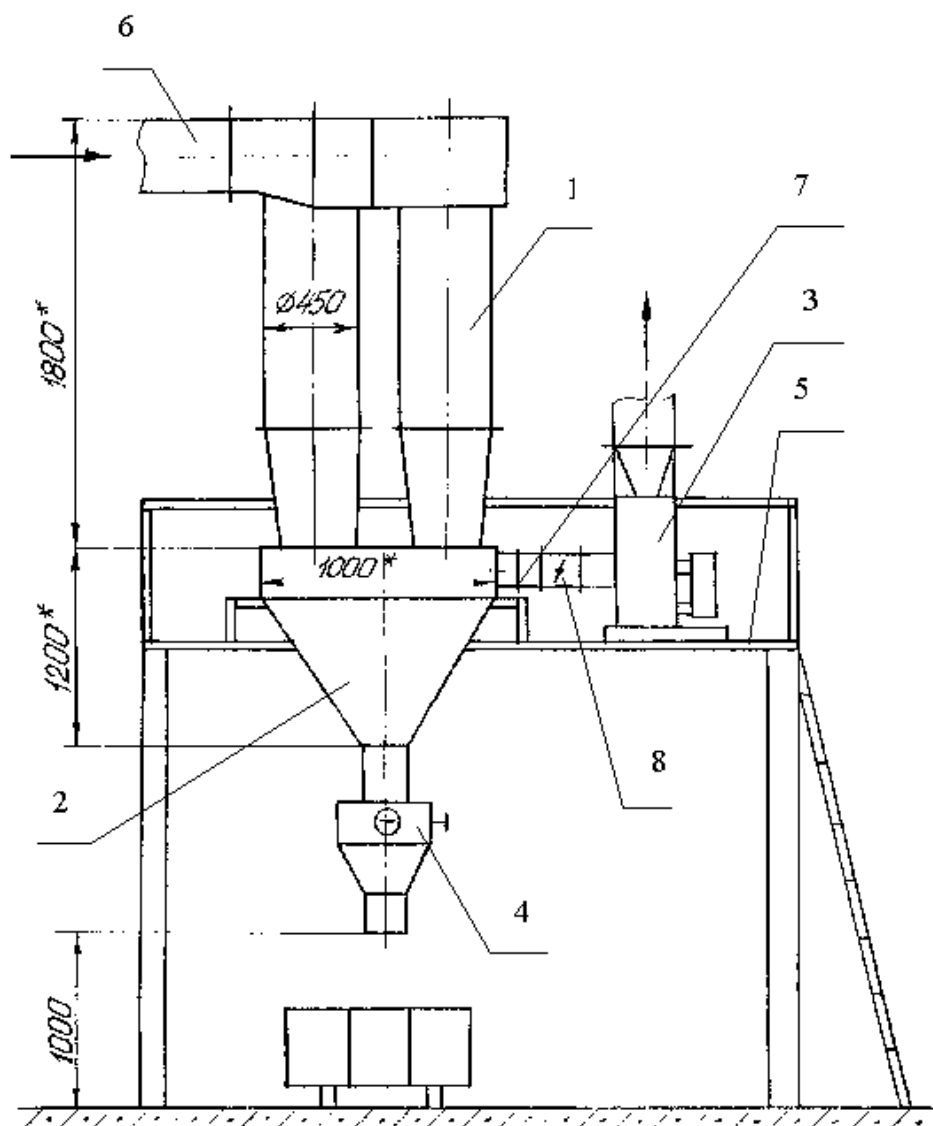


Рис. 4.9. Схема группового циклона ВПЦ, разработанного для термического цеха производства коробок передач ОАО «Автодизель»:

- 1 - циклон ВПЦ; 2 - бункер; 3 - вентилятор; 4 - затвор;
- 5 - площадка обслуживания; 6 - подводящий газоход;
- 7 - отводящий газоход; 8 - регулирующая заслонка

Выпускной патрубок циклона ВПЦ проходит через бункер, что позволяет устранить конденсацию влаги в бункере при очистке горячих газов. Уловленная пыль, в этом случае, не будет зависать при выгрузке. Циклоны типа ВПЦ менее чувствительны к подсосам постороннего воздуха в бункер, т.к. величина разрежения в бункере в несколько раз меньше обычных (противоточных) циклонов [15, 50, 51].

Эти циклоны хорошо komponуются с вентилятором в аспирационных системах.

Разработке новых конструкций циклонов на основании изучения кривых фракционной очистки газов посвящена работа американских ученых [52], в которой утверждается, что «должным образом спроектированные и функционирующие циклоны являются высокоэффективными уловителями и могут быть использованы как конечные улавливающие устройства». Таким образом, несмотря на то, что циклонные аппараты давно известны, работы по их исследованию ведутся и по сегодняшний день [11, 15, 39, 40, 52-58].

Разновидностью прямоточных осевых циклонов являются так называемые «баллистические» пылеуловители, в которых пыль концентрируется не у стенок корпуса, а у его оси. Оттуда пыль с частью воздуха через расположенный по оси пылеприемник удаляется за пределы аппарата, а очищенный воздух поступает в газопровод. Этот процесс может повторяться многократно.

Схема баллистического пылеуловителя представлена на рис. 4.10.

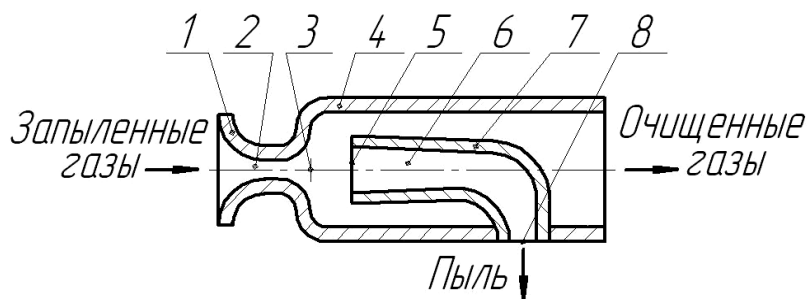


Рис. 4.10. Схема «баллистического» пылеуловителя:

- 1 - сопло; 2 - горловина; 3 - входное отверстие сопла;
- 4 - корпус; 5 - входное отверстие разделительного патрубка;
- 6 - прямой участок; 7 - разделительный патрубок;
- 8 - выходное отверстие

В различных патентных и литературных источниках встречаются следующие названия «баллистических» пылеуловителей: конфузорный инерционный воздухоочиститель, конфузорно-диффузорный пылеуловитель, градиентный пылеуловитель, прямоточный сепаратор, диффузорный инерционный пылеотделитель, инерционный пылеуловитель и т. д.

С целью повышения эффективности, подобные аппараты могут компоноваться с пылеуловителями других типов.

Основным достоинством баллистических пылеуловителей является их простота и способность функционирования при очень высоких газовых нагрузках, сохраняя сравнительно низкие значения гидравлического сопротивления [59-62].

4.3.3. Вихревые пылеуловители

В последнее время в промышленности стали активно применяться вихревые пылеуловители, основным отличием которых от противоточных осевых циклонов является наличие вспомогательного закручивающего газового потока.

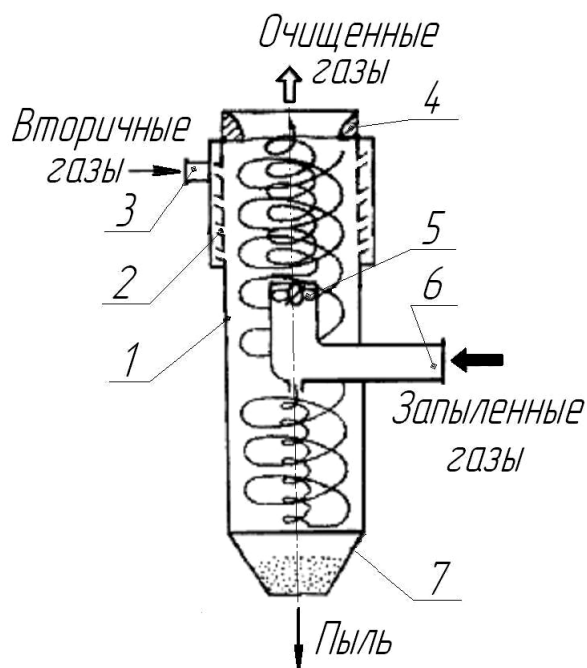


Рис. 4.11. Схема вихревого пылеуловителя:

- 1 - корпус аппарата; 2 - сопло;
- 3 - патрубок вторичного потока газа;
- 4 - разделительная диафрагма;
- 5 - завихритель; 6 - патрубок запыленного газа; 7 - бункер

В вихревом аппарате, представленном на рис. 4.11, пылегазовый поток поступает на очистку через спиральное отверстие 6 и движется вверх корпуса 1, подвергаясь при этом сначала воздействию завихрителя 5, а затем вытекающих из сопел 2 струй газа патрубка вторичного подвода газа 3. Струи вторичного газа, выходящие из сопел в одном направлении с основным потоком, интенсифицируют его вращение и одновременно создают в пристенном слое газа аппарата винтовое движение, направленное вниз. Под действием центробежных сил взвешенные в потоке частицы отбрасываются к периферии, а оттуда поступают в бункер 7. Очищенный газ, минуя разделительную диафрагму 4, поступает к потребителю или выбрасывается в атмосферу.

Подобно противоточным осевым циклонам, вихревые пылеуловители могут быть объединены в группы, а также работать в качестве первой ступени очистки перед тканевыми фильтрами и электрофильтрами. Эффективность вихревых пылеуловителей в основном сопоставима с эффективностью циклонов ЦН-15, металлоемкость несколько выше.

Диаметр применяемых вихревых пылеуловителей обычно находится в интервале от 300 до 2000 мм, расход очищаемых газов через аппарат лежит в диапазоне от 1500 до 80000 м³/ч.

Принцип использования вторичного газа для повышения эффективности циклонов является, несомненно, весьма перспективным и нашел применение при создании одной из конструкций противоточного осевого циклона вихревого типа (рис. 4.12) [43]. Основное отличие данной конструкции от обычных аппаратов заключается в создании между нисходящим запылённым газом и восходящим очищенным потоком преграды в виде закрученного кольца чистого газа, которое препятствует сносу частиц пыли в выходящий через выхлопную трубу поток. Для этого на нижнем срезе выхлопной трубы 2 установлено дополнительное устройство, состоящее из насадки 5, завихрителя 7, перфорированного кольца 6 (которое служит для равномерного распределения чистого газа по лопаткам завихрителя 7) и подводящего патрубка 4. Одним из преимуществ такого циклона (кроме более высокой эффективности пылеулавливания) является простота, с которой его можно изготовить из обычного противоточного осевого циклона, путем небольших переделок выхлопной трубы.

Недостатком вихревых пылеуловителей является необходимость использования дополнительного тягодутьевого устройства, а также сложность в изготовлении и эксплуатации [39, 11, 63-67].

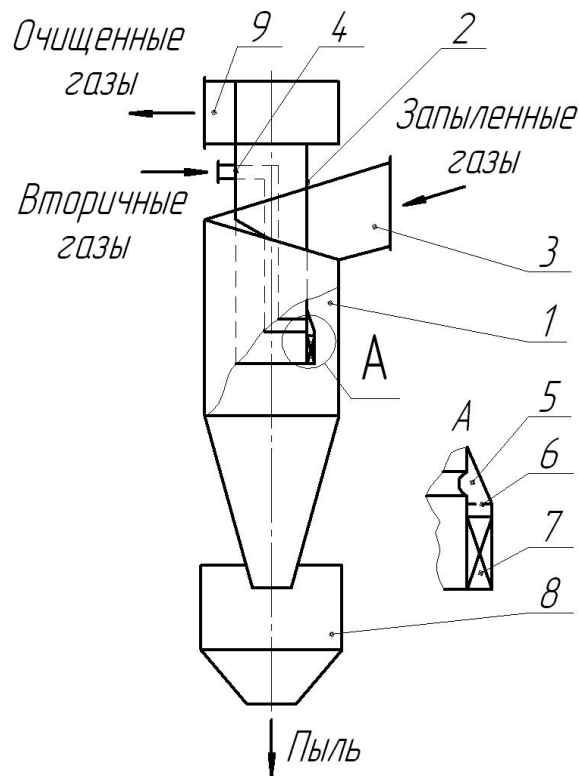


Рис. 4.12. Противоточный осевой циклон вихревого типа:

- 1 - корпус; 2 - выхлопная труба;
- 3 - тангенциальный ввод; 4 - труба подвода чистого воздуха; 5 - насадка;
- 6 - диафрагма; 7 - завихритель;
- 8 - бункер; 9 - улитка

4.3.4. Выгрузка пыли из бункера циклона

Выгрузка уловленной пыли из бункера циклона может осуществляться непрерывно или периодически в зависимости от ее количества и свойств. Так взрывоопасную и пожароопасную пыль необходимо удалять непрерывно.

Для предотвращения подсоса наружного воздуха в циклон во время выгрузки пыли из бункера применяются затворы.

В случае непрерывного удаления пыли применяют затворы с электроприводом или автоматические (рис. 4.13).

Автоматические затворы работают за счет уравнивающего контргруза и устанавливаются, если перепад давления между бункером циклона и пылеотводящим трактом не превышает 1000 Па. В случае если перепад давления составляет до 2000 Па, устанавливаются последовательно два автоматических затвора.

Следует отметить, что недостатком автоматических затворов является их негерметичность, что приводит к значительным подсосам воздуха и, следовательно, отрицательно влияет на эффективность пылеулавливания циклонной установки.

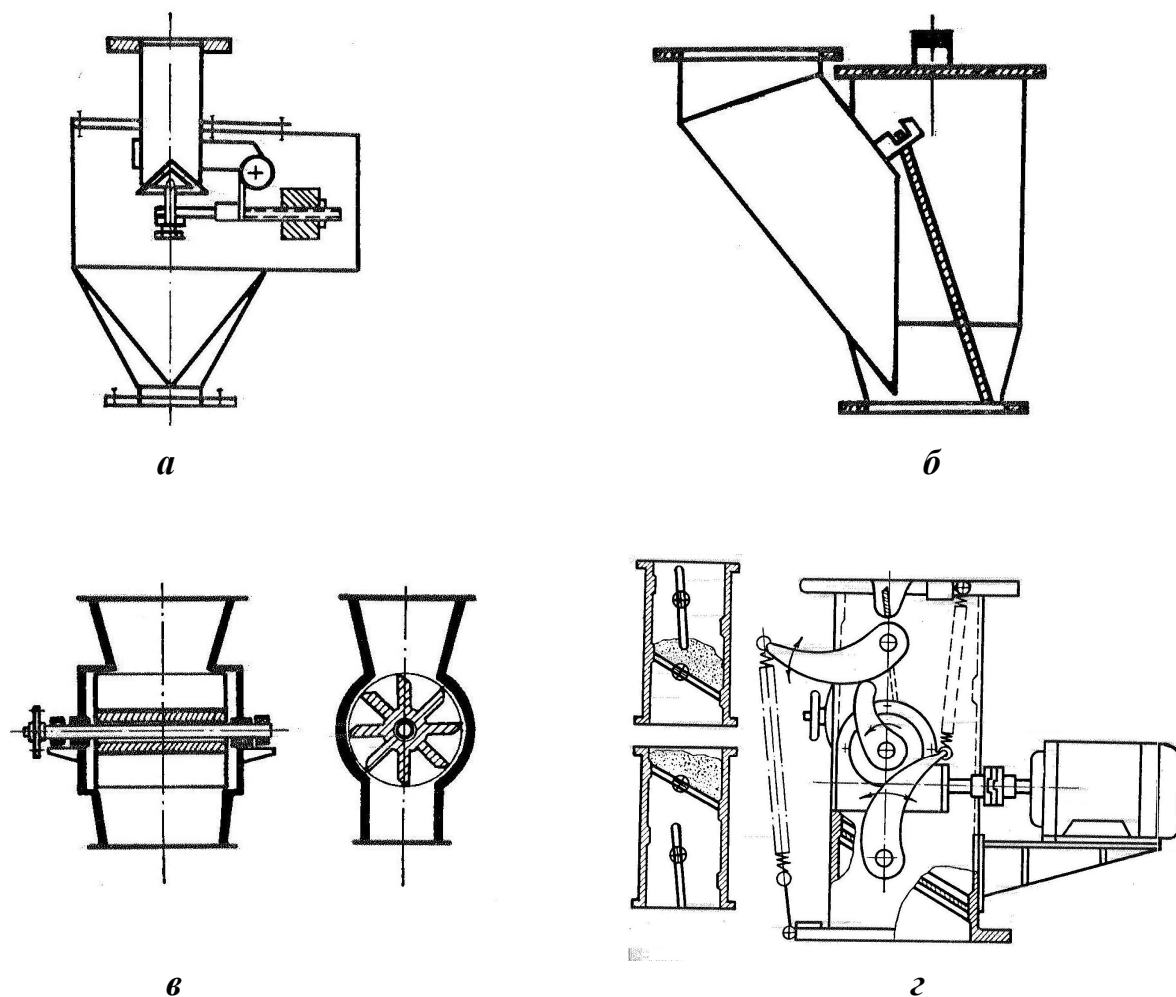


Рис. 4.13. Конструкции затворов:

а - горизонтальный автоматический затвор «Мигалка»;

б - вертикальный автоматический затвор «Мигалка»;

в - роторный лопастной затвор с электроприводом;

г - двойной лопастной затвор с электроприводом

Более высокую степень герметичности обеспечивают затворы с электроприводами, в конструкциях которых используются лопастные роторы, шнеки или клапаны. Роторные лопастные затворы целесообразно применять при выгрузке пыли, не склонной к слипанию. При выгрузке слипающейся пыли более надежную выгрузку обеспечивают двойные лопастные затворы.

Для периодической выгрузки пыли используются шиберные затворы и затворы с ручным управлением [68].

4.4. Осадительные камеры

Осадительные камеры применяются для предварительной очистки газа от грубой пыли, улавливание которой происходит за счет сил тяжести, действующих на частицы при их движении в газовой среде.

Пылеосадительные камеры подразделяются на камеры с горизонтальным направлением течения пылегазового потока (горизонтальные осадительные камеры) (рис. 4.14) и камеры с вертикальным направлением течения потока (вертикальные осадительные камеры) [15].

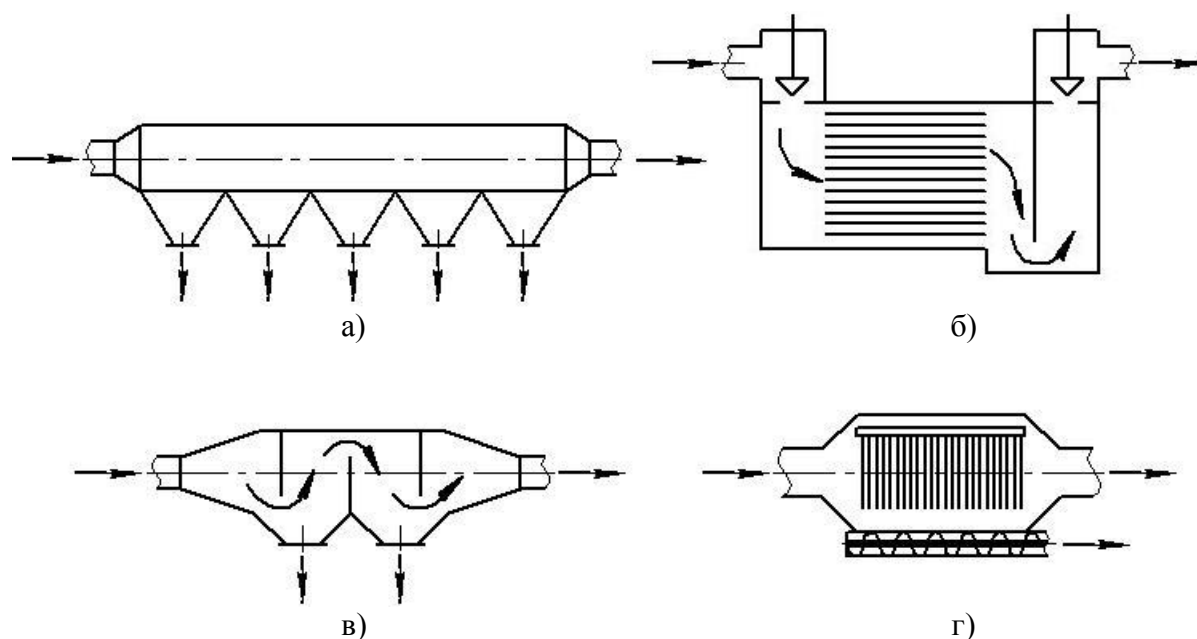


Рис. 4.14. Горизонтальные пылеосадительные камеры:

а - полая; б - многополочная; в - с перегородками;
г - с цепными или проволочными завесами

Для достижения удовлетворительной эффективности очистки газов необходимо, чтобы частицы пыли находились в пылеосадительной камере продолжительное время, поэтому скорость движения газов в камере обычно находится в интервале 0,2...0,8 м/с.

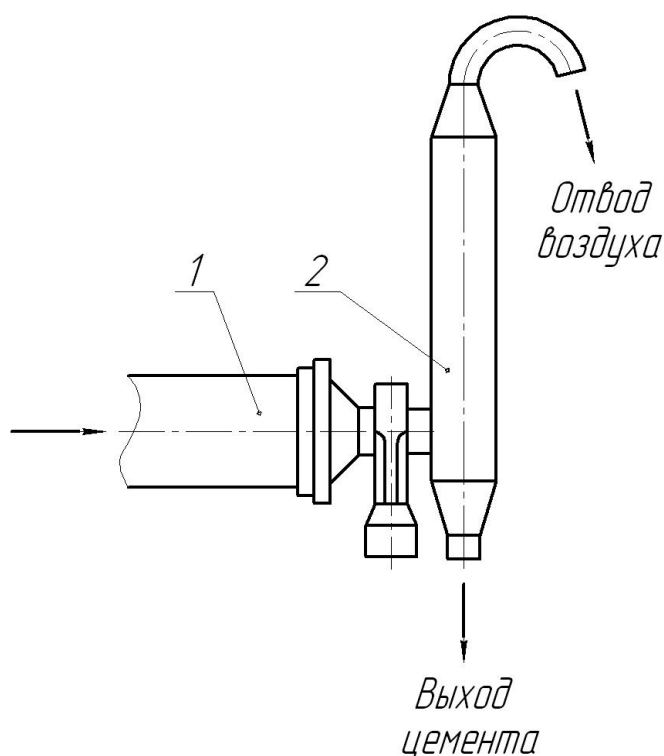


Рис. 4.15. Схема вертикальной осадительной камеры:
1 - мельница; 2 - шахта

Достоинствами пылесоса-осадительных камер являются:

- простота конструкции;
- малое гидравлическое сопротивление;
- способность работать при высоких температурах и запыленностях.

К недостаткам относятся:

- низкая эффективность;
- большие габаритные размеры.

Схема вертикальной осадительной камеры показана на рис. 4.15. Эта камера используется в цементной промышленности, устанавливается после мельниц. Эффективность пылеулавливания при скорости в камере 0,6 м/с достигает $\eta = 95 \%$ [15, 26, 37, 40].

4.5. Комбинированные пылеуловители

Анализ описанных выше конструкций пылеуловителей позволяет судить о том, что во многих аппаратах используется только один способ осаждения частиц пыли, что не всегда приводит к достаточной эффективности пылеулавливания.

В связи с этим рядом ученых [69, 70] были разработаны аппараты, в которых повышение эффективности пылеулавливания достигается путем комбинирования различных способов осаждения пыли.

Однозначно определить принадлежность этих аппаратов, к какой либо традиционной группе невозможно. В связи с этим целесообразно выделить их в отдельную группу.

Примером пылеуловителя сочетающего в своей работе различные способы осаждения пыли является электроциклон (рис. 4.16) [69]. Авторы утверждают, что аппарат имеет высокую эффективность на пыли с любым удельным электрическим сопротивлением. Степень очистки газа в электроциклоне на ряде пылей выше, чем в циклоне за счет более эффективного улавливания мелких фракций.

Недостатком электроциклонов является возможность налипания слоя пыли на коронирующие электродах и последующим снижением на-

пряженности электрического поля. При этом эффективность аппаратов резко снижается.

К комбинированным пылеуловителям также можно отнести двухступенчатый пылеуловитель, состоящий из циклона и фильтра, фильтровальная перегородка которого выполнена из нитей, укрепленных между верхней и нижней решетками. Циклон-фильтр изображен на рис. 4.17 в период очистки газа.

Пылеуловитель работает следующим образом. В процессе очистки нижняя решетка 6 поднята приводом 9 вверх и нити 7 сжаты, образуя фильтровальный слой. Запыленный газ через подводящий трубопровод 3 поступает тангенциально в промежуток между корпусом 1 и патрубком 12 и закручивается. В результате этого крупные пылинки оседают на стенках корпуса 1 и падают в пылесборник 2. Частично очищенный газ поступает затем через патрубок 12 в зазор 10 между воронкой 11 и нижней решеткой 6, а затем через фильтровальный слой из нитей 7 в отводящий трубопровод 4. При этом оставшиеся в газе пылинки оседают на ворсистых нитях 7.

Патрубок 12 в процессе очистки вытянут в виде цилиндра благодаря оттягивающему усилию груза 13. Это позволяет поддерживать постоянным зазор между ним и корпусом 1, обеспечивая равномерное течение запыленного газа по спирали.

После запыления фильтровального слоя производят регенерацию. Для этого привод 9 включают (например, автоматически по реле времени или от датчика перепада дав-

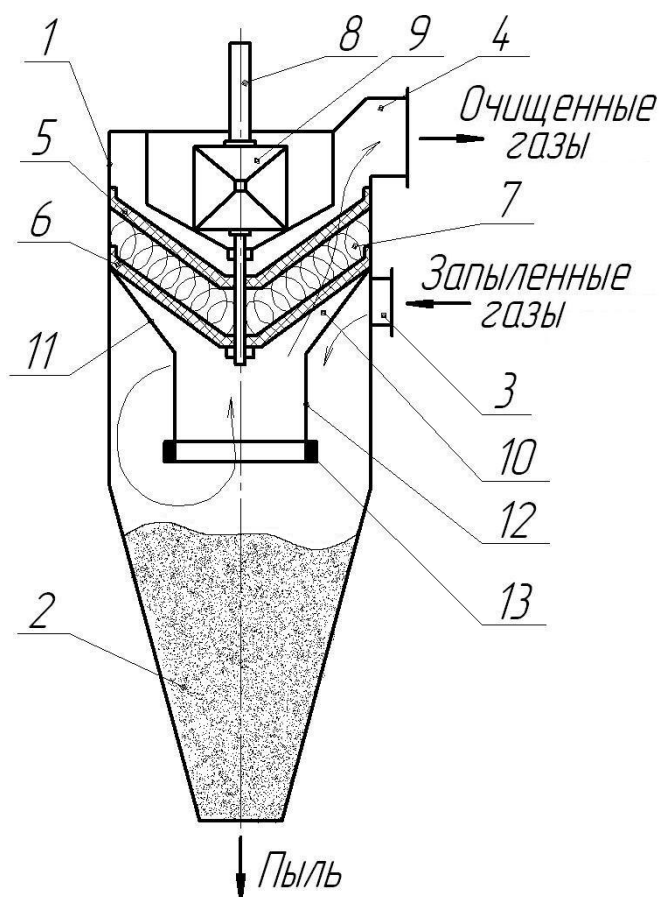


Рис. 4.17. Двухступенчатый пылеуловитель:

- 1 - цилиндрический корпус;
- 2 - пылесборник; 3 - подводящий трубопровод; 4 - отводящий трубопровод;
- 5 - верхняя решетка; 6 - нижняя решетка;
- 7 - ворсистые нити; 8 - шток;
- 9 - привод; 10 - зазор; 11 - воронка;
- 12 - вертикальный патрубок;
- 13 - кольцевое грузило

ления), шток 8 опускает нижнюю решетку 6, нити 7 вытягиваются. При этом вытягивание штока 8 производят резко, вследствие чего происходит встряхивание нитей и осевшая на них пыль падает в пылесборник 2. Таких встряхиваний производят несколько. В процессе опускания решетки 6

опускается и патрубок 12, опираясь, нижней частью в скопившуюся пыль [70].

Преимуществом данного аппарата является высокая эффективность при улавливании мелкодисперсной пыли.

Основными недостатками представленного пылеуловителя являются высокое гидравлическое сопротивление и сложность конструкции. Температура очищаемых газов определяется свойствами фильтровального материала, долговечность которого невелика.

К комбинированным пылеуловителям может быть отнесен пылеуловитель-классификатор (рис. 4.18), в котором очистка газа осуществляется на нескольких ступенях за счет силы инерции и центробежной силы.

Данный аппарат предназначен для предприятий, где требуется решить несколько задач: эффективно выделить пыль из газового потока, а также классифицировать ее по фракциям, так как частицы определенного размера являются целевым продуктом. К данным предприятиям в основном относятся производства строительных материалов (цемент, гипс, известь...).

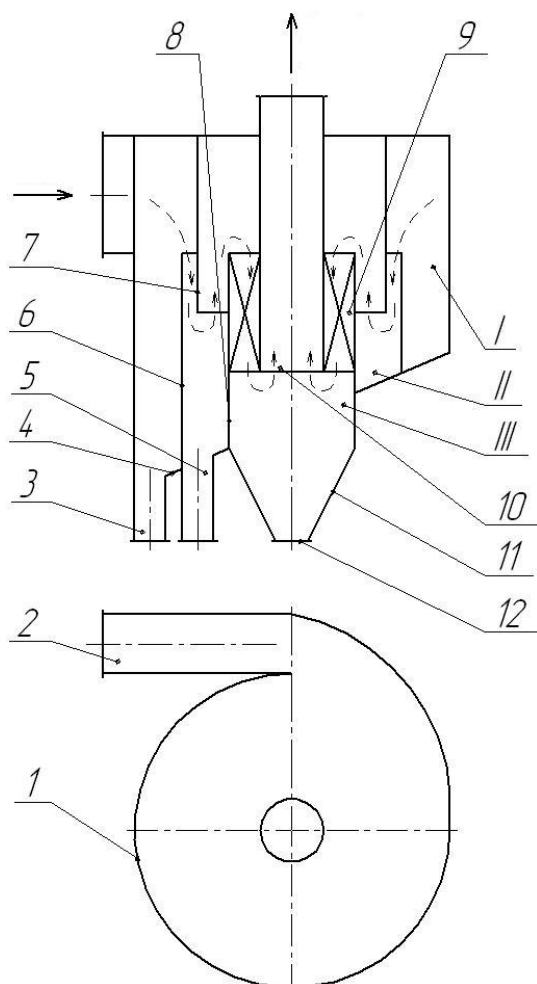


Рис. 4.18. Пылеуловитель-классификатор:

- I, II, III - три ступени очистки газа;
- 1 - корпус; 2 - входной патрубок;
- 3 - патрубок отвода крупной фракции пыли; 4 - наклонное днище; 5 - патрубок отвода средней фракции пыли;
- 6 - приемный цилиндр второй ступени очистки газа; 7 - экран; 8 - приемный цилиндр третьей ступени очистки газа;
- 9 - неподвижные лопасти; 10 - выходной патрубок; 11 - коническое днище
- 12 - патрубок отвода мелкой фракции пыли

Пылеуловитель-классификатор работает следующим образом. В корпусе пылеуловителя-классификатора размещены три ступени очистки газа (I, II, III). Запыленный газ через входной патрубок поступает на первую ступень очистки, где крупные частицы пыли за счет сил возникающих во вращающемся потоке смещаются к периферии, опускаются вниз к патрубку отвода крупной фракции пыли и удаляются из аппарата.

Поток газа со средней и мелкой фракцией пыли поступает на вторую ступень очистки, где за счет сил инерции возникающих при изменении направления движения потока газа на противоположное, частицы пыли средней фракции осаждаются и удаляются из аппарата через патрубок отвода средней фракции пыли.

Поток газа с мелкой фракцией поступает на третью ступень очистки газа, на которой за счет неподвижных лопастей увеличивается частота вращения пылегазового потока, следовательно, повышается действие центробежной силы при отделении мелкодисперсной пыли от газового потока. Очищенный газовый поток меняет свое направление на противоположное и через выходной патрубок выводится из аппарата, а мелкодисперсные частицы пыли по спиралеобразной траектории вдоль стенок приемного цилиндра третьей ступени очистки газа опускаются на коническое днище и удаляются [71].

4.6. Расчет циклонов для очистки газов промышленных предприятий

Как отмечалось выше, что циклонные пылеуловители являются наиболее распространенным видом газоочистного оборудования. В связи с этим рассмотрим подбор данного оборудования для очистки газов промышленных предприятий.

Многообразие конструкций циклонов, разработанных на сегодняшний день, затрудняет их подбор для промышленного использования. В связи с этим в СФ НИИОГАЗ проводились испытания различных конструкций циклонов на протяжении ряда лет. В результате были рекомендованы к использованию на промышленных предприятиях следующие типы циклонов. Для очистки газов от грубой пыли (с размером частиц более 20 мкм) целесообразно применение циклонов с винтовым входом газа ЦН-15, ЦН-24, которые обладают небольшими габаритами при высокой производительности. Циклон ВЦНИИОТ применяется для улавливания пыли с низкой плотностью в легкой промышленности и по эффективности соответствует циклону ЦН-24.

Для высокоэффективной очистки газов от пыли (с размером частиц более 10 мкм) целесообразно применение циклона со спиральным входом

газа СЦН-40. Следует отметить разработанный в последние годы циклон СЦН-50 со спиральным входом, который рекомендуется для улавливания абразивной пыли. Срок службы этого циклона увеличен в несколько раз по сравнению с циклоном ЦН-15, при равных эффективностях и гидравлических сопротивлениях.

Конструкции циклонов ЦН-15, ЦН-24, СЦН-40, ВЦНИИОТ представлены на рис. 4.19.

Скорость пылегазового потока на входе в циклон должна быть не ниже минимально возможной скорости транспортировки пыли. В случае не выполнения данного условия пыль будет откладываться в подводящем трубопроводе и во входном патрубке циклона. В табл. 4.1 представлены значения минимальной скорости движения газа в трубопроводах местных отсосов для транспортировки пыли [15].

Таблица 4.1. Значения минимальной скорости движения газа в трубопроводах местных отсосов для транспортировки пыли

<i>Наименование транспортируемого материала</i>	<i>Скорость газа в трубопроводах, не менее, м/с</i>	
	<i>в вертикальных</i>	<i>в горизонтальных</i>
Пыль древесная с мелкими опилками	14	16
Стружка древесная	18	20
Пыль шлифовальная древесная	8	10
Чугунные и стальные опилки	19	23
Пыль угольная	14	15
Земляная, песочная пыль, горелая и формовочная земля	13	15

В табл. 4.2 представлены аэродинамические характеристики циклонов ЦН-15, ЦН-24, СЦН-40, ВЦНИИОТ при скорости газа на входе $V_{вх} = 18$ м/с. Рекомендуемая скорость газа в плане циклона $V_{пл}$ (т.е. скорость газа в сечении цилиндрической части циклона) составляет: ЦН-15 – 2,5...3,5 м/с; ЦН-24 – 3,5...4,5 м/с; СЦН-40 – 1,3...1,9 м/с; ВЦНИИОТ – 4,0...5,3 м/с.

Диаметры циклонов обычно принимаются от 200 до 1000 мм с шагом 100 мм и от 1000 до 2000 мм с шагом 200 мм.

На основе сведений, предоставленных в табл. 4.2, можно сделать вывод, что при равной скорости газа на входе наименьшее гидравлическое сопротивление имеет циклон СЦН-40, наибольшее ЦН-24.

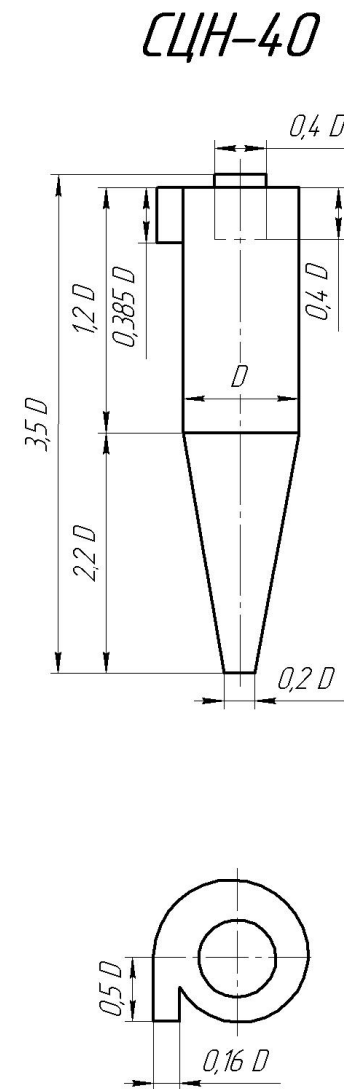
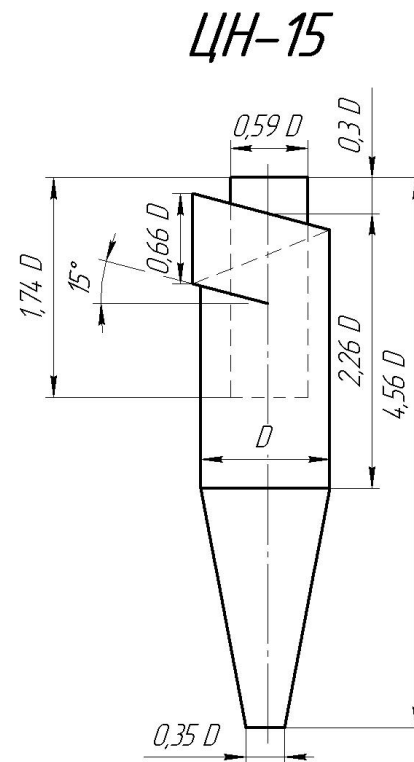
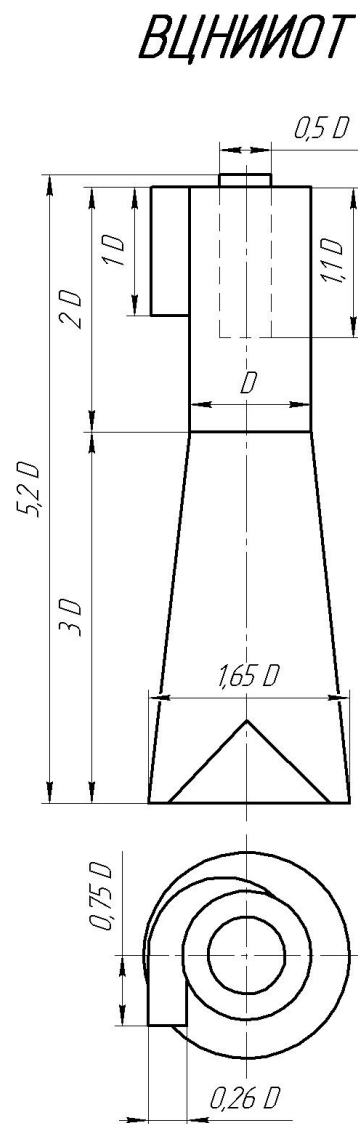
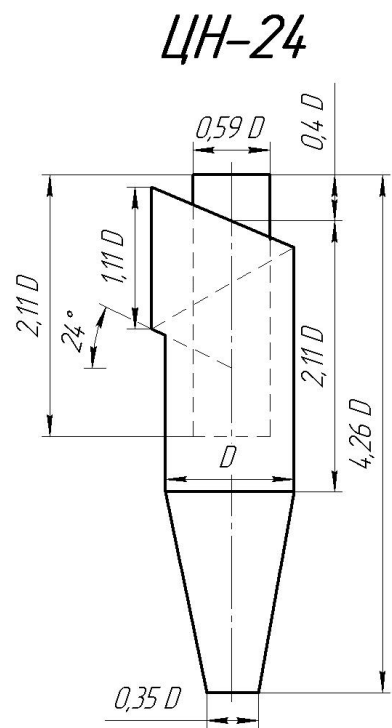


Рис. 4.19. Конструкции циклонов

Гидравлическое сопротивление циклона ΔP (Па) можно рассчитать со следующим зависимостям:

$$\Delta P = \xi_{\text{вх}} \cdot \frac{V_{\text{вх}}^2 \cdot \rho_{\text{г}}}{2}, \quad (4.1)$$

$$\Delta P = \xi_{\text{пл}} \cdot \frac{V_{\text{пл}}^2 \cdot \rho_{\text{г}}}{2}, \quad (4.2)$$

где $\xi_{\text{вх}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к входной скорости газа в циклоне;

$\xi_{\text{пл}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к плановой скорости газа в циклоне;

$\rho_{\text{г}}$ – плотность газа в рабочих условиях, кг/м^3 .

Таблица 4.2. Аэродинамические характеристики циклонов ЦН-15, ЦН-24, СЦН-40, ВЦНИИОТ

Тип циклона	Скорость газа на входе в циклон $V_{\text{вх}}$, м/с.	Коэффициент гидравлического сопротивления,	
		отнесенный к входной скорости газа в циклоне $\xi_{\text{вх}}$	отнесенный к плановой скорости газа в циклоне $\xi_{\text{пл}}$
ЦН-15	18	7,6	160
СЦН-40	18	7	1200
ЦН-24	18	10,9	80
ВЦНИИОТ	18	9,3	-

Плотность газа в рабочих условиях $\rho_{\text{г}}$ (кг/м^3) рассчитывается по формуле

$$\rho_{\text{г}} = \rho_0 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{B \pm P_{\text{г}}}{273 + t_{\text{г}}}, \quad (4.3)$$

где ρ_0 – плотность газа в нормальных условиях, кг/м^3 ;

B – барометрическое давление, Па;

$P_{\text{г}}$ – давление газа в газоходе, Па. Знак «+» ставится, если аппарат работает под нагнетанием, знак «-» – если под разрежением;

$t_{\text{г}}$ – температура газа, °С.

В случае последовательной установки циклонов значения их гидравлических сопротивлений суммируются:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots, \quad (4.4)$$

где ΔP – гидравлическое сопротивление циклонной установки в целом, Па;
 $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots$ – гидравлические сопротивления отдельных циклонов.

Следует отметить, что для проведения более точного расчета гидравлического сопротивления, целесообразно вносить поправочные коэффициенты, учитывающие влияние диаметра циклона, запыленности газа и групповой компоновки (в случае объединения циклонов в группу) на коэффициент гидравлического сопротивления.

Расчет эффективности пылеулавливания циклонов может быть произведен по экспериментально полученным значениям фракционной эффективности. Данная характеристика показывает, с какой эффективностью улавливаются отдельные фракции пыли в конкретном типе циклона (рис. 4.20).

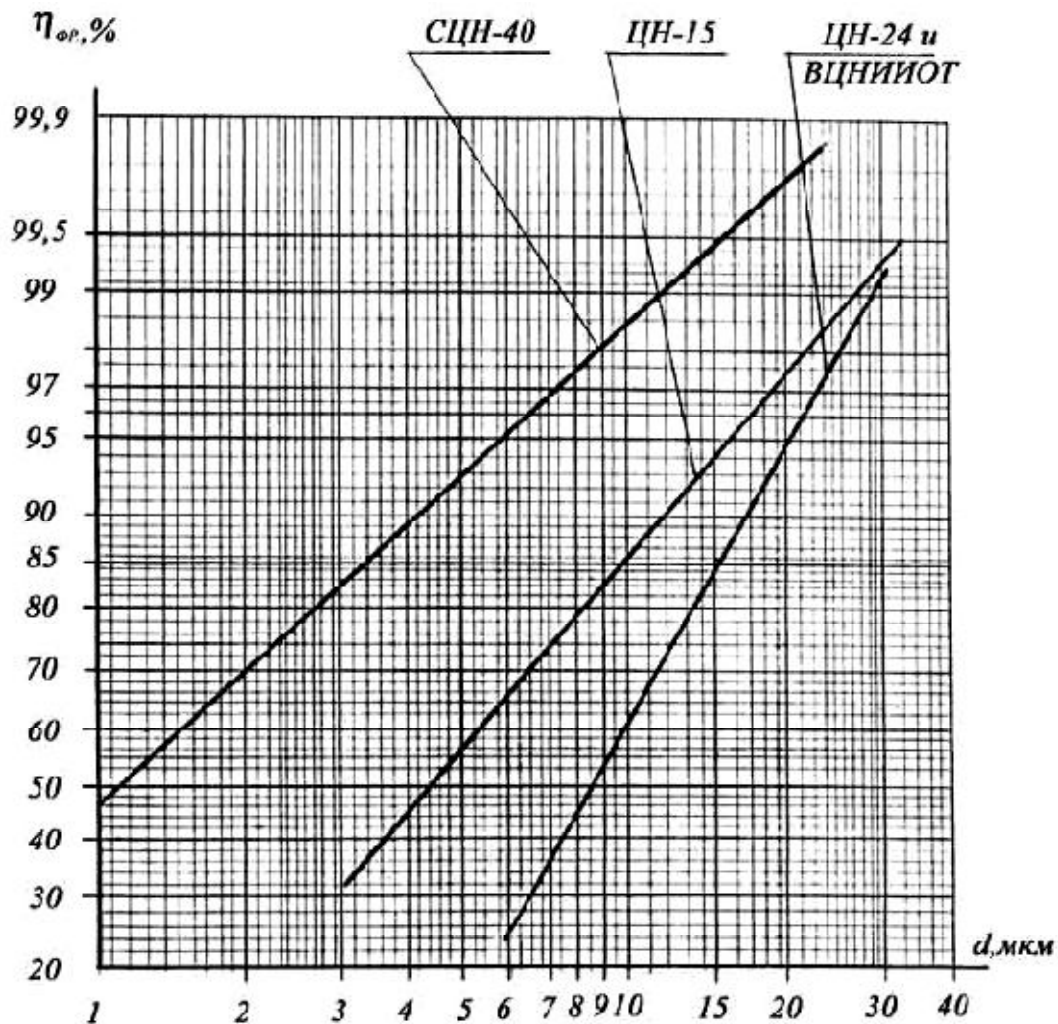


Рис. 4.20. Фракционная эффективность циклонов:

ЦН-15, ЦН-24, СЦН-40, ВЦНИИОТ

(диаметры моделей циклонов 300 мм, $\rho_{\text{п}} = 2650 \text{ кг/м}^3$, $t = 18^\circ \text{C}$,
 $d_{50} = 15 \text{ мкм}$, $\sigma_{\text{п}} = 3,5$)

Расчет эффективности пылеулавливания реального циклона может быть выполнен графическим методом. Следует отметить, что данный подход позволяет производить приближенный расчет циклона. Для проведения вычислений необходимы сведения о дисперсном составе и плотности улавливаемой пыли, вязкости газа, скорости газа в циклоне и его диаметре.

Последовательность расчета следующая:

1. Производится пересчет медианного диаметра частиц пыли d'_{50} (мкм) для реального циклона по следующей формуле:

$$d'_{50} = d_{50} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{пм}} V_{\text{м}} \mu}{\rho_{\text{п}} V \mu_{\text{м}}}}, \quad (4.5)$$

где d_{50} – медианный диаметр частиц пыли улавливаемой в циклоне, мкм;

$\rho_{\text{п}}, \rho_{\text{пм}}$ – плотность пыли улавливаемой в реальном циклоне и модели, кг/м³;

$V, V_{\text{м}}$ – скорость газа в реальном циклоне и модели (значения могут быть приняты для входа или плана циклонов), м/с;

$\mu, \mu_{\text{м}}$ – динамическая вязкость газа в реальных условиях и при испытаниях модели, Па · с.

2. Зная пересчитанный медианный диаметр частиц пыли d'_{50} и дисперсию пыли $\sigma_{\text{п}}$, по графикам, представленным на рис. 4.21-4.23, определяется эффективность пылеулавливания модели циклона в соответствии с его маркой.

3. Производится пересчет значения эффективности пылеулавливания для диаметра реального циклона η' (%) по формуле

$$\eta' = 100 - (100 - \eta) \left(\frac{D'}{D} \right)^n, \quad (4.6)$$

где η – эффективность пылеулавливания модели циклона, $\eta > \eta'$;

D' – диаметр реального циклона, мм;

D – диаметр модели циклона, мм;

n – показатель степени, для циклонов СЦН-40 $n = 0,18$; для ЦН-24 и ЦН-15 $n = 0,25$ (справедливо для диаметра циклона 300 мм и более).

Концентрация пыли в газе на выходе из циклона $Z_{\text{вых}}$ (г/м³) может быть определена по следующей формуле:

$$Z_{\text{вых}} = Z_{\text{вх}} \cdot \left(1 - \frac{\eta}{100\%} \right), \quad (4.7)$$

где $Z_{\text{вх}}$ – концентрация пыли в газе на входе в циклон, г/м³.

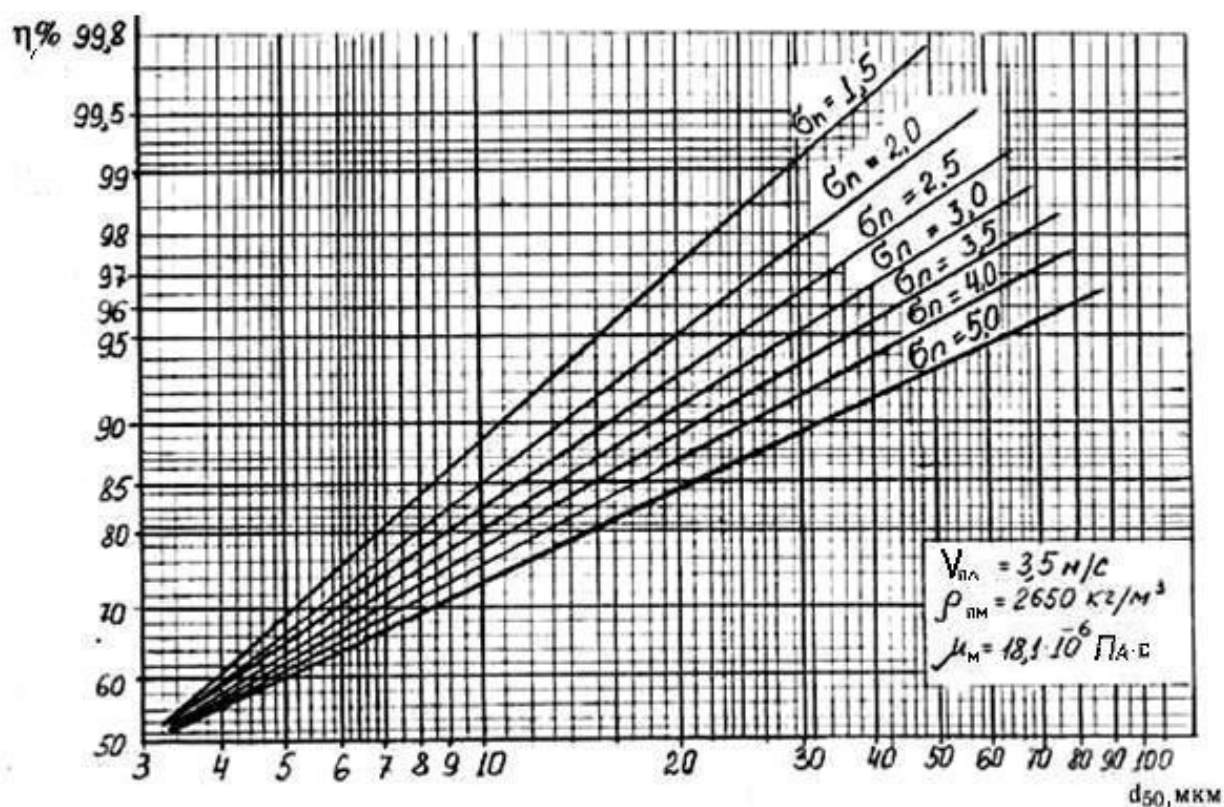


Рис. 4.22. Зависимость эффективности пылеулавливания циклона ЦН-15 диаметром 300 мм от медианного диаметра частиц d_{50} и дисперсии пыли $\sigma_{\text{п}}$

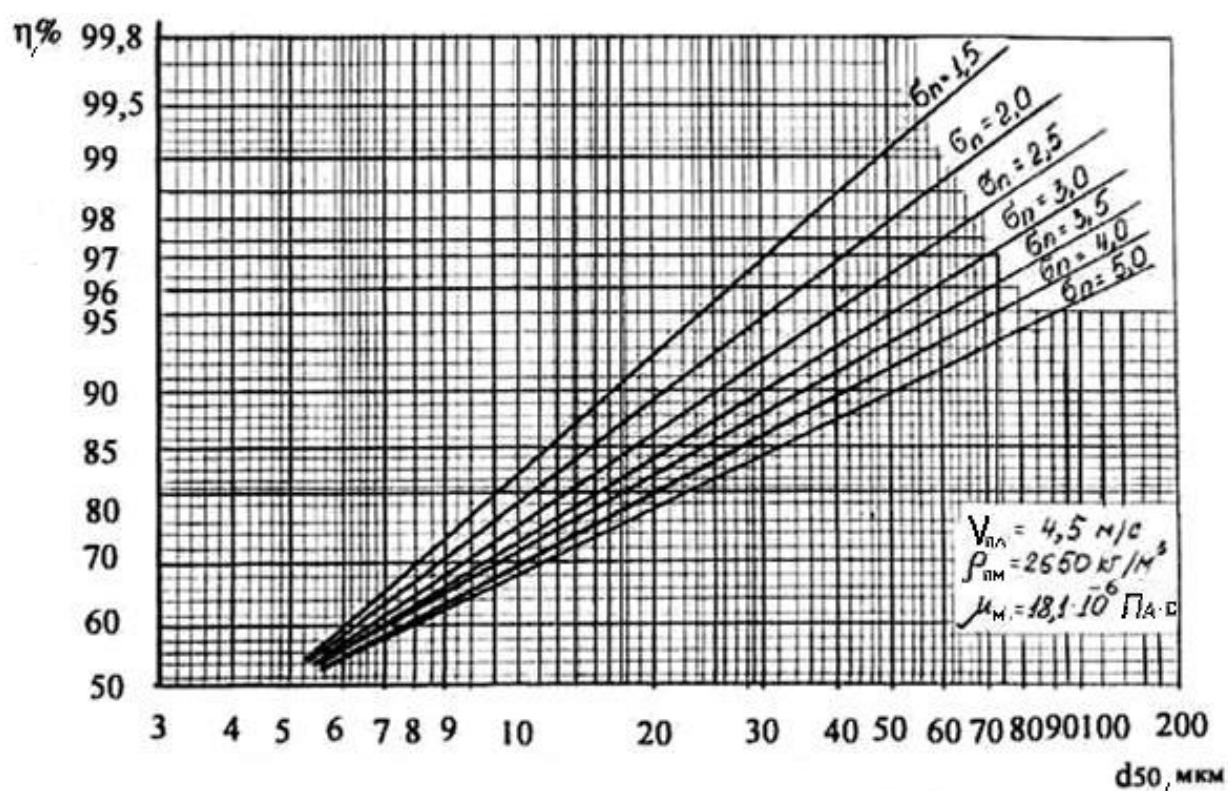


Рис. 4.23. Зависимость эффективности пылеулавливания циклонов ЦН-24 и ВЦНИИОТ диаметрами 300 мм от медианного диаметра частиц d_{50} и дисперсии пыли $\sigma_{\text{п}}$

В случае последовательной установки циклонов эффективность пылеулавливания установки в целом определяется по следующей формуле:

$$\eta_{\text{общ}} = 100 - (100 - \eta_1)(100 - \eta_2) \dots, \quad (4.8)$$

где $\eta_{\text{общ}}$ – эффективность пылеулавливания циклонной установки в целом, %;
 $\eta_1, \eta_2, \dots$ – эффективности пылеулавливания отдельных циклонов, %.

Блок-схема методики расчета циклона представлена на рис. 4.24.

4.6.1. Пример расчета циклона

Исходные данные

Рассчитать циклон для очистки воздуха от пыли отходящего от дробебетонной машины для очистки чугунного литья на машиностроительном заводе, обеспечивающий концентрацию пыли на выходе $Z_{\text{вых}}$ не более 5 г/м^3 .

Плотность улавливаемой пыли $\rho_{\text{п}}$, кг/м^3	4670
Медианный диаметр частиц пыли d_{50} , $\mu\text{м}$	26
Дисперсия пыли $\sigma_{\text{п}}$	2
Расход очищаемого воздуха Q , $\text{м}^3/\text{ч}$	21000
Концентрация пыли в воздухе на входе в циклон $Z_{\text{вх}}$, г/м^3	52
Барометрическое давление B , Па	$0,1 \cdot 10^6$
Давление газа в газоходу $P_{\text{г}}$, Па	1000
Плотность воздуха в нормальных условиях ρ_0 , кг/м^3	1,292
Температура очищаемого воздуха $t_{\text{г}}$, $^{\circ}\text{C}$	0
Динамическая вязкость воздуха при 0°C μ , $\text{Па} \cdot \text{с}$	$17,4 \cdot 10^{-6}$

Расчет

1. Принимаем для расчета тип циклона, например ЦН-15, и скорость газа в плане циклона $V_{\text{пл}} = 3,0 \text{ м/с}$. Считаем, что циклон будет установлен на линии всасывания вентилятора. По табл. 4.2 определяем коэффициент гидравлического сопротивления $\xi_{\text{пл}} = 160$.

2. Рассчитаем площадь сечения цилиндрической части циклона $F_{\text{пл}}$:

$$F_{\text{пл}} = \frac{Q}{V_{\text{пл}}} = \frac{21000}{3600 \cdot 3} = 1,94 \text{ м}^2.$$

3. Рассчитаем диаметр циклона:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{пл}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,94}{3,14}} = 1,57 \text{ м}.$$

Округляем: $D = 1,6 \text{ м}$.

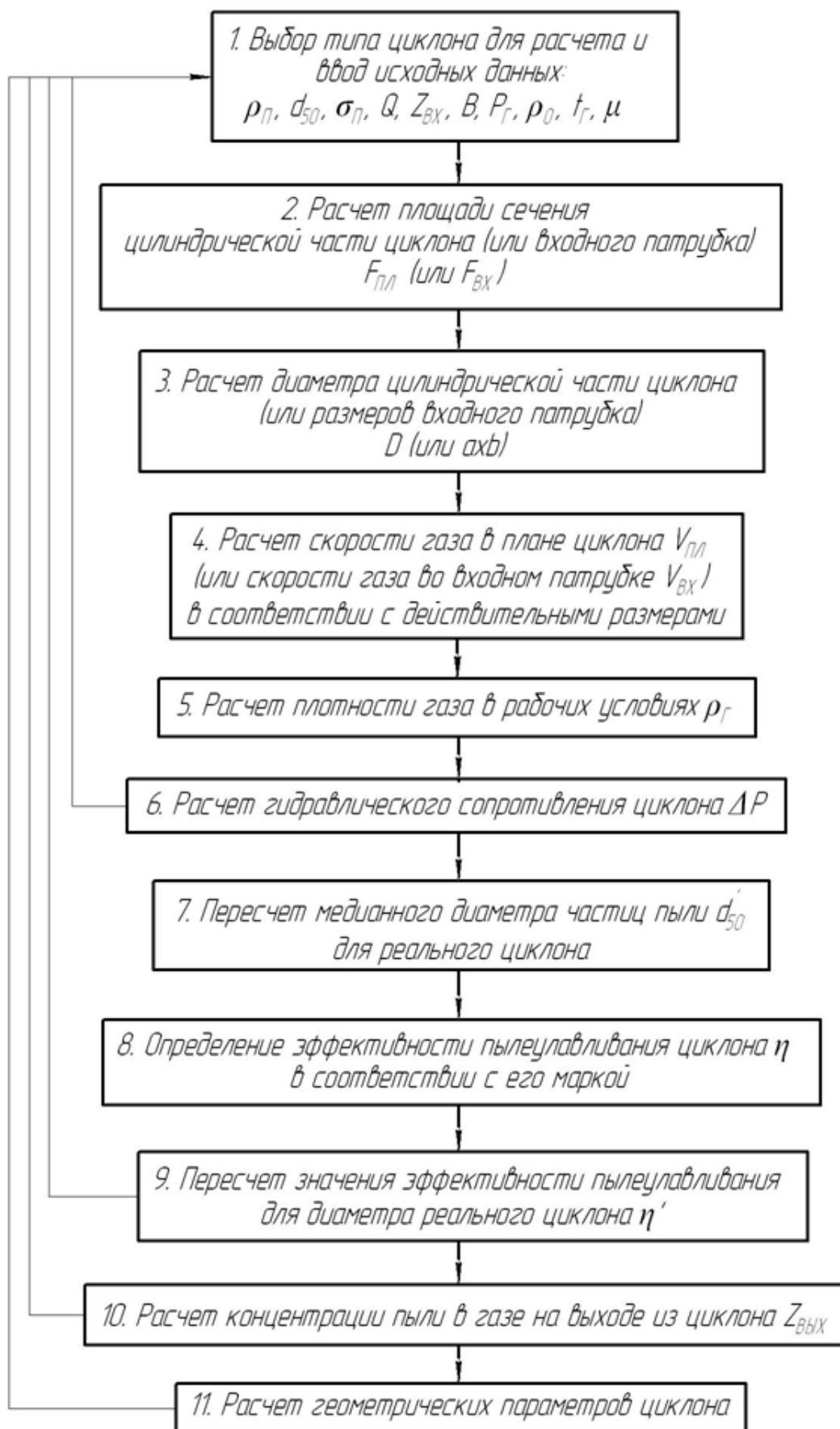


Рис. 4.24. Блок-схема методики расчета циклона

В случае если расчетный диаметр $D > 2$ м, либо высота циклона превышает требуемое значение, то необходимо принимать в расчет не одиночный, а групповой циклон, в соответствии с вычисленной ранее площадью сечения $F_{\text{пл}}$.

4. Рассчитаем скорость газа в плане циклона $V_{\text{пл}}$ в соответствии с действительным диаметром:

$$V_{\text{пл}} = \frac{Q}{F_{\text{пл}}} = \frac{21000 \cdot 4}{3600 \cdot 3,14 \cdot 1,6^2} = 2,9 \text{ м/с.}$$

5. Рассчитываем плотность газа в рабочих условиях $\rho_{\text{г}}$:

$$\rho_{\text{г}} = \rho_0 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{B \pm P_{\text{г}}}{273 + t_{\text{г}}} = 1,292 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{0,1 \cdot 10^6 - 1000}{273 + 0} = 1,265 \text{ кг/м}^3.$$

6. Рассчитаем гидравлическое сопротивление циклона:

$$\Delta P = \xi_{\text{пл}} \cdot \frac{V_{\text{пл}}^2 \cdot \rho_{\text{г}}}{2} = 160 \cdot \frac{2,9^2 \cdot 1,265}{2} = 851,09 \text{ Па.}$$

7. Производим пересчет медианного диаметра частиц пыли d'_{50} для реального циклона ЦН-15, в соответствии с данными, представленными на рис. 4.22:

$$d'_{50} = d_{50} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{пм}} V_{\text{м}} \mu}{\rho_{\text{п}} V \mu_{\text{м}}}} = 26 \cdot \sqrt{\frac{2650 \cdot 3,5 \cdot 17,4 \cdot 10^{-6}}{4670 \cdot 2,9 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6}}} = 21 \text{ мкм.}$$

8. Зная пересчитанный медианный диаметр частиц пыли d'_{50} и дисперсию пыли $\sigma_{\text{п}}$, по графику (см. рис. 4.22) определяется эффективность пылеулавливания циклона.

Получаем, что эффективность пылеулавливания циклона ЦН-15 диаметром 300 мм при улавливании пыли с характеристиками $d'_{50} = 21$ мкм, $\sigma_{\text{п}} = 2$ составляет $\eta = 95,5 \%$.

9. Производим пересчет значения эффективности пылеулавливания для диаметра реального циклона η' :

$$\eta' = 100 - (100 - \eta) \left(\frac{D'}{D} \right)^n = 100 - (100 - 95,5) \left(\frac{1,6}{0,3} \right)^{0,25} \approx 93 \%.$$

10. Рассчитываем концентрацию пыли в воздухе на выходе из циклона $Z_{\text{вых}}$:

$$Z_{\text{вых}} = Z_{\text{вх}} \cdot \left(1 - \frac{\eta}{100\%} \right) = 52 \cdot \left(1 - \frac{93}{100} \right) = 3,6 \text{ г/м}^3.$$

11. Рассчитываем геометрические параметры циклона по схеме (см. рис. 4.19), исходя из того, что значение его диаметра составляет $D = 1,6$ м.

Глава 5. «МОКРЫЕ» ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ (СКРУББЕРЫ)

Одним из весьма эффективных методов очистки выбрасываемых в атмосферу газов от твёрдых частиц, капель паровых и газовых токсичных компонентов является применение аппаратов, в которых используются для этой цели жидкости, в частности вода.

В настоящее время разработано и применяется большое количество «мокрых» аппаратов, различных по назначению, по способу взаимодействия очищаемых газов с жидкостью (водой). Общепринятой классификации «мокрых» пылеуловителей до настоящего времени не имеется. Обычно они подразделяются на группы в зависимости от поверхности контакта или по способу действия:

- полые газопромыватели (оросительные устройства, промывные камеры, полые форсуночные скрубберы);
- насадочные скрубберы;
- тарельчатые газопромыватели (барботажные и пенные аппараты);
- газопромыватели с подвижной насадкой;
- «мокрые» аппараты центробежного действия (ротоклоны);
- «мокрые» аппараты ударно-инерционного действия;
- механические газопромыватели (механические, динамические скрубберы);
- скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури, эжекторные скрубберы).

Помимо перечисленных групп, к «мокрым» пылеуловителям в какой-то степени могут быть отнесены также «мокрые» электрофильтры, орошаемые волокнистые фильтры и аппараты конденсационного действия.

Довольно полное описание конструкций, областей применения и методов расчёта этих аппаратов дано в источниках [6, 72, 73].

В данном разделе дано описание основных аппаратов мокрой очистки газов, выбрасываемых в атмосферу (их устройство, методика расчёта их основных показателей).

5.1. Полые форсуночные скрубберы

Полые форсуночные скрубберы представляют собой полую колонну. Чаще всего такие аппараты выполняют круглого сечения. Форсунки расположены ярусами. В ярусах отверстия форсунок, из которых вытекает вода, расположены в одной плоскости. Обычно применяют скрубберы, в которых направление движения воды, вытекающей из форсунок, является

противоположным движению очищаемого газа. Такие скрубберы называют противоточными.

Схема противоточного полого скруббера [6], представлена на рис. 5.1. Газ, подлежащий очистке, поступает во входной патрубок 1 и далее поднимается в корпус 2 скруббера к выпускному патрубку 3. В корпусе установлены ярусы форсунок 4, из которых вытекает вода в виде факелов из капель, направленная вниз навстречу восходящему потоку очищаемого газа.

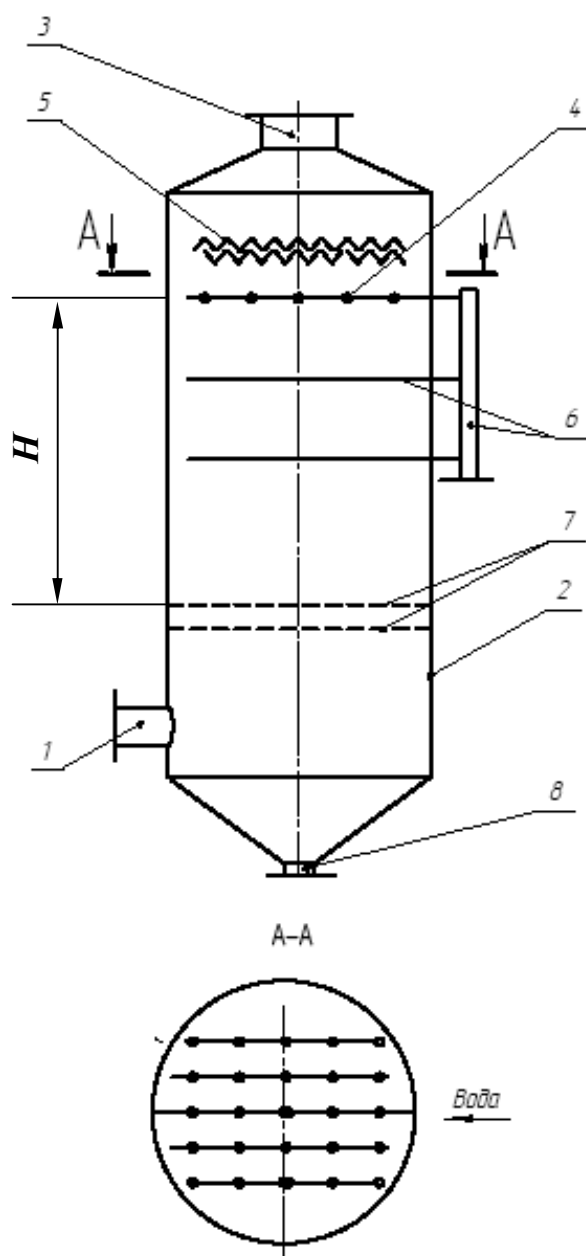


Рис. 5.1. Схема полого форсуночного скруббера:

- 1 - входной патрубок; 2 - корпус скруббера; 3 - выпускной патрубок;
- 4 - форсунки; 5 - каплеуловитель; 6 - коллектор подвода и распределения воды; 7 - газораспределительные устройства (решетки);
- 8 - патрубок вывода воды с уловленной пылью

Подвод воды к форсункам осуществляют подводящим коллектором 6. Перед выпускным патрубком 3 устанавливают каплеуловитель 5, особенно при скоростях газа более 1,2 м/с. В полых аппаратах на эффективность процессов очистки газа существенно влияет равномерность распределения по сечению и высоте аппарата скоростей газового потока (в дальнейшем газораспределение). Для обеспечения равномерности газораспределения в корпусе скруббера над патрубком 1 устанавливают газораспределительное устройство 7. Но их применение допустимо только тогда, когда улавливаемая пыль и вода не образуют неудаляемых отложений. Если такие отложения возникают, то приходится отказываться от газораспределительных устройств.

В этих случаях применяют входной патрубок, расположенный под углом 30-45° к вертикали и увеличивают высоту корпуса скруббера. Вода вместе с уловленной пылью из скруббера выводится через патрубок 8.

Исходные параметры, применяемые при проектировании полых скрубберов:

1. Скорость очищаемого газа в поперечном сечении корпуса скруббера

$$W_r = 0,8 \dots 1,2 \text{ м/с.} \quad (5.1)$$

2. Высота рабочей (цилиндрической) части скруббера (см. рис. 5.1)

$$H \geq 2,5 D_{\text{пс}}. \quad (5.2)$$

3. Концентрация пыли на входе в аппарат:

$$Z_{\text{вх}} \leq 12 \text{ г/м}^3. \quad (5.3)$$

4. Скорость газа в подводящем и отводящем патрубках:

$$W_{r1} = 12 \dots 20 \text{ м/с.} \quad (5.4)$$

5. Скорость воды из сливного патрубка 8 (рис. 5.1):

$$W_b = 0,2 \dots 0,3 \text{ м/с.} \quad (5.5)$$

6. Удельный расход воды m , м³ воды/м³ газа. Для полых скрубберов:

$$m = (0,5 \dots 8) \cdot 10^{-3}. \quad (5.6)$$

7. Полые скрубберы целесообразно применять для очистки газов от пыли с диаметром частиц $d_{\text{ч}} > 10 \text{ мкм}$.

5.1.1. Порядок расчёта полого скруббера

Исходные данные:

1. Расход газа Q , м³/с;
2. Массовая концентрация пыли на входе в полый скруббер Z , г/м³;
3. Температура очищаемого газа на входе и выходе полого скруббера t' и t'' , °C;

4. Химический состав газа;
5. Концентрация водяных паров в граммах, отнесённая на 1 м^3 сухого газа при нормальных условиях;
6. Абсолютное давление в аппарате P_a , Па;
7. Барометрическое давление P_b , Па;
8. Избыточное давление или разрежение $\pm P$, Па;
9. Плотность частиц $\rho_{\text{ч}}$, кг/м^3 ;
10. Медианный размер d_m в дисперсном распределении частиц пыли, мкм;
11. Среднее квадратичное отклонение $\sigma_{\text{ч}}$ в дисперсном распределении частиц.

Требуется определить:

$D_{\text{пс}}$ – диаметр скруббера, м;

H – высота рабочей части скруббера, м;

$q_{\text{в}}$ – расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

η – степень пылеулавливания в долях единицы или %.

Определение конструктивных размеров полого скруббера и эксплуатационных характеристик.

1. Диаметр полого скруббера $D_{\text{пс}}$ (м) определяем по формуле

$$D_{\text{пс}} = \sqrt{\frac{Q}{0,785 \cdot W_{\text{г}}}}. \quad (5.7)$$

Значение $W_{\text{г}}$ принимаем по условию (5.1).

2. Высоту рабочей части полого скруббера, принимаем в соответствии с условием (5.2):

$$H = 2,5D_{\text{пс}}.$$

3. Расход воды на скруббер $q_{\text{в}}$ ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$q_{\text{в}} = Q \cdot m, \quad (5.8)$$

где m – удельный расход воды принимаем по условию (5.6).

4. Число форсунок n для распыливания воды выбираем в пределах от 4 до 20. Число ярусов, в которых располагают форсунки, принимают от 1 до 4.

Давление воды перед форсункой принимаем равным $P_{\text{в}} = (1 \dots 4) \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Расход воды через форсунку $q_{\text{вф}}$ ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$q_{\text{вф}} = Qm/n. \quad (5.9)$$

Диаметр сопла форсунки d_c (м) рассчитывают по формуле

$$d_c = 0,949 \cdot q_{\text{вф}}^{0,5} \cdot \left(\frac{\xi_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{в}}}{P_{\text{в}}} \right)^{0,25}, \quad (5.10)$$

где $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды;

$\xi_{\text{ф}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления форсунки [74].

5. Диаметр патрубка вывода шлама 8 (см. рис. 5.1) $d_{\text{в}}$, м:

$$d_{\text{в}} = 2,26 \cdot \sqrt{(Q \cdot m)}. \quad (5.11)$$

6. Степень пылеулавливания полого скруббера η может быть определена по формуле [6]:

$$\eta = \Phi(x), \quad (5.12)$$

где $\Phi(x)$ – значение нормальной функции, распределения с аргументом x , который вычисляется по формуле [6]:

$$x = \frac{\lg(d_m/d_{50})}{\sqrt{(\lg^2 \sigma_{\text{ч}} + \lg^2 \sigma_{\eta})}}, \quad (5.13)$$

где d_m – медианный размер дисперсного распределения улавливаемой пыли, мкм;

d_{50} – диаметр частиц пыли, улавливаемых с эффективностью 50 %, мкм;

$\lg \sigma_{\text{ч}}$ и $\lg \sigma_{\eta}$ – стандартное логарифмическое отклонение функции распределения улавливаемых частиц пыли и фракционной эффективности аппарата.

Значение $\Phi(x)$ при заданном значении x можно определить по табл. 5.1.

Величину d_{50} можно рассчитывать по формуле

$$d_{50} = 5945 \cdot K^{-0,645} \cdot \rho_{\text{ч}}^{-0,5}, \quad (5.14)$$

$$K = \Delta P + P_{\text{ф}} \cdot m, \quad (5.15)$$

где ΔP и $P_{\text{ф}}$ – гидравлическое сопротивление аппарата и распыливающей форсунки, Па.

Формула (5.14) справедлива для мокрых аппаратов пылеулавливания в случае:

$$10^2 \leq K \leq 3 \cdot 10^4. \quad (5.16)$$

Таблица 5.1. Значение нормальной функции распределения

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-2,70	0,0035	-1,28	0,1003	-0,42	0,3372	0,42	0,6628	1,28	0,8997
-2,60	0,0047	-1,26	0,1038	-0,40	0,3446	0,44	0,6700	1,30	0,9032
-2,50	0,0062	-1,24	0,1075	-0,38	0,3520	0,46	0,6772	1,32	0,9066
-2,40	0,0082	-1,22	0,1112	-0,36	0,3594	0,48	0,6844	1,34	0,9099
-2,30	0,0107	-1,20	0,1151	-0,34	0,3669	0,50	0,6915	1,36	0,9131
-2,20	0,0139	-1,18	0,1190	-0,32	0,3745	0,52	0,6985	1,38	0,9162
-2,10	0,0179	-1,16	0,1230	-0,30	0,3821	0,54	0,7054	1,40	0,9192
-2,00	0,0228	-1,14	0,1271	-0,28	0,3897	0,56	0,7123	1,42	0,9222
-1,98	0,0239	-1,12	0,1314	-0,26	0,3974	0,58	0,7190	1,44	0,9251
-1,96	0,0250	-1,10	0,1357	-0,24	0,4052	0,60	0,7257	1,46	0,9279
-1,94	0,0262	-1,08	0,1401	-0,22	0,4129	0,62	0,7324	1,48	0,9306
-1,92	0,0274	-1,06	0,1446	-0,20	0,4207	0,64	0,7389	1,50	0,9332
-1,90	0,0288	-1,04	0,1492	-0,18	0,4286	0,66	0,7454	1,52	0,9357
-1,88	0,0301	-1,02	0,1539	-0,16	0,4364	0,68	0,7517	1,54	0,9382
-1,86	0,0314	-1,00	0,1587	-0,14	0,4443	0,70	0,7580	1,56	0,9406
-1,84	0,0329	-0,98	0,1635	-0,12	0,4522	0,72	0,7642	1,58	0,9429
-1,82	0,0344	-0,96	0,1685	-0,10	0,4602	0,74	0,7703	1,60	0,9452
-1,80	0,0359	-0,94	0,1736	-0,08	0,4681	0,76	0,7764	1,62	0,9474
-1,78	0,0375	-0,92	0,1788	-0,06	0,4761	0,78	0,7823	1,64	0,9495
-1,76	0,0392	-0,90	0,1841	-0,04	0,4840	0,80	0,7881	1,66	0,9515
-1,74	0,0409	-0,88	0,1894	-0,02	0,4920	0,82	0,7939	1,68	0,9535
-1,72	0,0427	-0,86	0,1949	-0,00	0,5000	0,84	0,7995	1,70	0,9554
-1,70	0,0446	-0,84	0,2005	0,00	0,5000	0,86	0,8051	1,72	0,9573
-1,68	0,0465	-0,82	0,2061	0,02	0,5080	0,88	0,8106	1,74	0,9591
-1,66	0,0485	-0,80	0,2119	0,04	0,5160	0,90	0,8159	1,76	0,9608
-1,64	0,0505	-0,78	0,2177	0,06	0,5239	0,92	0,8212	1,78	0,9625
-1,62	0,0526	-0,76	0,2236	0,08	0,5319	0,94	0,8264	1,80	0,9641
-1,60	0,0548	-0,74	0,2297	0,10	0,5398	0,96	0,8315	1,82	0,9656
-1,58	0,0571	-0,72	0,2358	0,12	0,5478	0,98	0,8365	1,84	0,9671
-1,56	0,0594	-0,70	0,2420	0,14	0,5557	1,00	0,8413	1,86	0,9686
-1,54	0,0618	-0,68	0,2483	0,16	0,5636	1,02	0,8461	1,88	0,9699
-1,52	0,0643	-0,66	0,2546	0,18	0,5714	1,04	0,8508	1,90	0,9713
-1,50	0,0668	-0,64	0,2611	0,20	0,5793	1,06	0,8554	1,92	0,9726
-1,48	0,0694	-0,62	0,2676	0,22	0,5871	1,08	0,8599	1,94	0,9738
-1,46	0,0721	-0,60	0,2743	0,24	0,5948	1,10	0,8643	1,96	0,9750
-1,44	0,0749	-0,58	0,2810	0,26	0,6026	1,12	0,8686	1,98	0,9761
-1,42	0,0778	-0,56	0,2877	0,28	0,6103	1,14	0,8729	2,00	0,9772
-1,40	0,0808	-0,54	0,2946	0,30	0,6179	1,16	0,8770	2,10	0,9821
-1,38	0,0838	-0,52	0,3015	0,32	0,6255	1,18	0,8810	2,20	0,9861
-1,36	0,0869	-0,50	0,3085	0,34	0,6331	1,20	0,8849	2,30	0,9893
-1,34	0,0901	-0,48	0,3156	0,36	0,6406	1,22	0,8888	2,40	0,9918
-1,32	0,0934	-0,46	0,3228	0,38	0,6480	1,24	0,8925	2,50	0,9938
-1,30	0,0968	-0,44	0,3300	0,40	0,6554	1,26	0,8962	2,60	0,9953
								2,70	0,9965

При расчёте гидравлического сопротивления полого скруббера, можно воспользоваться формулой:

$$\Delta P = \xi_{\text{пс}} \cdot (\rho_{\text{г}} \cdot W_{\text{г}}^2 / 2), \quad (5.17)$$

где $\xi_{\text{пс}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления, отнесённый к скорости очищаемого газа в поперечном сечении корпуса скруббера,

$$1600 \leq \xi_{\text{пс}} \leq 2500. \quad (5.18)$$

Для полых скрубберов при расчёте по формуле (5.13) можно принять $\lg \sigma_{\eta} = 0,29$ [73].

5.2. «Мокрые» аппараты циклонного типа

5.2.1. Циклон с мокрой стенкой (ЦМС)

Циклон ЦМС с мокрой стенкой (рис. 5.2) содержит цилиндрический корпус 1, который соединён с тангенциально врезанным в него входным патрубком 2. Снизу цилиндрический корпус соединён с конусом 3, нижнее отверстие которого соединено с патрубком 4 для отвода жидкости. Верхний конец корпуса заканчивается крышкой 5, в которую входит выхлопная труба 6, расположенная соосно с корпусом 1. Конец выхлопной трубы, выходящий из крышки 5, заканчивается спиральным патрубком 7 для отвода из циклона очищенного газа.

Циклон ЦМС оснащен коллектором 8 с подводным патрубком 9 для подвода орошающей жидкости. Из коллектора 8 отходят трубы 10, заканчивающиеся форсунками для тангенциальной подачи орошающей жидкости на внутреннюю поверхность корпуса 1. Внизу, под патрубком 2, к корпусу 1 прикреплены четыре опорные лапы 11. В крышку спирального патрубка 7 врезана форсунка 12. Циклон работает следующим образом. Во входной тангенциальный патрубок 2 поступает газ с твёрдыми частицами, которые необходимо удалить. Запыленный газ в корпусе образует закрученный поток. Твёрдые частицы под действием вращающегося потока отбрасываются к внутренней поверхности корпуса 1. Вводимая через коллектор 8 и трубы с форсунками 10 внутрь корпуса 1 орошающая жидкость образует плёнку, на которую осаждаются твёрдые частицы, отброшенные из потока на внутреннюю поверхность корпуса. Плёнка с уловленными твёрдыми частицами стекает вниз в конус 3 и выводится из аппарата через патрубок 4. Патрубок 4 для отвода жидкости должен быть соединен с гидрозатвором. Описание гидрозатвора будет дано далее.

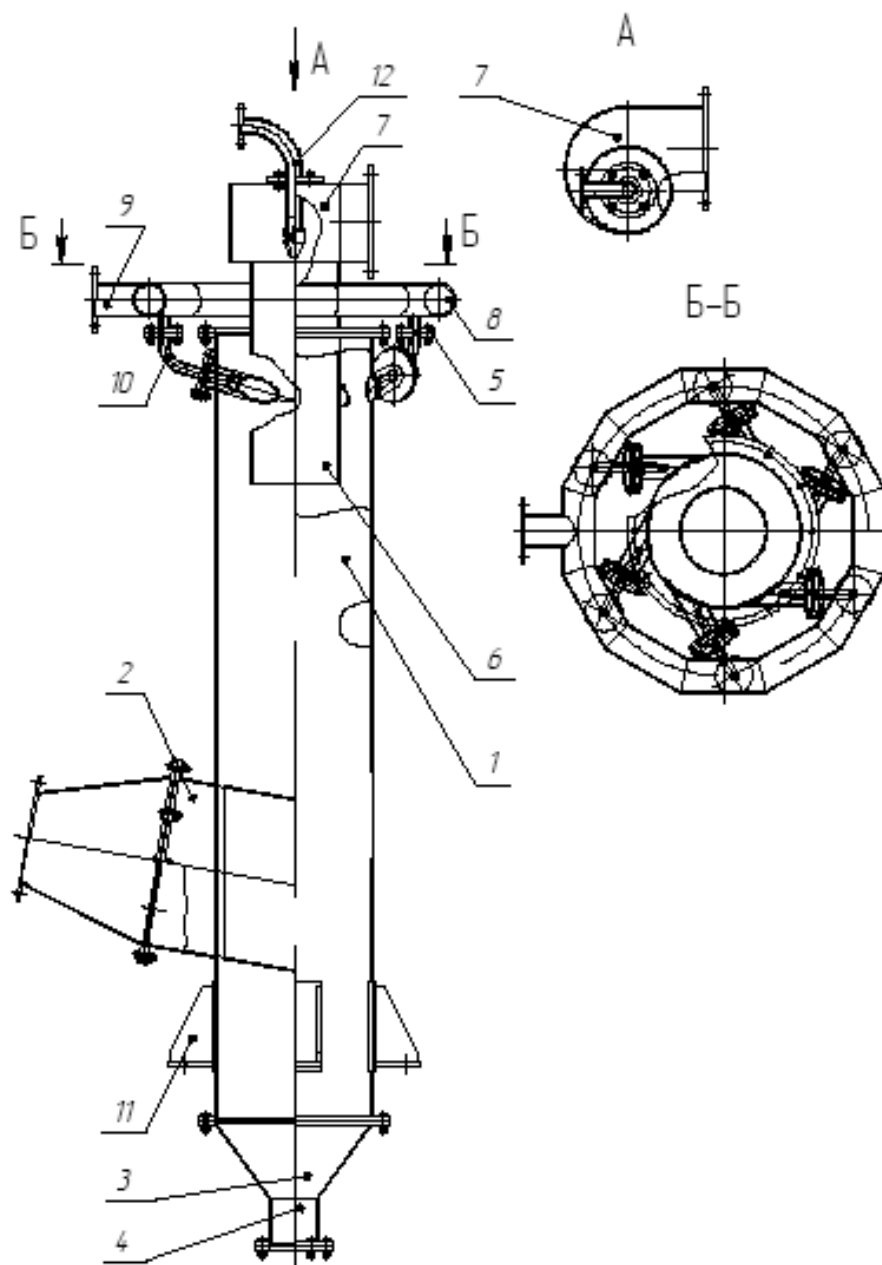


Рис. 5.2. Циклон ЦМС:

- 1 - корпус; 2 - входной патрубок; 3 - конус; 4 - патрубок отвода жидкости;
 5 - крышка; 6 - труба выхлопная; 7 - спиральный выходной патрубок;
 8 - коллектор; 9 - патрубок подвода жидкости; 10 - трубы с форсунками;
 11 - лапа опорная; 12 - форсунка центральная

Для циклонов с водяной плёнкой (мокрой стенкой) применяют удельное орошение $m \leq 2 \cdot 10^{-3}$. Установлено, что при скорости газа $W_r \leq 14 \dots 20$ м/с подобное удельное орошение не влияет на гидравлическое сопротивление ΔP , т.е. коэффициент гидравлического сопротивления циклона $\xi = \text{const}$. Это позволило получить зависимость для расчёта диаметра частиц пыли, улавливаемых с эффективностью 50 % d_{50} (мкм), ана-

логичную для сухих центробежных пылеуловителей по формуле [75, 76], которая действительна при $4 \leq \xi \leq 270$:

$$d_{50} = 3,06 \cdot 10^5 \cdot \xi^{-0,69} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot \mu}{W_{\Gamma} \cdot \rho_{\text{ч}}}}, \quad (5.19)$$

где D – диаметр цилиндрической части циклона, м;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

$\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, кг/м³.

В основу конструкции циклона ЦМС (см. рис. 5.2) могут быть положены циклоны ЦН-24 с коэффициентом $\xi = 80$ и $\lg \sigma_{\eta} = 0,31$.

5.2.2. Пример расчёта степени пылеулавливания центробежного скруббера

Исходные данные.

Массовый расход дымовых газов (через один скруббер),

подлежащих очистке Q_{Γ} , кг/с.....6,45

Температура газов перед скрубберами t_1 , °С.....160

Плотность дымовых газов (при нормальных условиях) ρ_0 , кг/м³...1,3

Концентрация золы в поступающих газах Z_1 , г/м³.....27,6

Плотность частиц золы $\rho_{\text{ч}}$, кг/м³.....2000

Температура воды, поступающей на орошение $t_{\text{н}}$, °С.....16

Дисперсный состав пыли задан в табл. 5.2, по которой рассчитаны значения, приведённые в табл. 5.3.

Таблица 5.2. Дисперсный состав пыли

Диаметр частиц по фракциям, мкм	0...7	7...17	17...28	28...42	42...50	50...53	>53
Содержание фракций, %	20	20	18,5	13,5	7,5	6	14

Таблица 5.3. Интегральное распределение дисперсности

Диаметр частиц $d_{\text{ч}}$, мкм	≤ 7	≤ 17	≤ 28	≤ 42	≤ 50	≤ 53
$\lg d_{\text{ч}}$	0,845	1,230	1,447	1,623	1,699	1,724
Интегральное содержание частиц в долях единицы, Φ	0,20	0,4	0,585	0,72	0,795	0,855
Значение аргумента x нормально вероятностной функции $\Phi(x)$ по табл. 5.1	-0,84	-0,25	0,21	0,585	0,82	1,06

Требуется определить:

Количество скрубберов n и их диаметр D .

Степень очистки газов η .

Гидравлическое сопротивление скрубберов ΔP .

Расход воды на орошение скрубберов $Q_{\text{ж}}$.

Расчёт.

Для определения характеристик пыли по табл. 5.2 (медианного размера d_m и значения $\lg \sigma_q$) воспользуемся допущением, что интегральное распределение частиц пыли подчиняется логарифмически нормальному закону. Из этого следует, что между значениями $\lg \sigma_q$ и x существует линейная зависимость, которую можно представить в виде уравнения:

$$\frac{\lg d_q - \lg d_{\min}}{\lg d_{\max}} = \frac{x_q - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (5.20)$$

где $d_{\max}$ и $d_{\min}$ – значения ближайших диаметров частиц, между которыми находится диаметр частицы d_q , для которой необходимо определить соответствующее значение x_q ;

$x_{\max}$ и $x_{\min}$ – значения аргументов нормальной функции распределения $\Phi(x)$, соответствующее диаметрам частиц $d_{\max}$ и $d_{\min}$.

Для медианного диаметра d_m соответствующее $\Phi(x) = 0,5$ и $x = 0,00$, по табл. 5.3 d_m находится в интервале $d_{\max} = 28$ мкм с $\Phi(x) = 0,585$ и $x_{\max} = 0,21$ и $d_{\min} = 17$ мкм с $\Phi(x) = 0,4$ и $x_{\min} = -0,25$. После подстановки этих значений в (5.20) получим

$$\frac{\lg d_m - \lg 17}{\lg 28 - \lg 17} = \frac{0,00 - (-0,25)}{0,21 - (-0,25)} \text{ или } \frac{\lg d_m - 1,23}{1,447 - 1,23} = \frac{0,00 + 0,25}{1,487}, \quad (5.21)$$

откуда $\lg d_m = 1,267$; $d_m = 18,5$ мкм;

$$\lg \sigma_q = \lg d_{84,1} - \lg d_m, \quad [6] \quad (5.22)$$

где $d_{84,1}$ – диаметр частицы, которому в интегральном распределении соответствует $\Phi(x) = 0,841$ и $x = 1$. Диаметр частицы $d_{84,1}$ находится в интервале (см. табл. 5.3) $d_{\min} = 50$ мкм и $d_{\max} = 53$ мкм. Для частицы $d_{\min} = 50$ мкм имеем $\lg d_{\min} = 1,699$; $\Phi(x_{\min}) = 0,795$ и $x_{\min} = 0,82$; а для $d_{\max} = 53$ мкм имеем $\lg d_{\max} = 1,724$; $x_{\max} = 1,06$. После подстановки значений $d_{84,1}$; $d_{\max}$; $d_{\min}$; $x_{84,1} = 1$; $x_{\min} = 0,82$; $x_{\max} = 1,06$; $x_{\min} = 0,82$ в формулу (5.20) получим

$$\frac{\lg d_{84,1} - 1,699}{1,724 - 1,699} = \frac{1 - 0,82}{1,06 - 0,82},$$

откуда $d_{84,1} = 1,69 + (0,025 \cdot 0,18)/0,24 = 1,709$; $d_{84,1} = 51,1$ мкм;

$$\lg \sigma_q = 1,709 - 1,267 = 0,442. \quad (5.23)$$

Итак, по данным дисперсного распределения, приведённого в табл. 5.2 и 5.3, определены основные параметры пыли (формулы (5.21) и (5.23)).

1. Плотность дымовых газов при температуре $t_1 = 160$ °С:

$$\rho_r = \rho_0 \frac{273}{273 + t_1} = 1,32 \cdot \frac{273}{433} = 0,83 \text{ кг/м}^3. \quad (5.24)$$

2. Общий расход газов, поступающих в золоуловители:

$$V_r = Q_r / \rho_r = 6,45 / 0,83 = 7,75 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.25)$$

3. Принимаем скорость газа в скруббере $W_r = 3,5$ м/с.

Диаметр скруббера:

$$D = \sqrt{\frac{V_r}{0,785 \cdot W_r}} = \sqrt{\frac{7,75}{0,785 \cdot 3,5}} = 1,68 \text{ м}. \quad (5.26)$$

Принимаем в качестве рассчитываемого мокрого центробежного скруббера аппарат ЦМС (см. рис. 5.2). Для него $\xi = 80$ и $\lg \sigma_\eta = 0,31$.

Рассчитываем диаметр частиц пыли по формуле (5.19), улавливаемых с эффективностью 50 %:

$$d_{50} = 3,06 \cdot 10^5 \cdot 80^{-0,69} \sqrt{\frac{1,68 \cdot 22,2 \cdot 10^{-6}}{3,5 \cdot 2000}} = 1,09 \text{ мкм}. \quad (5.27)$$

По формуле (5.14) находим

$$x = \frac{\lg \left(\frac{18,5}{1,09} \right)}{\sqrt{0,442^2 + 0,31^2}} = \frac{1,23}{0,54} = 2,28.$$

По значению $x = 2,28$ и табл. 5.1 находим $\eta = \Phi(x = 2,28) = 0,987$.

В качестве циклонов с мокрой стенкой (циклонов с водяной плёнкой – ЦВП) могут быть также применены [6] циклоны первого и второго исполнения с тангенциальным входом с размерами A х B и прямоточным

улиточным выходом с теми же размерами. При этом для первого исполнения ЦВП $A_1 = 0,35 D$ и $B = 0,62 D$, где D – диаметр корпуса.

Для второго исполнения – в 2 раза уменьшается площадь входного тангенциального патрубка $A_2 = 0,17 D$ и $B = 0,62 D$.

Соответственно коэффициенты ξ для первого исполнения равны $\xi = 30$, а для второго $\xi = 74$. При расчёте эффективности используется для всех ЦВП $\lg \sigma_\eta = 0,838$. Циклоны типа ЦВП показаны на рис. 5.3.

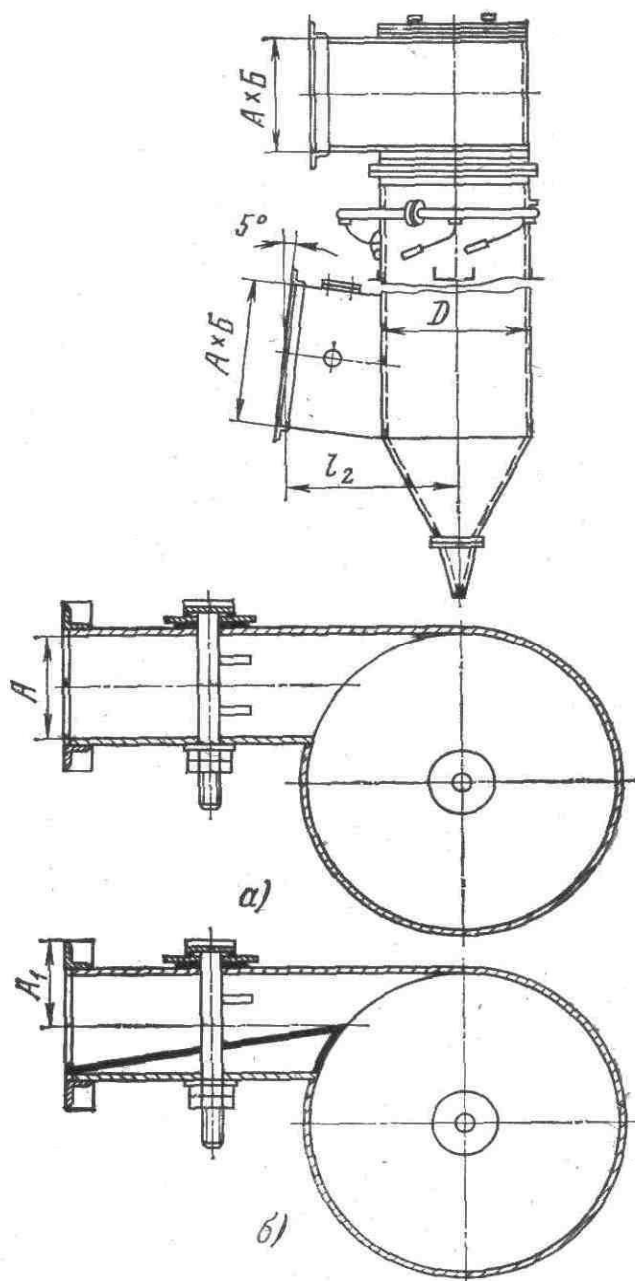


Рис. 5.3. Циклон с водяной пленкой (ЦВП):
а – основное исполнение; *б* – вариант с повышенной скоростью воздуха на входе в циклон

Порядок расчёта эффективности циклонов ЦМС или ЦВП следующий.

По формуле (5.19) определяют d_{50} . Затем в зависимости от типа циклона принимают $\lg \sigma_\eta$ и с учётом медианного диаметра пыли d_m (мкм) и логарифма стандартного отклонения $\lg \sigma_\chi$ по формуле (5.13) находят x . Далее по формуле (5.12) находят эффективность в долях единицы.

Гидравлическое сопротивление скруббера ЦМС определяем по формуле

$$\Delta P = \xi(\rho_\Gamma \cdot W_\Gamma^2 / 2) = 80 / (0,83 \cdot 3,5^2) / 2 = 407 \text{ Па.}$$

Расход воды на орошение скруббера (см. формулу (5.25)):

$$Q_{\text{ж}} = m \cdot V_\Gamma = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot 7,75 = 5,42 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

где $m = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^3 \text{ воды / м}^3 \text{ газа)}$ [6].

Массовый выброс золы в атмосферу:

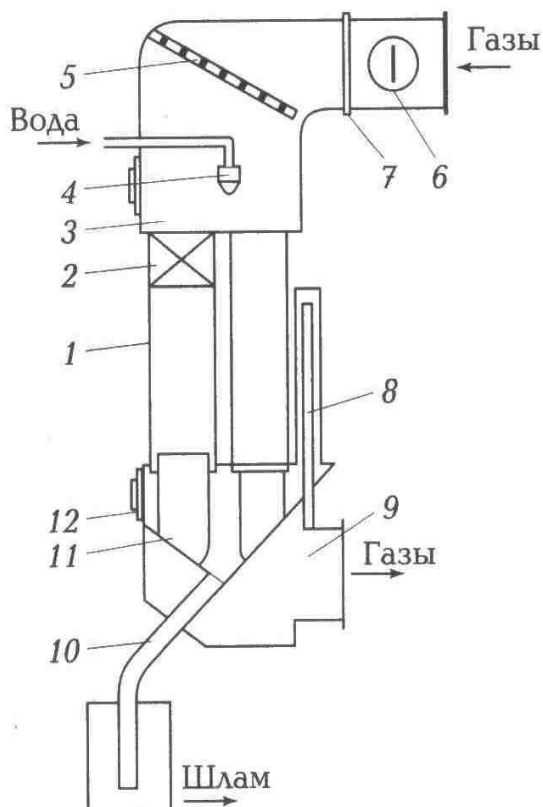
$$g_{\text{вых}} = z_1(1 - \eta)V_\Gamma = 27,6(1 - 0,987) 7,75 = 2,78 \text{ г/с.}$$

5.2.2. Батарейный циклон СЦВБ

Согласно формуле (5.19) уменьшение диаметра циклона приводит к уменьшению d_{50} и, следовательно, к увеличению эффективности аппарата.

Исходя из этих предпосылок в НИИОГАЗе был разработан батарейный скруббер с диаметром корпуса циклонных элементов $D = 300$ мм. Этот скруббер представлен на рис. 5.4.

Рис. 5.4. Центробежный скруббер СЦВБ-20



Скруббер состоит из четырёх рабочих элементов 1, представляющих собой трубу, в верхней части которой находится контактный элемент (двухлопастной завихритель) 2, а в нижней – кольцевой зазор. Верхние концы рабочих элементов входят в камеру грязного газа 3, в которой установлены для подачи орошающей жидкости цельнокафельная форсунка 4 и газораспределительное устройство 5. Перед камерой грязного газа для улавливания крупных предметов (мусора, бумаги, волокнистых материалов и др.) монтируется сетка 7, а также имеется люк 6 для периодической очистки сетки. Нижние концы рабочих элементов входят в шламовую камеру 12, а соединительных труб 11 – в камеру чистого газа 9. Камеры чистого газа и шламовая, соединены устройством для выравнивания давления 8.

Запылённый воздух подаётся через входной патрубок в камеру грязного газа, орошается водой, после чего газоводяная смесь закручивается в завихрителях.

Возникающие при этом центробежные силы отбрасывают капли воды с осевшими на них частицами пыли на стенки рабочих элементов. Вода вместе с уловленной пылью стекает в кольцевой зазор и попадает в шламовую камеру, из которой по сливному патрубку 10 стекает в гидрозатвор. Очищенный воздух по соединительным трубам 11 поступает в камеру чистого газа и далее вентилятором выбрасывается в атмосферу.

Аппарат рассчитан на производительность по газу до 20 000 м³/ч. При очистке больших объёмов газов скрубберы komponуются в группу из двух и более аппаратов. Скорость газов в свободном сечении завихрителя 20 м/с, удельный расход орошающей жидкости (подаваемой под давлением до 150 КПа) 0,3...0,5 л/м³. Гидравлическое сопротивление аппарата при расчётной производительности по газу составляет 1650 Па.

Скруббер СЦВБ-20 рекомендуется устанавливать для очистки вентиляционных выбросов с содержанием пыли до 10 г/м³ при температуре газов до 60 °С.

Расчёт эффективности осуществляется по тем же формулам, что и аналогичные расчёты для циклонов ЦМС и ЦВП.

5.3. Скрубберы Вентури

Принцип действия скрубберов Вентури основан на динамическом воздействии потока газа для раздробления жидкости, вводимой в газовый поток. Подлежащие улавливанию частицы пыли оседают на каплях воды, которые газовым потоком выводятся из скруббера Вентури.

Для улавливания капель с пылью после трубы Вентури обычно устанавливают каплеуловители, описание которых будет дано ниже.

Существует достаточно большое количество конструкций скрубберов Вентури. Здесь рассмотрим скруббер Вентури оптимальной конфигурации с центральным подводом орошения (рис. 5.5). Такую конфигурацию имеет скруббер со следующими размерами:

- угол сужения $\alpha_1 = 25 \dots 28^\circ$;
- длина конфузора $\ell_1 = (d_1 - d_r)/2 \tan(\alpha_1/2)$;
- диаметр горловины d_r ; длина горловины $\ell_r = 0,15 d_r$;
- угол диффузора $\alpha_2 = 6 \dots 7^\circ$.

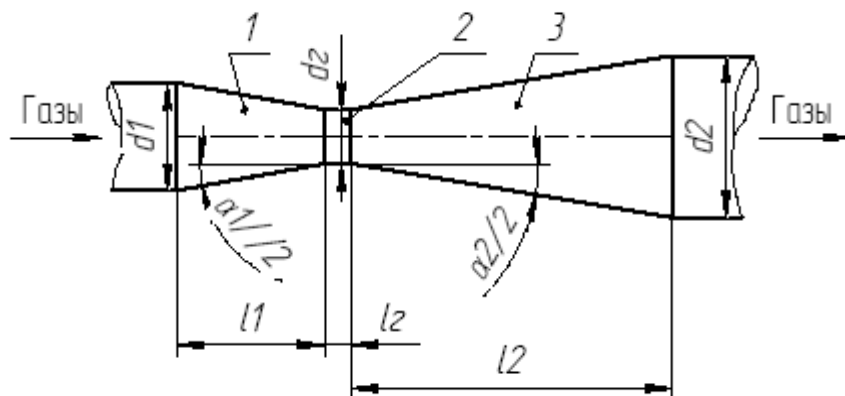


Рис. 5.5. Труба Вентури:

1 - конфузор; 2 - горловина; 3 - диффузор

Жидкость (например вода) вводится в газовый поток вблизи горловины трубы Вентури с помощью сопел (форсунок) так, что в суженном месте трубы образуется сплошная завеса жидкости. Запыленный газ, проходя через суженную горловину со скоростью $60 \dots 150$ м/с, сталкивается с завесой жидкости и разрывает её на капли. Размер образующихся при этом капель уменьшается при увеличении скорости газового потока. Так при скорости потока 100 м/с струя воды, вводимая через отверстие диаметром 5 мм, дробится на капли размером около 10 мкм, а при скорости газового потока 150 м/с средний размер капель составляет несколько мкм.

Скорость потока газа в горловине трубы выбирают исходя из следующего:

- при улавливании высокодисперсных частиц пыли или тумана, получающихся в результате возгона или конденсации паров высококипящих жидкостей (размер частиц менее 1 мкм):

$$W_r = 90 \dots 120 \text{ м/с};$$

- при улавливании пыли или капель жидкости, образующихся при механическом дроблении (размер частиц более $3 \dots 5$ мкм):

$$W_r = 70 \dots 90 \text{ м/с}.$$

Гидравлическое сопротивление трубы (Па) рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\text{тр}} = \xi \frac{\rho_{\text{г}} \cdot W_{\text{г}}^2}{2} + \xi_{\text{ж}} \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot m \cdot W_{\text{г}}^2}{2}, \quad (5.28)$$

где ξ – коэффициент сопротивления трубы без орошения горловины ($\xi=0,15$);

$\xi_{\text{ж}}$ – коэффициент сопротивления трубы при орошении её жидкостью;

$\rho_{\text{г}}$ – плотность газа в горловине трубы, кг/м³;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность орошающей жидкости, кг/м³;

m – принятый удельный расход жидкости, м³ воды /м³ газа;

$W_{\text{г}}$ – скорость газа в горловине трубы, м/с.

Коэффициент $\xi_{\text{ж}}$ определяется по формуле

$$\xi_{\text{ж}} = A \cdot \xi \cdot m^{1+B}, \quad (5.29)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты, зависящие от способа подвода орошения, скорости газа в горловине [6].

Например, для центрального подвода орошения в трубе Вентури оптимальной конфигурации:

$$A = 0,63; \quad (1 + B) = -0,3.$$

Диаметр горловины трубы Вентури $d_{\text{г}}$ (м) рассчитывается по формуле

$$d_{\text{г}} = 1,62 \sqrt{\frac{Q_{\text{г}}}{W_{\text{г}}}}, \quad (5.30)$$

где $Q_{\text{г}}$ – расход в горловине, м³/с;

$W_{\text{г}}$ – скорость в горловине, м/с.

Скорость газа на выходе из трубы Вентури принимают равной $W_{\text{вых}} = 16 \dots 20$ м/с.

Эффективность трубы Вентури определяют в следующем порядке.

По формуле (5.29) находят гидравлическое сопротивление трубы Вентури, а по формуле (5.16) находят потери, учитывающие гидравлическое сопротивление скруббера и потери, связанные с дроблением жидкости в форсунках, обозначаемые буквой K (формулы (5.14) и (5.15)). Затем по формуле (5.14) находят диаметр частиц пыли, улавливаемых с эффективностью 50%. Далее по формулам (5.13), (5.12) и табл. 5.1 определяется эффективность скруббера Вентури.

5.4. Каплеуловитель центробежный с тангенциальным подводом газа

Во всех «мокрых» пылеуловителях в той или иной степени происходит брызгоунос, интенсивность которого определяется скоростью газового потока в свободном сечении аппарата и способом подвода орошающей жидкости.

Для сепарации капель применяют гравитационные, инерционные и центробежные каплеуловители [73]. Из них наиболее эффективными, устойчивыми к образованию отложений и имеющими меньшие габариты, являются центробежные каплеуловители.

Из центробежных каплеуловителей может быть рекомендован аппарат КЦТ (каплеуловитель центробежный с тангенциально расположенным входным патрубком), который представлен на рис. 5.6.

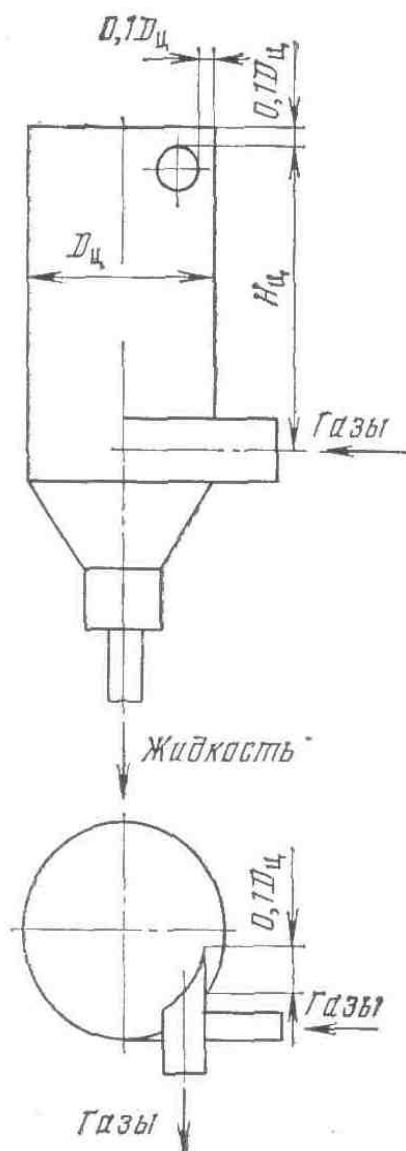


Рис. 5.6. Каплеуловитель центробежный
с тангенциальным входом (КЦТ)

Скорость газа во входном и выходном патрубках принимают $W_r = 18...25$ м/с. Скорость в цилиндрической части корпуса равна $W_{ц} = 3,5...4,5$ м/с; высота $H_{ц} = 1,5D_{ц} ... 2,5D_{ц}$ (см. рис. 5.6). Отношение высоты к ширине входного патрубка – 3:1.

При удельном орошении до $m = 0,7$ л/м³ унос капель составит не более 0,07 г/м³.

Диаметр патрубка слива шлама $d_{ш}$ рассчитывается по формуле

$$d_{ш} = \sqrt{\frac{Q \cdot m}{0,785 \cdot W_{ш}}} = 2,26\sqrt{Q \cdot m}, \quad (5.31)$$

где Q – расход газа в рабочих условиях, м³/с;

m – удельное орошение (концентрация капельной влаги в газе), м³ воды/м³ газа;

$W_{ш} = 0,25$ м/с – скорость слива шлама через патрубок.

При расчёте степени каплеулавливания КЦТ коэффициент гидравлического сопротивления, отнесённый к скорости газа в цилиндрическом корпусе, принимают равным $\xi_{кцт} = 18$ [73].

Диаметр капель, улавливаемых с эффективностью 50 %, принимают $d_{50} = 2,6$ мкм, а логарифм $\lg \sigma_{\eta} = 0,38$.

5.5. Гидрозатворы

Для сохранения разницы давлений в мокрых скрубберах и ёмкостях или трубопроводах, куда сливают жидкость с уловленной пылью, применяют гидрозатворы. Принцип действия и конструктивные исполнения даны на рис. 5.7 и 5.8. Применяются два типа гидрозатворов: в виде петли (см. рис. 5.7) или открытого промежуточного сосуда (см. рис. 5.8).

Основное достоинство первого гидрозатвора – постоянство скорости слива по всей его длине, что уменьшает возможность выпадения осадка. В нижней части гидрозатвора устанавливается заглушка, позволяющая произвести его очистку при остановках. В случае герметичного отвода шламовой жидкости на восходящей части петли необходима установка воздушника.

Второй тип гидрозатвора чаще всего применяется для вывода из аппаратов растворов. Достоинство затвора заключается в незначительном колебании уровня жидкости при пуске и остановке за счёт большого объёма промежуточного сосуда.

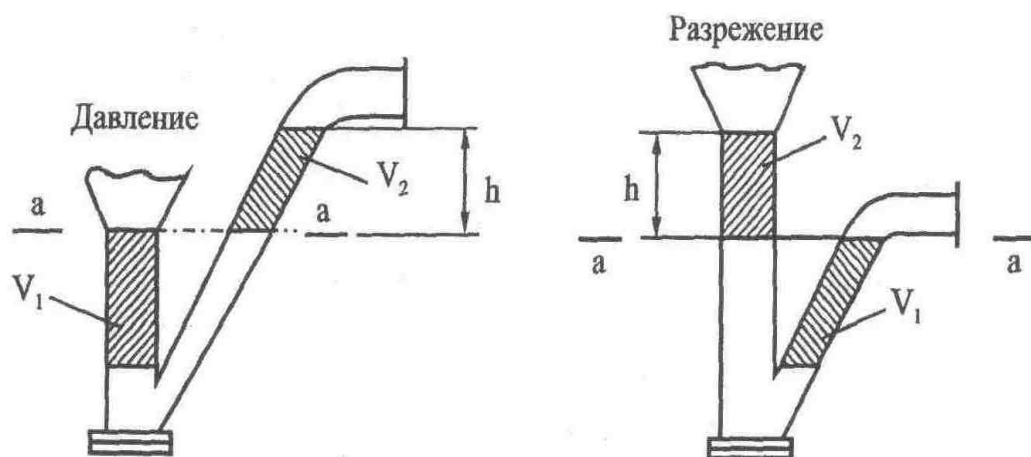


Рис. 5.7. Схема гидрозатвора типа петля

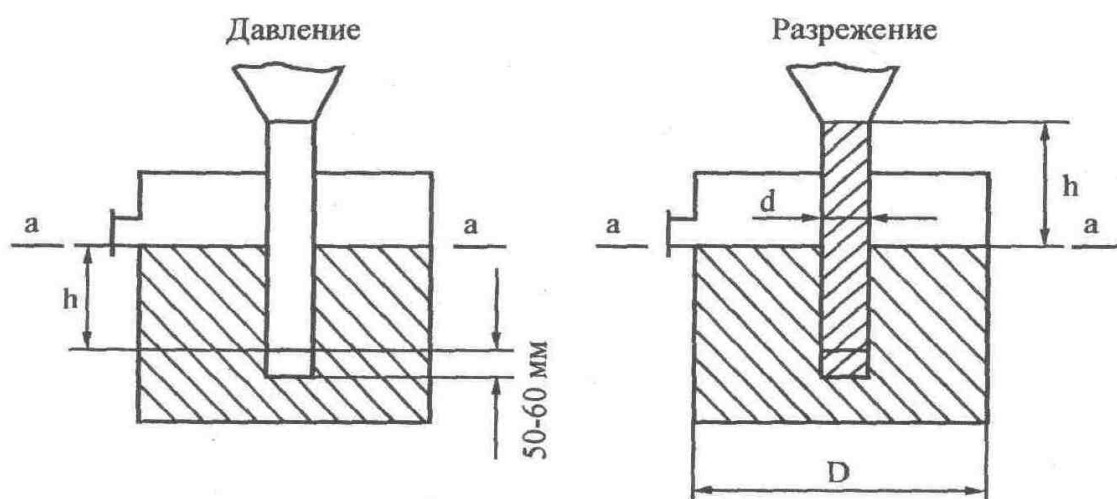


Рис. 5.8. Схема гидрозатвора с открытым промежуточным сосудом

Если пренебречь гидравлическими потерями при движении жидкости по гидрозатвору, необходимая высота гидрозатвора h (м) может быть определена из соотношения

$$h = (B - P_r) / (\rho_{\text{ж}} \cdot g), \quad (5.32)$$

где B – барометрическое давление, Па;

P_r – абсолютное давление газа в аппарате, Па;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м^3 .

Геометрические параметры гидрозатворов при давлении и разрежении показаны на рис. 5.7 и 5.8.

Перед пуском установки гидрозатвор должен быть обязательно за-
лит водой до уровня $a - a$. В случае применения в качестве гидрозатвора
– петли, объём занимаемый жидкостью V_1 (см. рис. 5.7), должен быть
больше или равен объёму V_2 . При использовании промежуточного сосуда
(при работе под разрежением) глубина заглубления сливной трубы (см.
рис. 5.8) находится из соотношения:

$$k > hd^2/D^2, \quad (5.33)$$

где d – диаметр сливной трубы, м;

D – диаметр промежуточного сосуда, м;

При работе под давлением сливная труба должна быть заглублена
ниже уровня $a - a$ на $k = h + (0,05 \dots 0,06)$, м.

Гидрозатворы оборудуются дренажными устройствами и лючками
для чистки при остановке оборудования. Гидрозатворы применяются при
небольших разрежениях и давлениях (до 15000...20000 Па), наиболее час-
то встречающихся в практике.

При больших давлениях в мокром палеуловителе на сливной трубе
устанавливается дроссель, связанный с уровнем жидкости в аппарате. В
случае большого разрежения слив жидкости может осуществляться само-
тёком в герметичную ёмкость, находящуюся под таким же разрежением,
что и аппарат.

Отвод жидкости из ёмкости по мере её заполнения осуществляется
насосом.

Глава 6. ОБОРУДОВАНИЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

6.1. Характеристика сточных вод промышленных предприятий

В современных технологических процессах вода находит широкое применение. До 80 % воды, задействованной в системе водопотребления предприятия, используется как теплоноситель для нагревания и охлаждения веществ, участвующих в реакции, остальная часть идет непосредственно для технологических целей (например, для промывки оборудования). Например, объемы воды, потребляемой нефтеперерабатывающим предприятием, исчисляются десятками тысяч кубометров в сутки, причем в основном это вода природного происхождения: атмосферная, поверхностная и подземная.

Сегодня природоохранными органами предъявляются жесткие требования к промышленным предприятиям по количеству образуемых промышленных сточных вод, а также качеству их очистки перед сбросом в водоемы. Не случайно при строительстве современных технологических производств до 20 % их стоимости расходуется на очистные сооружения. Ученые и конструкторы, при разработке и проектировании современных технологических производств, стараются использовать передовые достижения науки, привлекая в технологический процесс минимальное количество воды.

Современные водохозяйственные системы предприятий позволяют значительно сократить водопотребление и водоотведение, а в некоторых случаях полностью создать систему замкнутого водоснабжения [77].

Однако сегодня полностью ликвидировать сброс отходящих сточных вод в водоемы невозможно, поэтому необходимо обеспечить ее качественную очистку, а уловленные ценные вещества вернуть в технологическое производство. При решении этой задачи возникают трудности, которые связаны, прежде всего, с тем, что состав веществ, находящихся в сточной воде, зависит от специфики технологического процесса, из которого предусмотрен ее вывод. Для ее решения на предприятиях активно используются *локальные схемы очистки воды* на отдельных производствах. Такие системы, по сути, являются составной частью технологического процесса, подбор очистного оборудования для таких схем определяется составом сточных вод. Например, локальные очистные сооружения предварительной очистки используют для сточной воды, в состав которой входит значительное количество солей.

Все отводимые на предприятии сточные воды делятся на три вида:

- *производственные*, которые образуются в результате проведения технологического процесса;
- *бытовые* (образуются в процессе работы санитарных узлов производственных и вспомогательных зданий и сооружений);
- *атмосферные*.

Очевидно, что производственные сточные воды составляют наибольшую часть от всего объема отводимых сточных вод промышленных предприятий. Поэтому при разработке системы очистки сточной воды необходим тщательный анализ ее состава, определение важнейших характеристик, например:

- содержание компонентов очищаемой воды;
- биологическая потребность в кислороде (БПК) и химическая потребность в кислороде (ХПК);
- концентрация природных ионов pH;
- наличие механических примесей;
- степень минерализации.

В связи с наличием в сточных водах разных по составу и количеству загрязнений различают несколько технологических систем отведения и очистки сточных вод:

- *в первую систему* очистки нейтральных производственно-ливневых сточных вод подается вода, содержащая плавающие вещества – отходы производства (например, от промывки оборудования, нефтепродуктов, смыва полов производственных помещений, поверхностных вод и т.д.). Такая вода практически не содержит солей, и ее эффективная очистка позволяет повторно использовать воду в системе оборотного водоснабжения;
- *вторая система* предусматривает наличие в сточной воде солей, различных неорганических соединений, реагентов. Даже после очистки такую воду, ввиду наличия остаточной концентрации солей, нельзя использовать в системах оборотного водоснабжения, и она направляется на дальнейшую очистку. При этом часто она смешивается с бытовыми сточными водами, проходит очистку, и только потом сбрасывается в естественные водоемы.

6.2. Оборудование систем очистки сточных вод

Как отмечалось выше, выбор метода очистки сточной воды зависит от состава и степени загрязнения сточных вод, поступающих на очистку, а

также перспектив дальнейшего использования очищенной воды (будет ли вода возвращена в систему повторного водоснабжения, или она должна поступить в природные водоемы) [78, 79].

Существующие методы очистки промышленных сточных вод и используемое оборудование удобно представить в виде структурной схемы, представленной на рис. 6.1.

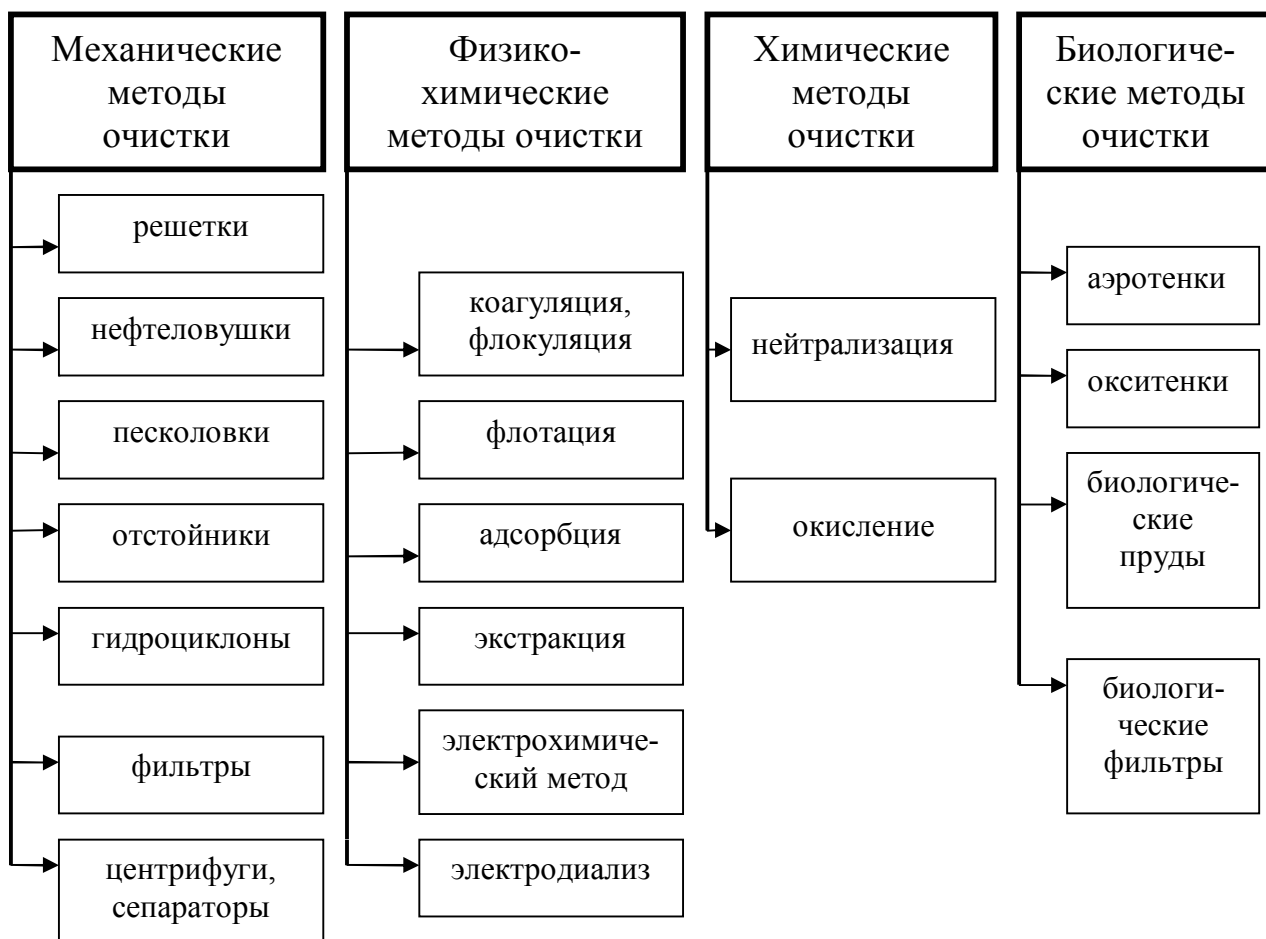


Рис. 6.1. Существующие методы очистки сточных вод

Крупные промышленные предприятия, имеющие свои заводские очистные сооружения, используют в основном три ступени очистки [80]:

- первая ступень - предварительная очистка от крупных частиц примесей;
- вторая ступень - основная очистка от нерастворенных и растворенных примесей;
- третья ступень - дополнительная очистка для возврата воды в производство или сброса в природные водоемы.

Механическая очистка. Механический метод используется как начальная стадия очистки с целью выделения из сточной воды крупных час-

тиц нерастворимых примесей минерального и органического происхождения. Для выделения крупных частиц используют *решетки, сетки, песколовки и нефтеловушки*, для более мелких фракций – *отстойники, фильтры, гидроциклоны, сепараторы и центрифуги*. Основным показателем выбора типа аппарата для механической очистки является изучение скорости осаждения примесей, находящихся в сточной воде.

Решетки служат для выделения из сточной воды крупных загрязнений с последующей их механической выгрузкой. Ширина прорезей между прутьями не превышает 19 мм, приведенная скорость воды находится в пределах 0,6...1,0 м/с. Прутья решетки устанавливают вертикально или наклонно.

Песколовки предназначены для удаления из сточной воды песка и крупных частиц - продуктов производства с размером частиц до 0,25 мм, причем вода должна иметь нейтральную или слабокислую среду. Различают песколовки с прямым и круговым движением очищаемого потока. В песколовке с круговым движением жидкости сточная вода подается в корпус 1 аппарата по тангенциально расположенному лотку 2 (рис. 6.2). Время осаждения частиц песка должно быть не меньше времени пребывания воды в аппарате. Всплывающие нефтепродукты задерживаются перегородкой 4 и через погружную воронку 5 выводятся из аппарата, а очищенная вода выводится из аппарата через выходной патрубок 3. Осевший песок с помощью гидроэлеватора 6 выводится из аппарата на переработку, например, в пруды-накопители. Производительность такой песколовки достигает 7000 м³/сут, приведенная скорость воды в песколовке составляет 0,15...0,3 м/с, время пребывания не превышает 1...2 мин [80].

Нефтеловушки на сегодняшний день можно считать основными аппаратами механической очистки сточных вод от нефтепродуктов, так как до 95 % нефтепродуктов улавливается именно в этих аппаратах. На рис. 6.3 показана конструкция многоярусной нефтеловушки. Сточная вода через входной патрубок 2 поступает в первую зону отстаивания 3, в которой происходит грубое отделение крупных частиц от потока. Крупные частицы и песок оседают в приемке 1 и после уплотнения выводятся из аппарата с помощью гидроэлеватора. Осветленная сточная вода, пройдя вертикальный канал 4 с распределительными лопатками, равномерно поступает в зону тонкой очистки 5 на параллельно располагаемые ярусы 6, установленные под углом до 45° к горизонту и собранные в блок 7. Расстояние между ярусами не превышает 50 мм, время пребывания воды в зоне отстаивания составляет 3...4 мин. Капли нефти и минеральные загрязнения поднимаются к поверхности.

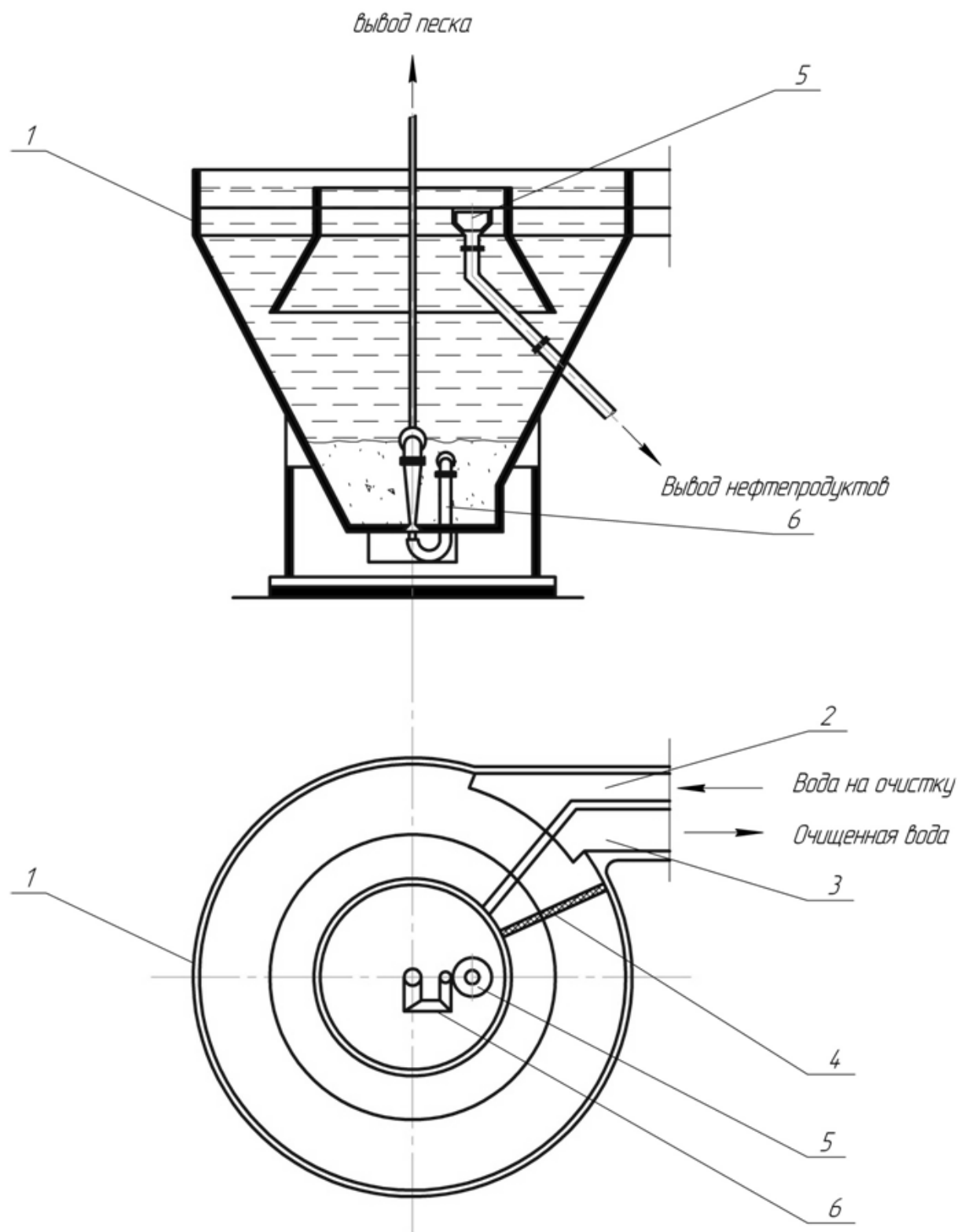


Рис. 6.2. Песколовка:

- 1 - корпус; 2 - лоток для подачи жидкости; 3 - выходной патрубок;
4 - перегородка; 5 - погружная воронка; 6 - гидрозелеватор

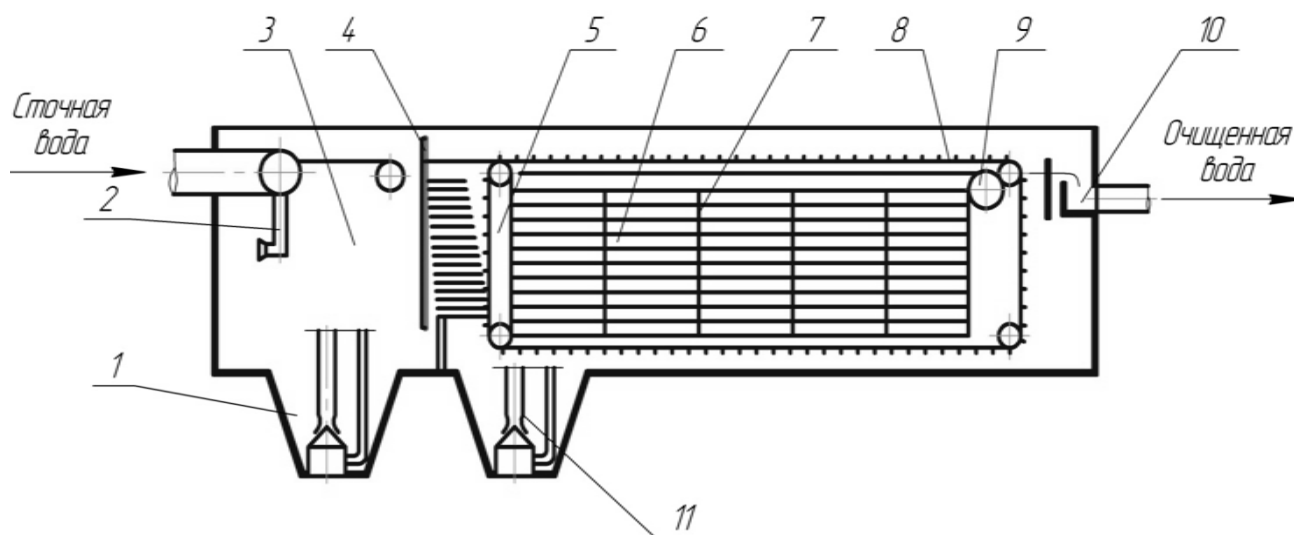


Рис. 6.3. Нефтеловушка:

- 1 - приемок; 2 - входной патрубок; 3 - первая зона отстаивания;
 4 - вертикальный канал; 5 - зона тонкой очистки; 6 - ярусы; 7 - блоки;
 8 - скребковый механизм; 9 - нефтевыводящая труба; 10 - штуцер;
 11 - приемок тонкой очистки

Скребковый механизм 8 подталкивает скопившуюся на поверхности воды нефть слоем до 0,1 м к нефтевыводящим трубам 9, и одновременно перемещает скопившийся в придонной области осадок к приемку тонкой ступени очистки 11. Очищенная вода выводится из аппарата через штуцер 10. Нефтеловушки изготавливаются с шириной секций 2...3 м, глубина слоя воды достигает 1,5 м. В таком аппарате приведенная скорость воды не должна превышать 0,05 м/с, а время пребывания вещества в аппарате достигает 2-х часов.

В *гидроциклонах* (рис. 6.4) выделение из сточной воды продуктов производства происходит за счет центробежных сил, возникающих в результате тангенциального расположения входного патрубка 6. При движении по нисходящей спиралеобразной траектории цилиндрической 4 и конической 2 частей корпуса тяжелая фракция с плотностью частиц выше плотности воды перемещается к стенке и выводится через патрубок 1 в виде шлама, а более легкая фракция частиц и осветленная вода поднимается по траектории восходящей спирали и выводится через патрубок 3. Для снижения гидравлического сопротивления аппарата на выходном патрубке 3 монтируется раскручивающее устройство 5. Диаметр напорных циклонов достигает 1000 мм. Для более тонкой очистки сточных вод в промышленности используют мультициклоны с диаметром до 50 мм, объединенные в батареи. Использование напорных гидроциклонов можно считать перспективным направлением осуществления процесса локальной

очистки сточных вод. На это указывает тот факт, что они конструктивно просты, компактны, эффективны в использовании [81].

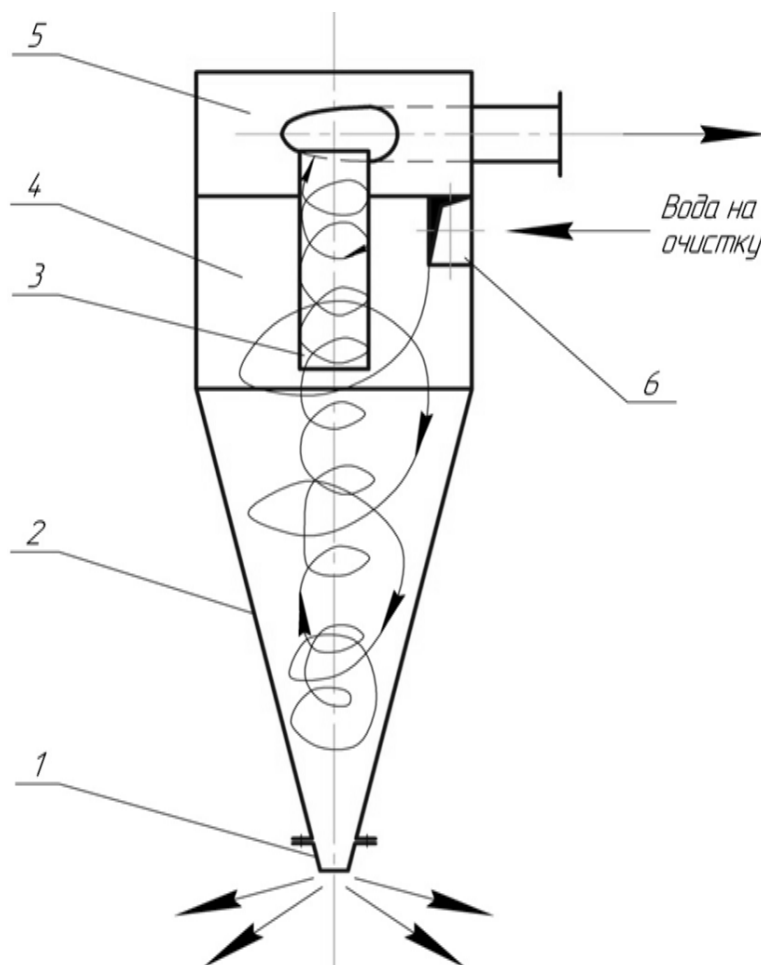


Рис. 6.4. Гидроциклон:

- 1 - патрубок для вывода шлама; 2 - коническая часть корпуса;
3 - патрубок для вывода осветленной жидкости; 4 - цилиндрическая часть корпуса; 5 - раскручивающее устройство

В *фильтрах* процесс разделения основан на пропускании промышленных сточных вод через слой специального зернистого материала природного (песок, керамзит и др.) или искусственного (пенополиуретан, пенополистирол и др.) происхождения, а также через сетку или фильтровальную ткань. Такие аппараты целесообразно использовать после проведенной механической очистки сточной воды, так как высокая концентрация нефтепродуктов на входе в фильтр может привести к быстрому забиванию межфильтровального пространства и снижению эффективности их работы. В этом случае фильтр должен пройти регенерацию, которую осуществляют обратным пропусканием чистой воды через слой под высоким давлением. Существенной задачей для обеспечения эффективной работы

фильтра является адгезия (способность прилипания) частиц нефти к зернам фильтрующего материала и их способность удерживаться в слое и не увлекаться вторичным потоком воды, покидающей зернистый слой. В современных песчаных фильтрах размер зерен фильтрующего материала изменяется в диапазоне 0,8...2 мм, скорость фильтрования достигает 15 м/ч, а высота слоя - 1...2 м. Диаметр корпуса фильтра составляет 1...3 м.

Физико-химическая очистка. Аппараты, работа которых основана на механическом методе очистки, не способны выделить из сточной воды продукты, находящиеся в виде коллоидного раствора или в растворенном виде. Однако именно в таком состоянии находится около 5 % загрязнений [82].

В этом случае после механического метода очистки целесообразно использовать один из методов физико-химической очистки.

Коагуляция – процесс добавления в сточную воду специальных химических соединений, которые способны изменить поверхностные свойства частиц загрязнений. Последние объединяются в достаточно крупные агломераты и, как результат, происходит их интенсивное осаждение в аппарате. Коагуляция наиболее эффективна для коллоидно-дисперсных частиц размером до 100 мкм. В качестве коагулянтов в промышленности используют *сульфат алюминия, глинозем, хлорид железа* и др., которые образуют в воде хлопья гидроксидов металлов. К сожалению, коагуляция как метод очистки имеет некоторые недостатки - значительный удельный расход коагулянта, а также трудности переработки образующегося осадка.

Повышению эффективности использования коагулянтов способствует добавление в сточную воду *флокулянтов* - специальных веществ органического и неорганического происхождения, которые способны создать молекулярную связь между взвешенными частицами. При этом снижается расход коагулянта, образующиеся хлопья взвешенных веществ более прочны и не разрушаются под воздействием турбулентных потоков среды. Наиболее известными флокулянтами являются *полиакриламид, полиэтиленамин, полимеры на основе стирола* и др.

Процесс *флотации* основан на способности мельчайших пузырьков воздуха, образуемых в водной среде при снижении давления, прилипать к взвешенным частицам и поднимать последние к поверхности очищаемой воды. Для того чтобы эффект прилипания имел место, взвешенные частицы должны быть гидрофобными, т.е. плохо смачиваемыми водой. В зависимости от способа получения мелкодисперсных пузырьков различают напорную, вакуумную, механическую, химическую, электрическую флотацию, а также диспергирование воздуха через пористый материал. Метод напорной флотации позволяет очищать сточные воды с концентрацией взвеси до 5 г/л.

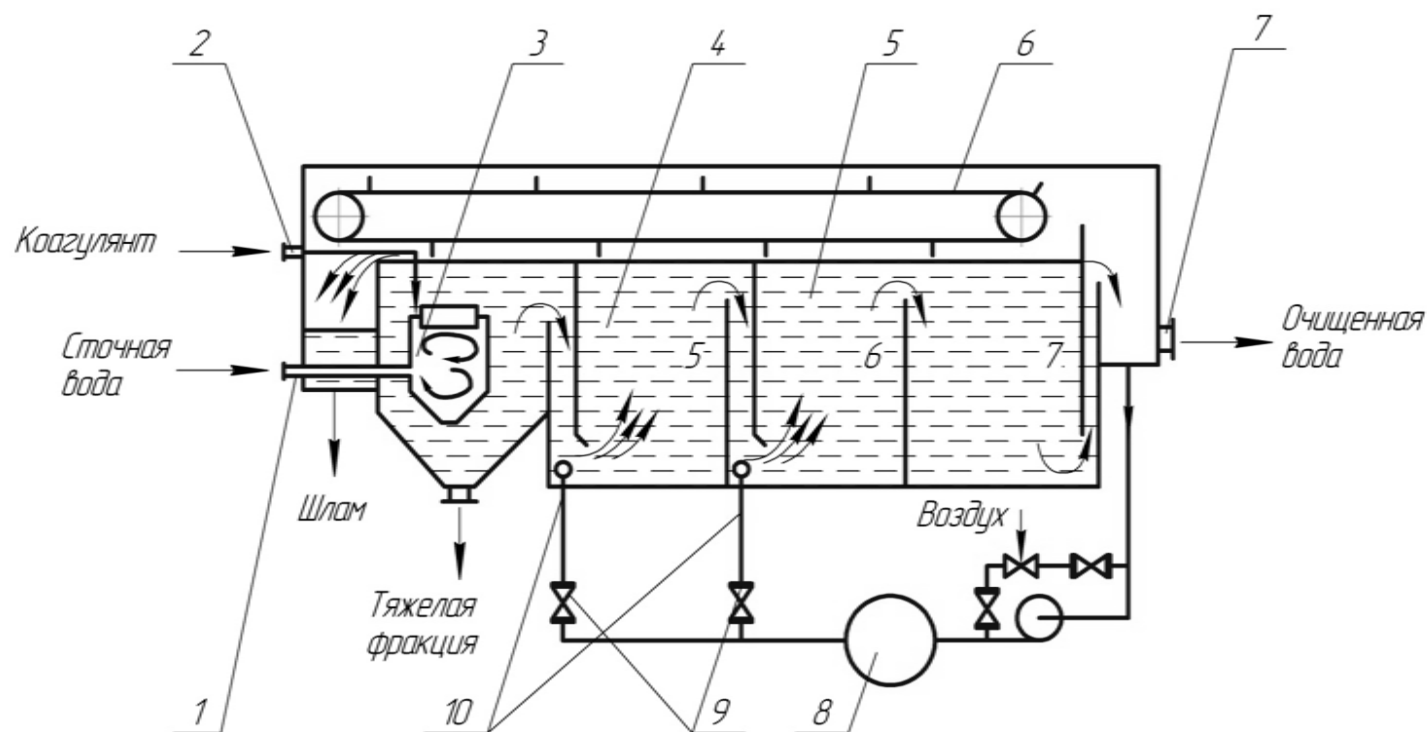


Рис. 6.5. Флотационная установка:

- 1 - труба для подачи воды; 2 - труба для подачи коагулянта; 3 – камера смешения; 4, 5 - флотокамеры;
 6 - скребковый механизм; 7 - штуцер для вывода очищенной воды; 8 - сатуратор; 9 - задвижки;
 10 - трубопровод; 11 - штуцер; 12 - приемный карман

Принцип работы флотационной установки, использующей метод напорной флотации, представлен рис. 6.5. Сточная вода, подлежащая очистке, по трубе 1 и коагулянт по трубе 2 поступают вместе в камеру смешения - гидроциклон 3. После отделения тяжелые частицы удаляются из флотатора через штуцер 11. Вода, освободившись от тяжелой фракции, поступает в напорные флотокамеры 4 и 5. В эти же камеры направляется рециркулирующая вода, которая уже прошла очистку и сатуратор 8. В сатуратор подают воздух, который под действием высокого давления растворяется в воде. Давление рециркулирующей составляет 0,5...0,7 МПа. Сброс давления в трубопроводе 10 осуществляется с помощью задвижек 9. Это приводит к выделению из воды воздуха в виде мельчайших пузырьков, которые с малой скоростью поднимаются к поверхности флотатора. По мере всплытия пузырьки воздуха «прилипают» к частичкам нефти и способствуют их выталкиванию к поверхности. Образовавшаяся на поверхности воды пена собирается скребковым механизмом 6 и выводится через приемный карман 12 в шламонакопитель. Очищенная вода выводится из аппарата через штуцер 7.

Использование *электрохимического метода* очистки сточных вод может успешно конкурировать с другими физико-химическими методами благодаря ряду преимуществ, среди которых можно выделить высокую эффективность, значительное снижение количества образованного осадка, небольшие производственные площади. Суть метода заключается в том, что обрабатываемая сточная вода подвергается электролизу с помощью растворимых или нерастворимых электродов. При электролизе с растворимыми электродами процесс растворения электродов в воде приводит к переходу в водную среду ионов металлов с последующим образованием гидроксидов этих солей и коагуляции взвешенных частиц. Напряжение на электродах составляет 12 В. В качестве материала для пластин электродов можно использовать сталь, алюминий. К недостаткам такого метода можно отнести высокий уровень капитальных затрат, необходимых на создание и обслуживание установок электрохимической очистки, а также снижение эффективности процесса во времени, что связано с образованием на поверхности электрода оксидной пленки.

Адсорбционный метод очистки основан на способности пористого вещества (адсорбента) поглощать взвешенное в сточной воде вещество (адсорбат). Движущей силой процесса является разность потенциалов между системами: «адсорбент-адсорбат» и «адсорбат-вода». Переход вещества в поры адсорбента приводит к равновесию системы. В качестве адсорбента используют гранулированный активированный уголь с размером частиц 0,1 мм. Процесс очистки осуществляют в аппаратах емкостного типа с уложенным слоем гранулированного материала.

Электродиализный метод основан на осаждении ионов солей, находящихся в сточной воде, при прохождении через мембраны, под действием электрического поля. Этот метод позволяет очистить сточную воду от растворенных солей.

Химическая очистка. Метод химической очистки используется как самостоятельный метод локальной очистки сточных вод и как метод, предшествующий биологической очистке. К химическим методам относят *нейтрализацию, окисление и восстановление.*

Нейтрализацию химическими реагентами (растворами кислот, щелочей, гашеной и негашеной известью) используют при большом содержании в сточной воде кислот и щелочей. *Окисление* хлором, хлоратом кальция, озоном и другими окислителями используют при высоком содержании в сточной воде сероводорода, сульфидов. При этом токсичные загрязнения теряют свою активность. *Восстановление* солей ртути, хрома, мышьяка проводят активированным углем, сульфатом железа, водородом.

Биологическая очистка. На сегодняшний день *биологическую очистку* сточных вод можно назвать основным методом очистки производственных сточных вод. Сооружения биологической очистки представляют собой целый блок аппаратов – отстойников и аэротенков, причем в них может производиться очистка производственных и бытовых сточных вод. Расход сточной воды в таких сооружениях может достигать 100000 т/сут, при этом возврат воды в систему оборотного водоснабжения в некоторых производствах может превышать 80 %.

В основе метода лежит природная способность специальных микроорганизмов (водорослей, грибов, бактерий, дрожжей) использовать органические и неорганические вещества, содержащиеся в сточной воде, как питательный субстрат, образуя при этом углекислый газ и воду. Такое сообщество микроорганизмов называют *активным илом*. Активный ил состоит из живых микроорганизмов и твердого субстрата – отмерших микроорганизмов, к которым микроорганизмы прикрепляются.

Для некоторых бактерий необходимо создание *анаэробных условий* проведения процесса, т.е. отсутствия растворенного в воде кислорода. Другим бактериям для создания благоприятных условий прохождения процесса биосинтеза необходим кислород, причем его концентрация в воде должна быть на уровне 2 мг/л. Такие условия существования биомассы называют *аэробными*.

Например, известно, что практически все углеводороды, входящие в состав нефти, могут быть переработаны микроорганизмами. Однако некоторые вещества, которые могут находиться в сточных водах (например, ионы тяжелых металлов, минеральные соли), при определенных концен-

трациях могут оказывать на них токсическое воздействие. В этом случае биологическому методу должны предшествовать иные методы очистки, способные значительно снизить концентрацию этих веществ в воде.

Наиболее благоприятными условиями проведения процесса биологической очистки на нефтеперерабатывающем заводе можно считать следующие характеристики сточной воды:

- температура 20...30 °C;
- уровень кислотности не должен превышать $pH = 6,5 \dots 7,5$;
- концентрация важных элементов питания клеток должна быть не менее: для азота 15 мг/л, фосфора 3 мг/л;
- общая концентрация солей в сточной воде не должна превышать 10 мг/л;
- концентрация кислорода в сточной воде (для систем с аэробными микроорганизмами) должна быть на уровне 2 мг/л;
- размер частиц, поступающих на очистку, не должен превышать 50 мкм.

Аппаратура для биологической очистки сточных вод. В основу классификации оборудования для биологического окисления сточных вод предложен принцип деления таких сооружений по организации процесса [83, 84]:

- *в природных условиях (полях орошения, полях фильтрации, биологических прудах);*
- *в специально созданных сооружениях (аэротенках, биофильтрах).*

Поля орошения представляют собой специально подготовленные земельные участки, в которых сточная вода проходит очистку за счет почвенной микрофлоры, солнца и воды. Если после процессов биологической очистки такие поля используются для посадок растений и сельскохозяйственных культур, то их называют *полями фильтрации*. В процессе очистки сточная вода проходит через фильтрующий слой почвы, в которой задерживаются взвешенные и коллоидные частицы. Проникающий в почву кислород окисляет вещества, превращая их в минеральные соединения. Этот процесс протекает на глубине 0,3...0,4 м и не должен сопровождаться попаданием воды в грунтовые воды.

Биологические пруды представляют собой каскад нескольких природных сооружений, по которым последовательно протекает сточная вода, очищаясь от вредных примесей с помощью водных микроорганизмов (рачков и водорослей). Систему биологических прудов часто используют совместно с другими очистными сооружениями. Глубина таких прудов не превышает одного метра.

Аэротенками называют железобетонные сооружения с системой аэрации. Сегодня аэротенки являются основными сооружениями для очистки сточных вод нефтеперерабатывающих заводов. Входная концентрация взвешенных частиц в воде перед аэротенком не должна превышать 150 мг/л, а нефтепродуктов – 30 мг/л. Обычно, глубина аэротенков не превышает 4...5 м.

Система биологической очистки с участием аэротенков включает следующие аппараты, в которые последовательно поступает вода: пред-аэратор (служит для первичного осаждения частиц и подачи активного ила), первичный аэротенк (служит для аэрации воды кислородом воздуха), аэротенк, вторичный отстойник (предназначен для разделения очищенной сточной воды и активного ила). Активный ил далее поступает на регенерацию, а сточная вода поступает на доочистку в биологические пруды.

По способу размещения активного ила в рабочем объеме аппарата различают аэротенки:

- с закреплением активного ила на неподвижном материале-носителе в виде биопленки, при этом сточная вода омывает поверхность носителя. Такие аппараты называют *биофильтрами*;
- с активным илом, находящимся во взвешенном состоянии (к этой группе аппаратов относят *аэротенки*);
- со смешанным способом размещения активного ила.

В *биофильтрах* пленка, состоящая из микроорганизмов, образуется на твердом носителе, которым заполняют объем аппарата. В качестве грузочного материала используют керамические и пластмассовые кольца, керамзит, гравий и другие материалы. Высота слоя носителя в биофильтре обычно не превышает 4-х метров. Производительность и эффективность работы зависит от общей площади поверхности загрузки (биопленки), а также возможностью доступа кислорода воздуха к поверхности биопленки.

Система аэрации выполняет функцию насыщения жидкости кислородом воздуха, поддержания активного ила во взвешенном состоянии и создания в аппарате зоны активного перемешивания.

На сегодняшний день различают несколько способов аэрации очищаемой воды:

- пневматическая, осуществляемая с помощью сжатого воздуха, поступающего в реакционный объем через отверстия в виде мелких пузырьков;
- механическая, осуществляемая с помощью воздуха, вовлекаемого в аэротенк лопастями мешалки, установленной на поверхности жидкости;

- струйная, при которой вовлечение воздуха вглубь реакционной объема происходит с помощью падающих струй жидкости, которые при падении вовлекают (инжектируют) воздух и диспергируют его в месте входа струи в объем жидкости.

Аппарат для аэрирования сточных вод, изображенный на рис. 6.6, состоит из резервуара 1, насоса 2, циркуляционного трубопровода 3, насадка 4, направляющей трубы 5, горизонтального патрубка 6. Принцип его работы сводится к следующему. Жидкость из резервуара 1 насосом 2 по трубопроводу 3 подается в насадку 4, откуда вертикальной струей, захватывающей воздух, поступает в аэрируемую жидкость. Газожидкостная смесь через направляющую трубу 5 поступает в горизонтальные патрубки 6. Жидкость по нижнему сечению патрубка 6 проходит под заслонкой 8 и устремляется вверх вдоль стенок резервуара, что обеспечивает циркуляцию жидкости. Наличие отверстий в горизонтальной трубе 7 приводит к дополнительному дроблению газовых пузырей, и, как следствие, к обновлению поверхности контакта фаз.

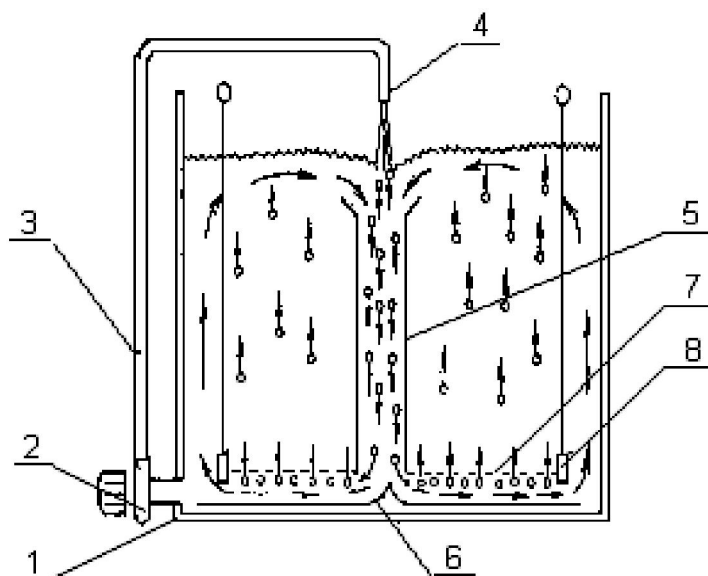


Рис. 6.6. Аэротенк со струйной системой аэрации

Способ струйного аэрирования вызывает в последнее время повышенный интерес со стороны исследователей и проектировщиков нового оборудования, так как он практически не уступает пневматическим, механическим, пневмомеханическим системам по скорости растворения кислорода в жидкости. К положительным характеристикам таких аэрационных систем можно отнести исключение из схемы производства газонагнетательных машин, достаточно развитую межфазную поверхность, высо-

кую эксплуатационную надежность, поскольку аппарат не имеет подвижных элементов, малое потребление энергии. Это подтверждают данные по эффективности различных типов аэрационных систем, приведенные в табл. 6.1 [85, 86].

По способу подачи сточной воды и активного ила аэротенки делят на две группы:

- *аэротенки-смесители*, в которых сточная вода и активный ил подаются равномерно по всей длине аппарата.
- *аэротенки-вытеснители*, в которых воду и ил загружают в начале аппарата.

Таблица 6.1. Характеристика аэрационных систем

<i>Тип аэратора</i>	<i>Эффективность переноса кислорода в жидкость, кг O₂/(кВт·ч)</i>
Пневматический мелкопузырчатый	0,95...1,8
Пневматический крупнопузырчатый	0,64...0,98
Механический турбинный	1,2...1,38
Механический поверхностный	1,68
Струйный	До 3,0

Первый способ подачи позволяет равномерно распределить нагрузку на активный ил по всему рабочему объему, упростить конструкцию системы подачи сжатого воздуха в аппарат, снизить отрицательное влияние застойных зон и зон циркуляции потоков.

Биологическая очистка сточных вод сопровождается несколькими параллельно протекающими процессами: снижением концентрации вредных веществ, ростом биомассы, снижением активности микроорганизмов. Для обеспечения нормальной жизнедеятельности микроорганизмов в аппаратах биологической очистки необходимо обеспечить эффективную *систему аэрации* воды воздухом, а также *систему отвода и регенерации биомассы*.

В ходе проведения процессов механической, физико-химической и биологической очистки сточных вод выделяется большое количество осадка, состоящего на 60-70 % из органических веществ. Эти вещества имеют особенность быстро разлагаться, гнить, что создает условия к появлению вредных патогенных микроорганизмов, отрицательно влияющих на санитарную обстановку близлежащих населенных территорий.

В этой связи на предприятиях созданы технологии, позволяющие решать задачу обработки и обеззараживания осадка сточных вод [83, 84].

6.3. Интенсификация процессов очистки сточных вод

Одной из важнейших задач развития нефтеперерабатывающей отрасли является сокращение количества воды, требуемой для технологических нужд, и количества сточных вод, сбрасываемых в водоемы. Решение этих задач зависит от ряда факторов.

Во-первых, необходимо дальнейшее совершенствование технологических процессов и повышение эффективности работы оборудования. Например, на нефтеперерабатывающих заводах комбинирование нескольких процессов в одной установке и, как следствие, ликвидация промежуточных парков, где происходит охлаждение и нагревание нефтепродуктов, позволяет существенно снизить требуемое количество воды. Этому также способствует активное применение на заводах теплообменников воздушного охлаждения. Важным элементом снижения количества нефтепродуктов, поступающих в сточные воды, является замена сальниковых уплотнений насосов на торцовые.

Во-вторых, необходимо совершенствовать систему очистки сточных вод с высоким содержанием растворенных солей (до 7000 мг/л). На сегодняшний день схема очистки такой воды включает прохождение воды через нефтеловушки, флотаторы, сооружения биологической очистки. Добиться значительного снижения солей можно путем замены биологической очистки на термическое обессоливание воды (выпаривание) и процесс обратного осмоса.

В-третьих, следует активно развивать системы локальной очистки сточных вод конкретного процесса или группы процессов, осуществление которых способствует образованию близких по составу сточных вод. Наличие таких систем позволяет вернуть очищенные сточные воды в технологический процесс, снизить нагрузку на заводские очистные сооружения.

В-четвертых, необходимо повышать эффективность оборудования для очистки сточных вод. Например, совмещение двух сооружений - песколовок и нефтеловушек позволяет снизить требуемые площади, исключить дополнительную турбулизацию воды, а использование многоярусных нефтеловушек позволяет отказаться от размещения промежуточных отстойников.

При биохимической очистке интенсифицировать процесс можно путем увеличения концентрации растворенного кислорода до 6 мг/л, а вместо воздуха использовать технический кислород, который в 3-4 раза ускоряет диффузионный и биохимический процессы, в 8 раз снижает рабочий

объем аппарата. Аппараты, в которых вместо воздуха используют технический кислород, называют *окситенками*. Это герметичные сооружения, позволяющие исключить неприятный запах, характерный при обычной биологической очистке. Применение кислорода также повышает эффективность его использования с 6-8 до 85-90 %, улучшает бактериальный состав активного ила.

Другим перспективным направлением интенсификации процесса биологической очистки является применение аэротенков со струйной системой аэрации. Как уже отмечалось выше, работа такого аппарата позволяет повысить эффективность использования кислорода воздуха с 60 до 90 %, а также значительно снизить энергетические затраты на проведение процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды выбросами промышленных предприятий является поистине международной проблемой. Не случайно ее решению посвящены теоретические и экспериментальные исследования ученых, работающих в научных центрах многих стран.

Очевидно, что решение задачи снижения выбросов промышленных предприятий в окружающую среду лежит в области усовершенствования существующих, а также разработки и внедрения, новых производственных технологий и экотехнического оборудования.

Следует отметить необходимость постоянного совершенствования правовых основ государственной политики в области охраны окружающей среды, регулирующих отношения в сфере взаимодействия общества и природы, которые возникают при осуществлении хозяйственной деятельности.

В настоящее время практически полностью отсутствует научно-техническая литература по аппаратам очистки промышленных газов и жидкостей.

Основные материалы, изложенные в данной книге, базируются на фундаментальных работах, проведенных учеными вузов и соответствующих отраслевых институтов за последние 50 лет.

Поэтому данное учебное пособие и предназначено для того, чтобы хотя бы в какой-то степени заполнить образовавшийся информационный вакуум.

Авторами книги являются научные работники ЗАО «Кондор-Эко» и ФГБОУ ВПО «ЯГТУ» непосредственно занимающиеся разработкой, изготовлением и пуско-наладкой экотехнической аппаратуры.

Предлагаемая книга предназначена в качестве пособия для студентов, изучающих курсы «Процессы и аппараты химической технологии» и «Экология», но может оказаться полезной и для инженерно-технических работников промышленных предприятий, проектных и исследовательских организаций.

Авторы будут признательны за все замечания и пожелания к книге, которые следует направить по адресу: 152101, Ярославская обл., п. Семибратово, ул. Павлова д.5.; или по e-mail: info@kondor-eco.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кукушкина, Ю.Е. Оценка биологического возраста у работников литейного цеха ОАО "Автодизель" / Ю.Е. Кукушкина, Н.И. Тятенкова // Актуальные проблемы экологии Ярославской области : материалы Второй науч.-практ. конф. Т. 2. - Ярославль, 2002. – С. 13-17.
2. Штокман, Е.А. Очистка воздуха: учебное пособие. - М. : АСВ, 1998. – 320 с.
3. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. - 3-е изд., перераб. - Л. : Химия, 1987. – 264 с.
4. ГОСТ Р 50820-95. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков. – М. : Госстандарт России, 1995. – 20 с.
5. Гордон, Г.М. Контроль пылеулавливающих установок / Г.М. Гордон, И.Л. Пейсахов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1973. – 384 с.
6. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков [и др.]; под общ. ред. А.А. Русанова. - М. : Энергия, 1975. – 296 с.
7. Коузов, П.А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей / П.А. Коузов, Л.Я. Скрябина. - Л. : Химия, 1983. – 143 с.
8. ГОСТ Р 8.777-2011. Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения. – М. : Стандартиформ, 2012. – 8 с.
9. А.с. 359577 СССР. Прямоточный анализатор пыли / Е.И. Павловский. - Оpubл. в Б.И. - 1972.- №35.
10. Алиев, Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов : справ. изд. - М. : Металлургия, 1986. – 544 с.
11. Коузов, П.А. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности / П.А. Коузов, А.Д. Мальгин, Г.М. Скрябин. - 2-е изд., перераб. и доп. – СПб : Химия, 1993. - 320 с.
12. Чекалов, Л.В. Формула газоочистки. - Семибратово, Ярославской обл. : Кондор-Эко, 2008. – 275 с.
13. Скрябина, Л.Я. Атлас промышленных пылей. - М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981. – 192 с.

14. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. - М. : Химия, 1967. - 344 с.
15. Чекалов, Л.В. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов. – Ярославль : Русь, 2004. – 424 с.
16. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.М. Пашин. - М. : Энергия, 1974. - 480 с.
17. Мутушев, М.А. Снижение токсичности отработавших газов дизелей с помощью электрофильтров / М.А. Мутушев, Ю.И. Санаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 2. – С.34.
18. Чекалов, Л.В. Высокоэффективный комбинированный электрофильтр / Л.В. Чекалов, В.М. Ткаченко, Ю.И. Громов // Электрические станции. – 2006. – №5. - С. 51-56.
19. Патент РФ №2229939. Элемент коронирующего электрода электрофильтра / Л.В. Чекалов, В.А. Гузаев, Н.А. Курицын, Ю.И. Санаев. – Оpubл. 10.06.2004.
20. Каталог пылеулавливающего оборудования / под ред. Л.В. Чекалова. – Ярославль : Кондор-Эко, 2006. - 240 с.
21. Санаев, Ю.И. Выбор типоразмера электрофильтра по параметрам аналоговой установки // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2008. – №5. – С. 35-36.
22. Левитов, В.И. Дымовые электрофильтры / В.И. Левитов, И.К. Решидов, В.М. Ткаченко [и др.]. - М. : Энергия, 1980. – 448 с.
23. Чекалов, Л.В. Научные основы создания электрогазоочистки нового поколения : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. - М. : МЭИ, 2007. - 39 с.
24. Санаев, Ю.И. Методы повышения эффективности работы электрофильтров : обзор. инфор. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1986. – С. 22.
25. Страус, В. Промышленная очистка газов / пер. Ю.Я. Косого. - М. : Химия, 1981. - 616 с.
26. Ужов, В.Н. Подготовка промышленных газов к очистке / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг. - М. : Химия, 1975. - 216 с.
27. Санаев, Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами. - Семibrатово : Кондор-Эко, 2009. - 163 с.
28. Санаев Ю.И. Экспериментальное исследование уноса пыли в электрофильтрах и разработка методов его снижения : автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1978. - 20 с.

29. Чекалов, Л.В. Реконструкция электрофилтра на Омской ТЭЦ-5 и выбор межэлектродного расстояния в электрофилтрах / Л.В. Чекалов, Ю.И. Санаев // Электрические станции. – 2011. – №1. – С.19-23.
30. Идельчик, И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. - М. : Машиностроение, 1983. – 351 с.
31. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов фильтрами / В.Н. Ужов, Б.И. Мягков. - М. : Химия, 1970. - 320 с.
32. P.A.F. White, S.E. Smith. High-efficiency air filtration. – London. Butter-worth, 1964. - 185 p.
33. Рукавные фильтры / М.Л. Моргулис, М.Г. Мазус, А.С. Мандрико, М.И. Биргер. – М. : Машиностроение, 1977. - 256 с.
34. Анализ современного состояния теории процесса фильтрации аэрозолей (применительно к практике инженерных расчетов) / Н.М. Анжуров, А.Ю. Вальдберг, Ю.А. Красовицкий, Н.Ю. Красовицкая, Е.А. Шипилова // Науч. и техн. аспекты охраны окружающей среды. – 2000. – № 5. – С. 127.
35. Горячев, И.К. Фильтровальные материалы для очистки газов. - М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1980. - 53 с.
36. Масленников, К.Н. Химические волокна. Словарь-справочник / под ред. проф. А.А. Конкина. - М. : Химия, 1973. - 192 с.
37. Ушаков, С.Г. Инерционная сепарация пыли / С.Г. Ушаков, Н.И. Зверев. - М. : Энергия, 1974. – 168 с.
38. Вальдберг, А.Ю. Образование туманов и каплеулавливание в системах очистки газов / А.Ю. Вальдберг, А.А. Мошкин, И.Г. Каменщиков. – М. : Изд. дом «Грааль», 2003. – 256 с.
39. Машиностроение. Энциклопедия. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т.IV-12 / М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексеев [и др.]; под общ. ред. М.Б. Генералова – М. : Машиностроение, 2004. – 838 с.
40. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков [и др.]; под общ. ред. А.А. Русанова. - 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
41. Карпухович, Д.Т. Исследование и разработка улиточного золоуловителя, совмещенного с дымососом, для промышленных котельных : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1969. – 18 с.
42. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М. : Химия, 1981. – 392 с.

43. Веригин, А.Н. Химико-технологические агрегаты конденсационного улавливания пыли / А.Н. Веригин, В.Н. Федоров, М.С. Малютин. – СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2000. – 336 с.
44. Jackson R. Mechanical equipment for removing grit and dust from gases. – Leathered: The British Coal Utilization Research Association, Leatherhead, Surrey, England, 1963. – p. 281.
45. Christian Fredriksson. Exploratory Experimental and Theoretical Studies of Cyclone Gasification of Wood Powder. Doctoral thesis // Division of Energy Engineering Department of Mechanical Engineering Lulea University of Technology 971 87 Lulea, Sweeden, 1999. - 151 p.
46. Вальдберг, А.Ю. Основы расчета эффективности газоочистных аппаратов инерционного типа / А.Ю. Вальдберг, С.Г. Сафонов // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2006. – №9. – С. 43-44.
47. Приходько, В.П. Основные принципы создания энергосберегающих устройств циклонного типа / В.П. Приходько, В.А. Пирогова, Е.М. Прохоров // Хим. и нефтегаз. Машиностроение. – 2006. – №10. – С. 32-34.
48. Скрябин, Г.М. Пылеулавливание в химической промышленности / Г.М. Скрябин, П.А. Коузов. – Л. : Химия, 1976. - 63 с.
49. Лазарев, В.А. Метод определения аэродинамических показателей циклонов по геометрическим параметрам их входных и выходных патрубков // Хим. и нефтегаз. Машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 37-39.
50. Смирнов, М.Е. Циклон для литейного производства / М.Е. Смирнов, А.В. Сугак, Г.М. Гончаров // Экология и промышленность России. - 2000. – Май. – С. 13-14.
51. Смирнов, М.Е. Улавливание пыли в вертикальном прямоточном циклоне / М.Е. Смирнов, А.В. Сугак, Г.М. Гончаров // Экология и промышленность России. - 2001. – Апрель. – С. 28-29.
52. Wang, L. A Study of the Cyclone Fractional Efficiency Curves / L. Wang, C.B. Parnell, B.W. Shaw // Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript BC 02 002. – 2002.– Vol. IV. June. – P. 1-13.
53. Звездин, Ю.Г. Метод расчета гидравлического сопротивления циклонов // Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технология. – 1988. – Т.31, вып. 12. - С. 126-129.
54. Исследование коэффициента гидравлического сопротивление циклонов СК-ЦН / А.Ю. Вальдберг, Ю.Ф. Хуторов, В.Е. Бойцова, С.Г. Сафонов // Хим. и нефтегаз. Машиностроение. – 2008. – №12. – С.37.

55. Лазарев, В.А. Циклоны и вихревые пылеуловители: Справочник.- 2-е изд., перераб. и доп.- Нижний Новгород : Фирма ОЗОН-НН, 2006. - 320 с.
56. Патент 2135300 С1 Российская Федерация, МКИ В 04 С 3/06, 5/081. Циклон / М.Е. Смирнов, А.В. Сугак, Г.М. Гончаров. - Оpubл. в Б.И. -1999. - №24.
57. Сугак, Е.В. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами / Е.В. Сугак, Н.А. Войнов, Н.А. Николаев. - Казань : РИЦ «Школа», 1999. - 224 с.
58. Асламова, В.С. Интенсификация процесса сепарации в прямоточном циклоне и вентиляторе-пылеуловителе : автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1987. - 16 с.
59. Смирнов, Е.П. Конфузорно-диффузорные (баллистические) пылеуловители / Е.П. Смирнов, И.М. Зицер // Обзор. инфор. Серия ХМ-14. Промышленная и санитарная очистка газов. - М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1992. - 31 с.
60. А. с. 1225600 СССР, МКИ В 01 D 45/04, В 01 D 45/08. Инерционный пылеуловитель / Е.П. Смирнов, Я.Л. Гинзбург, В.Д. Кузьмич, И.М. Зицер, Г.Ю. Степанов. - Оpubл. в Б.И. - 1986. - № 15.
61. Du Rocher, L. Development of an advanced air cleaner concept army vehicular gas turbines / L. Du Rocher, H. Giannotti // Diesel and gas turbines progress. - 1968. - Vol. 34, №1. - P. 49.
62. Патент 2079342 С1 Российская Федерация, МКИ В 01 D 45/04. Прямоточный сепаратор / В.С. Щипачев - Оpubл. в Б.И. - 1997. - № 14.
63. Обеспыливание промышленных газов: монография / Э.М. Соколов, Н.И. Володин, О.М. Пискунов, Ю.И. Санаев, П.Г. Варьяш. - Тула : Тул. гос. ун-т, 1999. - 376 с.
64. Пирумов, А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. - М. : Стройиздат, 1981. - 207 с.
65. Результаты испытаний пылеуловителя со встречными закручивающими потоками и циклона ЦН-15 / Б.С. Сажин, Л.И. Гудим, В.Н. Галич, Д.Т. Карпухович // Хим. пром-сть. - 1984. - №10. - С.626-627.
66. Медников, Е.П. Вихревые пылеуловители. - М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1975. - 44 с.
67. Сажин, Б.С. Вихревые пылеуловители / Б.С. Сажин, Л.И. Гудим. - М. : Химия, 1995. - 144 с.

68. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. - Ярославль: Верхне-Волжское изд-во, 1970. – 95 с.
69. Новиков, Л.М. Разработка конструкции и метода расчета центробежно-электрического пылеуловителя – электроциклона : автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Свердловск, 1987. - 20 с.
70. А.с. 824516 СССР, МКИ В 01 О 46/10. Двухступенчатый пылеуловитель / И.И. Полосин, В.Е. Тройнин, М.В. Поздняков, В.И. Уметский - Оpubл. 1978.
71. Барашева, М.А. Экспериментальные исследования опытного образца пылеуловителя-классификатора / М.А. Барашева, А.В. Сугак, Д.Е. Смирнов // Шестидесят шестая всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, высших учеб. заведений с междунар. участием : тез. докл. – Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2013. – С. 116.
72. Ужов, В.Н. Очистка газов мокрыми фильтрами / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг. – Л. : Химия, 1972. - 248 с.
73. Вальдберг, А.Ю. Образование туманов и каплеобразование в системах очистки газов / А.Ю. Вальдберг, А.А. Мошкин, И.Г. Каменщиков. – М. : Изд. дом Грааль, 2003. - 256 с.
74. Бородин, В.А. Распыливание жидкостей / В.А. Бородин, Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, В.И. Ягодкин. – М. : Энергомашиностроение, 1967. - 263 с.
75. Вальдберг, А.Ю. Осаждение взвешенных частиц в циклонах с мокрой плёнкой / А.Ю. Вальдберг, Н.С. Кирсанов // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2003. – №8. – С.14
76. Вальдберг, А.Ю. Анализ работы мокрых циклонов и пути повышения их эффективности / А.Ю. Вальдберг, А.Ю. Сафонов // Хим. и нефтегаз. Машиностроение. – 2006. – №7. – С.14.
77. Генкин, А.Э. Оборудование химических заводов: Учебник для техникумов. – М. : Высш. школа, 1978. – 272 с.
78. Москвичев, Ю. А. Теоретические основы химической технологии: Учебное пособие для сред. проф. учеб. заведений / Ю.А. Москвичев, А.К. Григоричев, О.С. Павлов - М.: Изд. центр «Академия», 2005. - 272 с.
79. Фурмер, И.Э. Общая химическая технология: Учеб. пособие для проф. техн. училищ / И.Э. Фурмер, В.Н. Зайцев. - 2-е изд. - М. : Высшая школа, 1978. - 264 с.

80. Пономарева, В.Г. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов / В.Г. Пономарева, Э.Г. Иоакимис, И.Л. Монгайт - М. : Химия, 1985. - 256 с.

81. Скобло, А.И. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / А.И. Скобло, И.А. Трегубова, Ю.К. Молоканов - М. : Химия, 1982. - 363 с.

82. Фарамазов, С.А. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация. – М. : Химия, 1978. – 352 с.

83. Яковлев, С.В. Биологическая очистка производственных сточных вод. Процессы, аппараты и сооружения / С.В. Яковлев, И.В. Скирдов. – М. : Стройиздат, 1985. - 40 с.

84. Яковлев, С.В. Очистка производственных сточных вод: Учеб. пособие для студентов вузов / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, Ю.В. Воронов. - М. : Стройиздат, 1979. - 320 с.

85. Сугак А.В. Гидродинамика и массоперенос при струйном аэрировании жидкости : дис. ... канд. техн. наук. - Л., 1986. - 145 с.

86. Сугак, А.В. Процессы и аппараты химической технологии: Учебное пособие для нач. проф. образования / А.В. Сугак, В.К. Леонтьев, В.В. Туркин. - М. : Изд. центр «Академия», 2005. - 224 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Динамическая вязкость воздуха

<i>Температура, °C</i>	<i>Вязкость, Н·с/м²</i>	<i>Температура, °C</i>	<i>Вязкость, Н·с/м²</i>	<i>Температура, °C</i>	<i>Вязкость, Н·с/м²</i>
10	$17,7 \cdot 10^{-4}$	80	$20,9 \cdot 10^{-4}$	180	$24,9 \cdot 10^{-4}$
20	$18,2 \cdot 10^{-4}$	90	$21,6 \cdot 10^{-4}$	200	$25,8 \cdot 10^{-4}$
30	$18,7 \cdot 10^{-4}$	100	$21,7 \cdot 10^{-4}$	250	$27,8 \cdot 10^{-4}$
40	$19,2 \cdot 10^{-4}$	110	$22,2 \cdot 10^{-4}$	300	$29,7 \cdot 10^{-4}$
50	$19,6 \cdot 10^{-4}$	120	$22,7 \cdot 10^{-4}$	350	$31,4 \cdot 10^{-4}$
60	$20,1 \cdot 10^{-4}$	140	$23,5 \cdot 10^{-4}$	400	$32,8 \cdot 10^{-4}$
70	$20,3 \cdot 10^{-4}$	160	$24,1 \cdot 10^{-4}$	500	$36,1 \cdot 10^{-4}$

Приложение Б

Техническая характеристика электрофильтров ЭГАВ

<i>Типоразмер электрофильтра</i>	<i>Входная запыленность очищаемого газа, г/м³, не более</i>	<i>Температура очищаемого газа, °С, не более</i>	<i>Допустимое разрежение внутри аппарата, кПа (кгс/м²)</i>	<i>Производительность по очищаемому газу (при условной скорости 1 м/с), м³/ч</i>	<i>Площадь активно-го сечения, м²</i>	<i>Площадь поверхности осаждения, м²</i>	<i>Энергетические затраты на очистку 1000 м³ газа, кВт/ч</i>
ЭГАВ1-10-4-4-4	90	330	15 (1500)	38160	10,6	819,2	0,4...1,3
ЭГАВ1-10-4-6-3				38160	10,6	921,6	
ЭГАВ1-14-7,5-4-4				100170	27,8	2150,4	
ЭГАВ1-14-7,5-6-3				100170	27,8	2419,2	
ЭГАВ1-20-7,5-4-4				143100	39,8	3072,0	
ЭГАВ1-20-7,5-6-3				143100	39,8	3456,0	
ЭГАВ1-30-7,5-4-4				214650	59,6	4608,0	
ЭГАВ1-30-7,5-6-3				214650	59,6	5184,0	
ЭГАВ1-40-7,5-4-4				286200	79,5	6144,0	
ЭГАВ1-40-7,5-6-3				286200	79,5	6912,0	
ЭГАВ1-40-9-4-4				343440	95,4	7372,8	
ЭГАВ1-40-9-6-3				343440	95,4	8294,4	
ЭГАВ1-40-12-4-4				467280	129,8	9830,4	
ЭГАВ1-40-12-6-3				467280	129,8	11059,2	
ЭГАВ2-56-9-6-3				480816	133,6	11612,2	
ЭГАВ2-56-9-4-4				480816	133,6	10321,9	
ЭГАВ2-76-9-6-3				652536	181,3	15759,4	

Условное обозначение электрофилтра следует расшифровывать следующим образом:

Э - электрофилтр; Г - горизонтальный; А - модификация; В - вертикальное встряхивание коронирующих электродов. Числа после букв: первое - количество секций (параллельных активных зон в одном корпусе); второе - количество газовых проходов; третье - номинальная высота электродов (м); четвертое - количество элементов в осадительном электроде, количество электрических полей по длине электрофилтра.

Приложение В

Высоковольтные агрегаты питания электрофильтров

Условное обозначение агрегатов серии ОПМД:

О - однофазный;

П - постоянного тока;

М - охлаждение с естественной циркуляцией воздуха и масла;

А - с автоматическим переключением коэффициента трансформации.

Условное обозначение агрегатов серии АПТД:

А - агрегат;

П - преобразовательный;

Т - трансформаторный;

Д - диодный.

<i>Наименование агрегата</i>	<i>Напряжение питания, В</i>	<i>Выпрямленное напряжение, кВ амплитудное значение</i>	<i>Номинальный ток, мА, среднее значение</i>
ОПМД-100 АПТД-100	380	80 110	100
ОПМД-250 АПТД-250	380	80 110	250
ОПМД-400 АПТД-400	380	80 110	400
ОПМД-600 АПТД-600	380	80 110	600
ОПМД-1000 АПТД-1000	380	80 110	1000
ОПМД-1600 АПТД-1600	380	80 110	1600

Приложение Г

Технические характеристики рукавных фильтров типа РФГ-VMC

<i>Показатель</i>	<i>Число секций</i>							
	<i>Однорядные</i>				<i>Двухрядные</i>			
	4	6	8	10	8	12	16	20
Поверхность фильт- рации, м ²								
общая	112	168	224	280	224	336	448	560
рабочая	84	140	196	252	196	308	420	532
Число рукавов								
в секции	14	14	14	14	14	14	14	14
в фильтре	56	84	112	140	112	168	224	280
Диаметр рукава, мм	220	220	220	220	220	220	220	220
Длина рукава, мм	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100
Рабочая фильтрую- щая поверхность рукава, м ²	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Габариты фильтра, м								
длина	3,0	4,5	6,0	7,5	3,0	4,5	6,0	7,5
ширина	2,25	2,25	2,25	2,25	2x2,25	2x2,25	2x2,25	2x2,25
высота	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Масса фильтра, кг	7600	733	12387	14816	14320	19949	25287	28500

Приложение Д

Техническая характеристика фильтров ФРИ с двухсторонней импульсной продувкой

Показатель	Типоразмер			
	ФРИ-630	ФРИ-800	ФРИ-1250	ФРИ-1600
Производительность по очищаемому газу, м ³ /ч, не более*	58176	77568	116352	155140
Температура очищаемых газов, °С, не более	130			
Давление в аппарате, кПа, не более	5,0			
Площадь поверхности фильтрования, м ²	606	808	1212	1616
Количество рукавов в фильтре	216	288	432	576
Размер рукава диаметр рукава, мм длина рукава, м	135 6,8			
Массовая концентрация пыли в очищаемом газе, г/м ³ , не более на входе на выходе	50 0,05			
Гидравлическое сопротивление, кПа, не более	2,0			
Расход сжатого воздуха на регенерацию, нм ³ /ч**	350	465	700	930
Габаритные размеры, м, не более длина ширина высота	4,52 4,22 9,325	5,85 4,22 9,325	8,54 4,22 9,325	11,22 4,22 9,325
Масса, кг, не более	15030	18570	25520	33140
<i>Примечания:</i> * Производительность по очищаемому газу рассчитана при удельной газовой нагрузке 1,6 м³/(м²·мин), удельная газовая нагрузка задается проектом установки. ** Расход сжатого воздуха рассчитан для цикла фильтрования 5 мин.				

Учебное издание

Э К О Т Е Х Н И К А.
АППАРАТУРА ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

Авторы: Смирнов Дмитрий Евгеньевич,
Чекалов Лев Валентинович,
Сугак Александр Викторович,
Смирнов Евгений Павлинович,
Смирнов Михаил Евгеньевич,
Санаев Юрий Иванович,
Громов Юрий Иванович,
Гинзбург Яков Львович

План 2013

Редактор М.А. Канакотина

Подписано в печать 27.12.13. Формат 60 х 84 1/16. Бумага белая.
Печать ризограф. Усл. печ. л. 10,46. Уч.- изд. 10,40.
Тираж 285. Заказ 172.

Ярославский государственный технический университет.
150023. Ярославль, Московский пр., 88.

Типография Ярославского государственного технического университета.
150000. Ярославль, ул. Советская, 14а.