

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В. Г. Самойлик

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБОГАЩЕНИЯ

Учебное пособие
для обучающихся образовательных учреждений
высшего профессионального образования

Донецк

2018

УДК 622.794.7(075.8)
ББК 33.4я7
С 17

Рекомендовано Учёным советом
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»
в качестве учебного пособия для студентов образовательных учреждений
высшего профессионального образования
(Протокол № 7 от 26.10.2018 г.)

Рецензенты:

Борщевский Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства зданий, подземных сооружений и геомеханики ГОУВПО «ДОННТУ»;

Хилько Светлана Леонидовна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Института физико-органической химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко.

Автор:

Самойлик Виталий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк)

Самойлик, В. Г.

С17 Вспомогательные процессы обогащения : учеб. пособие для обучающихся образоват. учреждений высш. проф. образования / В. Г. Самойлик ; ГОУВПО «ДОННТУ». – Донецк : ДОННТУ, 2018. – 238 с. : ил., табл.

ISBN 978-617-7722-56-3

В учебном пособии приведены сведения по обеспыливанию и пылеулавливанию на предприятиях по переработке полезных ископаемых. Изложены теоретические основы процесса обеспыливания, описан принцип действия различных типов обеспыливающих установок. Рассмотрены основные характеристики пыли, технические средства и мероприятия по снижению запыленности воздуха производственных помещений.

Дано подробное описание существующих методов и аппаратов для очистки пылегазовых потоков. Приведены методики выбора и расчёта различных типов промышленных пылеуловителей.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 21.05.04 "Горное дело" специализации "Обогащение полезных ископаемых" стационарной и заочной формы обучения.

УДК 622.794.7(075.8)
ББК 33.4я7

ISBN 978-617-7722-56-3

© В. Г. Самойлик, 2018
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2018

Содержание

Введение.....	6
Глава 1. Обеспыливание полезных ископаемых.....	8
1.1. Теоретические основы обеспыливания.....	9
1.2. Эффективность обеспыливания.....	11
1.3. Конструкции обеспыливателей.....	12
1.3.1. Гравитационные классификаторы.....	14
1.3.2. Центробежные классификаторы.....	19
1.3.3. Пневмовибрационные обеспыливающие установки.....	23
1.3.4 Обеспыливание на грохотах.....	24
Глава 2. Источники пылеобразования на обогатительных фабриках и мероприя-тия по борьбе с пылью.....	27
2.1. Источники образования пыли на обогатительных фабриках.....	27
2.2. Предельно допустимые концентрации пыли.....	28
2.3. Технические средства и мероприятия по снижению запыленности воз-духа производственных помещений.....	32
2.3.1. Укрытие оборудования.....	32
2.3.2. Аспирация производственных помещений.....	35
2.3.3. Увлажнение исходного материала и продуктов переработки.....	37
2.3.4. Уборка осевшей пыли.....	37
2.3.5. Проект комплексного обеспыливания.....	38
Глава 3. Свойства пыли.....	43
3.1. Дисперсный состав.....	43
3.2. Плотность частиц пыли.....	49
3.3. Аутогезионные свойства частиц пыли.....	50
3.4. Гигроскопические свойства пыли.....	54
3.5. Смачиваемость пыли.....	56
3.6. Абразивность частиц пыли.....	58
3.7. Электрическая проводимость пыли.....	59
Глава 4. Классификация методов и аппаратов для очистки пылегазовых потоков.....	63
4.1. Классификация методов пылеулавливания.....	63
4.2. Основные характеристики пылеуловителей.....	66
Глава 5. Гравитационно-инерционные пылеуловители.....	70
5.1. Пылеосадительные камеры.....	71
5.2. Инерционные пылеуловители.....	72
5.3. Циклоны.....	77
5.3.1. Принцип действия циклонного пылеуловителя.....	78
5.3.2. Конструкции циклонов.....	80
5.3.3. Выбор и расчёт циклонов.....	87
5.4. Батарейные циклоны.....	92

5.4.1. Конструкции батарейных циклонов.....	94
5.4.2. Расчёт батарейных циклонов.....	100
5.5. Вихревые пылеуловители.....	103
5.5.1. Конструкции вихревых пылеуловителей.....	104
5.5.2. Выбор вихревых пылеуловителей.....	108
Глава 6. Улавливание пыли фильтрованием.....	112
6.1. Характеристики пористой перегородки.....	112
6.2. Механизм процесса фильтрации.....	113
6.3. Классификация фильтров.....	116
6.4. Тканевые фильтры.....	117
6.4.1. Рукавные фильтры.....	118
6.4.2. Картриджные фильтры.....	136
6.4.3. Рулонные фильтры.....	142
6.5. Зернистые фильтры.....	146
6.6. Расчёт рукавных фильтров.....	148
Глава 7. Мокрые пылеуловители.....	153
7.1. Полые скрубберы.....	155
7.2. Центробежные скрубберы.....	157
7.3. Тарельчатые скрубберы.....	161
7.4. Ударно-инерционные скрубберы.....	167
7.5. Скрубберы Вентури.....	170
Глава 8. Электрофильтры.....	178
8.1. Принцип действия электрофильтров.....	179
8.2. Устройство электрофильтров.....	181
8.3. Эффективность пылеулавливания в электрофильтрах.....	185
8.4. Факторы, влияющие на эффективность пылеулавливания в электрофильтрах.....	186
8.4.1. Скорость газа в активном сечении аппарата.....	186
8.4.2. Электрические параметры электрофильтра.....	187
8.4.3. Концентрация и дисперсность частиц.....	187
8.4.4. Удельное электрическое сопротивление пыли.....	188
8.4.5. Свойства очищаемого газа.....	189
8.5. Конструкции электрофильтров.....	190
8.5.1. Электрофильтры пластинчатые, горизонтальные, сухие.....	190
8.5.2. Электрофильтры пластинчатые вертикальные сухие.....	196
8.5.3. Электрофильтры мокрые.....	198

8.6. Расчёт электрофильтров.....	200
Заключение	204
Список литературы.....	207
Приложение 1.....	212
Приложение 2.....	213
Приложение 3.....	214
Приложение 4.....	220
Приложение 5.....	222
Приложение 6.....	229
Приложение 7.....	231

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для более глубокого изучения студентами дисциплины «Вспомогательные процессы обогащения».

К вспомогательным процессам обогащения полезных ископаемых относятся (по классификации института "Механобр") следующие процессы:

- обезвоживание;
- фильтрование;
- сгущение пульпы;
- сушка;
- обеспыливание и пылеулавливание;
- окускование.

В данное учебное пособие включены процессы обеспыливания и пылеулавливания, так как остальные перечисленные выше процессы излагаются в отдельно выделенных дисциплинах "Обезвоживание продуктов обогащения, кондиционирование и очистка сточных вод", "Окускование минерального сырья".

Дисциплина «Вспомогательные процессы обогащения» – это область научных представлений об особенностях процесса пылеобразования на обогатительных фабриках, методах обеспыливания и пылеулавливания. Эта дисциплина является неотъемлемой частью комплекса дисциплин по подготовке специалистов по направлению «Горное дело».

Цель изучения дисциплины – получение информации о способах обеспыливания исходных продуктов переработки, об особенностях различных процессов пылеулавливания; формирование у студентов теоретических представлений о процессах обеспыливания и пылеулавливания, о конструктивных особенностях аппаратов и систем, обеспечивающих заданную эффективность удаления пыли.

В результате изучения дисциплины студент должен знать место и роль процессов обеспыливания и пылеулавливания в технологических схемах обогащения полезных ископаемых; принципы регулирования и расчёта производительности аппаратов; средства очистки промышленных выбросов в атмосферу.

Изучение дисциплины обуславливает приобретение умений, необходимых для: определения рациональной технологии обеспыливания и пылеулавливания; составления и расчёта технологических схем; выбора необходимого оборудования; организации управления процессами обеспыливания и пылеулавливания на обогатительных фабриках.

Дисциплина относится к профессиональному циклу базовой части учебного плана.

Базируется на знаниях и умениях, которые студент приобрел при освоении предшествующих дисциплин:

«Физика», «Физическая химия», «Органическая химия», «Высшая математика», «Основы переработки минерального сырья», «Теория разделения минеральных ресурсов» и др. Кроме этого студенты должны обладать базовыми знаниями основ математики, информатики и статистики.

Знания и умения, приобретенные при освоении данной дисциплины, реали-

зуются студентом при прохождении производственной практики, государственной итоговой аттестации и в дальнейшей своей производственной деятельности на обогатительной фабрике.

В учебном пособии последовательно раскрываются вопросы, связанные с процессами обеспыливания полезных ископаемых, мероприятиями по борьбе с пылью на обогатительных фабриках, основными характеристиками пыли. Приведена классификация методов и аппаратов для очистки пылегазовых потоков, рассмотрены основные характеристики пылеуловителей, оказывающих влияние на эффективность их работы. Подробно рассмотрены типы, конструктивные особенности и технические характеристики гравитационно-инерционных пылеуловителей; рукавных, рулонных и зернистых фильтров; мокрых пылеуловителей; электрофильтров. Приведены методики и примеры расчёта различных типов пылеулавливающего оборудования.

Учебное пособие будет полезно для работы студентам и аспирантам технических и горных специальностей, работникам промышленных предприятий, инженерно-техническим работникам.

Глава 1

ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Обеспыливанием называют процесс удаления пыли из полезного ископаемого или продуктов обогащения.

Процесс обеспыливания основан на классификации, так как при обеспыливании из продукта удаляют тем или иным способом класс определенной крупности, максимальный размер частиц которого зависит от минерального состава исходного продукта. Так, при обогащении углей и асбестовых руд обеспыливание проводят по крупности 0,5 мм, а при переработке руд чёрных и цветных металлов в пылевой продукт выделяют класс 0-0,1 мм.

Удаление классов такой крупности может осуществляться сухим способом (**обеспыливание**), или мокрым (**обешламливание**).

Применение операций обеспыливания обусловлено тем, что при обогащении некоторых полезных ископаемых пыль снижает эффективность разделения, равномерно распределяясь между концентратом и отходами. Особенно вредное влияние пыль оказывает на эффективность пневматических методов обогащения. Повышенное содержание пыли в питании пневмосепаратора приводит к уплотнению постели, что существенно затрудняет процесс поддержания её разрыхленности в необходимых пределах и существенно увеличивает значение параметра E_{pm} . В работе [1] установлена логарифмическая регрессионная зависимость параметра E_{pm} от среднего размера частиц d :

$$E_{pm} = -42,95 \ln(d) + 203,8.$$

Применение обеспыливания перед сухой магнитной сепарацией способствует улучшению условий сепарации и получению более качественного концентрата [2].

Операции обеспыливания достаточно широко применяются при обогащении углей, в особенности, в условиях Крайнего Севера. Обеспыливание углей позволяет уменьшить подачу материала на отсадочные машины и обезвоживающее оборудование, а также сократить объёмы подлежащих обработке шламовых вод. Выделение пыли в сухом виде в начале технологического процесса из окисленных углей Кузбасса приводит к резкому возрастанию эффективности флотации (удельная эффективность флотационных машин увеличивается примерно в 2 раза) [3].

Обеспыливание является основной технологической операцией при обработке черновых концентратов, получаемых при обогащении асбестовых руд.

Качество асбестовых концентратов оценивается по массовой доле волокна основного сита контрольного аппарата, пыли (фракции 0-0,4 мм), гали (частиц сопутствующей породы размером более 0,4 мм и менее 4,8 мм). Увеличение массовой доли пыли в готовой продукции снижает прочностные характеристики асбестоцементных изделий.

Недостаток применяемых методов извлечения свободных волокон асбеста из раздробленной руды заключается в том, что одновременно с асбестом из руды увлекается и значительное количество находящейся в ней пыли (до 35-40%) и галли (до 40-45% веса извлеченного асбеста). Получаемый черновой концентрат приходится обеспыливать и очищать от мелкой раздробленной породы.

Перечистка черновых концентратов осуществляется в операциях классификации (на обеспыливателях, классификаторах) и обезгаливания (на грохотах с отсасыванием волокна пневмосистемами, сепараторах, обезгаливателях).

Для операции классификаций применяются асбестовые обеспыливатели АО-61, барабанные классификаторы БК, грохоты инерционного действия ГИД-1500, ГИД-2000, грохоты кругового движения ГКД («Холл») [4, 5].

1.1 Теоретические основы обеспыливания

Для обеспыливания полезных ископаемых чаще всего применяют воздушную классификацию материала, которая осуществляется подачей струи воздуха навстречу движущемуся потоку материала.

Рассмотрим свободное падение частицы в воздухе (рис. 1.1).

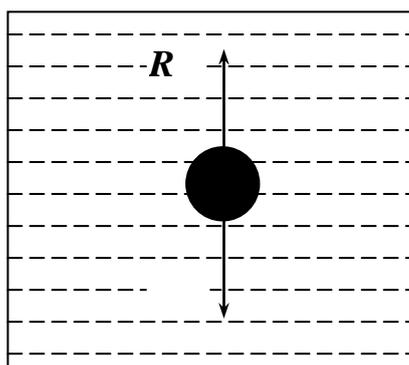


Рисунок 1.1 – Схема свободного падения твердой частицы в воздушной среде

Пусть твердая частица, имеющая массу m , свободно падает под действием силы тяжести G_0 . В первый начальный момент времени частица будет падать под действием ускорения свободного падения, но т.к. воздух оказывает сопротивление движению частицы, через некоторое время частица будет падать с определенной постоянной скоростью без ускорения. Таким образом, скорость падения частицы в вязкой среде, которой является воздух, не может беспрестанно возрастать, а с течением некоторого времени достигает своего наибольшего значения (**конечная скорость падения V_k**), которая сохраняется во все последующее время падения. Если твердую частицу поместить в восходящий воздушный поток, частица зависнет в нём, т.е. будет витать.

Средняя скорость восходящего воздушного потока, при которой частица не будет иметь вертикального перемещения, а будет находиться во взвешенном состоянии, называется **скоростью витания (V_v)**.

Скорость витания частицы равна конечной скорости падения частицы в неподвижном воздухе.

Таким образом, конечная скорость падения частиц в восходящем потоке определяется исходя из условия равенства действующих на них во взаимно про-

твopoпoлoжныx нaпpaвлeнияx сил тягeсти G_0 и динамического давления потока (сила сопротивления движению частицы R).

По закону Архимеда сила тяжести шара в среде составляет

$$G_0 = \frac{\pi d^3}{6} (\delta - \Delta) \cdot g,$$

где d – диаметр частицы, м;

δ – плотность частицы, кг/м³;

Δ – плотность среды, кг/м³;

g – ускорения свободного падения ($g = 9,81$ м/с²).

Установлено, что при малых скоростях и малых размерах частиц (менее 60 мкм) сопротивление среды определяется законом Стокса следующим выражением

$$R = 3\pi\mu d V_k$$

где V_k – конечная скорость падения частицы, м/с;

μ – динамическая вязкость среды, Па·с.

Из условия равенства G_0 и R получим

$$\frac{\pi d^3}{6} (\delta - \Delta) \cdot g = 3\pi\mu d V_k, \text{ откуда:}$$

$$V_k = \frac{g}{18\mu} d^2 (\delta - \Delta) \text{ м/с.} \quad (1.1)$$

При падении частиц в воздухе, приняв значение $\Delta = 1,23$ кг/м³ и $\mu = 0,000018$ Па·с

$$V_k = 3027 d^2 (\delta - 1,23) \text{ м/с.} \quad (1.2)$$

Данные формулы справедливы для расчёта скорости падения частиц крупностью 1-60 мкм.

Для частиц крупностью 0,12-0,85 мм определение скорости конечного падения в воздухе находят по эмпирической формуле Аллена (значение числа Рейнольдса будет в пределах $10 < \text{Re} < 1000$)

$$V_k = 40,6 \cdot \sqrt[3]{(\delta - 1,23)^2} d. \quad (1.3)$$

В процессе воздушной классификации отделение пыли производится из вертикальных и горизонтальных потоков исходного продукта. Количество воздуха V (м³/с), подаваемого в камеру пылеотделителя, зависит от скорости газа (воздуха) V_2 (м/с) и площади сечения камеры F_k (м²)

$$V = V_2 F_k, \text{ м}^3/\text{с},$$

откуда можно определить необходимое сечение камеры

$$F_k = \frac{V}{V_2}, \text{ м}^2.$$

Скорость потока (м/с) воздуха в момент пересечения им исходного продукта определяется по формуле [2]

$$V_z = mV_k, \quad (1.4)$$

где V_k – конечная скорость падения частицы пыли заданной крупности, м/с;
 m – коэффициент, зависящий от массовой концентрации пыли (n_k) в пылегазовой смеси (табл.1.1).

$$n_k = \frac{\delta_n}{\delta_{воз}},$$

где δ_n – масса пыли, отделяющейся из исходного продукта при обеспыливании, кг;

$\delta_{воз}$ – масса воздуха, подаваемого в обеспыливающий аппарат, кг.

Таблица 1.1 – Значение коэффициента m в функции концентрации пыли n_k

n_k	до 1	1-2	2-10	10-15	>15
m	1,25-1,3	1,35-1,5	1,5-2,0	2-2,5	2,5-3,0

1.2 Эффективность обеспыливания

Работа обеспыливающей установки характеризуется степенью извлечения пыли и К.П.Д. обеспыливающего аппарата.

Отношение количества пыли, извлеченной в пылевой продукт, к количеству пыли, содержащийся в исходном материале, называется степенью обеспыливания или степенью извлечения пыли.

К.П.Д. обеспыливания учитывает степень извлечения и количество материала крупнее заданного (граничного) размера, который попадает в пылевой продукт.

Обозначим:

α – содержание пыли в исходном материале, %;

β_n – содержание пыли в пылевом продукте, %;

β_o – содержание пыли в обеспыленном продукте, %;

γ_n – выход пылевого продукта, % от исходного;

γ_o – выход обеспыленного продукта, % от исходного.

При полном извлечении пыли в пылевой продукт и крупного в обеспыленный продукт

$$\gamma_n = \alpha; \beta_n = 100; \beta_o = 0.$$

Составим уравнение материального баланса по пыли

$$100\alpha = \gamma_n\beta_n + \gamma_o\beta_o;$$

$$\text{откуда } \gamma_n = \frac{100(\alpha - \beta_o)}{\beta_n - \beta_o}. \quad (1.5)$$

На основании определения степени извлечения пыли в пылевой продукт

$$\varepsilon_n = \frac{\beta_n\gamma_n}{\alpha}. \quad (1.6)$$

Подставляя в выражение 1.6 значение γ_n (1.5), получим

$$\varepsilon_n = 100 \cdot \frac{\beta_n(\alpha - \beta_o)}{\alpha(\beta_n - \beta_o)}, \% \quad (1.7)$$

Степень извлечения крупного материала в обеспыленный продукт определяется как отношение количества крупных классов, попавших в обеспыленный продукт, к количеству крупного продукта, содержащегося в исходном

$$\varepsilon_\kappa = \frac{\beta_\kappa \gamma_o}{\alpha_\kappa},$$

где β_κ – содержание крупного материала в обеспыленном продукте, %;

γ_o – количество (выход) обеспыленного продукта, %;

α_κ – содержание крупного материала в исходном, %.

$$\beta_\kappa = 100 - \beta_o; \gamma_o = 100 - \gamma_n; \alpha_\kappa = 100 - \alpha.$$

Тогда

$$\varepsilon_\kappa = \frac{(100 - \beta_o)(100 - \gamma_n)}{100 - \alpha} \quad (1.8)$$

Подставляя значение γ_n из уравнения материального баланса по пыли (1.5), получим

$$\varepsilon_\kappa = \frac{100(100 - \beta_o)(\beta_n - \alpha)}{(\beta_n - \beta_o)(100 - \alpha)}, \% \quad (1.9)$$

Коэффициент полезного действия обеспыливателя равен единице, если вся пыль попадает в пылевой продукт, а весь крупный материал – в обеспыленный, т.е. в этом случае

$$\eta = \varepsilon_n \varepsilon_\kappa = 1.$$

В общем виде коэффициент полезного действия определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta_n(100 - \beta_o)(\beta_n - \alpha)(\alpha - \beta_o)}{\alpha(100 - \alpha)(\beta_n - \beta_o)^2}, \text{ (доли ед.)} \quad (1.10)$$

КПД пылеулавливания (η) можно выразить через массовые показатели, как отношение массы уловленной пыли $Q_{ул.}$ к массе пыли $Q_{ex.}$, поступающей в пылеулавливающий аппарат

$$\eta = 100 \frac{Q_{ул.}}{Q_{ex.}} \% \quad (1.11)$$

1.3 Конструкции обеспыливателей

Полезные ископаемые и продукты обогащения обеспыливают в аэродинамических классификаторах различной конструкции, пневмовибрационных обеспыливающих установках, на грохотах и в аппаратах специальных конструкций [2, 3, 6-8].

Аэродинамические классификаторы относятся к аппаратам объёмного типа преимущественно непрерывного действия. Разделение в классификаторах осуществляется, в основном, в турбулентных двухфазных потоках одновременно по размеру, плотности и форме частиц, составляющих исходную смесь. В зависимости от сил, оказывающих определяющее влияние на частицы при их разделении по крупности, аэродинамические классификаторы разделяются на гравитационные и центробежные. В зависимости от характера движения воздуха они подразделяются на проходные и замкнутые (циркуляционные). В последних материал загружается и выгружается из сепаратора механическим способом.

На рис. 1.2, а показана схема простейшего гравитационного классификатора. Исходный материал подаётся в восходящий поток воздуха, переходит в состояние сквозного газодисперсного потока, после чего мелкие частицы под действием преобладающих сил аэродинамического сопротивления выносятся вместе с воздухом в тонкий продукт, а крупные – под действие преобладающих сил тяжести – в нижнюю часть классификатора, откуда выводятся в обеспыленный продукт. Такой принцип классификации может быть использован для выделения в пылевой продукт частиц крупностью менее 0,5 мм.

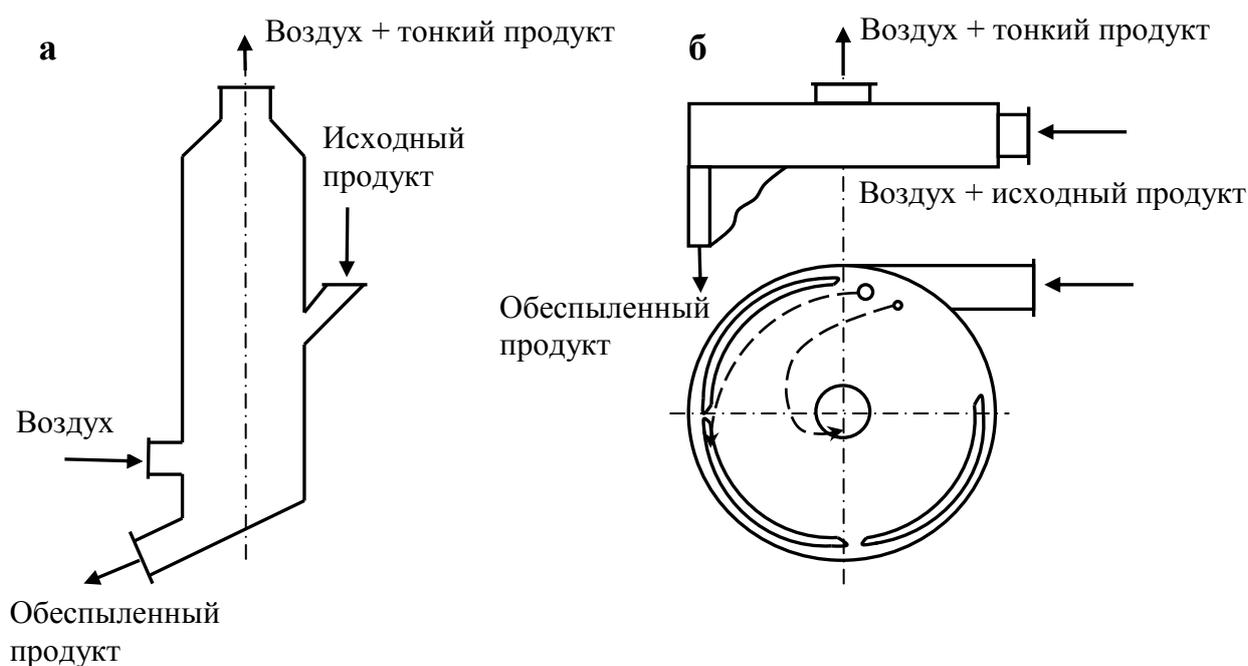


Рисунок 1.2 – Аэродинамические схемы гравитационных (а) и центробежных (б) классификаторов

Переход к разделению по тонким классам (менее 200 мкм) требует значительного увеличения массовых сил по сравнению с силой тяжести. Это достигается использованием центробежных сил инерции переносного движения, возникающих при вращении газового потока. Простейший центробежный классификатор проходного типа показан на рис. 1.2, б. Исходный материал вместе с воздухом подаётся тангенциально в цилиндрическую камеру. Закручиваясь, пылегазовый поток движется к оси камеры и отводится через центральный патрубок. Частицы в потоке находятся под действием центробежных сил, направленных к периферии,

и сил аэродинамического сопротивления, направленных к оси камеры. Для мелких частиц преобладают силы аэродинамического сопротивления, и они выводятся вместе с воздухом через выходной патрубок. Для крупных преобладают центробежные силы, они осаждаются на цилиндрической стенке камеры и выводятся через щели в грубый продукт.

1.3.1 Гравитационные классификаторы

В зависимости от взаимной ориентации сил тяжести и аэродинамического сопротивления гравитационные классификаторы разделяют на противоточные, поперечно-поточные и классификаторы с косым потоком [9].

Простейшим типом противоточных гравитационных классификаторов являются *камерные сепараторы с восходящим потоком* и *шахтные классификаторы*, схема работы которых представлена на рисунке 1.2, а. Специальными мерами для выравнивания по сечению трубы скоростей движения несущего газа и подбором рациональных соотношений размеров в малогабаритных классификаторах достигалась относительно высокая эффективность разделения. Однако, с увеличением размеров проходного сечения трубы (шахты) существенно искажалось поле скоростей, главным образом вследствие влияния местных сопротивлений на входе и на выходе из шахты. Поэтому увеличение объемной производительности шахтных и камерных классификаторов приводило к снижению эффективности разделения.

Классификаторы поперечно-поточного типа используют принцип разделения смеси в горизонтальном потоке воздуха. На рис. 1.3 представлена принципиальная схема работы поперечно-поточного классификатора.

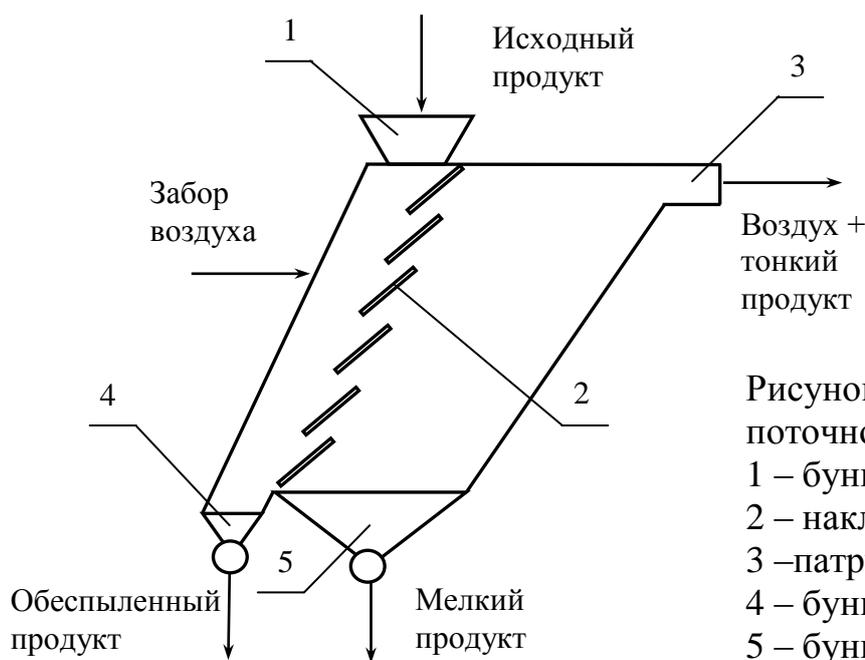


Рисунок 1.3 – Схема поперечно-поточного классификатора:

- 1 – бункер исходного продукта;
- 2 – наклонная жалюзийная решетка;
- 3 – патрубок пылевоздушной смеси;
- 4 – бункер крупного продукта;
- 5 – бункер среднего продукта

Исходный продукт из бункера 1 поступает в верхнюю часть жалюзийной решетки, набранной из ряда плоских параллельных пластин. Проходящий сквозь

зазоры между пластинами воздушный поток провеивает пересыпающийся по решетке 2 полидисперсный материал. Тонкие фракции увлекаются потоком в патрубков 3 и осаждаются в дальнейшем в пылеулавливающих устройствах. Обеспыленные крупные зёрна попадают в бункер 4. В бункере 5 собирается мелкий продукт. В зависимости от крупности он может в дальнейшем объединяться с крупным или тонким продуктом.

ООО «Завод пневмотранспортного оборудования», г. Тольятти выпускает поперечно-поточные пневмокласификаторы, работающие под разрежением, производительностью до 100 ч [10]. Аппараты характеризуются отсутствием подвижных частей, простотой конструкции и высокой надежностью. Простая перенастройка границы разделения за счет изменения расхода воздуха позволяет эффективно ($\varepsilon_n \leq 65\%$) проводить обеспыливание исходного продукта по крупности от 0,1 до 1,0 мм.

Среди гравитационных классификаторов с косым потоком наибольшее распространение получили *аппараты «зигзаг»* фирмы Альпине (Мультиплекс Zigzag MZM и MZF), схематично представленные на рис. 1.4, а, и также *классификаторы с пересыпными полками* (рис. 1.4, б).

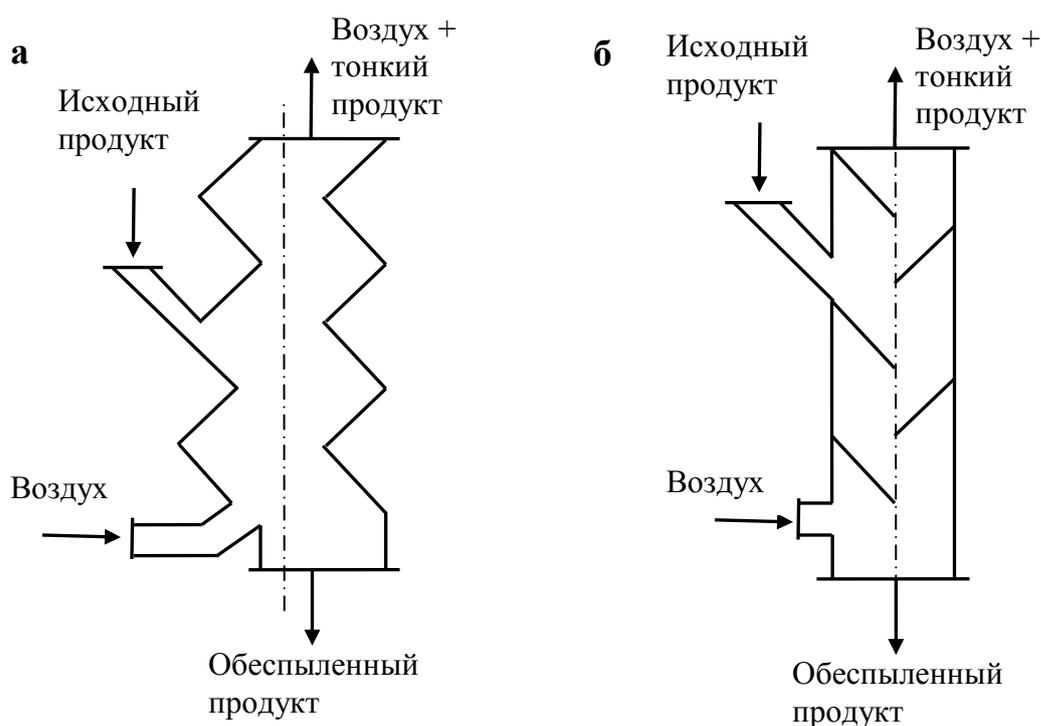


Рисунок 1.4 – Аэродинамические схемы гравитационных классификаторов:
а – «зигзаг», б – с пересыпными полками

Высокая эффективность разделения ($\varepsilon_n \leq 85\%$) достигается многократным дублированием относительно низкоэффективной классификации в большом числе секций. Классификация в отдельной секции носит поперечно-поточный характер (разделение в косом потоке). Внесение регулярных местных сопротивлений по ходу потока в обеих конструкциях как бы управляет положением и размерами крупномасштабных турбулентных вихрей, приводящих к интенсивному поперечному перемешиванию частиц, усредняющему параметры процесса по сечению

канала, что приводит к повышению эффективности разделения с одновременным увеличением затрат мощности на него ввиду роста аэродинамического сопротивления.

Для этих аппаратов характерны малый износ корпуса, защита от перегрузок, низкая чувствительность характеристик процесса к гранулометрическому составу исходного материала, возможность плавного регулирования граничного размера дроссельными заслонками, высокие надежность и ремонтпригодность.

Повышение производительности данного типа гравитационных классификаторов достигается параллельным соединением колонок в один аппарат (рис. 1.5).

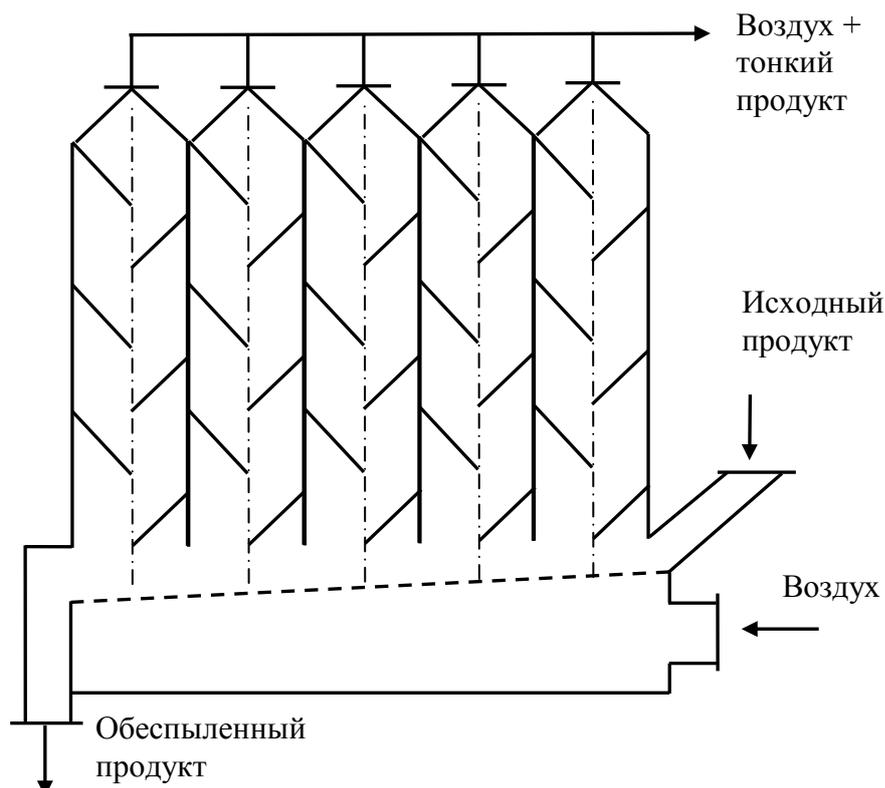


Рисунок 1.5 – Схема многорядного гравитационного классификатора с пересыпными полками

По физическому принципу близки к гравитационным противоточным аппаратам *классификаторы с кипящим слоем*, хотя природа движения частиц в слое, где частицы материала находятся в состоянии, близком к концентрированному, несколько отличается.

В классификаторах с кипящим слоем простейшую псевдооживленную систему создают в заполненном слое исходного материала вертикальном аппарате, через днище которого равномерно по сечению вводят оживающий агент (воздух). При его небольшой скорости V_2 зернистый слой неподвижен; с её увеличением высота слоя начинает возрастать (слой расширяется). Когда V_2 достигает критического значения, при котором сила гидравлического сопротивления слоя восходящему потоку воздуха становится равной весу твёрдых частиц, слой приобретает текучесть и переходит в псевдооживленное состояние. Соответствующую линейную скорость воздуха называют его первой критической скоростью $V_{кр}$. При

дальнейшем возрастании V_2 гидравлическое сопротивление слоя остаётся постоянным, пока он не разрушится и не начнется интенсивный вынос зернистого материала потоком из аппарата. Отвечающая данному состоянию слоя скорость потока называется скоростью уноса или второй критической скоростью псевдооживления ($V_{ун}$), превышающей $V_{кр}$ в десятки раз. Если скорость воздуха больше скорости витания частиц заданной крупности разделения, более тонкие частицы увлекаются потоком воздуха из аппарата, а более крупные остаются в слое и постепенно выводятся из аппарата.

На рис. 1.6 изображен обеспыливатель с кипящим слоем конструкции ИОТТ [3], предназначенный для обеспыливания угля крупностью 0-13 мм.

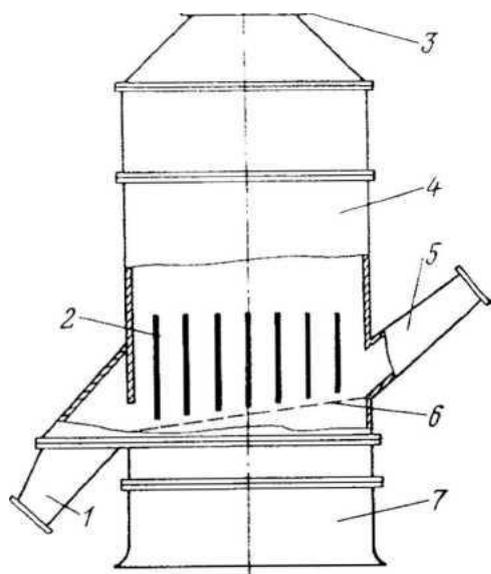


Рисунок 1.6 – Обеспыливатель с аэрофонтанирующим слоем:

- 1 – разгрузочная течка;
- 2 – направляющие пластины;
- 3 – отсасывающий патрубок;
- 4 – четырёхугольный корпус;
- 5 – загрузочная течка;
- 6 – решетка;
- 7 – входной коллектор

Аппарат через верхний патрубок подключается к всасывающему воздуховоду вентилятора. Граничная крупность разделения регулируется расходом воздуха и производительностью по исходному углю.

Такая конструкция классификатора в кипящем слое благоприятна для получения чистого тонкого продукта. Однако, для обеспечения полноты выхода тонкого продукта мелкие частицы должны успеть достичь верхней границы слоя, что достаточно сложно из-за высокой концентрации частиц в кипящем слое. Для повышения чистоты обеспыленного продукта необходимо или увеличивать время пребывания материала в аппарате, или использовать методы интенсификации процесса псевдооживления слоя, способствующие более эффективному выносу тонких частиц в пылевой продукт. Одним из таких методов является вибрационное воздействие на решето классификатора.

Принцип действия *пневмокласификатора виброкипящего слоя* построен на оживлении слоя материала механическим воздействием (вибрацией) и продувкой воздуха сквозь разрыхленный слой. За счет интенсивной вибрации многократно увеличивается порозность слоя (доля объёма, занятого оживающим агентом), частицы материала значительно удаляются друг от друга, не препятствуя выносу воздухом мелкой фракции.

Основными преимуществами пневмокласификаторов виброкипящего слоя (рис. 1.7), выпускаемых ООО «Строймаш», г. Санкт-Петербург, являются: длительное время воздействия воздушного потока на материал (80-100 секунд); многократное перемешивание слоя (до 1200 раз за время нахождения материала в агрегате); расход воздуха – до 270 м³ на тонну продукта (при границе уноса 0,1 мм). Степень извлечения пыли в пылевой продукт в таких аппаратах достигает 80-85%.



Рисунок 1.7 – Пневмокласификатор ПС-43

В таблице 1.2 приведены технические характеристики стандартных моделей, выпускаемых пневмокласификаторов ООО «Строймаш» [11].

Таблица 1.2 – Технические характеристики пневмокласификаторов виброкипящего слоя

Модель	Производительность, т/ч	Установленная мощность, кВт	Потребление воздуха, м ³ /ч	Удаляемая фракция, мм
ПС.41	5-10	2,2	2700	до 0,25
ПС.42	15-20	4,4	5400	до 0,25
ПС.43	30-40	6,4	10800	до 0,20
ПС.46	50-60	8,6	16200	до 0,16
ПС.48	70-80	15	21600	до 0,16

1.3.2 Центробежные классификаторы

В настоящее время имеется большое число конструкций центробежных классификаторов различных принципов действия. Даже серийно выпускаемые в России и за рубежом аппараты насчитывают десятки типов и сотни типоразмеров. Но, не смотря на такое многообразие, центробежные классификаторы в зависимости от характера движения в них воздуха можно разделить на **воздушно-проходные** и **воздушно-циркуляционные**. Воздушно-циркуляционные классификаторы отличаются от воздушно-проходных тем, что воздушный поток циркулирует внутри аппарата и не выводится наружу.

На рис. 1.8, *а* представлена схема работы центробежного воздушно-проходного классификатора.

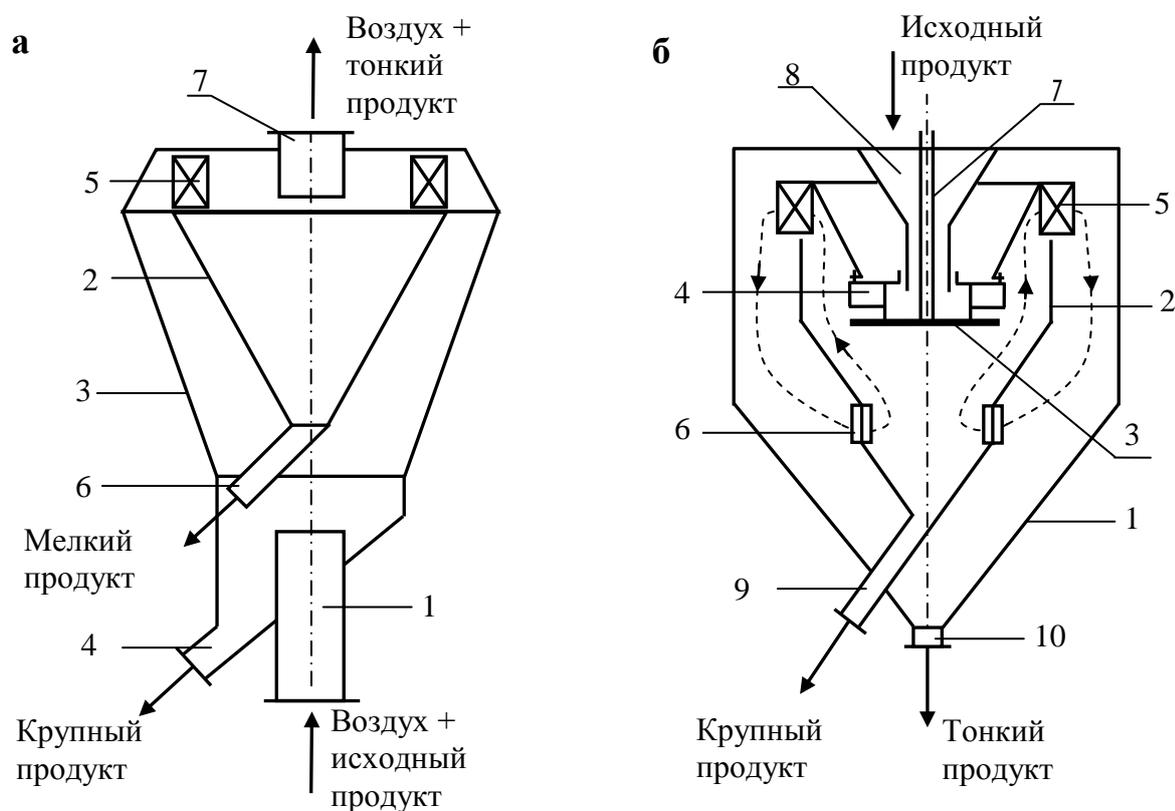


Рисунок 1.8 – Центробежные воздушные классификаторы:
а – воздушно-проходной; б – воздушно-циркуляционный

Исходный материал поступает в воздушном потоке по трубе 1 со значительной скоростью (15-20 м/с) и попадает в кольцевое пространство между внутренним конусом 2 и наружным 3. Здесь скорость потока снижается до 4-6 м/с, благодаря чему из него под действием силы тяжести выпадают наиболее крупные твёрдые частицы, которые через патрубок 4 выводятся из аппарата. Тем самым снижается концентрация материала в наиболее ответственной центробежной части классификатора. Далее поток огибает верхний край внутреннего конуса 2 и проходит через направляющие поворотные лопатки 5, которые придают ему вращательное движение.

Материал с воздушным потоком во внутреннем конусе благодаря тангенциальному расположению лопаток двигается по спирали, крупные частицы отбрасываются центробежными силами к стенкам и по трубе 6 удаляются, а тонкие уносятся по трубе 7 в пылеулавливающее устройство.

Крупность отделяемых частиц регулируется изменением наклона лопаток 5. Чем круче повернуты лопатки от радиального направления, тем больше сопротивление воздушному потоку, больше центробежные силы и меньше размер частиц, уносимых из сепаратора.

Схема центробежного воздушно-циркуляционного классификатора представлена на рис. 1.8, б. Он состоит из внешнего цилиндро-конического корпуса 1, в котором концентрически размещена вторая внутренняя камера 2. Во внутренней камере расположен распределительный диск 3 с лопастями 4 и вентиляторное колесо 5. В месте перехода цилиндрической части камеры в коническую часть установлены жалюзи 6, через которые внутренняя камера сообщается с наружной камерой. Диск и вентиляторное колесо посажены на один вал 7 и имеют общий привод.

Подлежащий классификации материал подается по желобу 8 на вращающийся распределительный диск 3 и отбрасывается центробежными силами к стенкам внутренней камеры 2. Вентиляторное колесо 5, вращаясь, засасывает воздух из внутренней камеры и нагнетает его в наружную. Классификация происходит в потоке воздуха, создаваемом вентиляторным колесом. Крупный материал преодолевает поток воздуха и осаждается во внутренней камере, удаляясь по патрубку 9. Лопастями 4 выделяют из потока захваченные им крупные частицы, повышая эффективность разделения. Тонкий материал выносится воздухом в наружную камеру. Здесь скорость потока воздуха резко снижается, тонкий материал осаждается и удаляется по патрубку 10. Очищенный воздух через жалюзи 6 вновь попадает во внутреннюю камеру классификатора, создавая замкнутый циркулирующий поток воздуха.

Для возможности регулирования аппарата на всасывающем тракте вентиляторного колеса смонтирована дроссельная задвижка, перемещение которой осуществляется во время работы аппарата штурвалами. Регулировка крупности разделения возможна также изменением числа лопастей.

По сравнению с воздушно-проходными классификаторами данный тип классификаторов более компактен и требует меньшего расхода энергии. Кроме того, для его работы не требуется использование дополнительного оборудования: вентилятора, пылеулавливающих аппаратов.

К преимуществам воздушно-проходных классификаторов можно отнести отсутствие подвижных частей, высокую ремонтпригодность. Кроме того, в них, в отличие от воздушно-циркуляционных классификаторов, не происходит нагрева воздуха внутри аппарата.

Центробежные воздушные классификаторы по способу организации внутри них воздушного потока разделяются на *центробежные динамические классификаторы* и *центробежные статические классификаторы*. В первом случае вихревой аэродисперсный поток генерируется за счет механического вращения ротора классификатора, во втором случае – пневматически за счет использования

направляющего аппарата или тангенциальной подачи воздушного потока в зону классификации.

Центробежно-динамические классификаторы по конструктивному исполнению могут быть как циркуляционными, так и воздушно-проходными. В качестве примера воздушно-проходного динамического классификатора можно привести одноконусный отбойно-вихревой сепаратор (рис. 1.9). В этом типе классификаторов центробежные силы сообщаются частицам быстровращающимися лопатками, прикрепленными к вертикальному валу. Граница разделения материала по крупности в таких сепараторах регулируется частотой вращения лопаток, что значительно меньше затрудняет движение воздушного потока при прохождении им классификатора, чем при использовании неподвижных направляющих лопаток.

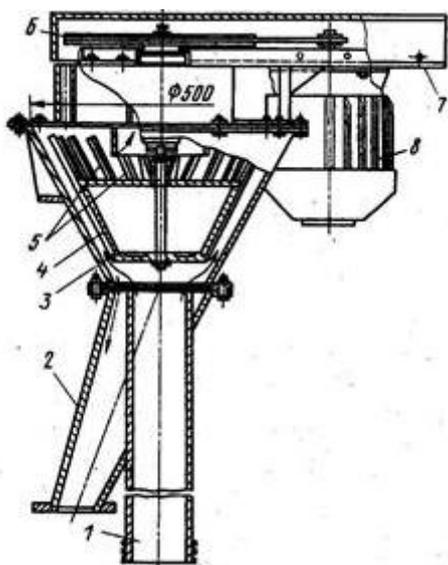


Рисунок 1.9 – Одноконусный отбойно-вихревой сепаратор с вращающимися лопатками

Сепаратор состоит из подводящей трубы 1, в которую подается аэросмесь исходного материала, конического корпуса 3 с трубой 2 для отвода крупных частиц и ротора 4 с лопатками 5, вращающегося от электродвигателя 8 через клиноременную передачу 6. Материал вместе с воздушным потоком, двигающимся со скоростью до 25 м/с, входит в пространство между корпусом и ротором (отбойная зона), где более крупные частицы ударами лопастей отбрасываются к стенкам кожуха и опускаются в трубу 2. В верхней части ротора (вихревой зоне) выступающие лопатки создают быстрое вращение воздушного потока и материала, благодаря чему частицы определенной крупности центробежными силами также отбрасываются к кожуху, а мелкие вместе с воздухом устремляются к центру и уносятся через отводящий патрубок 7 в пылеосадительное устройство [12].

Эффективность выделения тонкого продукта в центробежных классификаторах во многом определяется их конструктивным исполнением и в некоторых аппаратах достигает значений 85-90%.

Промышленностью серийно выпускаются центробежные классификаторы различных типов. Ниже приведены технические характеристики воздушных сепараторов типов КЦС и КЦД (рис. 1.10, табл. 1.3).



Рисунок 1.10 – Воздушные классификаторы КЦД (а) и КЦС (б)

В воздушно-центробежных статических классификаторах КЦС вихревой аэродисперсный поток, в котором происходит разделение материала, генерируется за счет использования аксиального направляющего аппарата. Крупность продуктов разделения в классификаторах КЦС регулируется положением установки лопаток направляющего аппарата и составляет от 60 до 500 мкм в зависимости от производительности и свойств разделяемого материала.

Таблица 1.3 – Технические характеристики воздушных классификаторов КЦС

Параметры	КЦС-1	КЦС-5	КЦС-10	КЦС-20
Производительность по загрузке, т/ч	1	5÷7	10÷12	20
Диапазон регулировки крупность разделения, мкм	60÷200	80÷200	100÷200	100÷200
Расход воздуха, тыс. м ³ /ч	1800	7000	15000	27000
Габариты (LxВxН), м	1,0x1,0x2,5	1,3x1,3x3,5	2,0x2,0x5,0	2,4x2,4x6,7
Масса, т	0,5	1,0	2,0-2,5	2,5-3,0

В воздушно-центробежных динамических классификаторах КЦД вихревой аэродисперсный поток, в котором происходит разделение материала, генерируется за счет механического вращения ротора классификатора типа «беличьего колеса» вокруг вертикальной оси. Крупность продуктов разделения в классификаторах КЦД регулируется изменением скорости вращения ротора классификатора и положением установки ряда регулировочных элементов и составляет от нескольких десятков до 200 мкм в зависимости от производительности и свойств разделяемого материала. Технические характеристики классификаторов КЦД приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4 – Технические характеристики воздушных классификаторов КЦД

Параметры	КЦД-5	КЦД-10	КЦД-20	КЦД-25	КЦД-40
Производительность по загрузке, т/ч	5	10	20	25	40
Диапазон регулировки крупность разделения, мкм	5÷100	7÷100	5÷150	7÷150	20÷200
Установленная мощность, кВт	5,5÷7,5	7,5÷11	11÷18,5	15÷22	30÷45
Габариты (LxВxН), м	1,6x1,0x2,3	2,2x1,4x2,7	2,0x1,5x3,0	3,4x2,1x3,1	3,4x2,8x3,7
Масса, т	0,75÷0,9	1,5÷1,7	1,5÷2,0	2,2÷2,5	3,3÷3,6

1.3.3 Пневмовибрационные обеспыливающие установки

Пневмовибрационные обеспыливающие установки нашли широкое применение при обогащении каменных углей [3].

На рис. 1.11 представлена схема обеспыливающей установки на обогатительной фабрике шахты «Воркутинская».

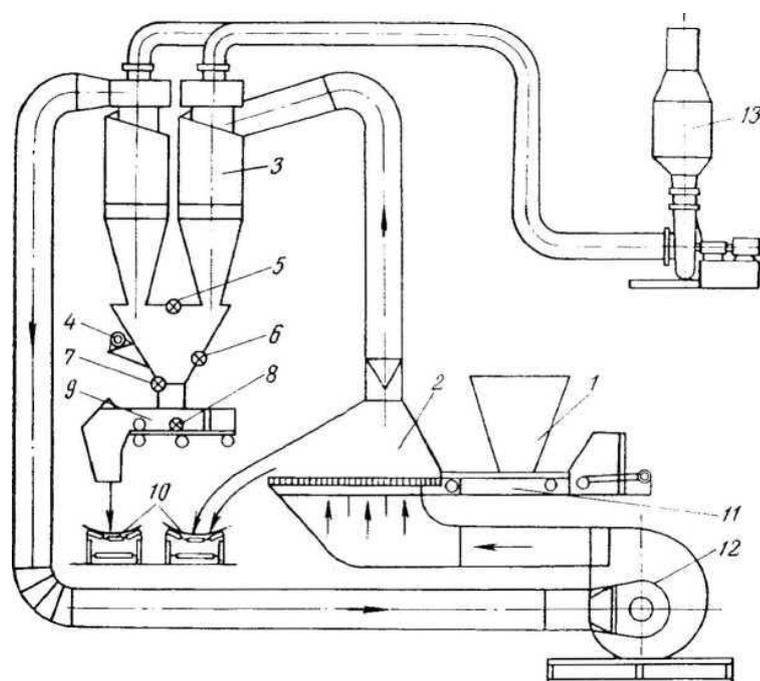


Рисунок 1.11 – Схема пневмовибрационной обеспыливающей установки на ОФ шахты «Воркутинская»:

1 – бункер исходного угля; 2 – грохот ГИЛ-52; 3 – циклоны ЦН-15; 4 – механический вибровозбудитель; 5 – аварийный датчик ИКС-2Н; 6 – изотопный датчик верхнего уровня БГИ-60-Ц2; 7 – датчик нижнего уровня БГИ-60-Ц2; 8 – аварийный датчик ИКС-211; 9, 11 – качающийся питатель КЛ-8; 10 – ленточный конвейер; 12 – вентилятор; 13 – пылеуловитель

При работе пневмовибрационной обеспыливающей установки исходный уголь крупностью 0-100 мм из бункера качающимся питателем подаётся на шпальтовое сито грохота, продуваемое вертикальным восходящим потоком воздуха, который создает вентилятор ВД-18,0, расположенный под грохотом. Под действием вибрации сита и восходящего движения воздуха происходит интенсивное разрыхление влажного материала с выносом пыли в два параллельно установленных циклона, где она отделяется от замкнутого воздушного потока и отводится в пылесборный бункер. Отсюда качающимся питателем пыль выгружается на ленточный конвейер.

Питатель включается и выключается автоматически с помощью системы установленных в бункере датчиков. Для предотвращения зависания пыли в бункере установлен механический вибровозбудитель. Обеспыленный в циклонах воздух возвращается в вентилятор и далее в обеспыливающую установку. Часть воздуха (до 20%) поступает на вторичную очистку в пылеуловитель ПМ-35 и выбрасывается в атмосферу.

Производительность пневмовибрационной установки по исходному углю и объёму подаваемого под шпальтовое сито воздуха, в зависимости от влажности угля и заданной крупности разделения, регулируется с помощью качающегося питателя КЛ-8 и направляющего аппарата в вентиляторе.

При работе пневмовибрационной установки в оптимальном режиме обеспыливания с удельным расходом воздуха 19-20 тыс. м³/(ч·м²) площади сита КПД обеспыливания при различной влажности угля имел следующие значения:

- при влажности 5-6% $\eta = 75-80\%$;
- при влажности 7-8% $\eta = 65-70\%$;
- при влажности 9-10% $\eta = 55-65\%$.

Аналогичные установки были внедрены на ОФ им. С.М. Кирова ПО «Кузбассуглеобогащение», на ГОФ им. Артёма ПО «Ростовуголь». Имеется опыт использования пневмовибрационных обеспыливающих установок при обогащении угля и за рубежом [13].

1.3.4 Обеспыливание на грохотах

Использование грохотов различных конструкций для отделения классов крупности менее 0,5 мм сухим способом является высокоэффективным способом обеспыливания полезных ископаемых. В отличие от пневматических классификаторов грохоты позволяют получить более точные границы разделения при высокой эффективности разделения. В зависимости от крупности подрешетного продукта, влажности исходного материала, конструктивного исполнения грохота эффективность обеспыливания может изменяться в пределах 80-95%. Поэтому, грохоты широко применяют для выделения тонких классов, в особенности крупностью менее 1,0-0,5 мм, при производстве строительных материалов, в процессах обогащения.

Обеспыливание на грохотах используется при обогащении асбестовых руд в операциях перечистки черного концентрата. Для отделения пылевого продукта от асбестового волокна применяются грохоты инерционного

действия ГИД-1500, ГИД-2000, грохоты кругового движения ГКД [5].

Основными отличительными особенностями грохотов типа ГИД являются:

- круговая траектория колебаний в горизонтальной плоскости деки грохота, т. е. продукт, под действием собственной силы тяжести, колебаний рабочей поверхности и наклона деки, движется на сите по петлеобразной траектории, проделывая путь значительно больший, чем длина деки, соответственно, повышая вероятность просеивания зёрен размером меньше размера отверстий;
- ситовая поверхность очищается резиновыми шарами;
- использование инерционных сил для возбуждения колебаний позволяет полностью уравнивать его подвижные массы;
- простота конструкции, высокая эксплуатационная надёжность, герметичность и возможность подключения к системе аспирации.

Технические характеристики серийно выпускаемых грохотов типа ГИД приведены в табл. 1.5 [14].

Таблица 1.5 – Технические характеристики грохотов типа ГИД

Параметры	ГИД-1-1500	ГИД-1-2000	ГИД-2-2000	ГИД-2-2000М
Производительность, т/ч, до	100	250	250	200
Крупность исходного материала, мм, до	60	60	60	40
Количество сит, шт.	1	1	2	2
Установленная мощность, кВт	4,0	5,5	5,5	5,5
Масса, кг	2700	6090	5840	6600

В последние годы в ОАО «НИИпроектасбест» был разработан грохот ГИД-1-2000А с повышенной амплитудой колебаний деки – 30 мм и площадью ситовой поверхности – 7,96 м². Общий вид грохота показан на рисунке 1.12.

Повышение амплитуды колебаний при сохранении частоты колебаний на уровне 240 мин⁻¹ позволяет увеличивать эффективность классификации (за счёт увеличения пути движения зёрен) и интенсивность очистки сит шарами. Увеличению эффективности классификации также способствует большая площадь ситовой поверхности.

Результаты испытаний, проведённых на серпентините крупностью менее 1 мм, показали, что грохот обеспечивает высокие технологические показатели:

- при классификации по границе разделения 0,5 мм (размер отверстий сит 0,55 мм) в диапазоне производительностей от 5 до 22 т/ч: эффективность классификации составила 89-93%, извлечение класса <0,5 мм в подрешетный продукт – 91-94%;

- при классификации по границе разделения 0,2 мм (размер отверстий сит 0,25 мм) в диапазоне производительностей от 4 до 8 т/ч: эффективность класси-

фикации составила 80-86%; извлечение класса -0,2 мм в подрешетный продукт – 89-95% [15].

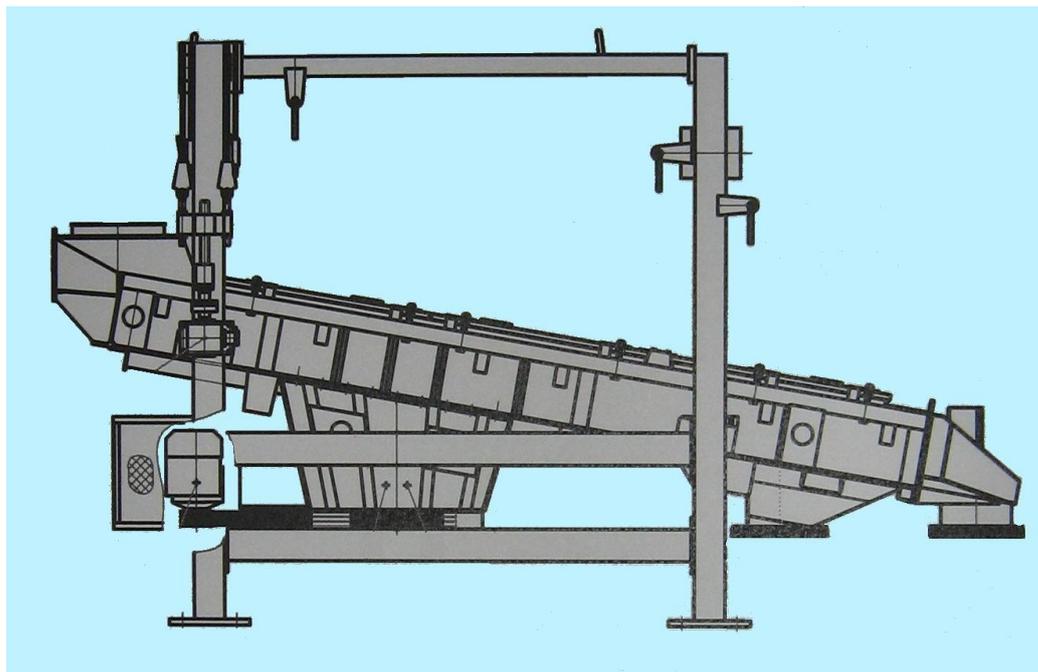


Рисунок 1.12 – Общий вид грохота ГИД-1-2000А

Для эффективного обеспыливания полезных ископаемых и продуктов их переработки кроме инерционных грохотов применяются грохоты различных конструкций. Усилия разработчиков направлены на усовершенствование существующих моделей грохотов и разработку новых с целью повышения извлечения мелких классов в подрешетный продукт при повышении единичной производительности оборудования.

Вопросы для самоконтроля.

1. Для каких целей проводится обеспыливание полезных ископаемых?
2. Объясните понятия «конечная скорость падения» и «скорость витания».
3. Как определяется эффективность обеспыливания?
4. Перечислите известные Вам типы обеспыливателей.
5. Какие типы гравитационных аэродинамических классификаторов Вы знаете?
6. Опишите принцип работы обеспыливателя с аэрофонтанирующим слоем.
7. Перечислите различия в работе центробежных классификаторов воздушно-проходного и воздушно-циркуляционного типа.
8. Опишите принцип работы пневмовибрационной обеспыливающей установки.
9. По какой крупности производится обеспыливание на грохотах?
10. Укажите основные отличительные особенности грохотов типа ГИД.

Глава 2

ИСТОЧНИКИ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ НА ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИКАХ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО БОРЬБЕ С ПЫЛЬЮ

2.1 Источники образования пыли на обогатительных фабриках

Как было уже указано в главе 1, одним из источников образования пыли на обогатительных фабриках являются обеспыливающие установки. Но кроме этого, на любой обогатительной фабрике существуют и другие источники пылеобразования.

Под пылью в условиях обогатительных фабрик понимают совокупность минеральных частиц размерами менее 0,5 мм, содержащихся в исходном минеральном сырье, воздухе или осевших на различных предметах.

Различают *первичную* и *вторичную пыль*. К первичной или основной относится пыль, образующаяся и выделяющаяся при работе технологического и транспортного оборудования, а к вторичной – пыль, осевшая на оборудовании и строительных конструкциях и переходящая во взвешенное состояние под воздействием потоков воздуха в производственных помещениях.

К основным источникам пылеобразования на углеобогатительной фабрике с мокрыми методами обогащения (отсадка, тяжелосредные сепараторы, флотация и др.) относятся такие производственные процессы, как грохочение, дробление, сушка, а также механическое и самотечное транспортирование угля и продуктов обогащения. Наиболее интенсивным пылеобразованием сопровождается перегрузка высушенного концентрата. Высушенный концентрат содержит большое количество тонких фракций угольной пыли за счет продуктов флотации, быстро теряющих влагу. Запыленность в этих местах достигает 40 мг/м³. Кроме интенсивного пылеобразования, транспортирование высушенного концентрата сопровождается еще и интенсивным парообразованием, которое усложняет обеспыливание.

На фабриках с сухими методами обогащения пыль образуется по ходу всего технологического процесса. Основными источниками пылеобразования являются места перегрузки продуктов обогащения с дек сепараторов и пневматических отсадочных машин на сборные конвейеры и при дальнейшей транспортировке. Число таких пересыпок на фабриках колеблется от 70 до 100, а запыленность в этих местах достигает 200-300 мг/м³.

Пылевыведение при работе отдельных механизмов зависит от нескольких факторов. Так, в процессе разгрузки угля из вагонов (вагоноопрокидывателей) на ямах привозных углей масса выгружаемого угля, попадая в приемные бункера, увлекает за собой воздух. При встрече воздуха с поверхностью бункера образуются области повышенного давления, вследствие чего происходит интенсивный вынос пыли в воздух в зонах разгрузки. Уровень запыленности изменяется в широких пределах в зависимости от влажности поступающего угля и интенсивности разгрузки.

Питатели, подающие уголь из приемного бункера на ленточные конвейеры, создают повышенную запыленность в закрытом помещении за счёт перепада из бункера, просыпания угля с движущихся узлов питателя, а также распространения пыли от мест пересыпания.

При грохочении на качающихся, валковых, вибрационных и резонансных грохотах, вследствие скачкообразного движения отдельных кусков по просеивающей поверхности, происходит их значительное измельчение и интенсивное пылеобразование. Если при этом грохот не имеет специальных укрытий очагов пылеобразования, то запыленность воздуха возле этих грохотов может достигать 800-1000 мг/м³ и более. Аналогичным образом, только в меньшей степени, пылеобразование происходит и при работе других видов классифицирующих устройств.

Быстрое вращение бит молотковой дробилки одновременно с измельчением угля создает интенсивное движение воздуха внутри её корпуса. Этот поток воздуха захватывает измельченные частицы угля и выносит их в виде пыли через зазоры и неплотности во внешнюю среду.

Пылеобразование при транспортировании угля и его продуктов обогащения зависит главным образом от вида конвейера, скорости движения тягового органа и технического состояния оборудования. Наибольшее пылеобразование возникает при транспортировании скребковыми конвейерами и шнеками. Однако и в ленточных конвейерах, при износившейся транспортной ленте или недостаточной её ширине, транспортируемый уголь может попадать на нижнюю (свободную) ветвь и рассеиваться на металлоконструкции конвейера и в производственное помещение.

Наиболее распространенный источник выделения пыли на обогатительных фабриках – самотечное (гравитационное) транспортирование, которое обычно осуществляется в закрытых желобах и используется для пересыпок материала с одного транспортирующего звена или оборудования на другое. Во всех случаях перегружаемый материал поступает сначала в воронку, примыкающую к технологическому оборудованию или устанавливаемую у места разгрузки конвейера, затем под действием собственного веса перемещается по наклонным или вертикальным желобам и поступает на нижерасположенный транспортирующий конвейер или в технологическое оборудование. При этом пересыпаемый материал эжектирует воздух, нагнетая его в укрытие. Под действием возникающего избыточного давления воздух с пылью выносятся в рабочее помещение.

2.2 Предельно допустимые концентрации пыли

Пыль, попавшая в воздух углеобогатительных фабрик, может длительное время находиться во взвешенном состоянии и при высокой концентрации способна взрываться.

Взрывчатость пыли зависит от вида пыли, крупности её частиц, влажности, содержания в ней минеральных веществ, концентрации в воздухе, наличия кислорода в смеси, температуры воспламенения (детонации) и других факторов. По данным исследований МакНИИ и ВостНИИ, пыль всех углей, кроме антрацитов,

является взрывчатой [16]. Влага и минеральные примеси действуют как инертные добавки, снижающие взрывчатость пыли. Температура воспламенения или взрыва угольной пыли – 750-850°C. Поэтому теоретически любой источник, имеющий такую температуру, может вызвать взрыв пыли. Источниками воспламенения пыли на углеобогатительных фабриках могут быть открытое пламя, электрические искры, нагретые металлические поверхности.

Взрыв пыли – мгновенное соединение горючей части пыли с кислородом воздуха. При этом выделяется большое количество тепла и газов, которые, нагреваясь, быстро расширяются, образуя взрывную волну. Каждый взрыв характеризуется двумя периодами: начальным, когда газы, расширяясь, создают взрывной толчок и вакуум в центре взрыва; вторичным, когда холодные газы устремляются к вакууму в центре взрыва. Полагают, что второй период более разрушительный.

Интенсивность взрыва максимальна, если соотношение кислорода и горючей массы в продуктах горения соответствует соотношению для полного сгорания продуктов в смеси. Содержание кислорода воздуха в горючей смеси должно быть не менее 16%, при меньшем содержании взрыва не последует.

Крупность частиц существенно влияет на взрывчатость пыли, так как с уменьшением размеров частиц возрастает их удельная поверхность, т. е. поверхность соприкосновения пыли с воздухом. Взрывчатость угольной пыли увеличивается с увеличением выхода летучих веществ.

Концентрация угольной пыли в воздухе существенно влияет на взрывчатость. Так, при концентрации угольной пыли 112 г/м³, когда пыль сгорает при полном расходе кислорода воздуха, интенсивность взрыва максимальна. Считают опасной концентрацию угольной пыли от 112 до 500 г/м³. Но взрыв может произойти и при концентрации пыли от 30 до 200 г/м³. При концентрации 1500-2000 г/м³ угольная пыль не взрывается. Опасность взрыва пыли также исключается, когда её количество в воздухе не достигает взрывчатой концентрации (нижнего концентрационного предела 7 г/м³).

Наиболее взрывоопасна пыль с частицами крупностью 70-100 мкм. Более мелкая пыль менее взрывоопасна, хотя и имеет большую удельную поверхность. Тонкая пыль предварительно окисляется (частично сгорает) и дает менее сильные взрывы.

Угли, содержащие более 15% летучих веществ, являются взрывоопасными. Особо опасные по взрыву угли с выходом летучих веществ более 35%. Угольная пыль зольностью более 60% по взрыву не опасна. То же относится к влажной пыли, которая не может подняться в воздух.

Тонкие пыли железа, алюминия, цинка и других металлов способны гореть и даже взрываться. Особенно опасны по взрыву сернистые и сульфидные пыли, взрывчатость которых зависит от содержания в них серы. Так, руды, содержащие более 18% серы, взрывоопасны. При содержании серы в руде более 40% происходит максимальный по силе взрыв. Руды, содержащие менее 12% серы, не взрывоопасны. Взрывоопасная концентрация серосодержащей пыли достигает 14-670 г/м³; максимальный по силе взрыв происходит при концентрации 300 г/м³; наиболее опасна по взрыву пыль размером 70 мкм. Температура воспламенения суль-

фидной пыли составляет 430-460°C, серной пыли – 310°C [3].

Основные причины взрыва пыли:

- наличие открытого огня во взрывоопасной смеси пыли с воздухом (аэрозоль) – неисправности освещения, короткое замыкание электротокков, сварочные работы, курение и т. д.;

- самовозгорание пыли, отлагающейся на перекрытиях, оборудовании, устройствах отопления и др.;

- загорание пыли в транспортных трубах пылеулавливания, особенно сушильных установок;

- производство слесарных работ с образованием искр в пыльных местах.

Опасность взрыва увеличивается при выделении и накоплении метана в бункерах и глухих непроветриваемых местах.

Концентрация взвешенной угольной пыли в производственных помещениях углеобогачительных фабрик (кроме фабрик, обогащающих антрациты) не должна превышать 30% нижнего предела взрывчатости угольной пыли, установленного для углей, перерабатываемых данной фабрикой.

Пыль, взвешенная в воздухе помещений обогатительных фабрик, опасна не только в отношении взрываемости. При длительном вдыхании она вызывает у рабочих профессиональное заболевание – **пневмокониоз**.

Пневмокониозы – ряд хронических заболеваний легких, возникающих вследствие длительного вдыхания производственной пыли. В зависимости от химического состава пыли различают следующие группы профессиональных заболеваний легких:

- силикоз** – пневмокониоз, развивающийся при воздействии пыли, содержащей диоксид кремния (SiO_2);

- антракоз** – пневмокониозы, вызываемые вдыханием углеродсодержащей пыли;

- асбестоз** – непосредственной причиной данной формы пневмокониоза служит длительное вдыхание волокон асбеста;

- металлокониозы** – пневмокониозы, обусловленные воздействием металлической пыли (алюминия – *алюминоз*; бария – *бариноз*; бериллия – *бериллиоз*; железа – *сидероз* и пр.).

Поэтому на обогатительных фабриках установлены нормы по предельно допустимой концентрации пыли в рабочих помещениях.

Предельно допустимая массовая концентрация пыли в воздухе рабочей зоны (ПДК) – массовая концентрация вдыхаемой пыли, которая при нормируемой рабочей смене (но не более 41 ч в неделю) на протяжении всего трудового стажа работающего не может вызвать у него заболеваний или отклонений состояния здоровья в отдаленные сроки жизни.

Для различных видов пыли могут быть установлены значения максимально разовой ПДК или среднесменной ПДК.

Для контроля запыленности воздуха на предприятиях проводят измерения максимально разовой и среднесменной массовой концентрации пыли, которые сравнивают с соответствующими нормированными значениями ПДК [17].

Максимально разовая концентрация пыли (МРК) – массовая концен-

трация вдыхаемой пыли в воздухе, определяемая по результатам непрерывного или дискретного отбора проб пыли в зоне дыхания работающего или в рабочей зоне за промежуток времени, равный 30 мин, при развитии технологического процесса, сопровождающегося максимальным выделением пыли.

Среднесменная массовая концентрация пыли (ССК) – усредненное (по времени) за рабочую смену значение массовой концентрации вдыхаемой пыли, определяемое по результатам непрерывного или дискретного отбора проб в зоне дыхания работающего или в рабочей зоне в течение не менее 75% рабочей смены.

Рабочая зона – пространство, ограниченное по высоте 2 м над уровнем пола или площадки, на которых находятся места постоянного (временного) пребывания работающих.

В табл. 2.1 приведены значения предельно допустимой концентрации пыли в воздухе рабочей зоны [18, 19].

Таблица 2.1 – Значения предельно допустимой концентрации (ПДК) пыли в воздухе рабочей зоны промышленных предприятий

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/м ³	Класс опасности
Алюминий и его сплавы (в пересчете на алюминий)	6/2	3
Алюминия оксид с примесью свободного диоксида кремния до 15% и окиси железа до 10% (в виде аэрозоля конденсации)	6	4
Барит	-/6	4
Железо	-/10	4
Железный агломерат	-/4	3
Зола	-/4	3
Кремния диоксид кристаллический (кварц, кристобалит, тридимит) при содержании в пыли более 70%	3/1	3
Кремния диоксид кристаллический при содержании в пыли от 10 до 70% (гранит, шамот, слюда-сырец, углелепородная пыль и др.)	6/2	3
Кремния диоксид кристаллический при содержании в пыли от 2 до 10% (горючие кукуерситные сланцы, медносульфидные руды и др.)	-/4	3
антрацит с содержанием свободного диоксида кремния до 5%	-/6	4
другие ископаемые угли и углелепородные пыли с содержанием свободного диоксида кремния до 5%	-/10	4

Если в графе "Величина ПДК" указано два Норматива, то это означает, что в числителе максимальная разовая, а в знаменателе – среднесменная ПДК, прочерк

в числителе означает, что Норматив установлен в виде средней сменной ПДК. Если приведен один Норматив, то это означает, что он установлен как максимальная разовая ПДК. В табл. 2.1 указаны также классы опасности вредных веществ. В соответствии с классификацией ГОСТ 12.1.007-76. "ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности" вещества разделены на четыре класса опасности:

- 1 класс – чрезвычайно опасные;
- 2 класс – высокоопасные;
- 3 класс – опасные;
- 4 класс – умеренно опасные.

2.3 Технические средства и мероприятия по снижению запыленности воздуха производственных помещений

Для соблюдения норм по предельно допустимому содержанию пыли в воздухе рабочей зоны обогатительных фабрик необходимо одновременно применять:

- максимальную герметизацию технологического оборудования и укрытие всех мест пылевыделения;
- аспирацию с очисткой воздуха, выбрасываемого в атмосферу, от пыли;
- увлажнение исходного материала и продуктов переработки в пределах, допускаемых технологическим процессом;
- уборку осевшей пыли.

2.3.1 Укрытие оборудования

В условиях обогатительных фабрик самым распространенным способом борьбы с запыленностью воздуха является изоляция и герметизация источников пылеобразования. На практике обычно применяют герметизацию оборудования в сочетании с аспирацией – отсосом запыленного воздуха и последующей очисткой его перед выбросом в атмосферу. Герметизация может также сочетаться и с увлажнением перерабатываемого или транспортируемого пылящего продукта.

Герметизация оборудования представляет собой устройство специальных герметических укрытий (кожухов), посредством которых оно ограждается от окружающей среды.

В зависимости от вида и конструкции ограждаемого оборудования, а также характера пылеобразования герметизация его может быть полной или частичной. При полной герметизации ограждаемое оборудование полностью заключается в герметическое укрытие, а при частичной герметизируются отдельные части этого оборудования, являющиеся источниками пылеобразования или причастные к ним. Полной герметизации на обогатительной фабрике подлежат дробилки, питатели, колосниковые грохоты, пневматические сепараторы, скребковые конвейеры.

Укрытия для полной герметизации выполняются полностью металлическими с жестким каркасом со сплошной обшивкой листовым железом толщиной 4-5 мм. Их конструкция должна предусматривать возможность быстрого разъема мест соединения отдельных узлов, надежное уплотнение разъемов, устройство

уплотнений в местах выхода из укрытий валов (рычагов) и установку резиновых прокладок. Укрытие должно быть изготовлено таким образом, чтобы оно не мешало нормальной работе оборудования и было удобно при обслуживании, имело минимальное число проёмов и неплотностей, обеспечивало возможность периодической уборки или смыва осевшей пыли и чтобы имеющиеся смотровые окна, отверстия и ремонтные люки быстро и надёжно закрывались, когда ими не пользуются.

Конструкция укрытия должна соответствовать геометрической форме оборудования и аэродинамике пылевоздушных потоков. В укрытиях организуются специальные устройства для гашения и направления газопылевых потоков к зонам отсоса. Отсос пылевоздушной смеси располагают в местах избыточного давления пылевоздушной смеси и в местах её образования.

Много пыли выделяется на обогатительных фабриках при конвейерном и самотечном транспортировании руд и сухих продуктов, а также при перегрузках их. Перегрузочные узлы предназначены для перегрузки материала с конвейера на конвейер и с конвейера в технологическое оборудование, выгрузки материала из оборудования на конвейер и перегрузки материала из одного оборудования в другое.

Узлы перегрузки материала с одного конвейера на другой обычно оснащают укрытиями кабинного типа (рис. 2.1). Такими укрытиями оборудуют приводные барабаны ленточных конвейеров, питатели. Транспортируемый материал с конвейерной ленты 1 поступает в приемную коробку и по желобу 3 ссыпается на конвейерную ленту 7 между направляющими 8, снабженными в нижней части гибким резиновым уплотнением. Для разравнивания и уплотнения материала на ленте предусмотрен козырек 6.

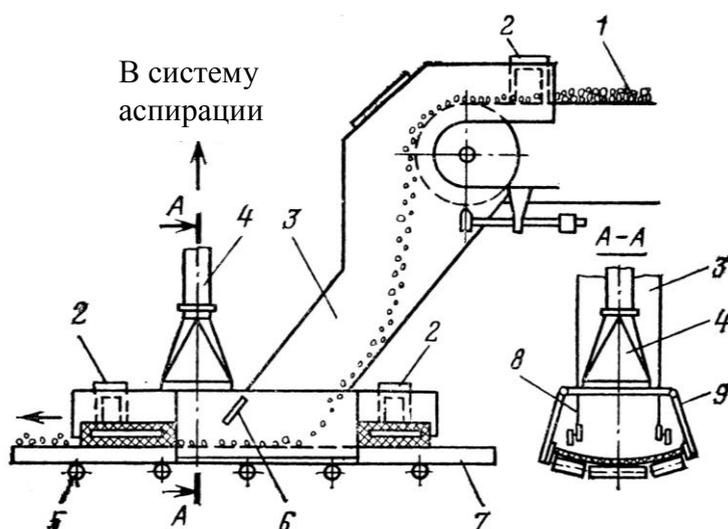


Рисунок 2.1 – Укрытие узла перегрузки материала с конвейера на конвейер

Под лентой расположены опорные ролики 5 для восприятия давления ленты и исключения возможности её провисания. На входе и на выходе имеются уплотнения 2 в виде двойных резиновых фартуков.

Приёмная коробка в верхней части выполнена сплошной, а в нижней снабжена откидными бортами 9, которые вместе с уплотнениями 2 образуют замкнутое пространство. Из этого пространства осуществляется отсасывание воздушно-пылевой смеси через приёмную воронку 4 системы аспирации воздуха. Тщательная герметизация укрытия способствует минимально возможному проникновению пыли за пределы укрытия.

При загрузке бункеров также выделяется много пыли. В зависимости от способа загрузки бункера применяют герметичные укрытия различных конструкций. В настоящее время наиболее распространен способ загрузки бункеров с ленточного конвейера при помощи сбрасывающей тележки. Материал, транспортируемый лентой, падает с барабана сбрасывающей тележки и по закрытым желобам поступает в бункер. Щели бункера укрывают гибким резиновым клиновидным уплотнением.

Если бункер загружается конвейером, то необходимо загрузочные отверстия бункера укрывать вместе с барабаном конвейера. В некоторых укрытиях предусматривают отсос воздуха из сбрасывающей тележки и из бункера.

Наибольшее пылевыведение характерно при грохочении на вибрационных грохотах, что обусловлено энергичными вибрационными воздействиями рамы грохота с ситом на просеиваемый материал. Для предупреждения выделения пыли при грохочении применяют неполные и полные укрытия грохотов.

Неполные укрытия применяют при незначительных выделениях пыли в результате грохочения материала. Неполное укрытие состоит из зонта, перекрывающего 2/3 просеивающей поверхности со стороны подачи материала на грохот. Пылевоздушная смесь отсасывается из-под зонта через приёмный патрубок.

Полное укрытие вибрационного грохота показано на рисунке 2.2.

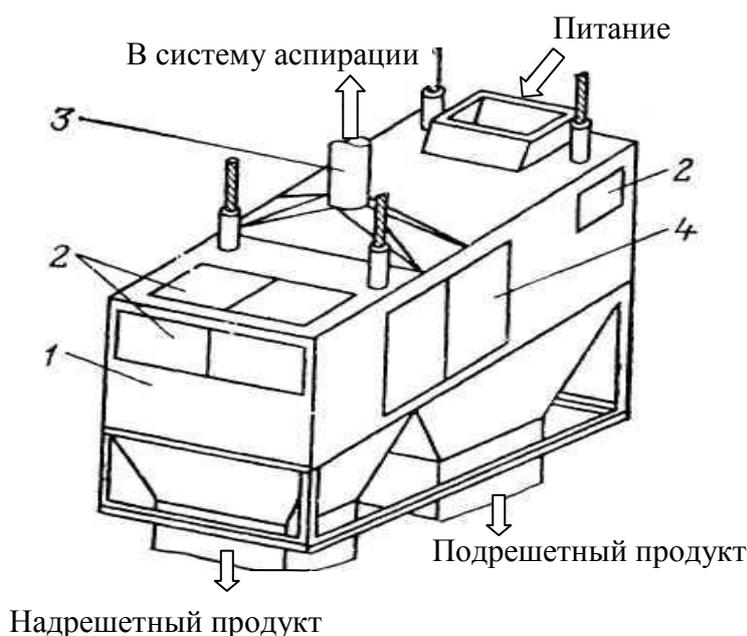


Рисунок 2.2 – Полное укрытие вибрационного грохота

Укрытие состоит из сплошного кожуха 1 со смотровыми окнами 2 и дверцами 4. Короб снабжен приёмным патрубком системы аспирации 3. В нижней

части кожуха расположены разгрузочные устройства для выгрузки надрешетного и подрешетного продуктов.

Сухое дробление и измельчение полезных ископаемых также сопровождается обильным пылевыделением. Различие в устройстве и работе дробилок требует отдельного решения укрытий для дробилок каждого вида.

В укрытиях щековых дробилок отсос пылевоздушной смеси осуществляется как от мест загрузки, так и мест выгрузки материала. Установлено [3], что 65% воздуха, попадаемого в укрытие, всасывается в месте загрузки, остальные 35% – в месте выгрузки дробленого продукта.

В молотковых и роторных дробилках при вращении ротора создается большое давление. Объем выбрасываемого воздуха составляет 2,5-3,5 тыс. м³/ч. Пылевоздушная смесь отсасывается снизу. Загрузочная часть укрытия соединяется с разгрузочной частью при помощи обводной трубы.

Конусные дробилки имеют простые укрытия без обводных труб с отсосом только снизу, в месте выгрузки дробленого продукта.

Существуют также определённые требования к укрытиям обогатительных машин, перерабатывающих полезные ископаемые в сухом виде.

Для аспирации пневматических сепараторов предусматривается схема движения рабочего воздуха с таким расчётом, чтобы внутри укрытий сепаратора был вакуум, не позволяющий проникать пылевоздушной смеси за пределы укрытия.

В схемах аспирации сухих магнитных и электрических сепараторов предусматривается отсос пылегазовой смеси от укрытия в месте загрузки исходного материала и в месте выгрузки продуктов обогащения. Укрытие сепаратора полностью изолирует его от внешнего пространства.

2.3.2 Аспирация производственных помещений

Различают три вида системы промышленной вентиляции производственных помещений обогатительных фабрик; **вытяжная (аспирационная); приточная, приточно-вытяжная.**

В первом случае запыленный воздух вентилятором отсасывается из помещения или от мест индивидуальных укрытий (аспирация) и выбрасывается в атмосферу через очистительные устройства. При аспирации под укрытиями создается необходимое разрежение, предотвращающее вынос пыли в помещение.

Во втором случае чистый атмосферный воздух вентилятором нагнетается в помещение и вытесняет собой загрязненный воздух помещений, при этом свежий воздух желательно направлять непосредственно на рабочие места.

В третьем случае предусматривают одновременный отсос воздуха из помещений и подачу атмосферного воздуха через очистительное устройство.

Из-за сложности очистки запыленного газа при приточной системе вентиляции на практике применяют главным образом вытяжную систему.

Система промышленной аспирации состоит из укрытий, воздухопроводов, коллекторов, вентилятора и аппаратов очистки выбрасываемого в атмосферу воздуха. Для расчёта вытяжной системы вентиляции необходимо знать: объем воздуха, отсасываемого от каждого укрытия; объем воздуха, просасываемого через не-

плотности трубопроводов и укрытий; скорость входящего в укрытие воздуха; сопротивление укрытия при прохождении в него воздуха; скорость ленты и её производительность при поступлении материала на перегрузку и другие данные.

При проектировании систем вентиляции нужно учитывать следующее [20]:

- аспирационные системы вентиляции должны проектироваться отдельно для каждого отделения фабрики и для каждой технологической цепи аппаратов с минимальной протяженностью воздухопроводов;

- скорости воздуха в воздуховодах необходимо выбирать так, чтобы исключалась возможность оседания пыли;

- в местах, благоприятных оседанию пыли (отводы, горизонтальные участки), необходимо размещать близлежащие лючки для очистки их от осевшей пыли;

- укрытия должны тщательно изолировать места образования пыли; соединения отдельных секций укрытий должны быть снабжены плотными прокладками из мягкой резины, войлока, фетра;

- расход отсасываемого воздуха от каждой точки пыления следует принимать на 10-15% больше расчётного;

- при проектировании необходимо предусматривать контрольные места для измерения аэродинамических и статических сопротивлений, объёма протекаемого в трубопроводе воздуха и его засорение;

- для удобства монтажа, ремонта и контроля работы воздухопроводы следует располагать в помещениях со свободным доступом к ним и в то же время так, чтобы они не мешали работе и обслуживанию объектов и машин;

- следует, по возможности, воздухопроводы вентиляции располагать у потолка, предусмотрев обслуживающие площадки для ответственных участков;

- количество местных отсосов, объединённых одной системой, следует принимать, исходя из возможности вертикальной прокладки воздухопроводов или наклонной под углом не менее угла естественного откоса осевшей пыли ($45-60^\circ$ к горизонтали);

- системы местных отсосов от технологического оборудования следует предусматривать отдельными для веществ, соединение которых может образовать взрывоопасную смесь или создать более опасные и вредные вещества;

- воздухопроводы вентиляционных систем должны изготавливаться из круглых труб во избежание отложений пыли.

Расчёт аспирационной системы сводится к определению следующих основных параметров:

- объёма отсасываемого воздуха;

- скорости воздуха в воздуховодах;

- запылённости отсасываемого воздуха;

- гидравлического сопротивления системы.

По полученным значениям объёма отсасываемого воздуха и сопротивления системы подбирают соответствующее пылевентиляционное и пылеулавливающее оборудование.

2.3.3 Увлажнение исходного материала и продуктов переработки

Увлажнение материала сильно влияет на пылеобразование. Так увеличение влажности порошка шамота от 0,02 до 4% уменьшает пылеобразование в 56 раз; увеличение влажности сухих кварцитов на 1-2% подавляет пылеобразование в 9-10 раз.

При увлажнении материалов следует учитывать их смачиваемость. К хорошо смачиваемым водой материалам относятся кварц, полевой шпат, магнетит, слюда и другие окисленные ископаемые. К слабо смачиваемым материалам относятся тальк, графит, молибден, свинцовый блеск, пирит, антрацит и целый ряд других полезных ископаемых.

С учетом того, что при влажности угля 6% затрудняются процессы грохочения и обогащения на пневматических сепараторах и отсадочных машинах, а при влажности 8-10% происходит нарушение всего технологического процесса, увлажнение исходного угля, как способ борьбы с пылью на углеобогатительной фабрике (УОФ), получило ограниченное применение. Однако, этот способ может быть использован для снижения пылевыделения продуктов обогащения УОФ, золы, шлака.

Проектирование увлажнения материалов с помощью орошения следует производить в увязке с остальными средствами борьбы с пылью, исходя из следующих основных требований:

- предусматривать блокировку средств орошения с работой основного технологического и транспортного оборудования;
- форсунки устанавливать вдали от воздухоотсасывающих конфузоров с целью исключения возможности попадания в аспирационные системы капель воды;
- для орошения использовать воду питьевого качества в соответствии с требованиями ГОСТ 2874-82. "Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством" и ГОСТ Р 51232-98 "Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля за качеством", а при отсутствии или недостатке воды питьевого качества по согласованию с органами Госсанэпиднадзора может быть использована вода других источников, не содержащая вредных неустраняемых примесей, при условии её предварительной очистки и обеззараживания.

2.3.4 Уборка осевшей пыли

Без регулярной уборки осевшей пыли невозможно обеспечить пылевзрывобезопасное и гигиеническое состояние в помещениях обогатительной фабрики. Очистка от пыли производственных помещений, подвесных конструкций, машин и оборудования во избежание вторичного пылевыделения должна производиться методами, предотвращающими взметывание осевших частиц (пневмоуборка с помощью аспирации, гидроуборка).

В производственных помещениях, в которых предусматривается мокрая уборка осевшей пыли, строительные конструкции должны удовлетворять следующим дополнительным требованиям:

- штукатурка стен, потолков и других строительных конструкций должна

производиться цементным раствором состава 1:5 на цементе марки 400 с последующим нанесением водоотталкивающих покрытий;

- наружные поверхности металлических конструкций, укрытий, вентиляционных установок и т. д. должны иметь антикоррозийные покрытия;

- дверные проёмы должны располагаться на высших отметках пола, а проёмы в перекрытиях ограждаются бортами;

- материалы покрытия полов должны быть устойчивыми в отношении механического и химического воздействий, не допускать сорбцию вредных веществ;

- полы должны иметь уклоны к канализационным устройствам для стока жидкости, образующейся при технологических процессах и влажной уборке помещения;

- очистку от пыли машин, механизмов и оборудования, снабженных аспирационными укрытиями, необходимо производить при включенной местной вытяжной вентиляции;

- рабочие, занятые уборкой пыли, должны быть обеспечены спецодеждой и средствами индивидуальной защиты органов дыхания и зрения.

Машины, оборудование и полы должны очищаться от пыли в конце каждой смены. Стены в помещениях, не связанных с интенсивным пылением, должны очищаться от пыли не реже 1 раза в месяц. На обогатительных фабриках с пневматическим методом обогащения, а также в корпусах сушки и по пути транспортирования высушенного материала уборка должна проводиться не реже 1 раза в неделю.

Вода, содержащая шлам, образующийся при влажной уборке производственных помещений, должна подвергаться очистке.

Сухая, пневматическая, уборка пыли осуществляется по принципу всасывания пыли в местах её отложения. Систему трубопроводов пневматической уборки пыли располагают таким образом, чтобы можно было обслуживать всю площадку. К вакуумным рукавам присоединяют сопла для всасывания пыли с полов и со стен.

Воздуховоды систем пневматической уборки выполняют из стальных бесшовных труб. Для предохранения воздуховодов от забивания пылью применяется вертикальная разводка их с наименьшей протяженностью горизонтальных участков. Скорость движения воздуха в горизонтальных воздуховодах должна быть не менее 20-25 м/с, в вертикальных – 15-20 м/с.

2.3.5 Проект комплексного обеспыливания

Проектирование технологических схем обогатительных фабрик должно производиться с учетом принимаемых мероприятий по борьбе с пылью. Средства обеспыливания следует размещать одновременно с компоновкой основного технологического оборудования.

В технологических схемах обогатительных фабрик, при существующих технических возможностях, необходимо предусмотреть:

- применение методов обогащения, сопровождающихся наименьшим пылеобразованием;

- размещение технологических участков и технологических аппаратов внутри производственных зданий с учетом необходимости исключения распространения пыли, взрывоопасных и токсичных газов на другие участки;
- использование в первую очередь технологического и транспортного оборудования, выпускаемого заводами-изготовителями с герметичными укрытиями (при отсутствии укрытий их следует применять как нестандартное оборудование);
- компоновку оборудования и средств борьбы с пылью, обеспечивающую удобное обслуживание;
- механизацию и автоматизацию всех технологических процессов обогащения полезного ископаемого и транспортировки продуктов обогащения;
- блокировку электродвигателей вентиляторов аспирационных систем с электродвигателями технологического оборудования таким образом, чтобы эксплуатация оборудования была невозможна без действия аспирационных устройств;
- сокращение до минимума протяженности трактов перемещения материала;
- наименьшее количество перегрузок;
- минимальные высоты перепадов в местах перегрузок;
- перегрузочные желоба с минимальными углами наклона к горизонтальной плоскости (не менее угла, обеспечивающего скольжение транспортируемого материала в желобе);
- скорости поступления материала из желобов на ленты конвейеров, по возможности близкие к скорости движения ленты;
- транспортирование уловленной пыли при очистке запылённого воздуха, исключаящее повторное пылеобразование.

На обогатительной фабрике должен быть проект комплексного обеспыливания атмосферы рабочей зоны, утверждённый в установленном порядке, а по производственным цехам – паспорт противопопылевых мероприятий с указанием перечня обязательных средств пылеподавления и режимов их работы.

Проект комплексного обеспыливания углеобогатительных фабрик содержит следующие разделы [20]:

- введение;
- краткая характеристика организации;
- свойства угольной пыли, источники её образования и нормирование запыленности воздуха в производственных помещениях углеобогатительных фабрик;
- основные мероприятия по борьбе с пылью в производственных помещениях по технологическим операциям:
 - укрытие очагов пылевыделения;
 - аспирация очагов пылевыделения и промышленная вентиляция;
 - пылеулавливающее оборудование;
 - пневматическая и гидравлическая уборка пыли, осланцевание и побелка в производственных помещениях;
- мероприятия по борьбе с пылью;
- контроль эффективности работы вентиляционных систем.

Раздел «*Краткая характеристика организации*» включает:

- описание существующей технологической схемы УОФ;
- сведения об исходном угле, поступающем на переработку, и получаемых конечных продуктах обогащения, их назначении по видам потребления;
- классификация помещений по категориям взрывоопасности и пожароопасности;
- схемы цепи аппаратов и спецификации основного технологического оборудования;
- типы бункеров и их вместимость на углеприёме и погрузке;
- при наличии сушильных отделений приводятся сведения по сушильным установкам, продуктам обогащения, подвергаемым сушке, и применяемым видам топлива.

В разделе «*Свойства угольной пыли, источники ее образования и нормирование запыленности воздуха в производственных помещениях*» приводятся данные по нижним концентрационным пределам воспламенения с указанием даты их определения. Представляются сведения по основным источникам пылеобразования и пылевыведения по всем технологическим операциям: углеприём, дробление, грохочение, обогащение, сушка, складирование и погрузка. Приводятся нормированные данные по запыленности воздуха на рабочих местах и в производственных помещениях.

В разделе «*Основные мероприятия по борьбе с пылью в производственных помещениях по технологическим операциям*» приводятся:

- типы укрытий, при необходимости указывается техническая документация, по которой изготовлены и смонтированы укрытия. Описывается наличие аспирационных укрытий в зонах подачи и выгрузки угля;
- сведения по укрытиям мест перегрузки угля с технологического и транспортного оборудования;
- конструктивное исполнение укрытий (простое с одинарными стенками, с двойными вентилируемыми стенками, с двойными стенками, желоб с диффузором);
- анализ эффективности применяемых укрытий очагов пылеобразования, выделяются участки укрытий, которые имеют низкую эффективность. На эти участки должны быть разработаны мероприятия, обеспечивающие снижение выделения пыли в производственные помещения до установленных норм;
- сведения о наличии на объекте аспирационных, вытяжных и приточных систем вентиляции в виде паспортов на них;
- технические характеристики вентиляционных установок и применяемого оборудования;
- данные УОФ по воздушному балансу аспирируемого и подаваемого в производственные помещения воздуха;
- анализ эффективности работы систем аспирационной вентиляции по результатам замеров выбросов пыли в атмосферу;
- мероприятия по совершенствованию вентиляционных систем, которые имеют низкую эффективность;

- технические характеристики пылеуловителей, вспомогательного оборудования к ним (выгрузатели, мигалки, гидрозатворы, форсунки) и технологические схемы сушильных отделений;
- типы пылеуловителей аспирационных систем вентиляции, их техническая характеристика;
- описание существующих на УОФ методов уборки пыли со стен, потолков, полов, строительных конструкций и поверхности технологического и транспортного оборудования;
- оборудование, с помощью которого производятся побелка помещений;
- перечень стационарных пневматических установок, оборудования, приспособлений и их технические характеристики;
- перечень применяемых при гидравлических методах уборки пыли приспособлений и их технические характеристики по расходу воды и другим параметрам.

В разделе «Мероприятия по борьбе с пылью» указываются способы борьбы с пылью с учетом требований действующих норм технологического проектирования УОФ и требований безопасности.

Мероприятия по борьбе с пылью разрабатываются на один год, уточняются в первом квартале наступившего года и прилагаются к действующему проекту комплексного обеспыливания УОФ.

Все рассмотренные выше мероприятия направлены на уменьшение пылеобразования при работе технологического и транспортного оборудования, на снижение уровня запылённости производственных помещений.

Эффективная работа укрытий и аспирационной системы обеспечивает соблюдение требуемых норм по содержанию пыли в рабочей зоне обогатительных фабрик. Однако, только удалением пыли из производственных помещений работа аспирационной системы не ограничивается. Запылённый воздух без предварительной очистки нельзя выбрасывать в атмосферу. Содержание пыли в уходящих газах не должно превышать значения *предельно допустимых выбросов ПДВ* (ПДВ – это максимальные выбросы в единицу времени для данного предприятия по данному компоненту, которые создают в приземном слое атмосферы концентрацию этого вещества, не превышающую ПДК).

Поэтому, второй основной задачей аспирационной системы является улавливание пыли, снижение её содержания в очищенном воздухе до требуемых норм.

Концентрация вредных примесей c_k в выбросах не должна превышать величины

$$c_k = 100k, \text{ мг/м}^3 \quad (2.1)$$

где k – коэффициент, принимаемый в зависимости от предельно допускаемой концентрации (ПДК) пыли в воздухе рабочей зоны производственных помещений, согласно ГОСТ 12.1.005-88, мг/м³:

ПДК.....	До 2	2 - 4	4 - 6	6 - 10
k	0,3	0,6	0,8	1,0

Концентрацию вредных примесей в выбросах объёмом менее 15 тыс. м³/ч с учетом трудности организации надлежащего обслуживания небольших очистных устройств и меньшего влияния на загрязнение атмосферы допускается принимать несколько большей по формуле

$$c_k = (160 - 4L)k, \text{ мг/м}^3, \quad (2.2)$$

где L – объём выброса, тыс. м³/ч.

Эффективность пылеулавливания во многом определяется свойствами пыли, принятыми методами обеспыливания, техническими характеристиками используемого оборудования. В последующих главах мы подробно изучим все эти вопросы. И начнём с самого основного – свойства пыли.

Вопросы для самоконтроля.

1. Объясните понятия «первичная» и «вторичная» пыль?
2. Перечислите основные источники пылеобразования на углеобогадательной фабрике.
3. От каких параметров зависит взрывчатость пыли?
4. Укажите основные причины взрыва пыли.
5. Что такое «Предельно допустимая массовая концентрация пыли в воздухе рабочей зоны»?
6. Что измеряют для контроля запыленности воздуха на предприятиях?
7. Какие технические средства и мероприятия применяются для снижения запыленности воздуха производственных помещений?
8. Какие виды систем промышленной вентиляции производственных помещений обогадательных фабрик Вы знаете?
9. Что необходимо учитывать при проектировании систем вентиляции?
10. Укажите основные разделы проекта комплексного обеспыливания углеобогадательных фабрик.

Глава 3

СВОЙСТВА ПЫЛИ

Эффективная и надежная работа пылеулавливающего оборудования в значительной степени зависит от физико-химических свойств пылегазового потока. При выборе пылеулавливающих аппаратов необходимо знать следующие основные свойства пыли, содержащейся в технологических и вентиляционных газах: дисперсность, плотность, аутогезионные свойства (слипаемость, сыпучесть), гигроскопичность, смачиваемость, абразивность, удельное электрическое сопротивление слоя частиц и другие.

3.1 Дисперсный состав

Дисперсный состав является одной из важнейших характеристик тонкоизмельченных материалов, определяющих их физико-химические свойства. В технике пылеулавливания и очистки газов дисперсный состав пыли имеет решающее значение, так как основной круг вопросов по расчету и выбору оборудования связан с этим параметром подлежащей улавливанию пыли.

Дисперсность – степень измельчения вещества. Под дисперсным составом понимают распределение частиц пыли по размерам. Он показывает, из частиц какого размера состоит данная пыль, и массу или количество частиц соответствующего размера.

Весь диапазон размеров частиц разбивают на фракции. Фракция объединяет пылевые частицы, находящиеся в пределах одного интервала размеров рекомендуемой шкалы. Например, применяют следующую шкалу размеров пылевых частиц: 1 – 1,3 – 1,6 – 2,0 – 2,5 – 3,2 – 4,0 – 5,0 – 6,3 – 8,0 – 13 – 16 – 20 – 25 – 32 – 40 – 50 – 63 мкм [21].

Дисперсность в значительной мере определяет свойства пыли. В результате измельчения изменяются некоторые свойства вещества и приобретаются новые. Это вызвано, в основном, тем, что при диспергировании вещества многократно увеличивается его суммарная поверхность. Например, при измельчении тела, имеющего форму куба и размеры 20x10x10 мм, и превращении его в частицы кубической формы с размером 1 мкм, суммарная поверхность материала возрастет в 10000 раз и станет равной 6 м² (вместо 600 мм²).

В результате резкого увеличения суммарной поверхности вещества повышается поверхностная энергия, что влечет за собой увеличение физической и химической активности. Очень быстро и интенсивно протекают реакции окисления этих веществ.

Степень дисперсности представляет собой качественный показатель, характеризующий "тонкость" пыли. В качестве условных показателей этого же свойства используются удельная поверхность, средний диаметр частиц, медианный диаметр и другие величины [22].

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:

ситовой анализ – разделение частиц на фракции путём последовательного просеивания навески пыли через лабораторные сита с отверстиями различных размеров;

седиментометрия – разделение навески пыли на фракции путём её осаждения в жидкой или газообразной среде;

микроскопический анализ – рассмотрение пылевых частиц с помощью оптического или электронного микроскопа, определение формы частиц, их размера и количества по фракциям;

центробежная сепарация – разделение пыли на фракции с помощью центробежной силы в специальном аппарате;

гидроаэродинамические методы – разделение пыли в восходящем потоке жидкости или газа.

Результаты определения дисперсного состава в большинстве случаев представляются в виде таблиц. Наиболее часто данные дисперсионного анализа даются в виде фракций, выраженных в процентах от общего числа или массы (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Дисперсный состав пыли

Размер частиц, мкм	Содержание фракции, %	Размер частиц, мкм	Содержание фракции, %
>40	5,02	4-6,3	16,56
25-40	9,50	2,5-4	9,32
16-25	14,57	1,6-2,5	4,61
10-16	17,74	<1,6	3,08
6,3-10	19,60	-	-

В некоторых методах анализа результаты записываются в виде таблиц с указанием процента массы или числа частиц, имеющих размер больше или меньше заданного (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Фракции пыли с частицами меньше или больше заданного размера

Размер частиц, мкм	Содержание частиц, %		Размер частиц, мкм	Содержание частиц, %	
	мельче	крупнее		мельче	крупнее
max	100,00	0,00	6,3	33,57	66,43
40,0	94,98	5,02	4,0	17,01	82,99
25,0	85,48	14,52	2,5	7,69	92,31
16,0	70,91	29,09	1,6	3,08	96,92
10,0	53,17	46,83	min	0,00	100,00

Результаты дисперсионного анализа можно представить и в вид графиков. Принимая равномерным распределение частиц по размерам внутри каждой фрак-

ции, строят ступенчатый график, называемый гистограммой. По оси абсцисс откладывают размеры частиц, а по оси ординат – относительное содержание фракций, т. е. процентное содержание каждой фракции, отнесенное к массе всего материала (рис. 3.1).

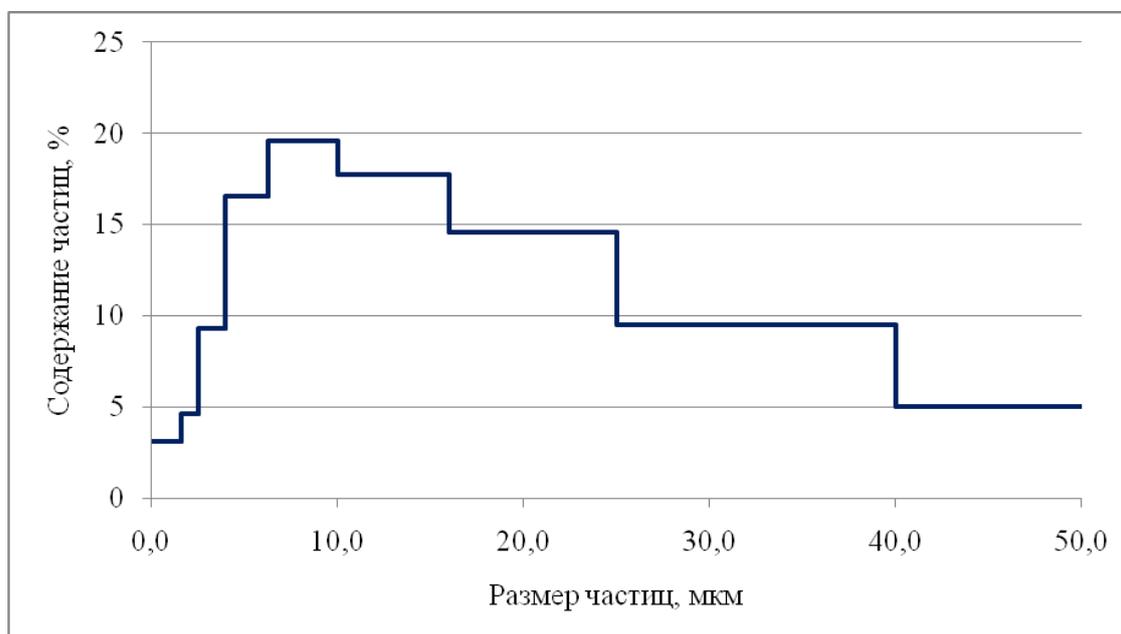


Рисунок 3.1 – Ступенчатый график фракционного состава частиц пыли

Если через середины отрезков на гистограмме провести плавную кривую, то получим дифференциальную кривую распределения частиц по размерам (рис. 3.2).

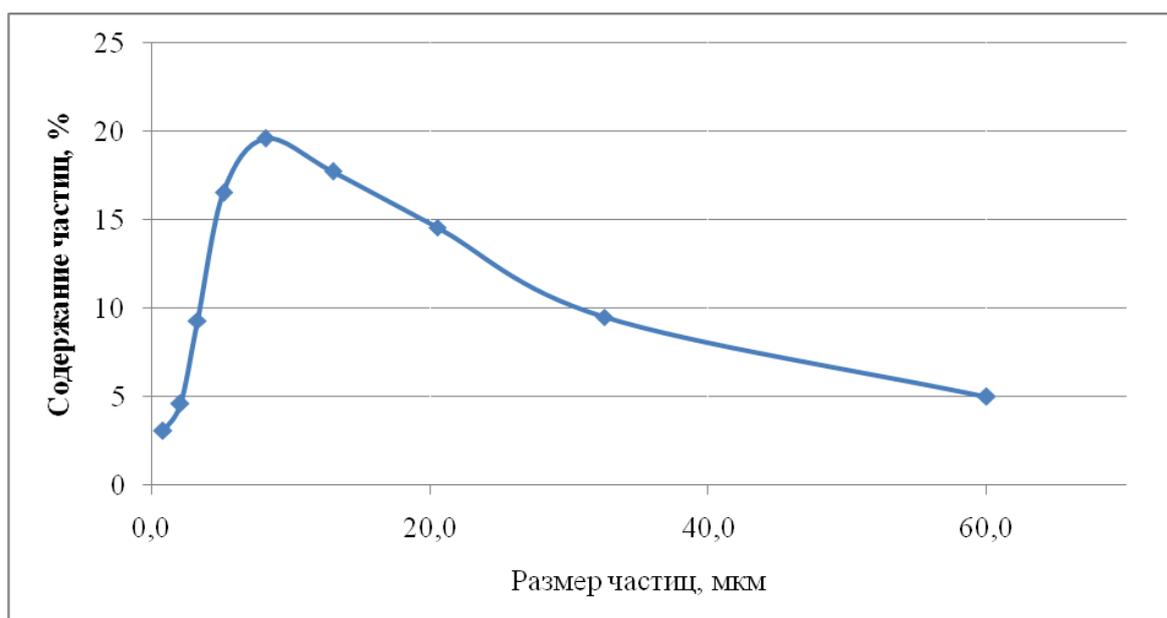


Рисунок 3.2 – Дифференциальная кривая распределения частиц пыли

Часто используется графическое изображение результатов дисперсионных анализов в виде интегральных кривых $R(d_u)$ или $D(d_u)$, каждая точка которых показывает относительное содержание частиц размерами больше или меньше заданного (рис. 3.3).

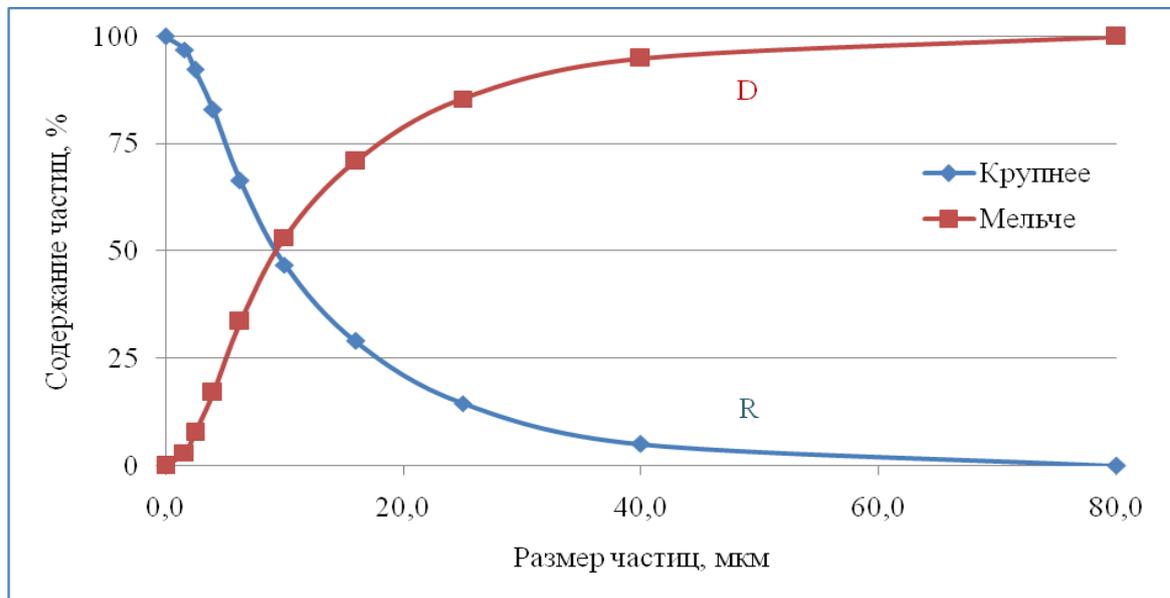


Рисунок 3.3 – Интегральное распределение частиц пыли в линейном масштабе координат

Обозначения D и R соответствуют начальным буквам немецких слов Durchgang (проход) и Ruckstand (остаток), так как первоначально характеристики дисперсного состава сыпучих материалов определялись путём ситового анализа, и соответствующие значения отвечали относительной доле материала, прошедшего сквозь сито с ячейками данного размера или оставшегося на нём [23].

Для целого ряда расчётов, в которых используется данные дисперсионных анализов, удобно аналитическое описание функций распределения частиц по размерам.

Академик А. Н. Колмогоров теоретически обосновал, что дисперсность пыли, образующейся при измельчении материала в течение достаточно длительного времени, подчиняется логарифмически нормальному закону распределения. Данное положение неоднократно подтверждено экспериментально [24].

Для аналитического описания дисперсного состава частиц пыли, подчиняющегося *закону логарифмически нормального распределения (ЛНР)*, используется следующее выражение

$$m(d) = \frac{100}{\lg \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lg d} \exp\left(-\frac{(\lg d - \lg d_{50})^2}{2 \lg^2 \sigma}\right) d(\lg d) \quad (3.1)$$

где $m(d)$ – относительная доля частиц размером менее d ;

d_{50} – медианный диаметр частиц, при котором доли частиц пыли размером более и менее d_{50} равны;

$lg\sigma$ – стандартное (среднеквадратическое) отклонение логарифмов текущих диаметров частиц d от их среднего значения.

Интеграл, входящий в формулу (3.1), не может быть выражен через элементарные функции. Для вычисления искомой функции её преобразуют в функцию нового аргумента x

$$x = (lgd - lgd_{50})/lg\sigma, \quad (3.2)$$

Аргумент x называется нормированной нормально распределенной величиной. Среднее значение этой величины равно нулю.

Произведя указанную замену, получают табулированную функцию нормального распределения Гаусса (Приложение 1)

$$m(d) = 100 \cdot F_0(x) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}x^2} dx, \% , \quad (3.3)$$

для которой существует однозначная связь между функцией $F_0(x)$ и её аргументом x .

Для описания ЛНР в практических целях удобно пользоваться логарифмической вероятностной координатной сеткой (Приложение 2). Эта координатная сетка характеризуется тем, что по оси абсцисс откладываются значения $lg(d)$ (для наглядности на оси абсцисс проставляются сами значения диаметров частиц d), а по оси ординат откладываются значения величины x (для наглядности проставляются значения функции $m(d) = 100 \cdot F(x)$). Значения x , отвечающие заданным значениям функции $F(x)$, находятся из Приложения 1. Значениям $F(x) < 50\%$ отвечают отрицательные значения аргумента x , которые откладываются вниз от начальной точки $F(x) = F(0) = 50\%$.

Вычерченный на такой сетке график ЛНР изобразится прямой линией (рис. 3.4), поскольку зависимость x от $lg(d)$ по формуле (3.2) является линейной.

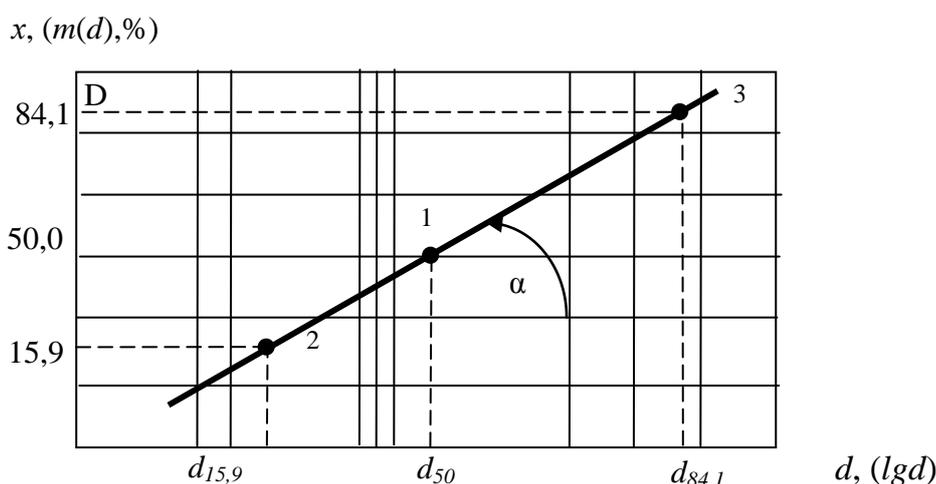


Рисунок 3.4 – Интегральное распределение частиц пыли в вероятностно-логарифмической системе координат

Угловой коэффициент $tg\alpha$ этой прямой определяется по формуле $tg\alpha = 1/lg\sigma$, здесь α – угол наклона между прямой и осью абсцисс.

Отсюда можно сделать следующие заключения:

- чем более полидисперсен порошкообразный материал, тем больше значение дисперсии σ и, соответственно, меньше угол наклона прямой α ;

- чем ближе к вертикали линия распределения на логарифмически вероятностной координатной сетке, тем уже распределение, т. е. тем более однороден по своим размерам материал.

- более измельченному материалу соответствует меньший медианный диаметр d_{50} частицы и более высокое расположение линии распределения на логарифмически вероятностной координатной сетке.

Стандартное (среднеквадратическое) отклонение логарифмов диаметров частиц из формулы (3.2) можно определить как

$$\lg \sigma = (\lg d - \lg d_{50})/x,$$

тогда при $x = \pm 1$:

$$\lg \sigma = \pm (\lg d - \lg d_{50}).$$

Для $x = +1$ из табулированной функции нормального распределения Гаусса (Приложение 1) следует, что $F_0 = 0,841$, или

$$\lg \sigma = \lg d_{84,1} - \lg d_{50} = \lg(d_{84,1}/d_{50}). \quad (3.4)$$

Аналогично, для $x = -1$ следует, что $F_0 = 0,159$ (Приложение 1), или

$$\lg \sigma = \lg d_{50} - \lg d_{15,9} = \lg(d_{50}/d_{15,9}). \quad (3.5)$$

Отсюда видно, что среднеквадратическое отклонение можно определить

$$\lg \sigma = \lg(d_{84,1}/d_{50}) = \lg(d_{50}/d_{15,9}),$$

или

$$\sigma = d_{84,1}/d_{50} = d_{50}/d_{15,9}. \quad (3.6)$$

Величины, входящие в соотношения (3.6): диаметры частиц, соответствующие проходам 84,1; 15,9 и 50%, находятся из графика функции распределения.

Из соотношений (3.6) также следует, что, зная медиану распределения d_{50} и величину среднеквадратического отклонения σ , можно вычислить $d_{84,1}$ или $d_{15,9}$ и построить на логарифмически вероятностной сетке график функции распределения.

Следовательно, для характеристики дисперсного состава пылей и сравнения их между собой достаточно иметь два параметра: $\lg \sigma$ и d_{50} . Значение d_{50} даёт средний размер частиц, а $\lg \sigma$ – степень полидисперсности пыли.

Обычно эти параметры устанавливаются опытным путем и принимаются в качестве исходных величин при проектировании газоочистного оборудования.

По дисперсности пыли классифицируются на 5 групп:

I – очень крупнодисперсная пыль, $d_{50} > 140$ мкм;

II – крупнодисперсная пыль, $d_{50} = 40-140$ мкм;

III – среднедисперсная пыль, $d_{50} = 10-40$ мкм;

IV – мелкодисперсная пыль, $d_{50} = 1-10$ мкм;

V – очень мелкодисперсная пыль, $d_{50} < 1$ мкм.

На рис. 3.5 приведена логарифмическая вероятностная сетка, на которой линиями выделены границы зон пяти классификационных групп пыли.

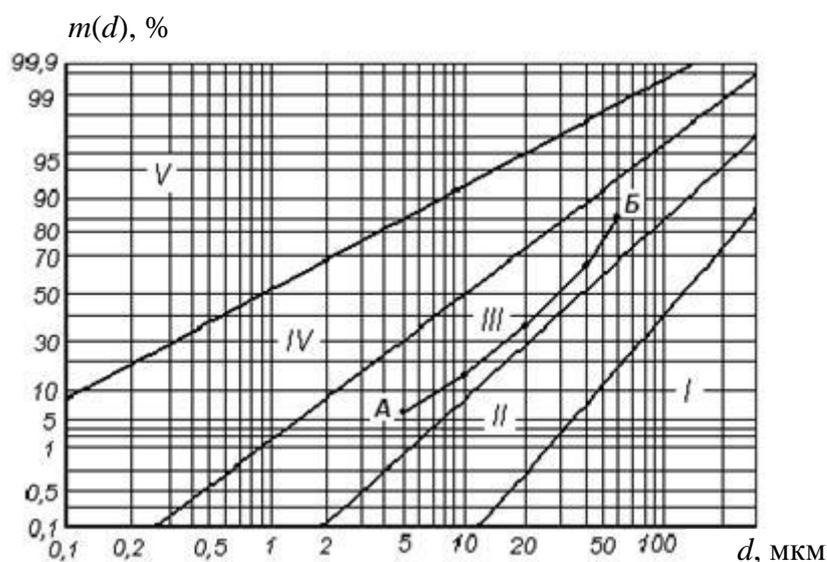


Рисунок 3.5 – Зоны пяти классификационных групп пыли

При наложении на эту диаграмму графика функции распределения конкретной пыли, можно определить группу её дисперсности. Так пыль, характеризующаяся ломаной кривой *АВ* (рис. 3.5), попадает в третью зону и относится к среднедисперсным. Если линия, характеризующая дисперсный состав пыли, проходит по нескольким участкам номограммы, пыль относят к группе, более высокой по дисперсности.

3.2 Плотность частиц пыли

Важный параметр пыли – её **плотность**. От плотности частиц пыли зависит эффективность её осаждения в гравитационных и инерционных пылеуловителях.

Различают истинную, кажущуюся и насыпную плотность частиц пыли [23].

Истинная плотность твёрдой частицы пыли определяется как отношение массы её вещества к занимаемому ею объёму за вычетом объёма пор и газовых включений, которые может иметь частица.

Кажущаяся плотность – это масса единицы объёма частиц, включая объём закрытых пор. Кажущаяся плотность монолитной частицы равна истинной плотности данной частицы.

Ощутимое снижение кажущейся плотности по сравнению с истинной наблюдается у пылей, склонных к коагуляции или к спеканию частиц, таких как сажа, окислы цветных металлов и другие.

Например, истинная плотность частиц газовой сажи составляет 1800-1900 кг/м³, а кажущаяся – около 130 кг/м³. Кажущаяся плотность частиц золы может изменяться от нескольких килограммов на 1 м³ для вспученных пористых частиц недожога топлива до нескольких тысяч килограммов на 1 м³ для частиц, содержащих железо, восстановленное из окислов.

Для расчётов, связанных с выбором или оценкой работы пыле- и золоулавливающих аппаратов, необходимы данные о кажущейся плотности частиц, так как именно кажущаяся плотность наряду с некоторыми другими факторами определяет поведение частиц в газовых потоках.

Кажущуюся плотность определяют пикнометрическим методом, который основан на определении объёма жидкости, вытесненной пылевыми частицами, масса которых предварительно измерена. Поделив массу материала на вытесненный им объём, получают плотность данного материала.

Применяемая жидкость не должна взаимодействовать с исследуемой пылью. Поэтому целесообразно использовать жидкость, применяемую для дисперсионного анализа жидкостным седиментометрическим методом.

Насыпная плотность – масса единицы объёма уловленной пыли, свободно насыпанной в ёмкость. В объём, занимаемый пылью, входят внутренние поры частиц и промежуточное пространство между ними.

Определение насыпной плотности проводят при помощи мерного цилиндра объёмом 50-100 см³ с диаметром 30 мм. Верхняя часть цилиндра в конце шкалы обрезана и отшлифована. Вначале определяют вес пустого цилиндра G_1 (г) и записывают его объём V (см³), указанный на шкале. Затем заполняют цилиндр пылью. Пыль, находящуюся выше верхней кромки цилиндра, удаляют и взвешиванием определяют массу цилиндра с пылью G_2 (г).

Насыпную плотность пыли ρ_n вычисляют по формуле

$$\rho_n = (G_2 - G_1) / V, \text{ г/см}^3. \quad (3.7)$$

Величиной насыпной плотности пользуются для определения объёма, который занимают зола или пыль в бункерах сухих газоочистных аппаратов, а также при выборе систем транспортировки уловленной пыли.

С увеличением однородности частиц по размерам их насыпная плотность уменьшается, так как увеличивается относительный объём воздушных прослоев.

Насыпная плотность слежавшейся пыли оказывается в 1,2-1,5 раза больше, чем свеженасыпанной.

В зависимости от степени гидратации пыли величины кажущейся и насыпной плотности могут различаться в 2-3 раза [24].

3.3 Аутогезионные свойства частиц пыли

Прочность сцепления частиц пыли с различными макроскопическими поверхностями и друг с другом определяется соответственно **адгезионными** и **аутогезионными** свойствами.

Аутогезией называется взаимодействие пылевых частиц между собой, **адгезией** – взаимодействие частиц с поверхностями.

Аутогезия, которую применительно к пылевидным материалам называют **слипаемостью**, вызвана силами электрического, молекулярного и капиллярного происхождения. Она зависит от природы частиц и от параметров среды, в которой они находятся.

Адгезионные взаимодействия проявляются между поверхностью аппарата и

монослоем частиц, контактирующих с ней. Сила адгезионного взаимодействия зависит как от природы пыли, параметров среды, так и от состояния поверхности. На поверхности, не подвергшейся специальной обработке, монослой частиц удерживается очень прочно и не удаляется обычными средствами регенерации осадительных поверхностей. Сила адгезии частиц к стальной поверхности на один-два порядка больше сил аутогезионного взаимодействия частиц [25].

В пылеуловителях явление адгезии наблюдается в начальной стадии запыления, когда частицы осаждаются на чистую поверхность. В дальнейшем, после образования монослоя частиц, удержание вновь поступающей пыли обуславливается силами аутогезии.

Так как адгезионные свойства проявляются только в монослое частиц, осевших на стенках или фильтрующих поверхностях газоочистных аппаратов, то из-за очень малой толщины такого слоя они, как правило, не оказывают влияния на работу систем пыле- и золоулавливания. Эксплуатационная надежность систем пылеулавливания зависит, главным образом, от аутогезионных свойств.

В качестве основного показателя, характеризующего аутогезию сыпучих материалов, принимается прочность пылевого слоя на разрыв. Количественно она равна силе, отнесённой к площади контакта, необходимой для разрыва слоя.

Все методики оценки прочности слоя порошкообразного материала на разрыв состоят из формирования образца и последующего приложения к нему растягивающего усилия, величина которого постепенно возрастает до момента разрушения образца.

Для определения разрывной прочности P специально сформированных пылевых слоёв наибольшее распространение получил метод разъемного цилиндра с использованием прибора, разработанного в НИИОГАЗ [25, 26].

На рис. 3.6 представлена схема ячейки прибор.

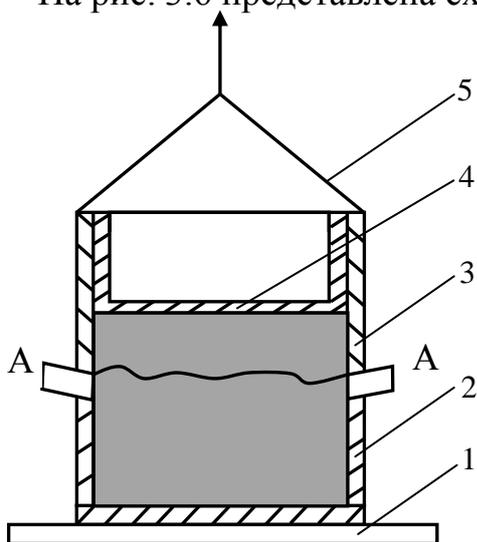


Рисунок 3.6 – Ячейка прибора для определения разрывной прочности пылевого слоя методом разъемного цилиндра

- 1 – основание;
- 2 – стакан;
- 3 – цилиндр;
- 4 – плунжер;
- 5 – дужка на цилиндре

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 засыпают исследуемую пыль, уплотняют её с помощью плунжера 4. К дужке 5 цилиндра крепится пружина, которая растягивается нитью, наматываемой на барабан с помощью электродвигателя. На верхнем конце пружины закреплён ползун, отме-

чающий на шкале перемещение пружине при её растягивании.

При проведении определений разрывной прочности пыль насыпают до верхней кромки цилиндра. Затем при помощи плунжера пыль уплотняют. Время приложения усилия – 15 с. После этого включают электродвигатель и начинают растягивать пружину, закреплённую на дужке цилиндра. Постепенно нарастающее усилие, достигнув некоторой величины F_p , разрывает образец по сечению $A-A$, месту стыка цилиндра и стакана. Отметив по шкале величину F_p , возвращают цилиндр с пылью в исходное положение. Пружина будет растянута на некоторую величину под воздействием массы цилиндра с остатками пыли, удерживаемой силами адгезии на его стенках. По шкале отмечают балластное усилие F_0 , соответствующее этой массе.

Разрывную прочность слоя пыли P вычисляют по формуле

$$P = (F_p - F_0)/S, \quad (3.8)$$

где S – площадь поперечного сечения цилиндра.

За окончательный результат принимают среднее арифметическое 6-8 параллельных определений. Расхождение между параллельными определениями не должно превышать 10%.

Одной из распространённых неполадок систем газоочистки является частичное или полное забивание отдельных аппаратов и других элементов улавливаемым продуктом. Поэтому для многих газоочистных аппаратов, пылевых затворов установлены определенные границы применимости в зависимости от слипаемости подлежащих улавливанию золы или пыли. Для установления таких границ используется условное разделение золы или пыли по степени слипаемости на четыре группы (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Слипаемость некоторых видов золы и пыли [27]

Группа слипаемости, разрывная прочность P , Па	Наименование золы и пыли
I. Неслипающиеся, $P < 60$	Шлаковая пыль, глинозёмная пыль, доломитовая пыль, шамотная пыль
II. Слабо слипающиеся, $60 < P < 300$	Летучая зола с недожогом более 30% при пылевидном сжигании каменных углей, летучая зола при слоевом сжигании любых углей, коксовая пыль, магнезитовая пыль (не сорбирувавшая влагу), сланцевая зола, апатитовая сухая пыль
III. Средне слипающиеся, $300 < P < 600$	Летучая зола без недожога (зола подмосковных углей), торфяная зола, пыль концентратов цветной металлургии и железного колчедана, пыль окиси цинка, свинца, влажная магнезитовая пыль, сухой цемент
IV. Сильно слипающиеся, $P > 600$	Цементная пыль, выпавшая из воздуха с большим влагосодержанием, гипсовая и алебастровая пыль, пыль глины, волокнистые пыли (асбест), пыль с максимальной величиной частиц 10 мкм

В зависимости от того, к какой группе относится улавливаемая пыль, решается вопрос о выборе пылеулавливающего аппарата. Так, слипаемость пыли определяет выбор типа направляющего элемента батарейных циклонов и необходимость оснащения бункеров специальными вибраторами.

Рекомендации по проектированию и эксплуатации циклонов устанавливают максимальную концентрацию пыли третьей группы вдвое меньше, чем в случае улавливания слабо слипающейся пыли.

Со слипаемостью тесно связана другая характеристика пыли – её сыпучесть. **Сыпучесть** характеризует подвижность частиц пыли относительно друг друга и их способность перемещаться под действием внешней силы.

Сыпучесть зависит от размера частиц, их влажности и степени уплотнения. Характеристики сыпучести используются при определении угла наклона стенок бункеров, течек и других устройств, связанных с накоплением и перемещением пыли и пылевидных материалов.

Величина сыпучести характеризуется косвенными показателями, среди которых наибольшее распространение получил угол естественного откоса.

Углом естественного откоса называется угол между горизонтальной поверхностью и образующей конуса насыпанного на неё порошкообразного материала. Угол естественного откоса связан с аутогезией, внутренним трением и плотностью упаковки частиц. Различают статический и динамический угол естественного откоса.

Динамический угол естественного откоса относится к случаю формирования откоса при падении частиц пыли на плоскость. Образование поверхности откоса отвечает состоянию динамического равновесия.

Под *статическим углом естественного откоса* (его называют также углом обрушения) понимают угол, который образуется при обрушении слоя в результате удаления подпорной стенки.

Статический угол естественного откоса всегда больше динамического угла естественного откоса.

Динамический угол естественного откоса определяют на лабораторной установке, представленной на рисунке 3.7, а.

Устройство состоит из бункера 1 с ирисовым затвором 2, закрепленного на штанге 3, которая жестко соединена под прямым углом с основанием 4. Основание устанавливается горизонтально при помощи установочных винтов 5. Над основанием параллельно его плоскости устанавливается диск 6. На штанге закреплена линейка 7 с передвижным указателем 8.

Пробу пыли засыпают в бункер. Затем приоткрывают затвор так, чтобы пыль начала высыпаться на середину диска. Засыпку продолжают до заполнения диска и завершения формирования конуса, т. е. до стабилизации его высоты. После этого при помощи передвижного указателя измеряют высоту конуса H .

Исходя из высоты конуса H и диаметра диска d , вычисляют динамический угол естественного откоса по формуле

$$\alpha_0 = \arctg(2H/d). \quad (3.9)$$

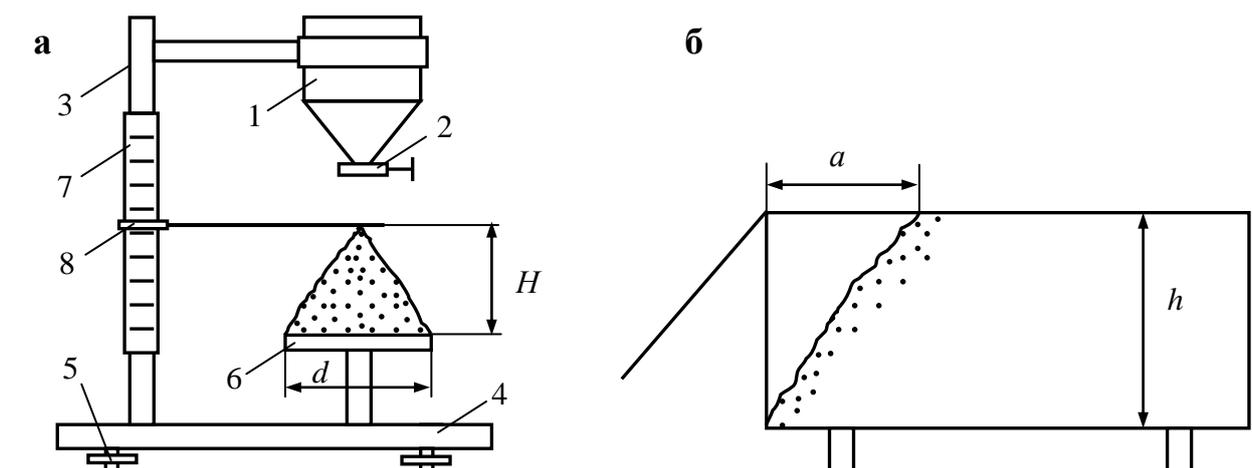


Рисунок 3.7 – Устройство для определения динамического (а) и статического (б) угла естественного откоса

Для определения статического угла естественного откоса используют установку, основным элементом которой является измерительный сосуд из стекла, имеющий форму параллелепипеда размером 70x40x40 мм, со съёмной торцевой стенкой (рис. 3.7, б).

После наполнения сосуда исследуемой пылью убирают съёмную стенку. Часть материала в виде треугольной призмы сползает, образуя при этом откос. Измеряют с точностью до 0,5 мм величину освободившейся верхней кромки сосуда a и высоту откоса h . По величинам a и h статический угол естественного откоса (угол обрушения) определяют с помощью формулы

$$\alpha_{cm} = \arctg(h/a). \quad (3.10)$$

За окончательный результат определения динамического и статического углов естественного откоса принимают среднее арифметическое шести параллельных определений.

3.4 Гигроскопические свойства пыли

Гигроскопичностью пыли называется её способность поглощать влагу из окружающей воздушной среды.

Поглощение влаги оказывает влияние на свойства пыли. Изменяется электрическая проводимость слоя пыли, силы адгезионного и аутогезионного взаимодействия, сыпучесть и другие свойства, которые необходимо учитывать при проектировании пылеулавливающих устройств.

Если частицы пыли растворимы в воде, то во влажной газообразной среде на их поверхности образуется насыщенный водный раствор вещества, из которого они состоят. Если парциальное давление паров воды над этим раствором меньше парциального давления паров воды в окружающем газе, пары воды из газа будут поглощаться веществом, обуславливая этим явление гигроскопичности.

Для водонерастворимых веществ процесс поглощения влаги обусловлен вначале адсорбцией молекул воды поверхностью частиц, а затем постепенным

дополнительным поглощением влаги под действием капиллярных сил и диффузии [28]. В обоих случаях поглощение влаги продолжается до установления равенства парциальных давлений паров воды над пылью и в окружающем её газе. Каждой относительной влажности газа соответствует свое содержание влаги в сыпучем материале, называемое *равновесной влажностью сыпучего материала*. Равновесие между относительной влажностью воздуха и влажностью материала описывается характерными для каждого вещества *изотермами сорбции* (рис. 3.8).

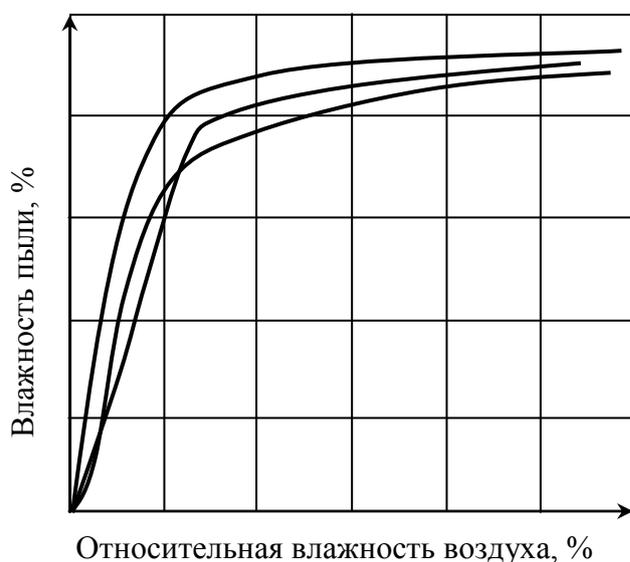


Рисунок 3.8 – Пример изотерм сорбции различных видов пыли

Равновесную влажность пыли (изотерму сорбции) определяют, выдерживая её до постоянной массы в воздушной среде с известной относительной влажностью. Несколько навесок исследуемой пыли высушивают до постоянной массы, а затем помещают в эксикаторы, в которых, благодаря наличию серной кислоты различной концентрации, поддерживается различная относительная влажность воздуха (табл. 3.4). Пыль выдерживается в эксикаторах несколько суток, пока масса пыли не станет постоянной. Затем определяют равновесную влажность пыли и строят график зависимости равновесной влажности пыли от относительной влажности воздуха (изотерму сорбции).

Таблица 3.4 – Общее давление паров и относительная влажность воздуха над водными растворами серной кислоты при температуре 20°C [25]

Концентрация H ₂ SO ₄ , масс. %	10	20	30	40	50	60	70	75
Давление пара, мм рт. ст.	16,6	15,4	13,2	9,95	6,2	2,87	0,72	0,28
Относительная влажность, %	94,6	87,2	75,3	56,7	35,4	16,4	4,1	1,6

Имея изотермы сорбции влаги промышленной пыли, можно предсказывать поведение улавливаемой пыли в технологических аппаратах, бункерах, разгрузочных устройствах при различной относительной влажности газа-носителя.

3.5 Смачиваемость пыли

Процесс смачивания порошкообразного материала происходит в результате сложного взаимодействия молекул на границе твёрдой, жидкой и газообразной фаз и приводит к образованию на поверхности частиц тонкой жидкостной пленки, из которой влага проникает в частицы. Смачивание порошка всегда сопровождается уменьшением поверхностной энергии частиц. Чем сильнее понижается поверхностная энергия частиц, тем полнее и лучше смачивается пыль.

Смачиваемость частиц водой оказывает влияние на работу мокрых пылеулавливающих аппаратов. При соприкосновении плохо смачиваемой частицы с поверхностью жидкости частица захватывается этой поверхностью, но в противоположность легко смачиваемой не погружается в жидкость или не обволакивается каплей жидкости, а остается на её поверхности. После того, как поверхность жидкости оказывается в значительной мере покрыта захваченными ею частицами, очистка газов ухудшается, так как вновь подводимые к поверхности жидкости частицы в результате упругих соударений с ранее захваченными могут возвратиться в поток газа и оказаться неуловленными.

Склонность пыли к смачиванию оценивают методом плёночной флотации. Метод основан на определении доли массы затонувших за определенное время частиц порошка, насыпанного тонким слоем на поверхность воды. Предполагается, что каждая из частиц, образующих слой, контактирует с водой. На рисунке 3.9 представлена схема установки для определения смачиваемости частиц.

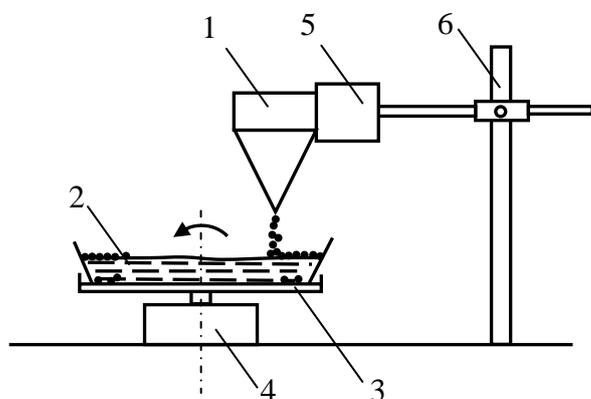


Рисунок 3.9 – Установка для определения смачиваемости пыли

Перед проведением анализа подбирают опытным путём ширину выпускного отверстия бункера 1, добиваясь того, чтобы время высыпания 1 г пыли составляло $2 \pm 0,1$ мин. Затем стеклянный сосуд 2 заполняют дистиллированной водой ниже его верхней кромки на 3-4 мм и ставят его на столик 3, приводимый во вращение электродвигателем 4 со скоростью 2 об/мин. Расстояние между пылевыпускным отверстием бункера и поверхностью воды должно составлять 3-4 мм [23, 25].

Пробу анализируемой пыли массой около 1 г помещают в бункер при включенном вибраторе 5 и следят, чтобы свежая порция пыли не попала на уже покрывшую воду и удерживающуюся в поверхностном слое пыль. Для этого после каждого поворота столика бункер с вибратором передвигают вместе со штативом 6 от периферии к центру. После высыпания всей пробы прибор останавливают. Воду с оставшимися на её поверхности частицами сливают. Осевшие на дно сосу-

да частицы с помощью промывалки переносят в предварительно взвешенную воронку Шота и при помощи водоструйного насоса из неё отфильтровывают влагу. Воронку с пылью помещают в сушильный шкаф и сушат при 105°C до постоянной массы.

Смачиваемость (в %) определяют по формуле

$$C = [(G_2 - G_1)/G] \cdot 100, \quad (3.11)$$

где G_2 – масса воронки с пылью, г;

G_1 – масса пустой воронки, г;

G – навеска пыли, г.

По смачиваемости, определенной методом пленочной флотации, промышленная пыль разделяется на три группы (табл. 3.5).

Таблица 3.5 – Группы промышленной пыли по смачиваемости

Группа пыли	Доля затонувших частиц (С), %
Плохо смачиваемая	<30
Средне смачиваемая	30-80
Хорошо смачиваемая	>80

Дополнительной характеристикой активности пыли по отношению к воде служит *кинетика смачивания*. Этот показатель определяется методом капиллярного впитывания посредством измерения скорости впитывания влаги пылевым слоем при контакте его с влажной поверхностью. По результатам измерений строят кривые кинетики смачивания слоя пыли (рис. 3.10).

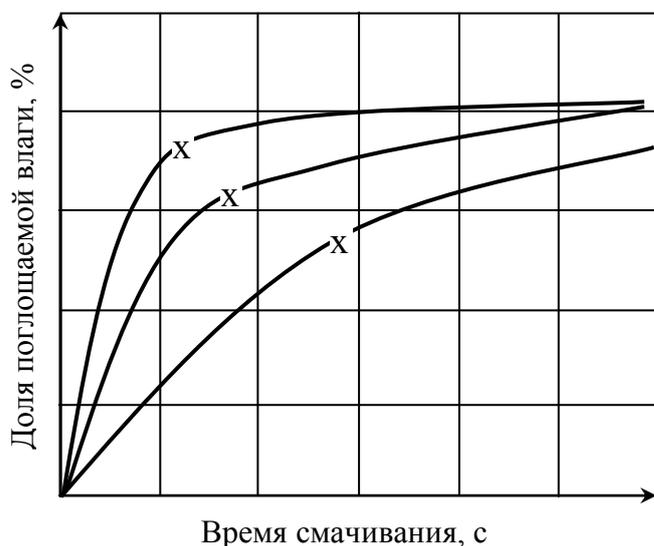


Рисунок 3.10 – Пример кривых кинетики смачивания различных видов пыли

Как видно из рисунка 3.10, кривые кинетики смачивания можно разделить на отрезки, отвечающие двум периодам. Первый (до отмеченной крестиком точки) характеризуется быстрым ростом объёма поглощаемой влаги и соответствует заполнению влагой крупных пор в частицах пыли и капилляров, образованных этими частицами. При этом происходит смачивание основной поверхности пыли. Второй отрезок соответствует вытеснению молекул газа из микропор в частицах пыли и характеризуется уменьшением скорости смачивания. Пыль можно считать

практически полностью смоченной в том случае, когда объём поглощенной влаги составляет примерно 92% максимального объёма смачивания.

Кинетические кривые смачивания пыли, построенные в логарифмических координатах, представляют собой прямые линии. Угол наклона этих линий характеризует скорость смачивания.

3.6 Абразивность частиц пыли

Одним из важных условий обеспечения нормальной работы пылеуловителей является прогнозирование мер по предупреждению износа поверхностей их корпуса.

В практике эксплуатации пылеочистных установок можно достаточно часто наблюдать истирание стенок аппаратов и газоходов. Интенсивный износ стенок аппаратов характерен для сухих инерционных пылеуловителей, газоходов и воздухопроводов в местах поворота запыленного газового потока.

Изнашивание стенок пылеочистных аппаратов происходит вследствие абразивных свойств частиц пыли, ударяющихся или трущихся о внутренние поверхности пылеуловителей под воздействием инерционных свойств. Так, износ конической части циклонов объясняется ударами крупных частиц, которые, отражаясь от стенок, совершают скачкообразные движения. В ряде случаев вследствие особой структуры вращающегося потока в циклоне крупные частицы не проходят в пылесборный бункер и продолжают вращаться в конусе до полного их истирания или остановки работы побудителя тяги.

Износ стенок пылеуловителей зависит от концентрации пыли и резко возрастает при увеличении скорости газа. Интенсивность абразивного износа пылеулавливающих установок также зависит от твердости, размера и плотности частиц. Частицы, имеющие острые грани, при прочих равных условиях разрушают металл более чем в 10 раз быстрее, чем частицы округлой формы. По мере увеличения размеров частиц пыли износ металла вначале возрастает и затем, достигнув максимума, снижается. Максимальный износ металла вызывают частицы пыли с размерами 90 ± 2 мкм.

Количественные показатели абразивных свойств дисперсных частиц устанавливаются опытным путём по потере массы образцов материалов, испытанных в регламентированных условиях на абразивметре [23, 25].

Абразивметр (рис. 3.11) состоит из кассеты 1 для крепления образца 2, устройства для разгона частиц пыли 3, приёмной воронки 4, вибрационного питателя 5 с бункером 6, обеспечивающего расход частиц не более 3 г/мин, корпуса 7, электродвигателя 8 и сборника пыли 9.

Исследуемая пыль массой 100 г загружается в бункер, откуда дозируется в приёмную воронку, закреплённую на крышке корпуса. Из воронки пыль поступает в разгонное устройство, представляющее собой трубку длиной 150 мм с внутренним диаметром 6 мм. На одном конце трубки крепится кассета с образцом, установленным под углом 45° к оси трубки, на другом – противовес для балансировки разгонного устройства. Разгонное устройство вращается электродвигателем в горизонтальной плоскости. Скорость вращения двигателя поддерживается по-

стоянной и составляет 314 ± 2 рад/с.

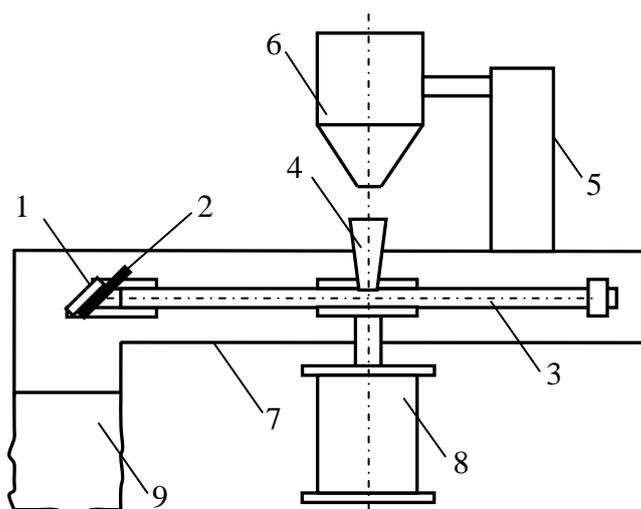


Рисунок 3.11 – Центробежный абразивметр

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

Коэффициент абразивности K_a вычисляют по уравнению

$$K_a = A \cdot \Delta m, \text{ м}^2/\text{кг}, \quad (3.12)$$

где A – постоянная абразивметра, $(\text{м}/\text{кг})^2$;

Δm – потеря массы образца в результате истирания частицами, кг.

Истирающее действие частиц пыли должно учитываться при выборе скоростей запыленных потоков, толщины металла для изготовления газоходов и газоочистных установок или выборе для них облицовочных материалов.

3.7 Электрическая проводимость пыли

Электрическую проводимость пыли характеризуют величиной удельного электрического сопротивления (УЭС) слоя пыли ρ (в Ом·м), которое равно сопротивлению прохождению электрического тока через куб пыли со стороны, равной 1 м.

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

Внутренняя проводимость вызвана электронной или ионной проводимостью материала самой частицы и увеличивается с ростом температуры за счёт увеличения энергии возбуждения электронов. На рис. 3.12 показана зависимость электрического сопротивления слоя пыли от температуры [23].

При комнатной температуре частицы адсорбируют из воздуха влагу и поэтому имеют сравнительно высокую поверхностную проводимость и, соответ-

венно, низкое сопротивление. По мере нагревания пыли адсорбированная влага испаряется, и сопротивление пыли возрастает. Такое возрастание для различных видов пыли продолжается до 90-180°C. Дальнейшее повышение температуры приводит к повышению объёмной проводимости и уменьшению сопротивления благодаря тепловому возбуждению электронов в частицах.

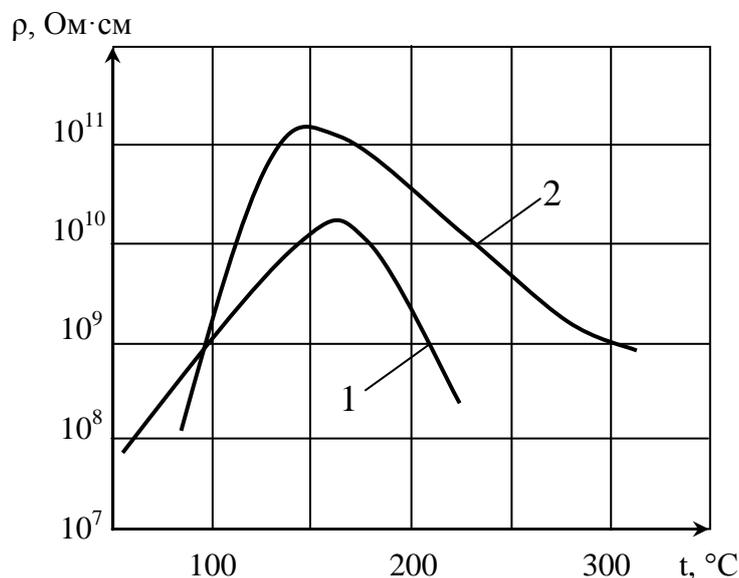


Рисунок 3.12 – Удельное электрическое сопротивление некоторых видов промышленной пыли:
1 – зола донецкого антрацита марки АШ;
2 – цементная пыль

Таким образом, кривая зависимости сопротивления пыли от температуры отражает два существенно различных вида электропроводимости пыли: поверхностную – при более низких температурах и объёмную – при высоких. Имея кривую зависимости сопротивления пыли от температуры, можно посредством регулирования рабочей температуры в известных пределах влиять на проводимость улавливаемой пыли [29, 30].

Зависимость удельного сопротивления от температуры и влажности, а также от некоторых других факторов используется в практике электрогазоочистки для подготовки газов перед электрофильтрами для улучшения их работы.

Методы определения удельного электрического сопротивления слоя пыли как в лабораторных, так и в промышленных условиях, состоят из двух этапов: формирования измерительного слоя пыли и измерения электрического сопротивления этого слоя.

От условий формирования слоя зависит плотность упаковки частиц. Поэтому в приборах для определения УЭС наиболее целесообразно формировать слой под воздействием электрических сил в поле коронного разряда. В этом случае плотность упаковки частиц соответствует характеристикам слоя пыли на осадительном электроде. Этим требованиям соответствует измеритель сопротивления ИСП-1, применяемый для определения УЭС пылей при температуре до 200°C в промышленных условиях [25].

Сопротивление слоя пыли может быть измерено тераомметром или определено расчётным путём с учетом величины напряжения, приложенного к измерительным электродам прибора, и тока, протекающего через слой пыли.

По величине УЭС улавливаемые пыли делятся на три группы:

- 1 – хорошо проводящая;
- 2 – со средней проводимостью;
- 3 – высокоомная.

Хорошо проводящая пыль имеет малое удельное электрическое сопротивление: $УЭС < 10^2$ Ом·м. Эта пыль, соприкасаясь с осадительным электродом электрофильтров, мгновенно теряет заряд и приобретает заряд в соответствии со знаком электрода. В результате между частицей и электродом возникает отталкивающая сила, направляющая частицу в газовый поток. Если отталкивающая сила преодолит силу сопротивления среды, возникает вторичный унос, снижающий эффективность улавливания пыли в электрофильтре.

Пыли со средней проводимостью ($УЭС$ в пределах 10^2 - 10^8 Ом·м) без каких-либо осложнений осаждаются на электродах и удаляются из электрофильтров. При осаждении на электроде эти пыли разряжаются не сразу, а через некоторое время, достаточное для накопления слоя и формирования из мелких осажденных частиц агломератов под действием электрических и аутогезионных сил. Размер агломератов обычно таков, что основная часть пыли при встряхивании электродов попадает в бункер электрофильтра и только небольшое количество уносится газовым потоком, образуя вторичный унос.

Высокоомные пыли характеризуются значительным удельным электрическим сопротивлением: $УЭС > 10^8$ Ом·м. Улавливание этих пылей в электрофильтре представляет наибольшую сложность. Из-за медленной разрядки частиц, оседающих на электроде, на последнем накапливается слой отрицательно заряженных частиц. Возникающее электрическое поле слоя начинает препятствовать дальнейшему осаждению частиц. Эффективность электрофильтра снижается. Возможно явление обратной короны, при котором значительно увеличивается потребляемый ток при снижении напряжения на электродах.

Пыли этой группы часто образуют на электродах прочный изолирующий слой, трудно поддающийся удалению. Высоким удельным электрическим сопротивлением обладают пыли магнезита, гипса, оксиды свинца и цинка PbO , ZnO , сульфид свинца PbS .

В случае электрической очистки газов от пыли, неблагоприятной для улавливания, для обеспечения эффективной работы электрофильтров необходимо предусматривать специальные меры. Так, для улавливания хорошо проводящей пыли следует применять электрофильтры с осадительными электродами, препятствующими возврату осаждённых частиц в газовый поток.

Снижение УЭС пыли достигается добавкой к газу ряда реагентов, например, сернистого ангидрида, аммиака, хлоридов кальция и натрия и др. Такой же результат дает добавление в газ электропроводных частиц сажи или кокса. Высокое сопротивление ряда пылей может быть понижено охлаждением пылегазового потока ниже $130^{\circ}C$ или его нагреванием свыше $350^{\circ}C$.

Вопросы для самоконтроля.

1. Какие методы определения дисперсного состава пыли Вы знаете?

2. Что такое «медианный диаметр частиц»?
3. В каких осях строится логарифмическая вероятностная координатная сетка?
4. На какие группы по дисперсности классифицируются пыли?
5. Укажите различия между истинной и кажущейся плотностью пыли.
6. Раскройте понятия «аутогезия» и «адгезия» пыли.
7. Какой метод применяется для определения разрывной прочности пылевого слоя?
8. На какие группы по степени слипаемости разделяются пыли?
9. Какими показателями характеризуется величина сыпучести пыли?
10. Как строятся изотермы сорбции влаги промышленной пыли и для чего они используются?
11. Каким методом оценивают склонность пыли к смачиванию?
12. Назовите группы промышленной пыли по смачиваемости?
13. Как определяется коэффициент абразивности пыли?
14. Чем обусловлено электрическое сопротивление слоя пыли?
15. На какие группы делятся пыли по величине удельного электрического сопротивления? Охарактеризуйте их основные свойства.

Глава 4

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И АППАРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПЫЛЕГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

4.1 Классификация методов пылеулавливания

Процесс очистки загрязненного воздуха в общем виде включает следующие основные этапы:

- предотвращение распространения исходной пыли в воздухе рабочей зоны и её удаление (процесс пылеулавливания);
- выделение пыли из воздуха (процесс пылеочистки);
- дальнейшее снижение устойчивости пылевого аэрозоля, сохранившегося после реализации предыдущих этапов, заключающееся в интенсификации распространения оставшихся в воздухе пылевых частиц и аэрации дисперсной среды в приземном слое атмосферы (процесс рассеивания пыли).

Основным элементом систем пылеочистки является аппарат очистки воздуха от пыли.

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

Для обеспыливания воздуха используют сухие, мокрые и электрические методы.

В основе *сухих методов* лежат гравитационные, инерционные, центробежные механизмы осаждения или фильтрационные механизмы.

При использовании *мокрых методов* очистка газовых выбросов осуществляется путём тесного взаимодействия между жидкостью и запыленным газом на поверхности газовых пузырей, капель или жидкой пленки.

Электрическая очистка газов основана на ионизации молекул газа электрическим разрядом и электризации взвешенных в газе частиц.

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

В основу действия аппаратов для очистки пылегазовых потоков положен определенный физический механизм. В улавливающих устройствах находят применение следующие способы отделения взвешенных частиц от взвешивающей среды, т. е. воздуха (газа):

- осаждение в гравитационном поле;
- осаждение под действием сил инерции;
- осаждение в центробежном поле;
- фильтрование;
- осаждение в электрическом поле;
- мокрая очистка и другие.

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

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

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

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

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

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

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

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

В зависимости от основного механизма улавливания, используемого в аппарате, пылеуловители можно разделить на следующие группы.

СУХИЕ АППАРАТЫ:

– гравитационно-инерционные:

- пылеосадительные камеры;
- инерционные пылеуловители;
- циклоны;
- вихревые пылеуловители;

– фильтрующие:

- волокнистые фильтры;
- тканевые фильтры;
- зернистые фильтры;

МОКРЫЕ АППАРАТЫ:

- полые скрубберы;
- центробежные скрубберы;

- тарельчатые скрубберы;
- ударно-инерционные скрубберы;
- скрубберы Вентури;

ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ:

- сухие горизонтальные;
- сухие вертикальные;
- мокрые.

Классификацию пылеуловителей можно проводить также и по дисперсности эффективно улавливаемой в них пыли [27]. Для очистки воздуха, удаляемого вытяжными аспирационными системами, от твёрдых частиц применяются пылеуловители пяти классов (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Класс пылеуловителей в зависимости от группы дисперсности пыли

Класс пылеуловителя	Размер эффективно улавливаемых частиц пыли, мкм	Группа пыли по дисперсности	Эффективность пылеуловителей, %
I	Более 0,3 - 0,5	V	< 80
		IV	99,9 - 80
II	Более 2	IV	92 - 45
		III	99,9 - 92
III	Более 4	III	29 - 80
		II	99,9 - 99
IV	Более 8	II	99,9 - 95
		I	> 99,9
V	Более 20	I	> 99

В табл. 4.1 указаны границы эффективности пылеуловителей каждого из классов на основе классификации зон дисперсности пыли по рис. 3.5. Первые из значений эффективности относятся к нижней границе соответствующей зоны, вторые – к верхней. Эффективность рассчитана из условия отделения от воздуха только практически полностью (эффективно) улавливаемых частиц, размер которых указан в табл. 4.1. Действительная эффективность пылеуловителей больше за счет частичного улавливания частиц по размеру меньших, чем указано в табл. 4.1.

Выбор оборудования при формировании системы пылеулавливания зависит от конкретных требований производства и физико-механических и физико-химических свойств дисперсных частиц. В табл. 4.2 приведены характеристики различных пылеуловителей. Эти сведения значительно облегчают выбор подходящего оборудования для систем очистки воздушно-газовых выбросов от взвешенных частиц.

Таблица 4.2 – Структурные характеристики различных систем пылеулавливания

Показатели	Пылеуловители					Фильтры	
	гравитационные	центробежные		мокрые			
		низконапорные	средне-напорные	низконапорные	высоконапорные	тканевые	электрические
Гидравлическое сопротивление, Па	до 100	100-300	750-1250	750-1500	5000-12500	750-1500	100-400
D_{min} частиц, улавливаемых с высокой эффективностью, мкм	50-40	40-30	25-8	5-2	1-0,1	0,1	1,0-0,25
Максимально допустимая температура газа, °С	Определяется материалом, из которого изготовлен аппарат					Определяется материалом фильтрующей перегородки	Определяется свойствами пыли и составом газа
Нижняя предельная температура газа	Выше точки росы			Любая		Выше точки росы	
Взрыво- и огнеопасность	Незначительная			Минимальная		Большая	

В целом, система очистки воздуха и газов может содержать оборудование нескольких типов, соединенное в последовательную цепочку по мере повышения эффективности пылеулавливания.

4.2 Основные характеристики пылеуловителей

К основным характеристикам оборудования для очистки пылегазовых потоков от взвешенных частиц относятся эффективность (степень) очистки воздуха от пыли; гидравлическое сопротивление; стоимость очистки.

К общим параметрам пылеуловителей относят их производительность по очищаемому газу и энергоёмкость, определяемую величиной затрат энергии на очистку 1000 м³ газа.

При оценке эффективности работы пылеуловителей принимают во внимание:

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

Эффективность работы пылеуловителей характеризуется **коэффициентом очистки η** , который определяется как отношение количества уловленной пыли к количеству пыли, поступающей в пылеуловитель

$$\eta = \frac{M_{ул}}{M_{вх}} = \frac{M_{вх} - M_{вых}}{M_{вх}} = \frac{M_{ул}}{M_{ул} + M_{вых}}, \quad (4.1)$$

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

Величина, дополняющая коэффициент очистки пылеуловителя до единицы, называется **коэффициентом проскока $K_{пр}$**

$$K_{пр} = 1 - \eta = \frac{M_{вых}}{M_{вх}} = \frac{M_{вых}}{M_{ул} + M_{вых}}. \quad (4.2)$$

Эффективность пылеулавливания можно выразить и через концентрации пыли в исходном $C_{вх}$ (мг/м³) и очищенном $C_{вых}$ (мг/м³) газах

$$\eta = \frac{C_{вх} \cdot V_{вх} - C_{вых} \cdot V_{вых}}{C_{вх} \cdot V_{вх}} = 1 - \frac{V_{вых} \cdot C_{вых}}{V_{вх} \cdot C_{вх}}, \quad (4.3)$$

где $V_{вх}$, $V_{вых}$ – объём газа на входе в пылеуловитель и выходе из него, м³.

Эффективность пылеулавливания для частиц пыли различных размеров в одном и том же аппарате неодинакова. Обычно более крупные частицы улавливаются более эффективно. Поэтому степень пригодности того или иного аппарата для улавливания пыли с известным дисперсным составом характеризуют достигаемые с его помощью фракционные коэффициенты очистки при оптимальных условиях эксплуатации.

Фракционный коэффициент очистки $\eta_{фр}$ равен отношению количества пыли данной фракции, уловленной в аппарате $M_{фр.ул}$, к количеству входящей пыли той же фракции $M_{фр.вх}$

$$\eta_{фр.} = \frac{M_{фр.ул}}{M_{фр.вх}}. \quad (4.4)$$

Обычно фракционные коэффициенты очистки для различных пылеуловителей определяются экспериментально путём проведения соответствующих испытаний аппаратов.

Зная фракционный состав пыли и фракционные коэффициенты очистки данного пылеуловителя, можно определить общий коэффициент очистки аппарата из выражения

$$\eta_o = \frac{\eta_{фр.1} \cdot \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{фр.2} \cdot \Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_{фр.n} \cdot \Phi_n}{100}. \quad (4.5)$$

где $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ – содержание данной фракции во входящем продукте, %.

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

$$\eta_o = [1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_n)] \cdot 100, \% \quad (4.6)$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ – эффективность очистки каждого из аппаратов, входящих в каскад (в долях единицы).

В этом случае следует учитывать изменение фракционного состава пыли при переходе от одного аппарата к другому. Содержание данной фракции на входе во второй аппарат можно определить по формуле

$$\Phi_{2вх} = \Phi_{1вых} = \Phi_{1вх} \cdot \frac{100 - \eta_{фр}}{100 - \eta_1}, \quad (4.7)$$

где $\Phi_{1вх}$ и $\Phi_{1вых}$ – содержание данной фракции на входе в первый аппарат и на выходе из него, %;

η_1 – общий коэффициент очистки в первом аппарате.

$\eta_{фр}$ – фракционный коэффициент очистки данной фракции в первом аппарате.

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

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

Производительность характеризуется количеством воздуха, которое очищается за 1 час. Аппараты, в которых воздух очищается при прохождении через фильтрующий слой, характеризуются удельной воздушной нагрузкой, т. е. количеством воздуха, которое проходит через 1 м² фильтрующей поверхности за 1 час.

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

$$H = A \cdot V_2^n, \quad (4.8)$$

где V_2 – скорость движения воздуха через аппарат, м/с;

A , n – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем и зависящие от конструкции аппарата.

Расход энергии зависит в значительной мере от гидравлического сопротивления аппарата. В электрофильтрах электроэнергия расходуется в основном на создание электростатического поля. Расход электроэнергии при одноступенчатой очистке находится в пределах от 0,035 до 1,0 кВт·ч на 1000 м³ воздуха.

Удельные затраты энергии на удаление дисперсных примесей возрастают пропорционально снижению концентрации взвешенных в потоке частиц, поскольку степень очистки в пылеулавливающих аппаратах практически не зависит от начальной концентрации пыли. В дополнение к этому затраты растут и с уменьшением размеров частиц.

Стоимость очистки является важнейшим показателем, так как характеризует экономичность очистки. Она зависит от многих факторов: капитальных затрат на оборудование, эксплуатационных расходов и др. Стоимость очистки воздуха в различных аппаратах значительно отличается. Как правило, более эффективная очистка обходится значительно дороже.

Если стоимость очистки определенного количества воздуха в таком сравнительно простом аппарате, как циклон большой производительности, принять за 100%, то стоимость очистки такого же количества воздуха в батарейном циклоне составит 120%, в циклоне с водяной пленкой – 130%, в электрофильтре – 220%, в тканевых фильтрах (в зависимости от типа) от 260 до 280%. Двухступенчатая очистка по схеме батарейный циклон – электрофильтр стоит 330% [21].

Вопросы для самоконтроля.

1. Перечислите основные этапы процесса обеспыливания воздуха.
2. Какие способы отделения взвешенных частиц от взвешивающей среды Вы знаете?
3. На какие группы можно разделить пылеуловители в зависимости от основного механизма улавливания, используемого в аппарате?
4. Укажите классы пылеуловителей в зависимости от группы дисперсности пыли?
5. Какие параметры относятся к основным характеристикам оборудования для очистки пылегазовых потоков?
6. Чем характеризуется эффективность работы пылеуловителей?
7. Как определяется фракционный коэффициент очистки?
8. Как определяется суммарная эффективность очистки при последовательной установке нескольких аппаратов?
9. Какими параметрами характеризуется производительность пылеуловителей?
10. Как определяется гидравлическое сопротивление пылеулавливающего аппарата?

Глава 5

ГРАВИТАЦИОННО-ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

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

Скорость удаления частиц пропорциональна осаждающей силе. Из-за очень малого веса мелких частиц гравитационное осаждение оказывается слишком медленным и малоэффективным процессом для частиц размером менее 100 мкм. При использовании инерционного эффекта скорость улавливания резко повышается. Благодаря этому можно уменьшить размер оборудования и расширить диапазон эффективного улавливания до частиц размером около 20 мкм. Для некоторых циклонов предельный размер улавливаемых частиц составляет 5-10 мкм [21].

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

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

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

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

Пылеуловители рассматриваемого типа используются для первичного удаления грубых частиц газового потока. В большинстве случаев защиты воздуха от загрязнения требуется улавливание гораздо более мелких частиц (размером около 1 мкм), поэтому для окончательной очистки воздуха необходимо применять пылеуловители других типов. Однако, гравитационно-инерционные пылеуловители

можно использовать как предварительные, располагая их последовательно с устройствами других типов, чтобы уменьшить нагрузку на последние. Это особенно необходимо при сильно запыленных газовых потоках.

5.1 Пылеосадительные камеры

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

Для достижения приемлемой эффективности очистки газов данными устройствами необходимо, чтобы частицы находились в пылеосадительных аппаратах возможно более продолжительное время, а скорость движения пылевого потока была незначительной. Обычно средняя скорость движения газов в пылеосадительных камерах составляет 0,2-3 м/с. Следовательно, данное оборудование относится к категории экстенсивного оборудования, рабочие объёмы таких аппаратов весьма значительны, что требует больших производственных площадей.

К преимуществам пылеосадительных камер можно отнести их незначительное гидравлическое сопротивление (50-300 Па), возможность их применения при высокой запылённости воздушного потока.

Эффективность очистки газов в пылеосадительных камерах составляет 40-60%.

Приближенный расчёт пылеосадительных камер сводится к определению площади осаждения (площади дна камеры или полок) по заданному размеру частиц пыли. При этом принимают ряд допущений: пыль равномерно распределена по сечению камеры и состоит из шарообразных частиц, оседающих в соответствии с законом Стокса; скорость движения пыли и газов не меняется по сечению камеры; осевшая пыль не уносится из камеры.

Рассмотрим движение частиц пыли в пылегазовом потоке, проходящем через пылеосадительную камеру (рис. 5.1).

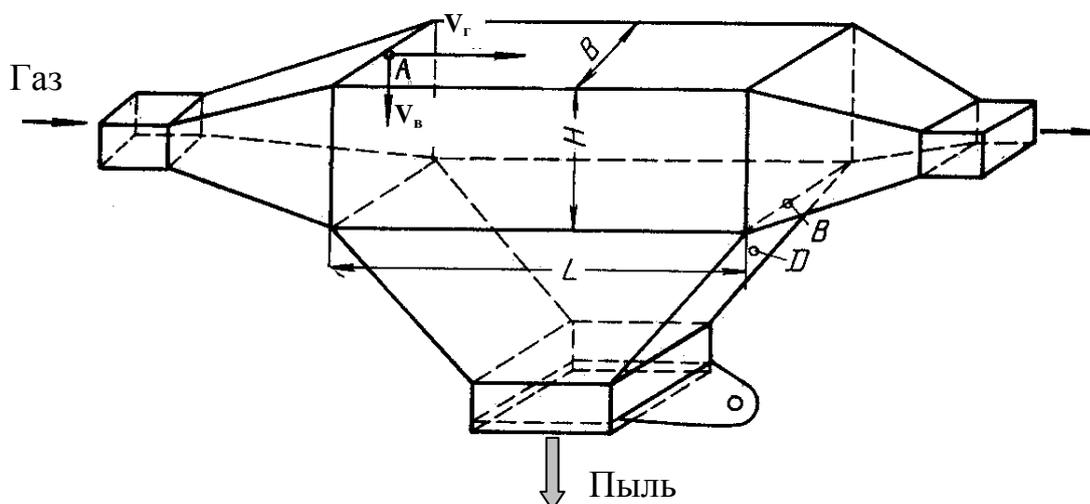


Рисунок 5.1 – Пылеосадительная камера

Допустим, что частица имеет шарообразную форму и на её падение не оказывают влияние другие частицы. В камере частица падает со скоростью витания V_6 под действием сил тяжести и сопротивления газа и одновременно увлекается потоком газа со скоростью V_2 . Условие эффективного улавливания в камере частиц граничной крупности следующие

$$t_1 \leq t_2, \quad (5.1)$$

где t_1 – время падения частицы в камере, с;

t_2 – время перемещения частицы от входного до выходного патрубка камеры, с.

Частица будет уловлена в камере, если она достигнет конической части камеры или дна раньше, чем будет вынесена газовым потоком из камеры. Наибольший путь проходит частица, находящаяся в верхней части камеры (точка А). Время падения такой частицы

$$t_1 = \frac{H}{V_6}, \text{ с}, \quad (5.2)$$

где H – высота камеры, м.

Пренебрегая плотностью воздуха ($\Delta=1,23 \text{ кг/м}^3$), скорость витания частицы при ламинарном режиме движения можно определить из выражения (1.1)

$$V_6 = \frac{d_q^2 \rho_q g}{18\mu}, \text{ м/с}, \quad (5.3)$$

где d_q – диаметр граничного зерна, м;

μ – вязкость воздуха, Па·с;

ρ_q – плотность частиц, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Время прохождения частицы через камеру длиной L при скорости потока V_2

$$t_2 = \frac{L}{V_2}, \text{ с}. \quad (5.4)$$

Тогда, с учетом условия эффективного улавливания (5.1)

$$\frac{H}{V_6} = \frac{L}{V_2}. \quad (5.5)$$

Подставляя в полученное равенство значение скорости витания (5.3), получим

$$\frac{H18\mu}{d_q^2 \rho_q g} = \frac{L}{V_2}. \quad (5.6)$$

Средняя скорость движения газов V_2 (м/с) в камере составит

$$V_2 = \frac{Q_2}{HB \times 3600}, \text{ м/с}, \quad (5.7)$$

где Q_2 – расход газа через камеру, м³/ч;

B – ширина камеры, м.

Подставив полученное выражение V_2 в формулу (5.6), получим

$$\frac{H18\mu}{d_c^2\rho_c g} = \frac{LHB3600}{Q_2}. \quad (5.8)$$

Обозначим $S=L\cdot B$ – площадь камеры, м^2 .

Преобразуя полученное выражение (5.8), найдем диаметр граничного зерна, улавливаемого в камере

$$d_c = \sqrt{\frac{18\mu Q_2}{3600S\rho_c g}}, \text{ м}. \quad (5.9)$$

Габаритные размеры камеры, необходимые для гравитационного осаждения частиц крупнее заданного размера d_c , принимаются из конструктивных соображений, с учетом требуемого соотношения площади и высоты.

Из формулы (5.9) следует, что решающую роль при гравитационном осаждении играет площадь дна камеры, увеличение которой существенно улучшает условия осаждения. Уменьшение высоты камеры без увеличения площади дна камеры ничего не даёт, так как одновременно уменьшается площадь поперечного сечения камеры, а, следовательно, растёт скорость воздуха и сокращается время пребывания частиц в камере.

5.2 Инерционные пылеуловители

Принцип действия инерционного пылеуловителя основан на том, что при изменении направления движения потока запыленного воздуха частицы пыли под действием сил инерции отклоняются от линии тока и выделяются из потока.

Инерционные пылеуловители улавливают крупную пыль размером 20-30 мкм и более. Их эффективность обычно находится в пределах 60-85%. Точное значение зависит от многих факторов: дисперсности пыли и её свойств, скорости потока, конструкции аппарата и других. По этой причине инерционные аппараты применяют обычно на первой ступени очистки с последующим обеспыливанием воздуха в более совершенных аппаратах. Преимуществом всех инерционных пылеуловителей является простота устройства и невысокая стоимость аппарата.

Схемы действия *простейших инерционных пылеуловителей* приведены на рис. 5.2.

В пылеуловителе с вертикальной отражательной перегородкой (рис. 5.2, а) запылённый поток воздуха, встречая на своём пути преграду, огибает её, а твёрдые частицы по инерции сохраняют первоначальное движение и выпадают из потока на дно пылеуловителя. Такие пылеуловители имеют большее гидравлическое сопротивление, чем пылесадительные камеры. Уменьшение гидравлического сопротивления достигается при использовании инерционных пылеуловителей, обеспечивающих более плавное изменение направления потока (рис. 5.2, б).

Эффективность пылеулавливания повышается, если частицам сообщить дополнительный момент движения, вектор которого направлен вниз и совпадает с

вектором гравитационных сил. Такой эффект используется в инерционных пылеуловителях с центральным подводом газа (рис. 5.2, в).

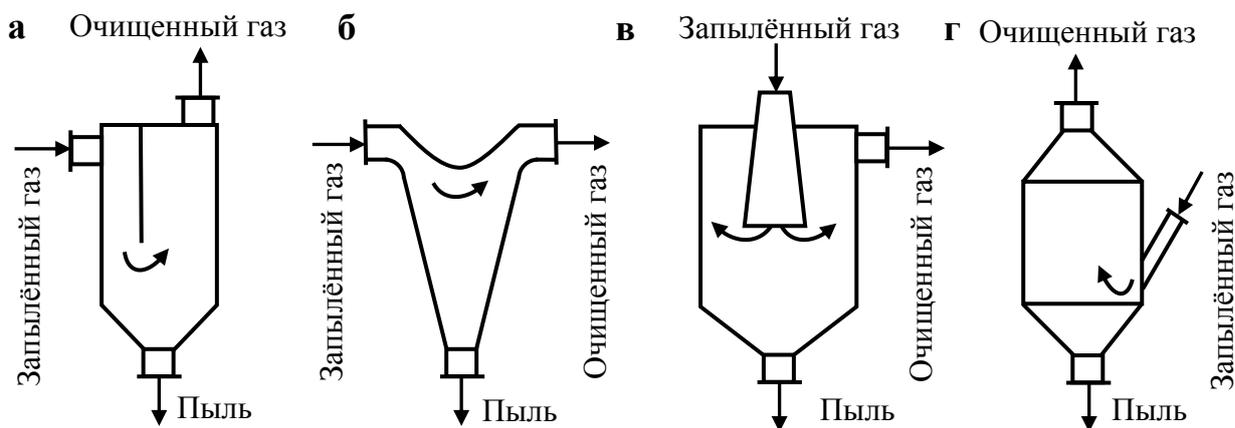


Рисунок 5.2 – Пылеуловители инерционного действия:

а – с вертикальной отражательной перегородкой; б – с плавным поворотом газового потока; в – с центральным подводом газа; г – с боковым подводом газа

Запылённый газовый поток направляется сначала вниз по расширяющемуся конусу, а затем поворачивает на 180° и выводится сверху аппарата. Скорость газа на входе в аппарат достигает 10-20 м/с. Расширяющийся конус позволяет постепенно снизить скорость газового потока и препятствует вторичному уносу частиц. Потеря скорости при входе в большой объём внутренней камеры пылеуловителя и поворот газового потока создают необходимые условия для выделения крупных частиц пыли из потока газа и осаждения их под действием сил инерции и силы тяжести на дно пылеуловителя. Инерционные силы, действующее на частицы пыли при таком способе подачи, обеспечивают дополнительное ускорение порядка $g/3$ [31].

Аналогичный эффект используется и в инерционных пылеуловителях с боковым подводом газа (рис. 5.2, г). Запылённый воздух подводится в аппарат под углом 60° к его вертикальной оси, поэтому и угол поворота газового потока составляет 120° .

Скорость потока воздуха во внутренней части данных типов пылеуловителей должна находиться в пределах 0,6-1,0 м/с. Повышение этой скорости приводит к ухудшению пылеосаждения, а снижение – к неоправданному увеличению габаритов пылеуловителей.

Обычно эффективность простых инерционных пылеуловителей определяется приближенно с учётом действия только силы тяжести. Если скорость витания частиц пыли больше скорости подъёма газа в пылеуловителе, то частицы выпадают в бункер, а если меньше – будут выноситься из пылеуловителя. Зная дисперсный состав пыли и граничную крупность разделения, можно подсчитать эффективность обеспыливания.

Принцип резкого изменения направления газового потока при столкновении с решеткой, состоящей из наклонных пластин, использован в пылеуловителях жалюзийного типа различной конструкции [23, 30, 31]. Эти аппараты используются

в качестве золоуловителей для очистки дымовых газов электростанций и промышленных котельных, для предварительной очистки газов перед циклонами.

Схема *жалюзийного пылеуловителя* показана на рисунке 5.3, а. С помощью жалюзийной решётки, установленной в газоходе и состоящей из ряда наклонных пластин, поток газа делится на две части. Большая часть газа (90-95%) огибает пластины и, частично освобождаясь при этом от пыли, продолжает двигаться дальше в прежнем направлении. меньшая часть газа (10-5%), в которой сосредоточена основная масса содержащейся в газе пыли, отводится для очистки в циклон, после чего присоединяется к основному потоку газа. Движение газа через циклон осуществляется главным образом за счёт перепада давления на жалюзийной решётке.

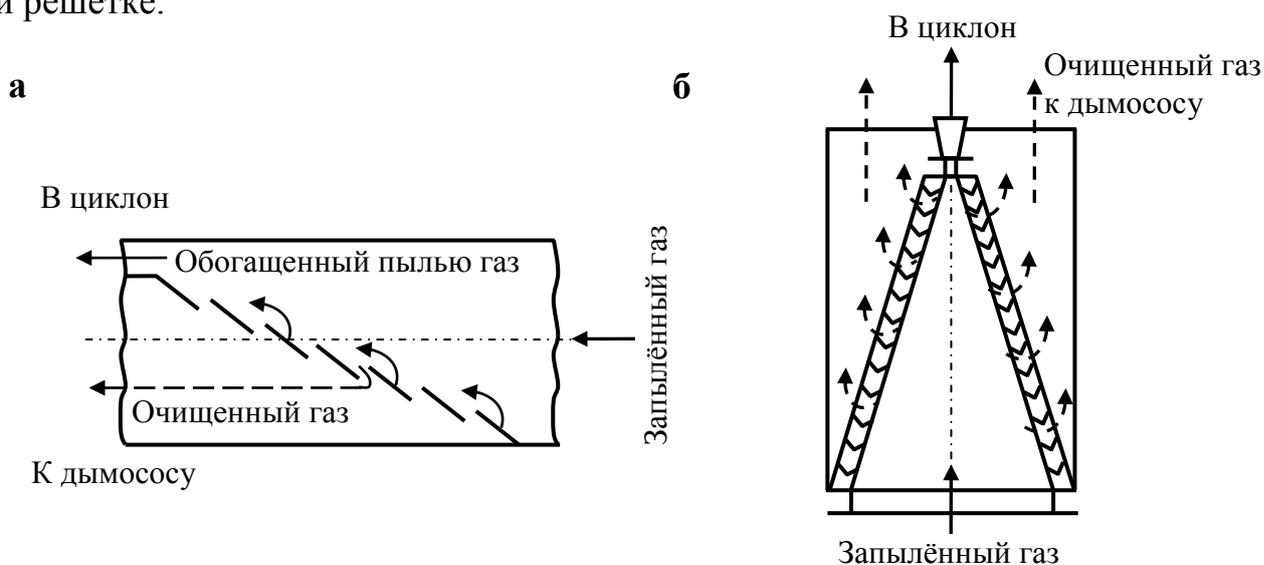


Рисунок 5.3 – Жалюзийные пылеуловители:

а – жалюзийный пылеуловитель; б – схема жалюзийного золоуловителя ВТИ

Жалюзийный золоуловитель ВТИ с решётками, набираемыми из стальных уголков, по конструкционному оформлению и методам расчёта основных эксплуатационных характеристик являются наиболее отработанными аппаратами рассматриваемого типа. Существуют различные варианты золоуловителей ВТИ, предназначенные для установки в вертикальных газоходах при движении запылённых газов снизу вверх или сверху вниз, а также в горизонтальных газоходах. Число лопастей из уголков 40x40 мм в их решётках может составлять от 11 до 75 штук, ширина входной камеры $B = 209-1425$ мм при высоте решётки $H = 595-4038$ мм [23].

На рисунке 5.3, б показан вариант жалюзийного золоуловителя ВТИ, установленный в газоход основанием навстречу потоку запылённого воздуха. Основание золоуловителя полностью перекрывает сечение газохода, вследствие чего запылённый воздух направляется во внутреннюю часть аппарата. Основная масса воздуха проходит через жалюзийную решётку. Частицы пыли, продолжая по инерции двигаться вперед, вместе с оставшимся потоком воздуха удаляются из золоуловителя через центральный выходной патрубок и направляется в циклон, а затем – в дымоход.

Скорость газа на входе в золоуловитель составляет 10-20 м/с. Скорость газа

на входе в циклон примерно на 25% выше скорости подвода газа к решётке.

Поскольку жалюзийные пылеуловители состоят из жалюзийной решётки и отсосного пылеуловителя (циклона), эффективность улавливания в нём частиц пыли зависит от эффективности самой решётки, эффективности циклона и доли отсасываемого в него газа. Если обозначить через φ относительную долю газа, направляемого с пылевым концентратом, то степень очистки газа в жалюзийном пылеуловителе определяется по формуле

$$\eta = \eta_u [1 - (1 - \varphi)(1 - \eta_p)] , \quad (5.10)$$

где η_u – степень очистки газов в отсосном циклоне;

η_p – степень очистки газов в решётке.

Выражение (5.10) справедливо при значениях φ не менее 0,05-0,10, так как при $\varphi = 0$ степень очистки газов в жалюзийном аппарате также будет равна нулю.

Для приблизительных расчётов степень очистки газов в жалюзийных пылеуловителях можно использовать выражение

$$\eta = 0,8\eta_p . \quad (5.11)$$

Прямоточный инерционно-вихревой сепаратор представляет собой аппарат, состоящий из последовательно уменьшающихся колец, расположенных на расстоянии друг от друга. Система заканчивается соплом определённого диаметра. Кольца имеют строго определённый профиль с острой задней кромкой. Отделение частиц пыли от газа происходит за счёт инерционного пролёта частиц мимо колец по направлению к соплу. При столкновении с кольцами частицы отбрасываются в центр потока, а малоинерционный газ вытекает через зазоры между кольцами. Прямоточный сепаратор обеспечивает отделение от газовой смеси не менее 95% твёрдых взвешенных частиц пыли размером от 1 до 1500 мкм.

Для обеспечения эффективной работы сепаратора в систему пылеочистки включены вентиляторы и пылеулавливающее устройство (циклон). Принцип работы системы показан на рисунке 5.4.

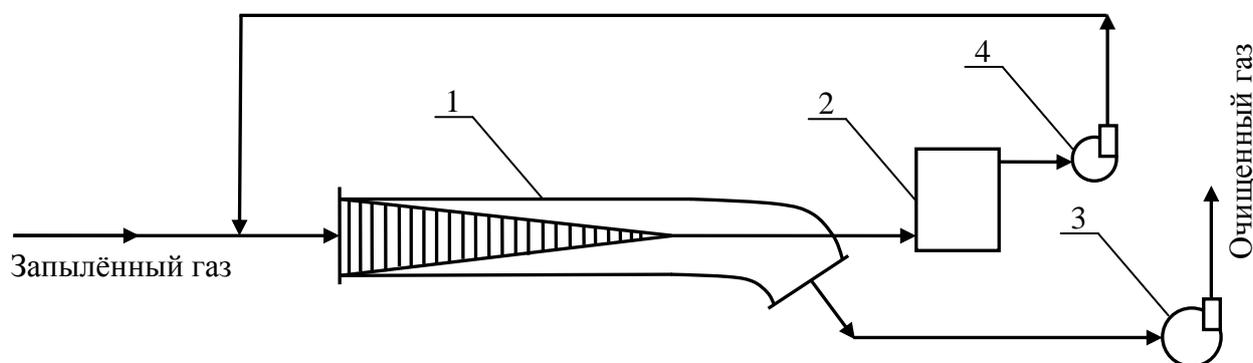


Рисунок 5.4 – Схема работы прямоточного инерционно-вихревого пылеуловителя:
1 – инерционно-вихревой пылеуловитель; 2 – пылеулавливающее устройство, 3 – вентилятор основной системы; 4 – вентилятор байпасной линии

Запылённый газ поступает в прямоточный сепаратор 1 с определённой скоростью за счёт разрежения, создаваемого в системе основным вентилятором 3. Очищенный газ проходит через основной вентилятор и выбрасывается в атмосферу. Газ с концентратом пыли проходит через сопло сепаратора и поступает в пылеулавливающее устройство 2. Не полностью очищенный газ проходит через вентилятор байпасной линии 4 и возвращается в начало схемы. Поскольку объём запылённого газа на выходе из прямоточного сепаратора составляет всего лишь 5÷10% от общего объёма поступающего на очистку газа, то небольшой добавленный на входе объём значительно не изменит равновесие системы.

Преимуществами систем очистки газов с использованием прямоточного сепаратора являются малые габариты и материалоемкость, высокая износостойкость, работа в широком диапазоне температур и коррозионной активности сред.

Технические характеристики стандартного ряда прямоточных инерционно-вихревых пылеуловителей приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Технические характеристики прямоточных инерционно-вихревых пылеуловителей [32]

Наименование показателя	Единица измерения	ПС-200	ПС-400	ПС-600
Производительность	м ³ /ч	2000-6000	15000-40000	45000-85000
Гидравлическое сопротивление	Па	От 1000 до 4000		
Диаметр	мм	250	530	710
Длина	мм	2350	3700	5100
Масса	кг	73	254	435

5.3 Циклоны

Циклоны широко применяются для очистки от пыли вентиляционных и технологических выбросов во всех отраслях народного хозяйства.

Они имеют следующие преимущества:

- отсутствие движущихся частей в аппарате;
- надежное функционирование при температурах газов вплоть до 500°С без каких-либо конструктивных изменений (если предусматривается применение более высоких температур, то аппараты можно изготавливать из специальных материалов);
- возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями;
- пыль улавливается в сухом виде;
- гидравлическое сопротивление аппаратов почти постоянно;
- аппараты успешно работают при высоких давлениях газов;
- пылеуловители весьма просты в изготовлении;
- рост запыленности газов не приводит к снижению фракционной эффективности очистки.

Циклоны обеспечивают фракционную эффективность очистки на уровне 80-95% от частиц пыли размером более 10 мкм. Циклоны в основном рекомендуются

использовать перед высокоэффективными аппаратами пылеочистки (тканевыми и электрофильтрами). В ряде случаев циклоны обеспечивают эффективность очистки, достаточную для выброса газов или воздуха в атмосферу.

5.3.1 Принцип действия циклонного пылеуловителя

Принцип действия циклона (рис. 5.5) основан на использовании центробежных сил.

Пылегазовый поток с большой скоростью по касательной поступает в цилиндрическую часть корпуса циклона, и совершает движение по нисходящей спирали. Под действием центробежной силы, возникающей при вращательном движении потока, пылевидные частицы перемещаются к стенкам корпуса циклона и выпадают из потока. Газ, освобождённый от пыли, продолжая вращаться, совершат поворот на 180° и выходит из циклона через расположенную по оси выхлопную трубу.

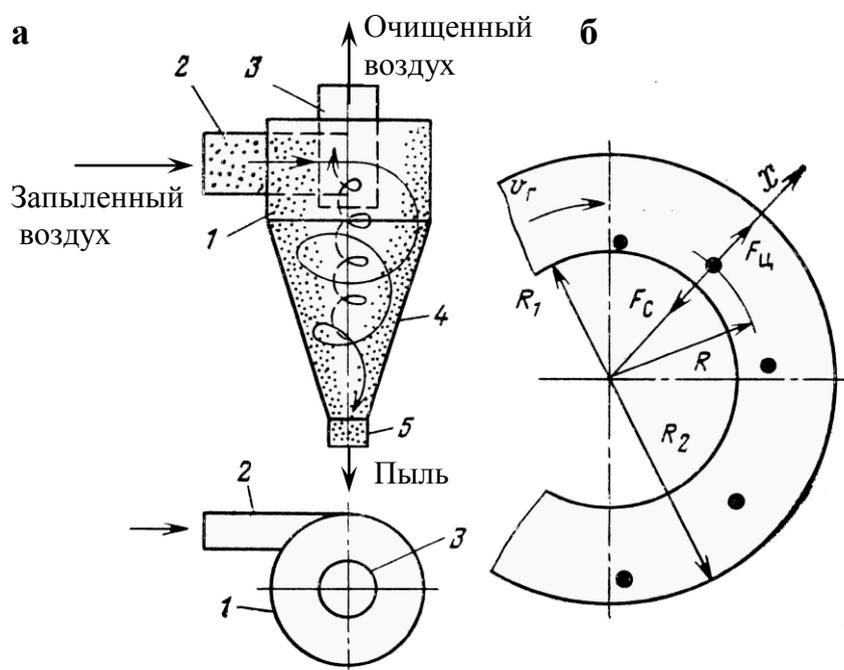


Рисунок 5.5 – Циклон: а – конструкция; б – схема движение частиц
1 – цилиндрическая часть, 2 – входной патрубок, 3 – выхлопная труба,
4 – коническая часть, 5 – пылевой насадок

Частицы пыли, достигшие стенок корпуса, под действием перемещающегося в осевом направлении вращающегося потока и сил тяжести движутся по направлению к пылевому насадку и через него попадают в бункер для сбора пыли.

Процессы, происходящие в циклонах, весьма сложны и зависят от многих факторов. Поэтому для теоретических расчётов приходится делать ряд допущений:

1. Пылевидные частицы, поступающие с воздушным потоком в циклон, имеют сферическую форму.
2. При входе в циклон частицы равномерно распределены по сечению.

3. Частицы, достигшие стенок циклона, осаждаются (в действительности часть этих осажденных частиц будет захвачена и вынесена из циклона вследствие турбулизации потока газа).

4. Не учитывается коагуляция пылевидных частиц в циклоне.

С учетом этих допущений вычислим минимальный диаметр частиц, улавливаемых в циклоне.

При движении во вращающемся криволинейном потоке газа частицы пыли находятся под действием силы тяжести, центробежной силы и силы сопротивления газового потока. Для частиц, размеры которых соответствуют минимальному диаметру эффективно улавливаемой в циклоне частицы, значением силы тяжести при расчётах можно пренебречь. Скорость частиц пыли в циклоне можно считать равной скорости вращения газового потока.

Центробежная сила, действующая на частицу массой m , может быть определена из выражения

$$F_{ц} = \frac{mV_c^2}{R} = \frac{\pi d^3}{6} \rho \frac{V_c^2}{R}, \quad (5.12)$$

где V_c – тангенциальная скорость пылевой частицы, равная скорости газового потока при входе в циклон, м/с;

R – расстояние от оси циклона до частицы, м;

d – диаметр частицы, м;

ρ – плотность частицы, кг/м³.

Под влиянием центробежной силы частица приобретает скорость в радиальном направлении, встречая при своём движении сопротивление газового потока. При равенстве центробежной силы и силы сопротивления потока частица пыли будет двигаться с постоянной радиальной скоростью V_p , которую можно определить на основании уравнения

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho \frac{V_c^2}{R} = 3\pi d \mu V_p, \quad (5.13)$$

где μ – динамическая вязкость газа, Па·с.

Отсюда предельная скорость, которую может достигнуть частица пыли в радиальном направлении, равна

$$V_p = \frac{d\rho V_c^2}{18R\mu}. \quad (5.14)$$

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

где R_1 – радиус выхлопной трубы циклона, м;

R_2 – радиус цилиндрической части циклона, м;

Время, затрачиваемое частицей на прохождение этого пути

$$t = \frac{R_2 - R_1}{V_p}. \quad (5.15)$$

В формуле (5.14) величина R – переменная.

Она изменяется в пределах $R_1 < R < R_2$, и её среднее значение можно принять как

$$R = \frac{R_2 + R_1}{2}.$$

Подставляя это значение R в выражение (5.14), получим

$$V_p = \frac{d\rho V_2}{18(R_1 + R_2)0,5\mu} = \frac{d\rho V_2}{9(R_1 + R_2)\mu}. \quad (5.16)$$

Подставив выражение (5.16) в формулу для определения времени, затрачиваемого частицей на прохождение до внутренней стенки циклона (5.15), получим

$$t = \frac{R_2 - R_1}{V_p} = \frac{9(R_2 - R_1)(R_2 + R_1)\mu}{V_2^2 d^2 \rho} = \frac{9\mu(R_2 - R_1)^2}{V_2^2 d^2 \rho}. \quad (5.17)$$

Диаметр частицы, успевшей за время t пройти путь $R_2 - R_1$, будет равен

$$d = \frac{3\sqrt{(R_2^2 - R_1^2)\mu}}{V_2\sqrt{\rho t}}. \quad (5.18)$$

Из выражения (5.18) следует, что эффективность работы циклона возрастает с увеличением скорости газового потока на входе в циклон V_2 , размера d и плотности ρ пыли и уменьшается с увеличением вязкости μ газа и размеров циклона.

Однако зависимость между эффективностью обеспыливания в циклоне и скоростью потока во входном патрубке не является прямо пропорциональной. Установлено, что увеличение эффективности происходит до определенного предела возрастания скорости потока и затем начинает снижаться. Это обусловлено тем, что при скорости потока выше предельной воздействие восходящего вращательного потока на нисходящий становится весьма значительным, что приводит к захвату и уносу им частиц пыли.

Кроме того, эффективность очистки газа зависит и от конструкции принятого типа циклона.

5.3.2 Конструкции циклонов

Наибольшее распространение в промышленности получили циклоны, корпус которых имеет коническую и цилиндро-коническую форму. Используются также циклоны с обратным конусом (для улавливания волокнистых и абразивных частиц пыли) и цилиндрические. Однако, эффективность обеспыливания в них более низкая, чем в цилиндро-конических и конических.

Циклоны могут изготавливаться с «левым» и «правым» вращением газового потока. Обычно «правым» принято называть вращение потока в циклоне по часовой стрелке (если смотреть со стороны выхлопной трубы), «левым» – вращение потока против часовой стрелки. Направление вращения выбирают исходя из условий компоновки циклона в схеме, а также расположения циклонов в группе.

В зависимости от способа подведения воздуха к циклону различают циклоны с тангенциальным и спиральным подводом воздуха. При прочих равных условиях циклоны со спиральным подводом обладают более высокой эффективностью очистки.

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

На протяжении более чем столетней истории развития циклонов было разработано несколько десятков типов их конструкций. Только на территории бывшего СССР находили применение более 20 различных типов циклонов. Среди них наибольшее распространение получили циклоны НИИОГАЗ (научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов); ЛИОТ (Ленинградский институт охраны труда); СИОТ (Свердловский институт охраны труда) (рис. 5.6).

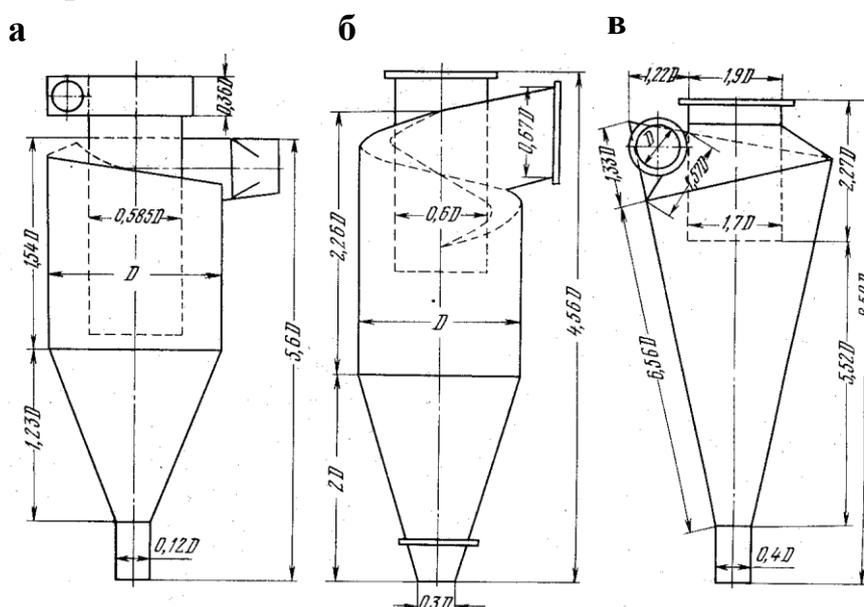


Рисунок 5.6 – Циклоны конструкции ЛИОТ (а); НИИОГАЗ (б) и СИОТ (в)

Характерной особенностью циклонов ЛИОТ является удлиненная цилиндрическая часть с глубоко введенной выхлопной трубой. Циклоны предназначены для сухой очистки газов, выделяющихся при сушке, обжиге, агломерации, сжигании топлива. Диаметр – 550-1890 мм, производительность – 1200-19200 м³/ч, эффективность очистки – 90%, рабочая среда – пыль до 10 мкм.

Циклоны СИОТ полностью лишены цилиндрической части. Выхлопная труба опущена в верхнюю часть конуса. Входной патрубок имеет треугольное сечение. Циклоны СИОТ применяют для очистки газов от сухой неволокнистой, неслипающейся пыли крупностью до 10 мкм. Диаметр циклонов – 700-1950 мм, производительность – 1500-10000 м³/ч, эффективность очистки – 90%.

Отличительной особенностью цилиндрико-конических циклонов конструкции НИИОГАЗ являются наклонный входной патрубок, сравнительно короткая выхлопная труба, а также малый угол раскрытия конической части. Наклон входного

патрубка и винтообразная верхняя крышка способствуют направлению вращающегося газового потока вниз, что снижает гидравлическое сопротивление циклона. На выхлопной трубе циклона иногда устанавливают улитку, раскручивающую вращающийся газовый поток. Эти циклоны характеризуются также постоянным отношением диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона, равному 0,59.

Существуют три типа циклонов конструкции НИИОГАЗа основной серии ЦН, различающиеся между собой углом наклона входного патрубка к горизонту:

а) ЦН-15 с углом наклона 15° , нормальный (рис. 5.7, а) и укороченный (ЦН-15у);

б) ЦН-11 с углом наклона 11° , с повышенной эффективностью при большем гидравлическом сопротивлении (рис. 5.7, б);

в) ЦН-24 с углом наклона 24° , с повышенной пропускной способностью при меньшей эффективности и сниженном гидравлическом сопротивлении. Используются для очистки газов от пылей со средним (медианным) диаметром более 20 мкм.

Циклоны ЦН-15У отличаются от циклона ЦН-15 меньшей высотой. По сравнению с ЦН-15 циклоны ЦН-15У имеют несколько худший коэффициент очистки, поэтому применение может быть оправдано только в тех случаях, когда имеются ограничения газоочистной установки по высоте.

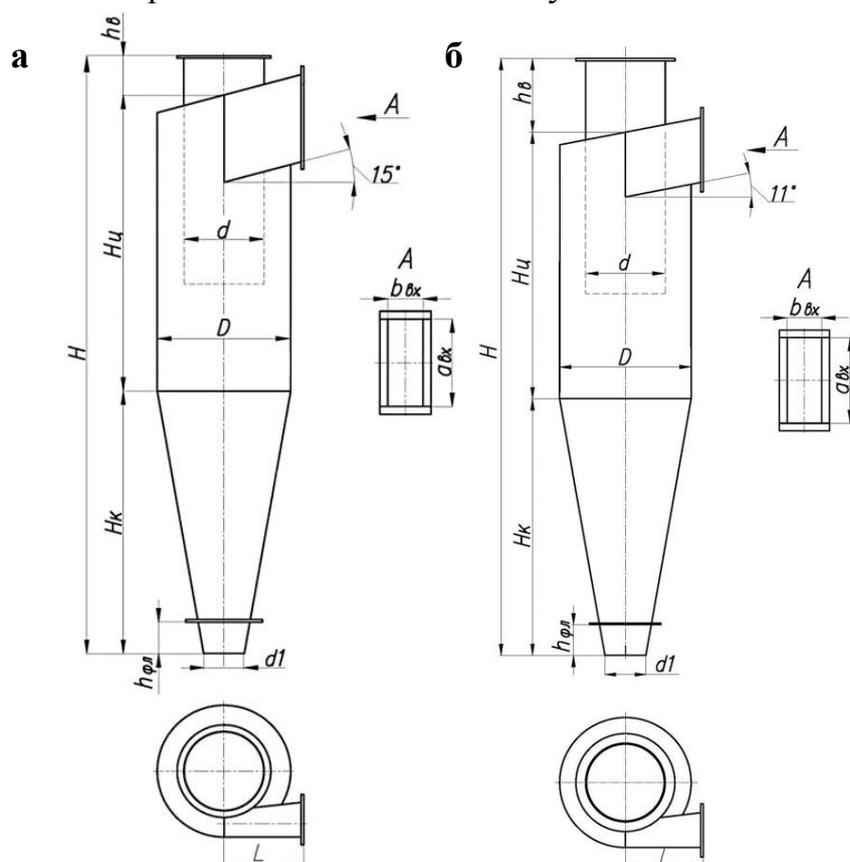


Рисунок 5.7 – Схемы циклонов ЦН-15 (а) и ЦН-11 (б)

Циклоны ЦН предназначены для отделения от газообразной среды взвешенных частиц сухой пыли, образующейся в различных помольных и дробильных установках, при транспортировании сыпучих материалов, а также летучей золы. Диаметр циклонов ЦН – 200-3000 мм, производительность – 280-114000 м³/ч. До-

пустимая запылённость газа: для слабо слипающейся пыли – не более 1000 г/м^3 , для средне слипающейся – до 250 г/м^3 .

Эффективность очистки циклонами ЦН зависит от диаметра и типа улавливаемых взвешенных твёрдых частиц. При увеличении диаметра циклона уменьшается эффективность очистки. Поэтому при больших объёмах газа и высоких требованиях к очистке газовый поток пропускают параллельно через несколько циклонов малого диаметра. Циклоны выбранного диаметра объединяются в группы по 2, 4, 6, 8 элементов с общим бункером.

Параметры циклонов ЦН приведены в таблице 5.2, их технические характеристики – в Приложении 3 [32, 33].

Таблица 5.2 – Параметры циклонов ЦН (в долях внутреннего диаметра циклона)

Наименование	ЦН-15	ЦН-15у	ЦН-24	ЦН-11
Угол наклона входного патрубка, град.	15	15	24	11
Высота входного патрубка	0,66	0,66	1,11	0,48
Высота выхлопной трубы	1,74	1,5	2,11	1,56
Высота цилиндрической части циклона, H_c	2,26	1,51	2,11	2,06
Высота конуса циклона, H_k	2	1,5	1,75	2,0
Высота внешней части выхлопной трубы, h_e	0,3	0,3	0,4	0,3
Общая высота циклона, H	4,56	3,31	4,26	4,38

К коническим циклонам конструкции НИИОГАЗ относятся аппараты СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М (рис. 5.8, табл. 5.3).

Таблица 5.3 – Параметры циклонов СК (в долях внутреннего диаметра циклона)

Наименование	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Внутренний диаметр выхлопной трубы	0,334	0,340	0,22
Высота заглублиения выхлопной трубы	0,535	0,515	0,4
Высота цилиндрической части циклона	0,535	0,515	0,4
Высота конической части циклона	3,0	2,110	2,6
Высота внешней части выхлопной трубы	0,2-0,3	0,2-0,3	0,3
Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия	0,334	0,229	0,18

Циклоны состоят из удлиненного конического корпуса с входным и выходным патрубками, спирального раскручивателя потока воздуха, а также затвора

для удаления скопившейся пыли. Для большего удобства монтажа и эксплуатации, а также совместимости с различными системами вентиляции эти устройства могут иметь правое или левое закручивание потока.

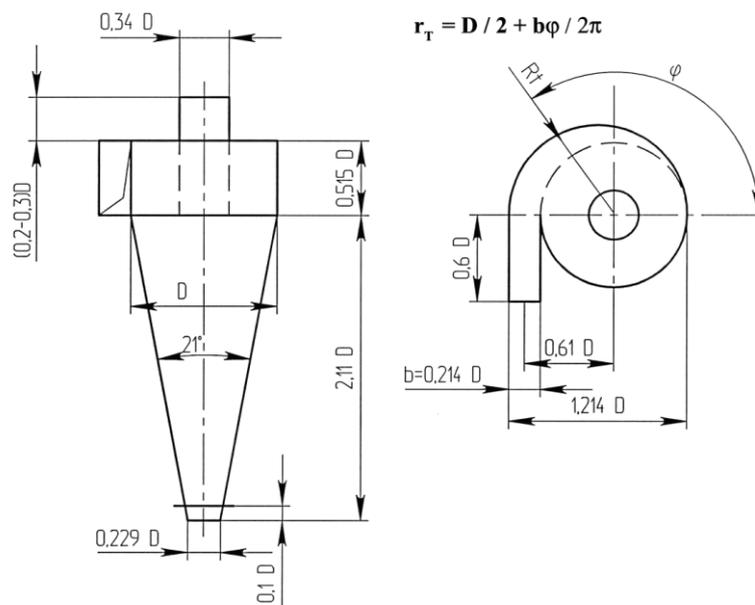


Рисунок 5.8 – Циклон спирально-конический СК-ЦН-34

Применяются для улавливания пылей, обладающих высокой абразивностью частиц или высокой слипаемостью. Допустимая запылённость газа: для слабо слипающихся пылей – не более 1000 г/м^3 , для средне слипающихся пылей – не более 250 г/м^3 . Температура очищаемого газа – до 250°C . Рекомендуемая скорость очищаемого газа на входе в циклон – $10\text{-}17 \text{ м/с}$. Диаметр – $400\text{-}3000 \text{ мм}$, производительность – $1100\text{-}63600 \text{ м}^3/\text{ч}$, эффективность очистки – до 97% .

Спирально-длинноконический циклон наиболее эффективный из серии конических циклонов с улиточным завихрителем при равных диаметрах корпуса и одинаковых гидравлических потерях. Технические характеристики циклонов серии СК и СДК приведены в Приложении 3 [32, 33].

Конические циклоны более эффективны, чем цилиндрико-конические циклоны серии ЦН, но требуют больших затрат на очистку газов, т.к. имеют большее гидравлическое сопротивление и меньшую производительность.

На рис. 5.9 представлены графики фракционной эффективности очистки газов от пыли в циклонах ЦН различных марок.

Наибольшее распространение в промышленности получили циклоны типа ЦН-15, которые обеспечивают достаточно высокую эффективность при умеренном гидравлическом сопротивлении.

В зависимости от производительности по газу и условий применения выбирают циклоны одиночного исполнения (диаметром от 300 до 1400 мм) или в виде группы из нескольких циклонов одинакового диаметра (от 300 до 1000 мм) с общим сборником и бункером (рис. 5.10). Циклоны в группе изготавливают с «левым» и «правым» вращением газового потока, одиночные – только с «правым» вращением. Исходя из компоновочных соображений, групповые циклоны изготавливают с

камерой очищенного газа в виде «улитки» или в виде сборника. Бункеры циклонов имеют пирамидальную форму.

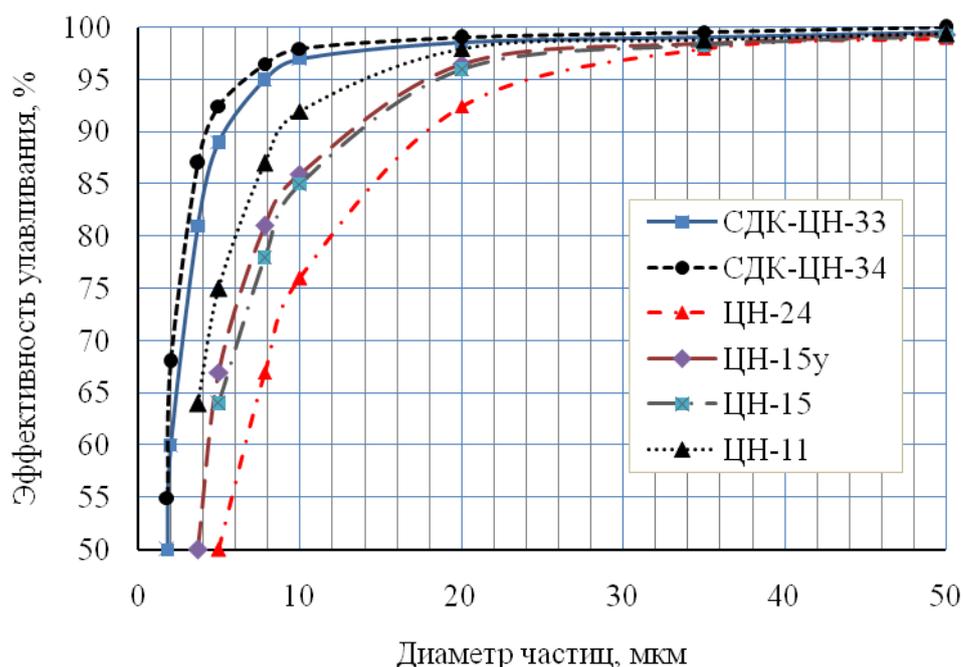


Рисунок 5.9 – Фракционная эффективность циклонов НИИОГАЗ

При работе циклонов должна быть обеспечена своевременная выгрузка пыли. При этом уровень пыли в бункерах должен быть не ниже плоскости, отстоящей от крышки бункера на расстоянии, равном половине диаметра циклона.

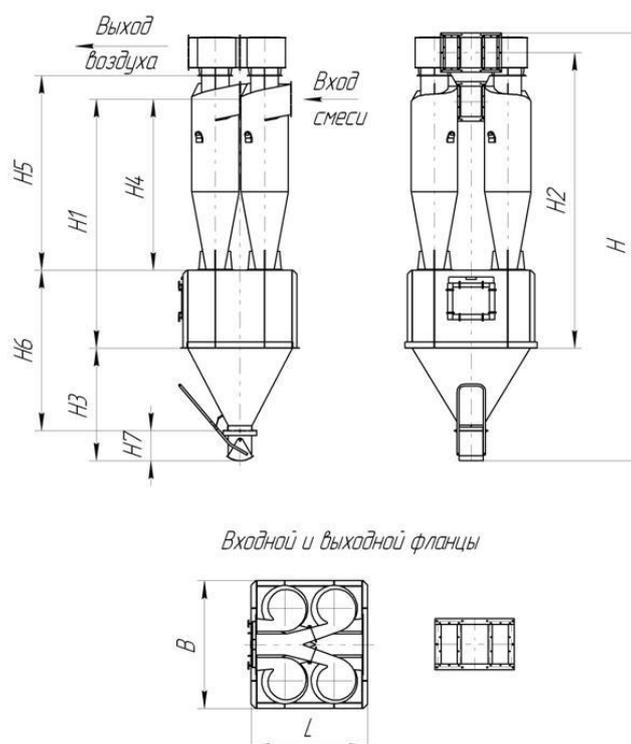


Рисунок 5.10 – Схема группового циклона ЦН-15-600x4УП

Обозначение установки циклона ЦН-15 содержит сведения о типе и основных размерах циклона и расшифровывается следующим образом, например ЦН-15-600х4УП: Ц – циклон; Н – конструкция циклона по нормали НИИОГАЗ; 15 – угол наклона входного патрубка относительно горизонтальной оси, в градусах; 600 – внутренний диаметр цилиндрической части циклона, в мм, 4 – количество циклонов в группе; У – Циклон ЦН-15 с камерой выхода очищенного газа в виде улитки; П – форма выполнения бункера для накопления пыли в виде пирамиды.

В последнее время для очистки газа и аспирационного воздуха от пыли с размером частиц более 10 мкм все большее применение находят циклоны со спиральным входом газа типа СЦН-40 (рис. 5.11). Они имеют наиболее высокую степень очистки по сравнению с циклонами ЦН-15 и СК-ЦН-34. Вынос пыли из циклона СЦН-40 в 2,5 раза меньше циклона ЦН-15 и в 1,5 раза меньше циклона СК-ЦН-34 при равных энергозатратах.

Высокая степень очистки достигнута за счёт повышения интенсивности вращательного движения газа в корпусе циклона и одновременного снижения скорости радиального стока в направлении к выхлопной трубе. Циклоны СЦН-40 меньше подвержены забиваемости и абразивному износу, просты в изготовлении и эксплуатации. Гидравлическое сопротивление циклона СЦН-40 при $t=20^{\circ}\text{C}$ составляет 1000-2000 Па. Условная скорость в сечении корпуса циклона – 1,3-1,9 м/с. Диаметр – 300-1200 мм, производительность – 330-7730 м³/ч, эффективность очистки – 95%.

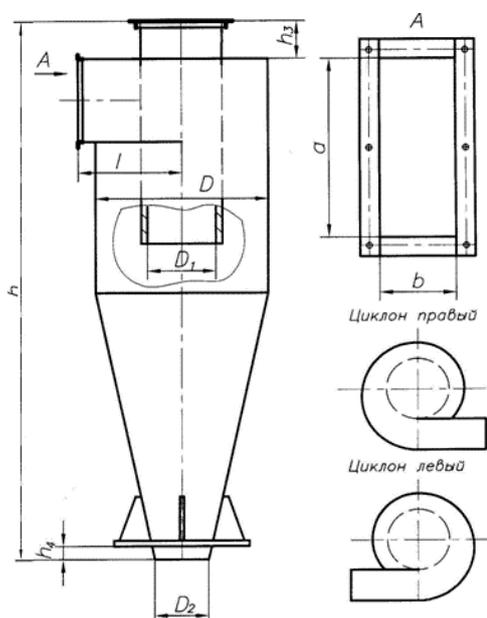


Рисунок 5.11 – Циклон СЦН-40

Циклоны СЦН-40 могут изготавливаться как правого, так и левого исполнения. Возможно батарейное изготовление из 4-х циклонов. Технические характеристики циклонов приведены в Приложении 3.

К одной из последних разработок НИИОГАЗ относятся циклоны СЦН-50, предназначенные для очистки газа от абразивной пыли [34]. Повышенная стойкость к абразивному износу достигнута за счет спирального ввода запыленного га-

за в циклон, удлинения цилиндрического элемента корпуса и диаметра выпускного отверстия. Срок службы данного циклона больше в 1,5-2,5 раза по сравнению с циклоном ЦН-15 при одинаковой производительности, гидравлическом сопротивлении и степени очистки. На тонких пылях степень очистки выше, унос пыли на 15-20% меньше.

Увеличенные, по сравнению с СЦН-40 входной и выходной патрубки, позволили разработчику снизить сопротивление циклона и увеличить производительность циклона СЦН-50 (Приложение 3).

5.3.3 Выбор и расчёт циклонов

Широкий диапазон типоразмеров циклонов ЦН позволяет подобрать циклоны, обеспечивающие необходимую эффективность очистки газовой среды при оптимальных удельных энергозатратах.

При одинаковой эффективности наиболее высокие технико-экономические показатели имеют циклоны ЦН-11. Циклоны ЦН-15 отличаются большей производительностью, более устойчивой работой на пылях, склонных к налипанию, поэтому их эксплуатация оправдана при очистке газов с высокой концентрацией мелкой пыли или улавливании средне и сильно слипающихся пылей.

При невысоких требованиях к качеству очистки и для очистки газов со средним медианным диаметром частиц более 20 мкм экономически рентабельно использование циклонов ЦН-24. При больших расходах газов и высокой концентрации пыли в газовом потоке применение циклонов ЦН-24 может быть рекомендовано в качестве первой ступени очистки, перед аппаратами, обеспечивающими высокую эффективность, например, перед циклонами СДК-ЦН-33, рукавными фильтрами или электрофильтрами.

Циклоны ЦН-15У имеют более низкие технико-экономические показатели, по сравнению с циклоном ЦН-15, и их использование может быть оправдано в тех случаях, когда не предъявляются высокие требования к качеству очистки и имеются ограничения габаритов по высоте.

Для очистки газов от мелкой пыли, со средним медианным диаметром 5-6 мкм, а также при высоких требованиях к качеству очистки следует использовать наиболее высокоэффективные спирально-длинноконические циклоны СДК-ЦН 33. При ограничениях по габаритам следует использовать спирально-конические циклоны СК-ЦН-34, имеющие также высокую эффективность при больших энергетических затратах. Модернизированные циклоны СК-ЦН-34М специально разрабатывались для использования в установках каталитического крекинга нефтепродуктов, дегидрирования бутана, а также в производстве технического углерода. Эти циклоны более энергоёмкие, но являются наиболее эффективными при очистке газов от мелкодисперсных пылей. Циклоны СК-ЦН-40 по эффективности незначительно уступают циклонам СДК-ЦН-33, но имеют меньшее гидравлическое сопротивление и меньшие габариты по высоте.

Определившись с типом циклона, приступают к его расчёту.

Для расчёта циклона необходимы следующие исходные данные:

- количество очищаемого газа при рабочих условиях $V_p, \text{ м}^3/\text{с}$;

- плотность газа при рабочих условиях ρ_r , кг/м³;
- динамическая вязкость газа при рабочей температуре μ_r , Па·с;
- дисперсный состав пыли, задаваемый двумя параметрами:
 - d_m , мкм – медианный размер частиц пыли (представляет такой размер, при котором количество частиц крупнее d_m , равно количеству частиц мельче d_m);
 - и $lg\sigma_q$ – стандартное (среднеквадратическое) отклонение логарифмов текущих диаметров частиц d от их среднего значения;
- запыленность газа C_{ex} , г/м³;
- плотность частиц пыли $\rho_{ч}$, кг/м³;
- требуемая эффективность очистки газа η .

Расчёт циклона проводится методом последовательных приближений в следующем порядке.

1. Задавшись типом циклона (с учётом V_p , C_{ex} и η), по таблице 5.4 определяют оптимальную скорость газа в аппарате ω_{opt} , м/с.
2. Определяют диаметр циклона при принятой ω_{opt} , м:

$$D = \sqrt{\frac{4V_p}{\pi\omega_{opt}}} \quad (5.19)$$

Таблица 5.4 – Параметры, определяющие эффективность циклонов

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
ω_{opt} , м/с	4,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0
d_{50}^T , мкм	8,5	4,5	3,65	2,31	1,95	1,13
$lg\sigma_\eta^T$	0,308	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

Примечание. Значения d_{50}^T в таблице соответствуют следующим условиям работы циклонов: средняя скорость газа в циклоне $\omega_T = 3,5$ м/с; диаметр циклона $D_T = 0,6$ м; плотность частиц $\rho_{ч,T} = 1930$ кг/м³; динамическая вязкость газа $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Полученное значение D округляют до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона $D_{ц}$ (табл. 5.5). Если расчётный диаметр циклона превышает его максимально допустимое значение, то необходимо применять два или более параллельно установленных циклона.

Таблица 5.5 – Типовые значения внутреннего диаметра циклона, м

$D_{ц}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
---------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

3. По выбранному диаметру циклона находят скорость движения газа в циклоне, м/с:

$$\omega = \frac{4V_p}{\pi n D_{ц}^2}, \quad (5.20)$$

где n – число циклонов.

Действительная скорость в циклоне не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15%:

$$100 \left| \frac{\omega - \omega_{opt}}{\omega_{opt}} \right| \leq 15 \%$$

4. Определяют коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона:

$$\xi = k_1 k_2 \xi_{500}, \quad (5.21)$$

где k_1 – поправочный коэффициент на диаметр циклона (табл. 5.6);

k_2 – поправочный коэффициент на запылённость газа (табл. 5.7)

ξ_{500} – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (табл. 5.8).

Таблица 5.6 – Поправочный коэффициент k_1 на диаметр циклона

Тип циклона	Значения k_1 для D , мм				
	150	200	300	450	500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24	0,85	0,90	0,93	1,0	1,0
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 5.7 – Поправочный коэффициент k_2 на запылённость газа

Тип циклона	Значение k_2 при $C_{вх}$, г/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,5
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15у	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Таблица 5.8 – Коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона

Тип циклона	Значения ξ_{500}		Тип циклона	Значения ξ_{500}	
	При выхлопе в атмосферу	При выхлопе в гидравлическую сеть		При выхлопе в атмосферу	При выхлопе в гидравлическую сеть
ЦН-11	245	250	СДК-ЦН-33	520	600
ЦН-15	155	163	СК-ЦН-34	1050	1150
ЦН-24	75	80	СК-ЦН-34М	-	2000

5. Определяют потери давления в циклоне, Па:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} = \xi \frac{\rho_{\Gamma} \omega^2}{2}, \quad (5.22)$$

где ρ_{Γ} и ω – соответственно, плотность и скорость газа в расчётном сечении аппарата;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления.

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

6. Эффективность очистки газа в циклоне:

$$\eta = 0,5[1 + \Phi(x)], \quad (5.23)$$

где $\Phi(x)$ – табличная функция от параметра x , равного:

$$x = \lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right) / \sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta}^T + \lg^2 \sigma_{\eta}^c}. \quad (5.24)$$

где d_{50} – диаметр частиц, реально осаждаемых с эффективностью 50% при рабочих условиях.

Для учёта влияния на величину d_{50} отклонения реальных условий работы от типовых (табл. 5.4 Примечание) используют соотношение:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D_u}{D_T}\right) \left(\frac{\rho_{\Gamma T}}{\rho_{\Gamma}}\right) \left(\frac{\mu}{\mu_T}\right) \left(\frac{\omega_T}{\omega}\right)}. \quad (5.25)$$

Полученное значение d_{50} должно быть меньше d_m (заданного). Если это не выполняется, то необходимо выбрать другой циклон с меньшим значением d_{50}^m .

Определив по формуле 5.24 значение x , находим значение нормальной функции распределения $\Phi(x)$ по данным Приложения 1.

Затем по формуле 5.23 определяют расчётное значение эффективности очистки газа в циклоне.

Если расчётное значение η окажется меньше необходимого по условиям допустимого выброса пыли в атмосферу, то нужно выбрать другой тип циклона с большим значением коэффициента гидравлического сопротивления. Для ориентировочных расчётов можно пользоваться формулой:

$$\frac{\xi_1}{\xi_2} = \left(\frac{1-\eta_1}{1-\eta_2} \right)^2 \frac{\omega_1 D_2}{\omega_2 D_1}, \quad (5.26)$$

где индекс 1 относится к расчётным, а индекс 2 – к требуемым значениям параметров циклона.

Пример.

Определить диаметр циклона для осаждения пыли диаметром $d_m = 20$ мкм, $lg \sigma_u = 0,468$ и плотностью $\rho_u = 2900$ кг/м³. Расход воздуха при рабочей температуре $V_p = 2475$ м³/ч. Температура воздуха – 70°C, $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6}$ Па·с, $\rho_0 = 1,293$ кг/м³ при $T = 273$ К. Концентрация входящей в циклон пыли – 5,0 г/м³. Требуемая эффективность очистки $\eta = 0,90$. Циклон работает на выхлоп в атмосферу.

Решение.

1. Выбираем циклон ЦН-11.

Для него оптимальная скорость газа $\omega_{opt} = 3,5$ м/с (табл.5.4).

2. Диаметр циклона: $D = \sqrt{\frac{4V_p}{\pi\omega_{opt}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2475}{3,14 \cdot 3,5 \cdot 3600}} = 0,50$ м.

Принимаем $D_u = 0,5$ м.

3. По выбранному диаметру циклона определяем действительную скорость газа:

$$\omega = \frac{4V_p}{\pi D_u^2} = \frac{4 \cdot 2475}{3,14 \cdot 1 \cdot (0,5)^2 \cdot 3600} = 3,53 \text{ м/с.}$$

Проверяем отклонение действительной скорости в циклоне от принятой:

$$100 \left| \frac{\omega - \omega_{opt}}{\omega_{opt}} \right| = 100 \frac{3,53 - 3,50}{3,50} = 0,85 \%.$$

Принимаем действительную скорость в циклоне $\omega = 3,53$ м/с, т.к. она отклоняется от оптимальной менее чем на 15%.

4. Определяем коэффициент гидравлического сопротивления, используя данные табл. 5.6-5.8:

$$\xi = k_1 \cdot k_2 \cdot \xi_{500} = 1 \cdot 0,98 \cdot 245 = 240,1.$$

5. Рассчитываем гидравлическое сопротивление, предварительно найдя плотность газа при 70°C ($T = 273 + 70 = 343$ К):

$$\rho_g = \rho_0 \frac{T_0}{T} = 1,293 \frac{273}{343} = 1,029 \text{ кг/м}^3.$$

$$\Delta P = \xi \rho_g \frac{\omega^2}{2} = \frac{240,1 \cdot 1,029 \cdot 3,53^2}{2} = 1513,26 \text{ Па.}$$

6. Динамическая вязкость газа при 70°C ($T=343\text{K}$):

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} = 17,1 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 124}{343 + 124} \left(\frac{343}{273} \right)^{3/2} = 20,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

где C – постоянная Сатерленда (для воздуха $C=124$ в интервале $T = 0-553\text{K}$).

7. Из таблицы 5.4 находим значение $d_{50}^T = 3,65$ мкм для циклона ЦН-11 диаметром $D_T = 600$ мм при табличной плотности частиц $\rho_{ч,м} = 1930$ кг/м³; динамическая вязкость газа $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с, а также величину $\lg \sigma_{\eta}^T = 0,352$.

Пересчитаем значение d_{50} при рабочих условиях по формуле:

$$\begin{aligned} d_{50} &= d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D_{ч}}{D_T} \right) \left(\frac{\rho_{ч,м}}{\rho_{ч}} \right) \left(\frac{\mu}{\mu_T} \right) \left(\frac{\omega_T}{\omega} \right)} = \\ &= 3,65 \sqrt{\left(\frac{0,5}{0,6} \right) \left(\frac{1930}{2900} \right) \frac{20,7 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{3,5}{3,53} \right)} = 2,625 \text{ мкм}. \end{aligned}$$

Полученное значение d_{50} меньше d_m , поэтому можно продолжать расчёт.

8. Эффективность очистки газа в циклоне

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

$$x = \lg \left(\frac{d_m}{d_{50}} \right) / \sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta}^T + \lg^2 \sigma_{ч}} = \lg \frac{20}{2,625} / \sqrt{0,352^2 + 0,468^2} = 1,35 \approx 1,4.$$

Дисперсный состав пыли d_{50}^T и $\lg \sigma_{\eta}$ находим в табл. 5.4.

Из Приложения 1 выбираем $\Phi(x) = 0,9192$.

$$\eta = 0,5[1 + 0,9192] \approx 0,959 \approx 96\%.$$

Расчётное значение η соответствует необходимому, т.е. выбранный нами для очистки пыли циклон марки ЦН-11 с диаметром 0,5 м подходит по условию задания.

5.4 Батарейные циклоны

Батарейные циклоны (рис. 5.12) применяется для очистки дымовых газов тепловых электростанций, промышленных котельных, сжигающих твердое топливо, для улавливания пыли в отходящих газах сушильных и агломерационных установок, а также в других отраслях промышленности.

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 направляющих аппаратов типа «винт» или «розетка» либо за счет улиточного входа газа. Запыленный газ через патрубок поступает в камеру грязного газа и распределяется по циклонным элементам. С помощью циклонных элементов производится очистка газа от пыли. Уловленная пыль отводится в бункер, далее через затвор выгружается наружу. Очищенный газ после циклонных элементов поступает в камеру чистого газа, а затем с помощью дымососа выбрасывается через дымовую трубу в атмосферу.

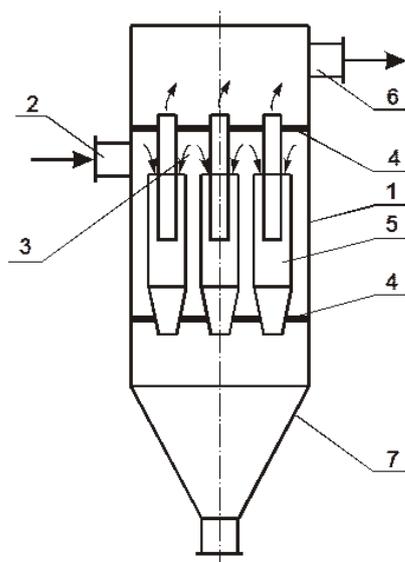


Рисунок 5.12 – Схема батарейного циклона:

- 1 – корпус;
- 2 – патрубок для входа запылённого газа;
- 3 – распределительная камера;
- 4 – трубная решетка;
- 5 – циклонный элемент;
- 6 – патрубок отвода очищенного газа;
- 7 – бункер для пыли

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

Благодаря такой компоновке размеры батарейных циклонов (в плане) меньше, чем группы обычных циклонов при той же производительности. В целом такие батарейные циклоны позволяют очищать с равной эффективностью большие, чем в случае одиночных циклонов, объёмы газа, но при этом они более металлоёмки и менее надежны (особенно при высокой концентрации пыли и при пыли, склонной к слипанию).

Направляющие аппараты типа «винт» или «розетка» устанавливают в кольцевом пространстве между стенкой цилиндрической части каждого циклонного элемента и его выхлопной трубой (рис. 5.13).

Направляющее устройство типа "винт" состоит из двух винтовых лопаток, наклоненных под углом $\alpha = 25^\circ$. Оно менее подвержено забиванию пылью, но одновременно имеет меньшую степень очистки, чем устройство типа "розетка", состоящее из восьми лопаток, наклоненных под углом 25 или 30° . Угол наклона лопаток 25° в устройстве типа "розетка" способствует получению более высокого коэффициента очистки, но увеличивает гидравлическое сопротивление по сравнению с циклонными элементами с углом наклона 30° . Направляющий аппарат с безударным входом обеспечивает ту же степень очистки, что и обычный аппарат типа «розетка», но при значительно меньшем коэффициенте гидравлического сопротивления.

В батарейных циклонах также применяются циклонные элементы с улиточным, полуулиточным или спиральным подводом газа. Элементы с тангенциальным подводом имеют лучшие показатели по очистке за счёт герметичности узла ввода газов.

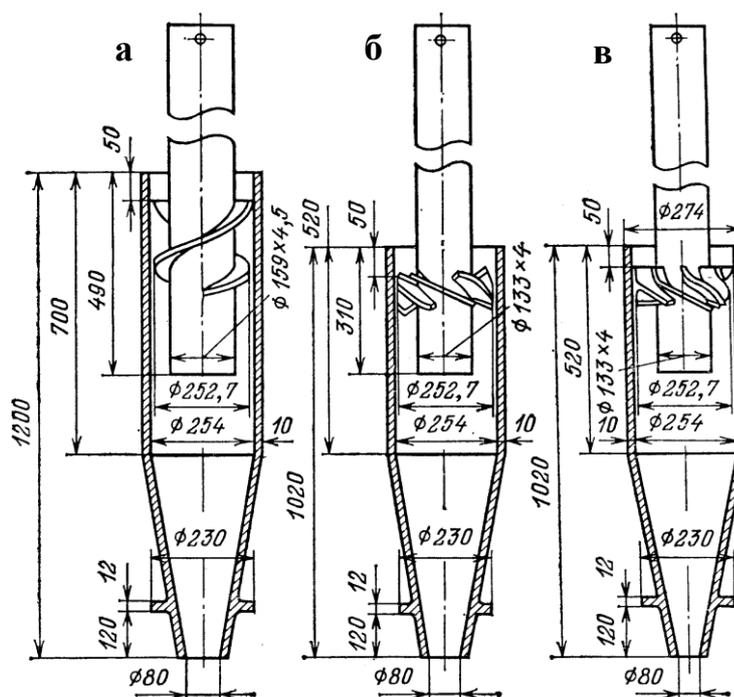


Рисунок 5.13 – Циклонные элементы:

а – с направляющим аппаратом типа «винт»; б – с направляющим аппаратом типа «розетка»; в – с направляющим аппаратом типа «розетка» с безударным входом

Обычно батарейные циклоны состоят из элементов диаметром 100, 150 и 250 мм. Применение элементов малого диаметра приводит к возрастанию их числа в аппарате, что увеличивает опасность вредных перетоков газов между элементами. Поэтому чаще всего применяют элементы диаметром 250 мм. Оптимальная скорость газов в элементе лежит в пределах от 3,5 до 4,75 м/с.

5.4.1 Конструкции батарейных циклонов

Среди батарейных циклонов наибольшее распространение в промышленности нашли циклоны типов БЦ-2, ПБЦ, ЦБ-254Р производительностью от 12 000 до 125 000 м³/ч [31].

На рисунке 5.14 представлен *батарейный циклон типа БЦ-2*. Эти циклоны рекомендуется применять для очистки газов, содержащих неслипающиеся и неволокнистые пыли. Циклоны БЦ-2 в зависимости от типоразмера имеют от 20 до 56 цельнолитых циклонных элементов, внутренний диаметр цилиндрической части которых равен 254 мм. Элементы снабжены профилированными направляющими аппаратами типа "розетка" с углом наклона $\alpha = 25^\circ$. Условная скорость в корпусе циклона составляет 4-5 м/с, коэффициент гидравлического сопротивления – 80.

Каждый аппарат имеет две параллельно работающие секции. При пониженных нагрузках одну из секций можно отключить шибером. В каждой секции на крышках установлены предохранительные клапаны во избежание повреждения аппарата при взрывах или хлопках в процессе очистки взрывоопасных пылегазовых смесей.

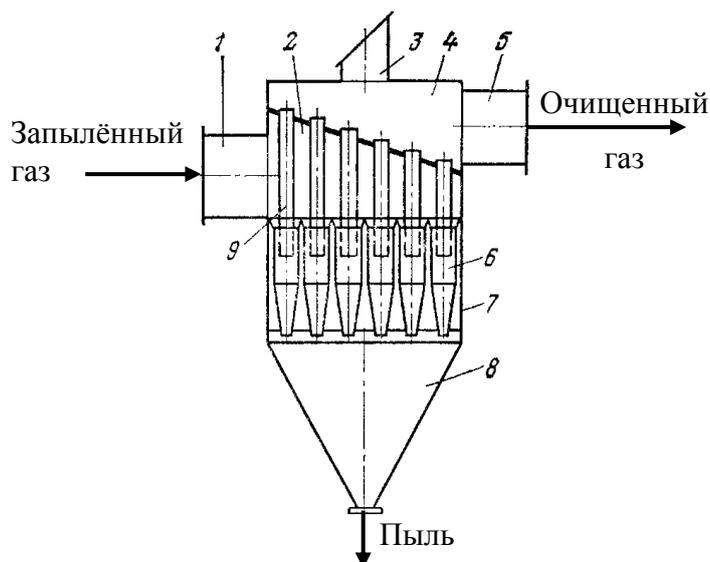


Рисунок 5.14 – Батарейный циклон БЦ-2:

- 1 – подводящий патрубок;
- 2 – газораспределительная камера;
- 3 – предохранительный клапан;
- 4 – камера очищенного газа;
- 5 – патрубок очищенного газа;
- 6 – циклонный элемент;
- 7 – корпус;
- 8 – бункер;
- 9 – выхлопная труба

Принцип работы БЦ-2 состоит в следующем. Запыленный воздух через патрубок 1 поступает в газораспределительную камеру 2 и распределяется по циклонным элементам 6. С помощью циклонных элементов происходит очистка газов от пыли. Уловленная пыль отводится в бункер 8 и далее через затвор выгружается наружу. Очищенный газ через выхлопные трубы 9 циклонных элементов поступает в камеру очищенного газа 4, откуда с помощью дымососа выбрасывается через дымовую трубу в атмосферу.

Условное обозначение типоразмера циклона: БЦ – батарейный циклон; 2 – число секций; следующая цифра – число рядов по глубине; цифра в скобках – число циклонных элементов в каждой из двух секций (по ширине).

Производительность батарейного циклона БЦ-2 по очищаемому воздуху или газу в зависимости от давления газов на входе составляет 15-49 тыс. м³/ч (табл. 5.9), запыленность входных газов – 35-75 г/м³ (минимальное значение – для средне слипающей пыли), допустимая температура газов на входе – до 400°С. Степень улавливания пыли с $d_m = 20$ мкм – не менее 85%.

Таблица 5.9 – Техническая характеристика батарейных циклонов БЦ-2

Типоразмер циклона	Суммарная площадь сечения циклонных элементов, м ²	Расход газа, м ³ /ч при перепаде давления ΔP, Па		Число циклонных элементов	Масса, кг
		450	600		
БЦ-2-4х(3+2)	1,012	15000	17400	20	3530
БЦ-2-5х(3+2)	1,265	18900	21800	25	4140
БЦ-2-5х(4+2)	1,518	22600	26100	30	4850
БЦ-2-6х(4+2)	1,822	27200	31400	36	5600
БЦ-2-6х(4+3)	2,125	33160	36600	42	6360
БЦ-2-7х(5+3)	2,834	42200	49000	56	7950

Батарейные циклоны типа ПБЦ предназначены для технологической очистки запыленных газов сухим способом в системах пылеулавливания сушильных установок, в системах аспирации и промышленной вентиляции углеобогажительных фабрик и предприятий других отраслей промышленности.

В зависимости от типоразмера батарейные циклоны типа ПБЦ имеют от 24 до 212 сварных циклонных элементов с полуулиточным входом газа; внутренний диаметр цилиндрической части – 231 мм. Элементы размещены вертикальными рядами с углом наклона 45° к горизонтали.

Особенность конструкции аппарата заключается в том, что наиболее крупная пыль под влиянием инерционных и гравитационных сил осаждается в межэлементном пространстве, а более мелкая пыль отделяется непосредственно в циклонных элементах.

Батарейный циклон состоит из корпуса 2, бункера пыли 3, циклонных элементов 4 и шлюзового затвора 5 (рис. 5.15). На коллекторах очищаемого газа и крышках аппаратов установлены предохранительные клапаны избыточного давления 1. Уловленная пыль выгружается из бункеров шлюзовыми затворами с электродвигателями мощностью 0,7 кВт.

Условное обозначение типоразмера циклона: ПБЦ – пылеуловитель батарейный циклонный; цифра после букв – производительность тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$.

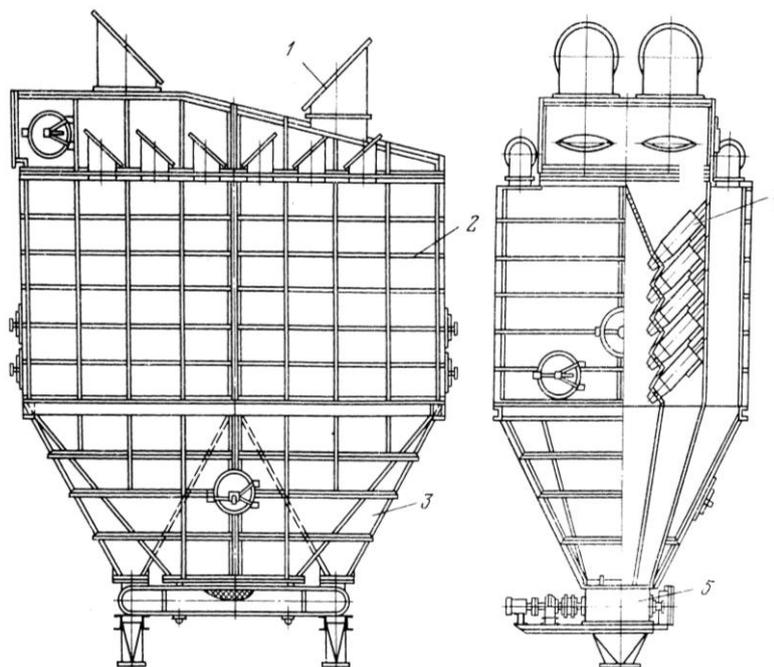


Рисунок 5.15 – Батарейный циклон ПБЦ:

1 – взрывной клапан; 2 – корпус; 3 – бункер пыли; 4 – циклонные элементы; 5 – шлюзовой затвор

Производительность циклонов ПБЦ – 12-180 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$, допустимая запыленность газа – $75 \text{ г}/\text{м}^3$, коэффициент гидравлического сопротивления – 120. Степень улавливания угольной пыли с $d_m = 30 \text{ мкм}$ и плотностью $1400 \text{ кг}/\text{м}^3$ – не менее 95%.

Техническая характеристика батарейных циклонов ПБЦ приведена в табл. 5.10.

Таблица 5.10 – Техническая характеристика батарейных циклонов ПБЦ

Типоразмер циклона	Суммарная площадь сечения циклонных элементов, м ²	Производительность, тыс. м ³ /ч	Число циклонных элементов	Масса, кг
ПБЦ-15	1,003	12-15	24	4000
ПБЦ-25	1,505	25-30	36	5000
ПБЦ-35	2,006	35-40	48	6100
ПБЦ-50	3,845	50-60	92	12500
ПБЦ-75	4,849	75-85	116	13300
ПБЦ-100	5,852	100-125	140	15300
ПБЦ-150	8,859	155-180	212	23500

Батарейные циклоны ЦБ-254Р предназначены для очистки газов с повышенной запыленностью от неслипающейся пыли. В зависимости от типоразмера аппараты типа ЦБ-254Р имеют от 25 до 80 циклонных элементов с внутренним диаметром цилиндрической части 254 мм, оснащенных направляющим аппаратом типа «розетка» с профилированными лопатками, имеющими угол наклона $\alpha=25^\circ$.

Циклоны – односекционные, но при необходимости очистки большого объёма газов в установке может быть использовано несколько секций. Выходная камера имеет ступенчатую форму, бункер – пирамидальную форму (рис. 5.16).

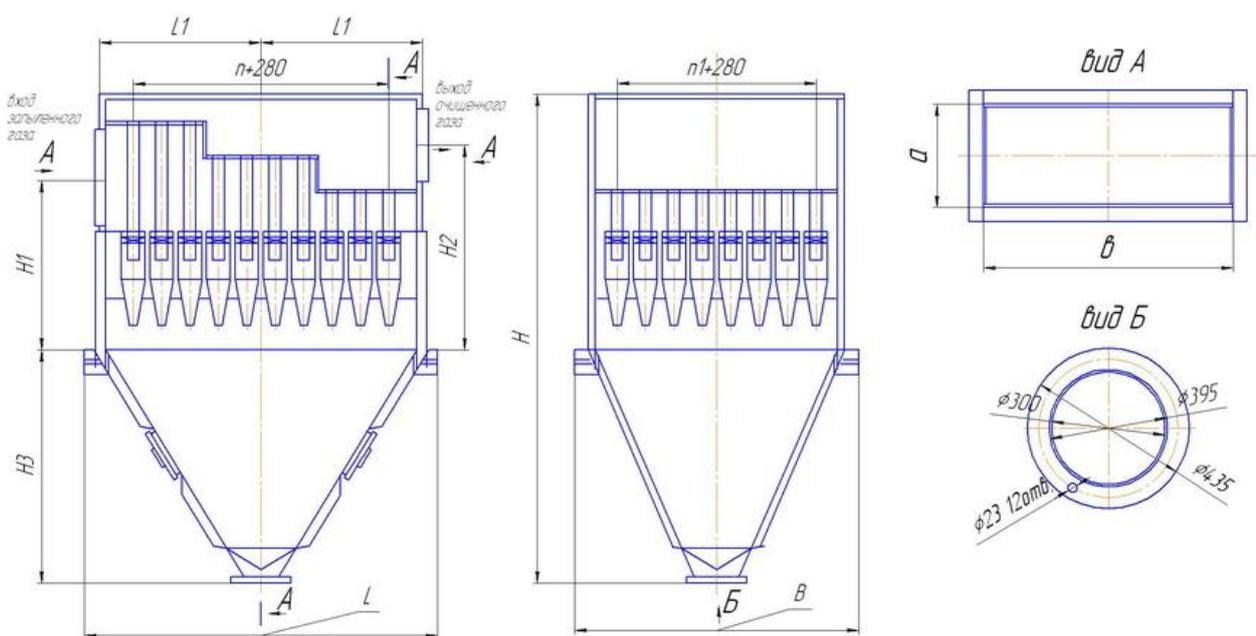


Рисунок 5.16 – Циклон батарейный ЦБ-254Р

Условное обозначение типоразмера циклонов: ЦБ – циклон батарейный; 254 – диаметр циклонных элементов, мм; Р – направляющий аппарат типа «розетка»; цифра после тире – число циклонных элементов.

Техническая характеристика батарейных циклонов ЦБ-254Р приведена в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Техническая характеристика батарейных циклонов ЦБ-254Р

Типоразмер циклона	Производительность, м ³ /ч при скорости потока газа в циклонном элементе 4,5 м/с	Число циклонных элементов	Масса, кг
ЦБ-254Р-25	20580	25	3630
ЦБ-254Р-30	24630	30	4170
ЦБ-254Р-40	32900	40	5210
ЦБ-254Р-50	41100	50	6576
ЦБ-254Р-60	49350	60	7700
ЦБ-254Р-80	65750	80	10000

Производительность циклонов ЦБ-254Р – 20,6-65,8 тыс. м³/ч, допустимая запыленность газа – 400 г/м³, температура очищаемого газа ≤400°С; коэффициент гидравлического сопротивления – 90. Степень улавливания пыли с $d_m = 20$ мкм – не менее 85%.

Батарейные циклоны, по сравнению с одиночными и групповыми, имеют более низкую эффективность улавливания пыли, что объясняется неравномерностью распределения запыленного потока по циклонным элементам. Попытки использовать в батарейных циклонах элементы малого диаметра с высокой эффективностью и, соответственно, с высоким коэффициентом сопротивления, не дали положительных результатов.

Перспективным направлением в совершенствовании батарейных циклонов является использование циклонных элементов большого диаметра (более 500 мм) со спиральным входом и высокой циркуляцией газового потока в циклоне [35].

В последнее время были разработаны **батарейные циклоны с укрупненными элементами диаметром 512 мм типа БЦ-512**, которые предназначены для улавливания золы после котлов, сжигающих каменные и бурые угли, в том числе и слипающейся, которая забивает циклоны других типов (рис. 5.17).

Батарейный циклон состоит из входной 1 и выходной 3 камер, бункера 5 с золоспусками, системы пожаротушения 4 и самих циклонных элементов 2.

Батарейные циклоны изготавливают одно-, двух-, трёх-, четырёх- и шестисекционными. Основным блоком батарейного циклона БЦ-512 является секция циклонных элементов СЭЦ-24. Она набирается из одиночных циклонных элементов в четыре ряда по шесть элементов в каждом ряду.

В зависимости от направления вращения газового потока различают циклонные элементы правого, и левого вращения. В секции СЭЦ-24 каждый ряд набирается из элементов одного вращения. Ряды с элементами разного вращения чередуются друг с другом по ширине секции.

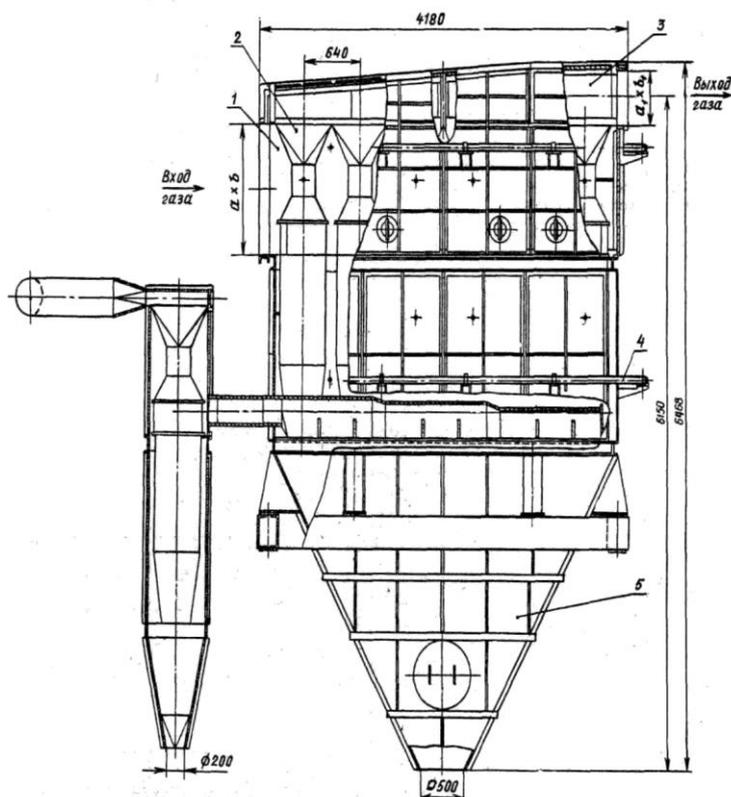


Рисунок 5.17 – Батарейный циклон БЦ-512 односекционный:

1 – входная камера; 2 – циклонный элемент; 3 – выходная камера; 4 – система пожаротушения; 5 – бункер

Циклонные элементы изготовлены из стандартных труб 530x9 мм и снабжены сварными четырёхзаходными завихрителями газового потока. На срезе выпускной трубы циклонного элемента установлен зубчатый раскручиватель для снижения неравномерности радиальных потоков газа (рис. 5.18).

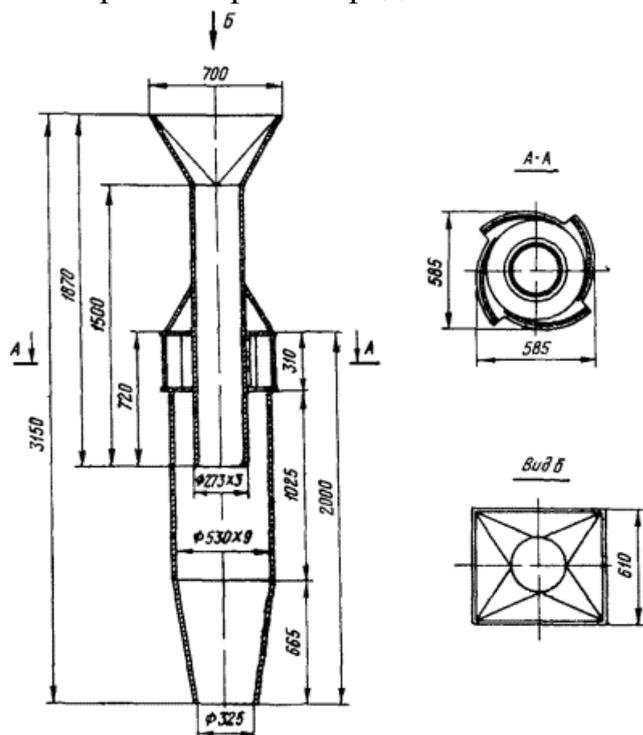


Рисунок 5.18 – Циклонный элемент батарейного циклона БЦ-512

Выхлопная труба элемента заканчивается сверху переходным конфузорным патрубком прямоугольного сечения 640 мм на 700 мм с углами наклона сторон более 60°. Сваренные между собой переходные патрубки образуют верхнюю трубную доску. Отсутствие отложений золы и пыли на верхней трубной доске является одним из преимуществ данной конструкции.

Выходная камера клиновидной формы обеспечивает равную скорость по длине. Бункер батарейного циклона разделен на секции, имеющие по одному золовыпускному отверстию (500x500 мм) на 40-50 циклонных элементов. Наклон стенок бункера – не менее 55° к горизонту. Для слипающей пыли (золы) угол наклона бункера следует увеличить до 60° и установить систему вибровстряхивания.

Технические характеристики батарейных циклонов БЦ-512: производительность по очищаемому газу – 44-440 тыс. м³/ч; гидравлическое сопротивление – 1100-1300 Па; число циклонных элементов – от 16 до 114; допустимая температура газов на входе – до 400°C. Степень улавливания пыли с $d_m = 20$ мкм – 92-94%.

5.4.2 Расчёт батарейных циклонов

Расчёты батарейных циклонов выполняют в следующем порядке [28, 36].

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

2. Рассчитывают расход газа через один циклонный элемент q_{opt} , при котором обеспечиваются оптимальные условия его работы

$$q_{opt} = 0,785 \omega_{opt} D^2, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.27)$$

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

3. Определяют количество циклонных элементов, необходимое для оптимальных условий работы батарейного циклона при объёмном расходе запылённого воздуха V_p

$$n_{opt} = V_p / q_{opt} \quad (5.28)$$

4. По таблице 5.12 принимают типовую конструкцию батарейного циклона с близкой пропускной способностью и числом элементов таким образом, чтобы число элементов выбранного батарейного циклона n отличалось от n_{opt} не более, чем на 10%.

5. Далее определяют действительную скорость в циклонном элементе ω

$$\omega = V_p / 0,785 n D^2, \text{ м/с}. \quad (5.29)$$

6. По уточненной скорости потока в циклонном элементе определяют потери давления в циклоне ΔP при рабочих значениях плотности газа ρ_r

$$\Delta P = \xi \rho_r \omega^2 / 2, \text{ Па}. \quad (5.30)$$

Таблица 5.12 – Техническая характеристика батарейных циклонов

Тип циклона	Число элементов в циклонах различных типоразмеров	Оптимальная скорость потока газа в элементе, м/с	Производительность по газу, м ³ /с	Коэффициент гидравлического сопротивления, ξ	Тип циклонного элемента	Температура газов, Т, °С
БЦ-2	20; 25; 30; 36; 42; 56	4,5	4,2-13,6	80	"розетка" $\alpha = 25^\circ$	до 400
ЦБ-254Р	25; 30; 40; 50; 60; 80	4,5	5,7-18,3	90	"розетка" $\alpha = 25^\circ$	до 150
ПБЦ	24; 36; 48; 92; 116; 140	3,5	3,3-34,7	120	с полуулиточным подводом	до 120

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ батарейных циклонов принимают по опытным данным (табл. 5.12).

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

7. Коэффициент очистки газа в элементе батарейного циклона определяют по методике расчета индивидуального циклона, используя опытные значения d_{50}^T и $lg\sigma_\eta^T$ принятого типа элемента, которые приведены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Параметры, определяющие эффективность батарейных циклонов

Параметры	Тип направляющего аппарата			
	"розетка" $\alpha = 25^\circ$	"розетка" $\alpha = 30^\circ$	"винт"	с полуулиточным подводом
d_{50}^T , мкм	3,85	5	4,5	3
$lg\sigma_\eta^T$	0,46	0,46	0,46	0,325

Примечание. Параметры, приведенные в таблице, соответствуют следующим условиям работы циклонных элементов: средняя скорость газа в элементе $\omega_T = 4,5$ м/с; диаметр циклонного элемента $D_T = 0,25$ м; плотность частиц $\rho_{ч,T} = 2200$ кг/м³; динамическая вязкость газа $\mu_T = 23,7 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Эффективность очистки газа в циклоне:

$$\eta = 0,5[1 + \Phi(x)], \quad (5.31)$$

где $\Phi(x)$ – табличная функция от параметра x , равного:

$$x = lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right) / \sqrt{lg^2 \sigma_\eta^T + lg^2 \sigma_\eta}. \quad (5.32)$$

где d_{50} – диаметр частиц, реально осаждаемых с эффективностью 50% при рабочих условиях, мкм.

Для учёта влияния на величину d_{50} отклонения реальных условий работы от типовых (указаны в табл. 5.12) используют соотношение:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D}{D_T}\right) \left(\frac{\rho_{ч,T}}{\rho_{ч}}\right) \left(\frac{\mu}{\mu_T}\right) \left(\frac{\omega_T}{\omega}\right)}. \quad (5.33)$$

Определив по формуле (5.32) значение x , находят значение нормальной функции распределения $\Phi(x)$ по данным Приложения 1.

Затем по формуле 5.31 определяют расчётное значение эффективности очистки газа в циклоне и сравнивают его с заданным.

Пример.

Рассчитать степень очистки в батарейном циклоне дымовых газов при температуре 140°C , динамической вязкости газа в нормальных условиях $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6}$ Па·с, расходе газа $V_p = 65\,000$ м³/ч. Запыленность газа – 70 г/м³, плотность газов в нормальных условиях $\rho_0 = 1,31$ кг/м³. Характеристика пыли: $d_m = 20$ мкм; $\sigma_{ч} = 3,0$; $\rho_{ч} = 2700$ кг/м³. Величина потери давления в циклоне – не более 900 Па.

Решение.

Расчёты выполняем в следующем порядке.

1. Принимаем значение оптимальной скорости:

$$\omega_{\text{опт}} = 5 \text{ м/с.}$$

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

$$q_{\text{ошт}} = 0,785 \omega_{\text{ошт}} D^2 = 0,785 \cdot 5 \cdot 0,25^2 = 0,245 \text{ м}^3/\text{с.}$$

3. Определяем количество элементов:

$$n_{\text{ошт}} = V_p / q_{\text{ошт}} = 65\,000 / (3600 \cdot 0,245) = 18,05 / 0,245 = 74 \text{ шт.}$$

4. Выбираем батарейный циклон типа ЦБ-254Р-80 (табл. 5.11, 5.12), составленный из 80 циклонных элементов с направляющими типа "розетка". При выборе типа циклона, кроме его соответствия по количеству элементов, принималась во внимание и возможность работы при температуре среды до 150°C .

Определяем действительную скорость потока через один элемент:

$$\omega = V_p / 0,785 n D^2 = 18,05 / (0,785 \cdot 80 \cdot 0,25^2) = 4,6 \text{ м/с,}$$

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

5. Определяем плотность и динамическую вязкость дымовых газов в рабочих условиях при 140°C ($T=273+140=413\text{K}$):

$$\mu = \mu_0 \frac{273+C}{T+C} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} = 17,1 \cdot 10^{-6} \frac{273+124}{413+124} \left(\frac{413}{273}\right)^{3/2} = 23,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с},$$

где C – постоянная Сатерленда (для воздуха $C=124$ в интервале $T = 0-553\text{K}$).

$$\rho_T = \rho_0 \cdot T_0 / T = 1,31 \cdot 273 / 413 = 0,81 \text{ кг/м}^3.$$

Принимаем по таблице 5.12 коэффициент гидравлического сопротивления элемента $\xi = 90$ и вычисляем потери давления в циклоне:

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

Величина потери давления в циклоне не превышает заданного значения 900 Па. Поэтому продолжаем расчёт для циклона ЦБ-254Р-80.

6. Принимаем по таблице 5.13 значения $d_{50}^T = 3,85$ мкм и $\lg \sigma_\eta^T = 0,46$ для элемента типа "розетка" с углом наклона лопаток 25° .

Пересчитываем значение d_{50} при рабочих условиях:

$$\begin{aligned} d_{50} &= d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D}{D_T}\right) \left(\frac{\rho_{ч,T}}{\rho_{ч}}\right) \left(\frac{\mu}{\mu_T}\right) \left(\frac{\omega_T}{\omega}\right)} = \\ &= 3,85 \sqrt{\left(\frac{0,25}{0,25}\right) \left(\frac{2200}{2700}\right) \left(\frac{23,5 \cdot 10^{-6}}{23,7 \cdot 10^{-6}}\right) \left(\frac{4,5}{4,6}\right)} = 1,68 \text{ мкм}. \end{aligned}$$

Подсчитываем параметр осаждения x и находим по Приложению 1 соответствующее ему значение интеграла вероятности $\Phi(x)$:

$$x = \lg \left(\frac{d_m}{d_{50}} \right) / \sqrt{\lg^2 \sigma_\eta^T + \lg^2 \sigma_\mu} = \lg \left(\frac{20}{1,68} \right) / \sqrt{0,46^2 + \lg^2 3} = 1,88.$$

$$\Phi(x) = 0,97.$$

Эффективность очистки газа в циклоне:

$$\eta = 0,5[1 + \Phi(x)] = 0,5[1 + 0,97] = 0,98.$$

5.5 Вихревые пылеуловители

Вихревые пылеуловители были разработаны значительно позже циклонов. Принцип действия вихревых аппаратов аналогичен принципу действия циклонов. И в том, и в другом случае выделение пыли из очищаемого пылегазового потока происходит под действием центробежных сил, возникающих при вращении потока в корпусе. Основным их отличием от циклонов является наличие вспомогательного закручивающего газового потока. Расход вторичного газа должен составлять 30-50% от первичного. Давление вторичного воздуха 5-6 кПа.

Применяют следующие способы подведения к вихревому пылеуловителю вторичного газа, необходимого для закручивания обеспыливаемого потока: **из окружающей среды, из очищенного потока, из запыленного потока**. Использование атмосферного воздуха экономически невыгодно, так как при этом значительно увеличиваются общий расход газа и тем самым энергозатраты на дымосос, что может быть оправдано только при необходимости охлаждения запылённого газа. Применяя второй вариант, можно несколько повысить эффективность очистки, так как для использования в качестве вторичного воздуха отбирают периферий-

ную часть потока очищенного воздуха с наибольшим содержанием остаточной пыли. Третий вариант наиболее экономичен: производительность установки повышается на 40-65% с сохранением эффективности очистки.

В вихревых пылеуловителях достигается весьма высокая для аппаратов, основанных на использовании центробежных сил, эффективность очистки – 98-99% и выше. На эффективность очистки оказывает незначительное влияние изменение содержания пыли в очищаемом воздухе (газе) – от 1 до 500 г/м³. Аппарат может применяться для очистки газов с температурой до 700°С. В вихревом пылеуловителе не наблюдается износа внутренних стенок аппарата, что связано с особенностями его воздушного режима. Аппарат более компактен, чем другие пылеуловители, предназначенные для сухой очистки выбросов.

К недостаткам вихревых пылеуловителей можно отнести: наличие дополнительного дутьевого устройства, увеличение общего объема газов при использовании в качестве вторичного газа атмосферного воздуха, большую сложность аппарата в изготовлении и эксплуатации.

5.5.1 Конструкции вихревых пылеуловителей

Применяют две основные разновидности *вихревых пылеуловителей (ВПУ)*: соплового (рис. 5.19, а) и лопаточного типа (рис. 5.19, б).

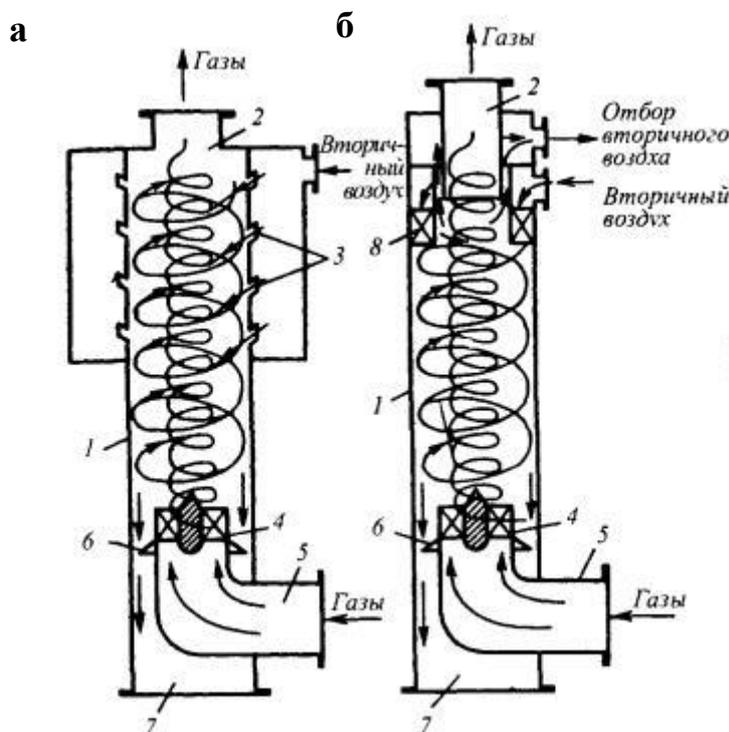


Рисунок 5.19 – Вихревые пылеуловители соплового (а) и лопаточного типа (б): 1 – камера; 2 – выходной патрубок; 3 – сопла; 4 – лопаточный завихритель типа «розетка»; 5 – входной патрубок; 6 – подпорная шайба; 7 – пылевой бункер; 8 – кольцевой лопаточный завихритель

В аппарате того и другого типа запыленный газ поступает в камеру через входной патрубок с завихрителем типа «розетка» и обтекателем. Лопатки завихрителя устанавливаются под углом $30-40^\circ$ при отношении диаметра завихрителя к диаметру аппарата, равном $0,8-0,9$. Объем вторичного газа составляет $30-50\%$ от первичного.

В *вихревых пылеуловителях соплового типа* (рис. 5.19, а) вторичный газовый поток закручивается системой тангенциальных сопел. В верхней части пылеуловителя устанавливают несколько рядов сопел, расположенных по нисходящей спирали и обычно наклоненных к горизонтали под углом $15-30^\circ$. Газ поступает в распределительную камеру, где он находится под большим давлением, и выходит через сопла с относительно большой скоростью – $60-80$ м/с. Частицы пыли, поступающие в аппарат по нижнему каналу, сначала с потоком газа поднимаются по спирали, затем под действием центробежных сил отбрасываются к стенке и с вторичным, верхним потоком газа движутся вниз, попадая в кольцевое межтрубное пространство. Кольцевое пространство вокруг входного патрубка оснащено подпорной шайбой, обеспечивающей безвозвратный спуск пыли в бункер.

Вихревой пылеуловитель лопаточного типа (рис. 5.19, б) отличается тем, что вторичный поток вводится в верхней части аппарата через завихритель.

По основным показателям аппараты лопаточного типа оказались более эффективными: при одинаковом диаметре камеры 200 мм и производительности 330 м³/ч гидравлическое сопротивление соплового аппарата составило $3,7 \cdot 10^3$ Па, эффективность $96,5\%$, а лопаточного, соответственно, – $2,8 \cdot 10^3$ Па и 98% (при улавливании особо мелкодисперсной пыли).

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

Вихревые пылеуловители изготавливаются на производительность от 330 до $30\,000$ м³/ч очищаемого газа. Одиночные аппараты, при необходимости, можно сгруппировать на требуемую производительность. Известны установки с производительностью более $300\,000$ м³/ч. Имея высокую эффективность очистки, установки вихревых пылеуловителей успешно конкурируют с электрическими и тканевыми пылеуловителями.

Кроме описанных выше вихревых пылеуловителей (ВПУ) в промышленности широко используются *пылеуловители со встречными закрученными потоками (ВЗП)*. Они имеют низкий коэффициент гидравлического сопротивления ($\zeta = 50$) и достаточно высокую эффективность пылеулавливания в пределах $96-99\%$ [38]. Размерами элементов и конструкцией данный аппарат существенно отличался от аппаратов ВПУ, так как для эффективного улавливания пыли требуется совершенно другое соотношение расходов воздуха и параметров крутки вторичного и первичного потоков. Подача очищаемого воздуха осуществлялась одним вентилятором. В верхнем вводе закрутка потока осуществлялась тангенциальной подачей воздуха, в нижнем – лопаточным закручивателем.

Вихревой пылеуловитель со встречными закрученными потоками (рис. 5.20) состоит из: цилиндрического корпуса 1, включающего в себя непосредственно сепарационную и послесепарационную камеры и конический пылесборник 2 в нижней части аппарата.

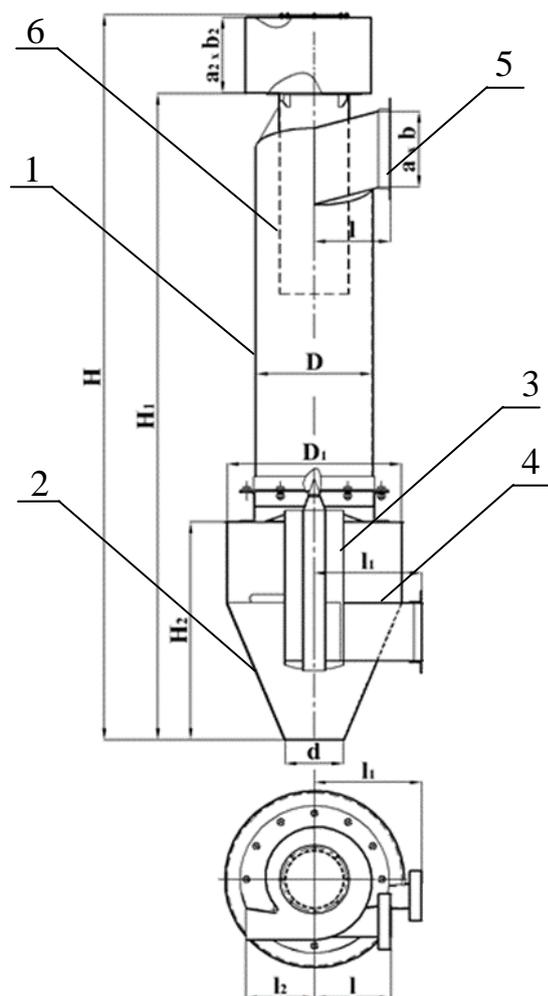


Рисунок 5.20 – Вихревой пылеуловитель со встречными закрученными потоками ВЗП:

- 1 – цилиндрический корпус;
- 2 – конический пылесборник;
- 3 – осевой патрубок первичного потока;
- 4 – завихритель;
- 5 – патрубок вторичного потока;
- 6 – осевой вывод очищенного газа

Запыленный газ поступает в аппарат по двум вводам одновременно: первичный поток по осевому патрубку в нижней части аппарата 3, снабженному завихрителем 4, вторичный поток – по патрубку, расположенному в верхней части аппарата 5, где находится также осевой вывод очищенного газа 6. Поступивший в пылеуловитель запыленный газ закручивается завихрителем, под действием центробежных сил частички пыли перемещаются к стенкам цилиндрического аппарата, где попадают в зону вращения вторичного закрученного потока. Взаимодействие потоков газа усиливает центробежные силы, действующие на частицы пыли, которая эффективно отбрасывается и, достигая стенки цилиндрического корпуса, направляется в нижнюю часть аппарата (пылесборник) под отбойную шайбу. Очищенный газ выводится через осевой коаксиальный вывод вверху аппарата. Вращение потоков внутри аппарата имеет одно направление.

Оптимальная скорость газа в цилиндрической части корпуса циклона составляет 6,6 м/с. Оптимальная кратность расходов вторичного и первичного потока – 0,65.

В табл. 5.14 приведены технические характеристики и габаритные размеры различных типоразмеров вихревых пылеуловителей со встречными закрученными потоками.

Таблица 5.14 – Технические характеристики пылеуловителей ВЗП [38]

Типоразмер	H	D	D ₁	a	a ₁	b	b ₁	Производительность, м ³ /ч
ВЗП-200	1140	200	300	132	100	52	42	1000
ВЗП-300	1710	300	450	198	150	78	63	2500
ВЗП-400	2280	400	600	264	200	104	84	4000
ВЗП-450	2565	450	675	297	225	117	95	5000
ВЗП-500	2850	500	750	330	250	130	105	6000
ВЗП-600	3420	600	900	396	300	156	126	8000
ВЗП-800	4560	800	1200	528	400	208	168	10000
ВЗП-1000	5700	1000	1500	660	500	260	210	15000
ВЗП-1200	6840	1200	1800	792	600	312	252	20000
ВЗП-1300	7410	1300	1950	858	650	338	273	23000

Пылеуловитель ВЗП-М отличается от пылеуловителя ВЗП тем, что верхний завихритель в нём улиточный (рис. 5.21). За счёт улиточного завихрителя и наличия конического корпуса в пылеуловителе ВЗП-М достигнута большая эффективность очистки от мелкодисперсной пыли.

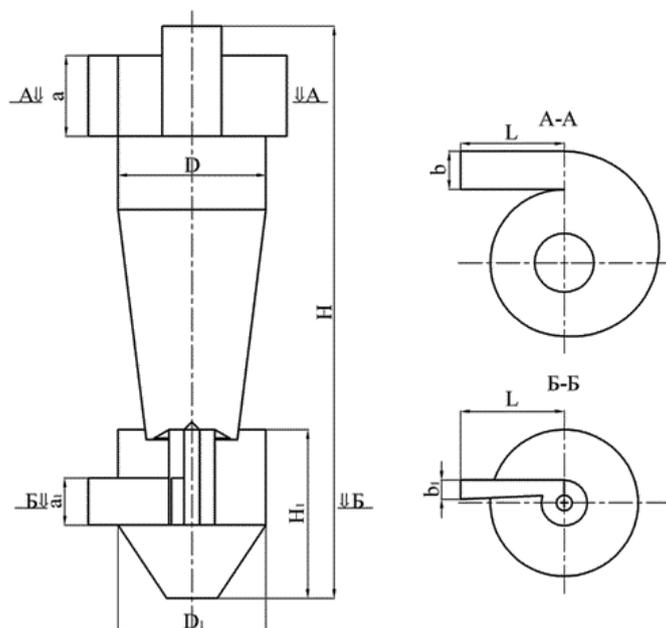


Рисунок 5.21 – Вихревой пылеуловитель со встречными закрученными потоками ВЗП-М

Проходя через завихрители, воздушные потоки закручиваются в одну и ту же сторону навстречу друг другу. Пыль под действием центробежной силы отбрасывается к стенке, смывается нисходящим верхним потоком через кольцевую щель под отбойную шайбу в бункер пылеуловителя. Очищенный воздух через центральный выхлопной патрубок выводится из пылеуловителя. Если требуется

большая производительность, пылеуловители ВЗП-М объединяются по 2 и 4 в группы с общим подводом к завихрителям верхнего и нижнего потоков и с общим бункером.

Оптимальная скорость – 3,5 м/с. Оптимальная кратность расходов первичного и вторичного потоков – 0,69. Эффективность очистки – 98-99%.

В табл. 5.15 приведены технические характеристики и габаритные размеры различных типоразмеров пылеуловителей ВЗП-М [39].

Таблица 5.15 – Технические характеристики пылеуловителей ВЗП-М

Типоразмер	H	H ₁	D (D ₁)	a	a ₁	b	b ₁	Производительность, м ³ /ч
ВЗП-М-300	1710	345	300	165	196	78	39	1000
ВЗП-М-400	1560	460	400	220	128	104	52	2000
ВЗП-М-450	1755	518	450	248	144	117	59	2500
ВЗП-М-500	1950	575	500	275	160	130	65	3000
ВЗП-М-600	2340	690	600	330	192	156	78	4000
ВЗП-М-800	3120	920	800	440	256	208	104	7000
ВЗП-М-1000	3900	1150	1000	550	320	260	130	10000
ВЗП-М-1200	4680	1380	1200	660	384	312	156	14000
ВЗП-М-1300	5070	1495	1300	715	416	338	169	17000

Вихревые пылеуловители со встречными закрученными потоками имеют ряд преимуществ перед ВПУ: меньшие габариты и металлоёмкость, отсутствие необходимости в дополнительном вентиляторе, поскольку очищаемый газ подаётся в оба канала. Энергозатраты аппаратов ВЗП в 3-4 раза меньше по сравнению с ВПУ. Надёжность работы данных аппаратов значительно возросла, так как в конструкции отсутствовали сопла. Но вместе с тем эффективность пылеулавливания у ВЗП по сравнению с ВПУ несколько ниже, хотя указанные выше преимущества обеспечили дальнейшее широкое распространение аппаратов ВЗП.

5.5.2 Выбор вихревых пылеуловителей

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

$$D_a = (4V_2 / \pi v_2)^{0,5} \quad (5.34)$$

где V_2 – объёмный расход запыленного газа, м³/с;

v_2 – скорость газа в рабочей зоне пылеуловителя, м/с (рекомендуется принимать в пределах 3,5-6,6 м/с).

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

$$d_{кр} = \{(v_2 / H) \ln(D_a / D_{mp}) / [(1 / 18\mu_2)(p_m - p_2) \omega^2]\}^{0,5}; \quad (5.35)$$

$$d_{\text{кр}} = (3/2 \pi s) [(\mu_e / \rho_m) \tau \ln(1 + V_2/V_1)]^{0.5}, \quad (5.36)$$

где H – высота пылеулавливающей камеры, м;

$D_{\text{мп}}$ – диаметр патрубка для подвода запыленного газа, м;

ω – угловая скорость газового потока в аппарате, с^{-1} ;

s – число оборотов потока газа в пылеуловителе;

$\tau = 1/2 \pi R_1^2 H / (V_1 + V_2)$ – время пребывания газа в ядре потока, с;

R_1 – радиус ядра потока, принимаемый равным радиусу ввода первичного потока, м;

V_1, V_2 – объёмный расход первичного и вторичного потоков газа, $\text{м}^3/\text{с}$.

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

$$\varepsilon = [(c_n - c_k) / c_n] \cdot 100. \quad (5.37)$$

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

$$\varepsilon = (V_1 \varepsilon_1 + V_2 \varepsilon_2) / V, \quad (5.38)$$

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

Величины ε_1 и ε_2 (в %) могут быть рассчитаны по зависимостям:

$$\varepsilon_1 = [(D_{\text{ин}}^2 - 4r_{1i}^2) / (D_{\text{ин}}^2 - D_{\text{эм}}^2)] \cdot 100; \quad (5.39)$$

$$\varepsilon_2 = [(D_a^2 - 4r_{2i}^2) / (D_a^2 - D_{2n}^2)] \cdot 100, \quad (5.40)$$

где $D_{\text{ин}}$ – диаметр ввода первичного потока, мм;

$D_{\text{эм}}$ – диаметр втулки аксиального завихрителя, мм;

r_{1i} и r_{2i} – радиус, на котором частица входит в аппарат с потоками газа, мм;

D_a – диаметр аппарата, мм;

D_{2n} – внутренний диаметр вторичного потока, мм.

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

$$\Delta P = \xi v_2^2 \rho_e / 2, \quad (5.41)$$

где v_2 – скорость газа в рабочей зоне аппарата, м/с;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления аппарата, рассчитываемый по скорости v_2 .

Пример.

Определить конструктивные размеры и гидравлическое сопротивление вихревого пылеуловителя при следующих исходных данных:

Производительность по запыленному воздуху $V_z, \text{м}^3/\text{ч}$	2400
Скорость воздуха в рабочей зоне аппарата $v_z, \text{м/с}$	до 5

Температура воздуха, поступающего на очистку t_3 , °C	40
Плотность воздуха в нормальных условиях ρ_0 , кг/м ³	1,35

Решение.

Определяем геометрические размеры аппарата.

Диаметр вихревого пылеуловителя:

$$D_a = [4V_2 / (\pi v_2)]^{0,5} = [4 \cdot 2400 / (3,14 \cdot 5 \cdot 3600)]^{0,5} = 0,41 \text{ м.}$$

Принимаем диаметр аппарата $D_a = 0,45$ м.

Действительная скорость газа в аппарате:

$$v = 4V_2 / (\pi D_a^2 \cdot 3600) = 4 \cdot 2400 / (3,14 \cdot 0,45^2 \cdot 3600) = 4,2 \text{ м/с.}$$

Определяем значения коэффициентов χ_1 и χ_2 , задаваясь коэффициентом $\alpha = F_2 / F_1 = 2$ и коэффициентом $\gamma = v / v_1 = 0,5$ (где F_1 , F_2 – проходные сечения патрубков верхнего и нижнего потоков, v_1 – скорость газа в верхнем патрубке):

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

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

Диаметр ввода нижнего потока:

$$D_1 = \chi_1 D_a = 0,408 \cdot 0,45 = 0,18 \text{ м.}$$

Диаметр патрубка вывода очищенного воздуха:

$$D_{\text{вых}} = \chi_2 D_a = 0,801 \cdot 0,45 = 0,36 \text{ м.}$$

Высота рабочей зоны аппарата:

$$H_{\text{рз}} = (2,8 \div 3,1) D_a = 3,1 \cdot 0,45 = 1,4 \text{ м.}$$

Примем высоту $H_{\text{рз}} = 1,4$ м.

Диаметр отбойной шайбы:

$$D_{\text{ш}} = (0,9 \div 0,95) D_a = 0,93 \cdot 0,45 = 0,42 \text{ м.}$$

Площадь ввода верхнего и нижнего потоков:

$$F_2 = F - F_{\text{вых}} = \pi D_a^2 / 4 - \pi D_{\text{вых}}^2 / 4 = (3,14 / 4)(0,45^2 - 0,36^2) = 0,057 \text{ м}^2;$$

$$F_1 = \pi D_1^2 / 4 = 0,785 \cdot 0,18^2 = 0,026 \text{ м}^2.$$

Фактическое соотношение величины α :

$$\alpha = F_2 / F_1 = 0,057 / 0,026 = 2,16.$$

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

Рассчитаем потери давления в аппарате.

Коэффициент гидравлического сопротивления нижнего потока:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= 5,5n + [260 + 4,8(n - 3,8)^2] [(V_2 / V_2) - 0,3]^3 = \\ &= 5,5 \cdot 0,545 + [260 + 4,8(0,545 - 3,8)^2] [(1200 / 2400) - 0,3]^3 = 29,5, \end{aligned}$$

где $V_2 = 0,5V_1$ – объёмный расход вторичного потока газа для ВПУ, м³/с;
 n – конструктивный параметр интенсивности крутки потока, $n = 0,545$.
 Коэффициент гидравлического сопротивления верхнего потока:

$$\xi_2 = 2,6 + 158(0,6 - V_2/V_1)^3 = 2,6 + 158(0,6 - 1200/2400)^3 = 2,8.$$

Общий коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 (1 - V_2/V_1)^3 (F/F_1)^2 + \xi_2 (V_2/V_1)^3 (F/F_2)^2 = \\ &= 29,5(1 - 0,5)^3 (0,159/0,026)^2 + 2,8(0,5)^3 (0,159/0,033)^2 = 146,0. \end{aligned}$$

Гидравлическое сопротивление аппарата определяем по формуле:

$$\Delta P = \xi \rho_2 v^2 / 2,$$

где v – действительная скорость газа в аппарате, м/с;
 ρ_2 – плотность газа при рабочих условиях ($t = 40^\circ\text{C}$), кг/м³.

$$\rho_2 = \rho_0 T / (T + t) = 1,35 \cdot 273 / (273 + 40) = 1,18 \text{ кг/м}^3.$$

$$\Delta P = 146,0 \cdot 1,18 \cdot 4,2^2 / 2 = 1520 \text{ Па}.$$

Гидравлическое сопротивление соответствует средним значениям, характерным для вихревых пылеуловителей.

Принимаем пылеуловитель с рассчитанными конструктивными размерами.

Вопросы для самоконтроля.

1. Укажите условие эффективного улавливания частиц граничной крупности в пылеосадительной камере.
2. На чём основан принцип действия инерционного пылеуловителя?
3. Укажите основные достоинства и недостатки циклонов.
4. Опишите принцип действия циклонного пылеуловителя.
5. Какие конструкции циклонов Вам известны?
6. Как работает циклонный элемент батарейного циклона?
7. Опишите принцип действия батарейного циклона БЦ-2.
8. Как проводится расчёт батарейного циклона?
9. На чём основан принцип действия вихревых пылеуловителей?
10. Какие способы подведения к вихревому пылеуловителю вторичного газа применяются?

Глава 6

УЛАВЛИВАНИЕ ПЫЛИ ФИЛЬТРОВАНИЕМ

Одним из наиболее эффективных способов пылеулавливания является фильтрование запыленных газов через пористые перегородки. Этот процесс состоит в том, что пылегазовая смесь пропускается через пористую перегородку (ткань, слой щебня или другого материала), пыль оседает на перегородке и внутри ее, очищенный газ проходит через поры.

К **преимуществам способа** очистки газов фильтрованием относят: возможность улавливания субмикронных частиц пыли, высокая эффективность пылеулавливающих аппаратов, возможность очистки горячих и агрессивных газов, эффективное улавливание пыли при малой ее концентрации в газах; удобство эксплуатации фильтров и возможность полной автоматизации процесса очистки воздуха.

К **недостаткам этого способа** очистки газов можно отнести: необходимость систематической регенерации фильтрующей поверхности; громоздкость конструкции фильтров, ограничения по температуре и влажности газов на входе в фильтр для некоторых типов фильтровальных перегородок, высокий расход электроэнергии из-за большого сопротивления осадка и фильтрующей перегородки.

Пористые перегородки играют различную роль в зависимости от их вида, некоторые из них служат в основном для отложения на них слоя пыли, которая становится пылеулавливающей средой (тканые, волокнистые фильтры); другие слои задерживают пыль при прохождении её через перегородку (зернистые фильтры).

В обоих случаях скорость процесса фильтрации определяется перепадом давления на пористой перегородке, создаваемым вентилятором или другим побудителем тяги. По мере накопления уловленных частиц сопротивление движению газа непрерывно возрастает, в связи с чем, при сохранении постоянного перепада давления на пористой перегородке скорость фильтрации непрерывно уменьшается. Наоборот, для поддержания постоянной скорости фильтрации необходимо непрерывно увеличивать перепад давления на пористой перегородке. В обоих случаях при достижении некоторого предельного сопротивления перегородку приходится подвергать регенерации, т. е. освобождению от уловленной пыли.

6.1 Характеристики пористой перегородки

Основным свойством пористой перегородки является *пористость ε* , представляющая собой отношение пустого пространства (объёма пор) между твёрдыми непроницаемыми элементами пористой среды к общему объёму, занятому пористой средой [40]. Величину объёма твёрдых элементов фильтрующей перегородки, заключенную в единице объёма пористой среды, называют *плотностью упаковки a* .

Пористость фильтрующей среды или плотность упаковки при отсутст-

вии закрытых пор внутри фильтрующих элементов можно определить из выражения

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_\phi}{\rho_s} = 1 - \alpha, \quad (6.1)$$

где ρ_s – плотность материала элементов фильтрующей среды;
 ρ_ϕ – кажущаяся плотность фильтрующей среды.

Под **скоростью фильтрации** ω_ϕ понимают условную скорость, получаемую как отношение объёмного расхода газа Q_s , проходящего через фильтр, к полной площади фильтрующей перегородки F

$$\omega_\phi = \frac{Q_s}{F}. \quad (6.2)$$

Численно скорость фильтрации равна газовой нагрузке фильтра, т. е. объёму газа, проходящего через единицу поверхности фильтра в единицу времени, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Фактическая скорость в поровых каналах существенно больше скорости фильтрации ω_ϕ и зависит от пористости фильтрующей перегородки ε

$$\omega_\varepsilon = \frac{\omega_\phi}{\varepsilon}. \quad (6.3)$$

Важной характеристикой пористой перегородки является **пылеёмкость**, которая представляет собой количество пыли, задерживаемое фильтром за период непрерывной работы, т. е. между двумя очередными регенерациями.

Критерием пылеёмкости является **интенсивность роста удельного сопротивления**

$$U = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{M_1}, \quad (6.4)$$

где ΔP_1 , ΔP_2 – начальное и конечное сопротивление фильтра, Па;

M_1 – удельная запыленность фильтра – количество пыли, уловленной единицей поверхности, $\text{кг}/\text{м}^2$;

При заданном предельном сопротивлении ΔP_2 пылеёмкость фильтра рассчитывают по формуле

$$M = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{U} \cdot F. \quad (6.5)$$

При улавливании мелких частиц пылеёмкость фильтра оказывается всегда меньше, чем при улавливании крупной пыли.

6.2 Механизм процесса фильтрации

Осаждение частиц пыли на твёрдых элементах пористой перегородки может происходить под воздействием различных факторов:

- эффект касания, когда частица пыли движется на расстоянии меньше радиуса частицы от пылеулавливающего препятствия;
- эффект инерции, когда при изменении направления движения запыленного потока частицы пыли отклоняются от этого направления и осаждаются;
- диффузионный эффект проявляется при осаждении частиц с размером менее 0,1 мкм (субмикронных). Под действием ударов газовых молекул такие частицы движутся хаотически, отклоняются от направления движения газов и относительно легко осаждаются на волокнах или зёрнах перегородки;
- гравитационный эффект проявляется для частиц крупнее 5 мкм при движении газов в вертикальном направлении со скоростью менее 0,05 м/с;
- электростатический эффект, который проявляется в силу взаимодействия зарядов на частицах и на твёрдых элементах пористой перегородки.

Таким образом, эффективность пылеулавливания можно записать как функцию указанных параметров

$$\eta = \lambda(R, S_{tk}, D, G, E), \quad (6.6)$$

где R, S_{tk}, D, G, E – безразмерные параметры осаждения частиц под действием сил касания (зацепления), инерции, диффузии, гравитации и электрических сил [41, 42].

Эффект касания (зацепления).

Если частица движется по линии, проходящей около твердого элемента фильтра на расстоянии, меньшем радиуса частицы или равном ему, она непременно коснется этого элемента и удержится на нём.

Параметр R , характеризующий осаждение частиц в результате касания и зацепления, определяют по формулам:

для волокнистых перегородок

$$R = \frac{d_q}{d_g},$$

для насыпного (зернистого) материала

$$R = \frac{d_q^2}{d_3^2},$$

где d_q – диаметр частицы, м;

d_g – диаметр волокна, м;

d_3 – диаметр зерен засыпки, м.

Степень очистки в результате касания оценивается эмпирической формулой

$$\eta_R = R^2 \left(\frac{d_g V_z \rho_z}{\mu_c} \right)^{0,0625}, \quad (6.7)$$

где V_z – скорость газа, м/с;

ρ_z – плотность газа, кг/м³;

μ_c – вязкость среды, Па·с.

Эффект инерции.

Механизм захвата за счет инерции тем эффективнее, чем выше скорость фильтрации и больше масса частицы. При обтекании твердого элемента фильтра (волокна или зерна) линии тока искривляются, а частица пыли, стремясь, в силу инерции, сохранить прямолинейное движение, смещается с линии тока и направляется к поверхности твёрдого элемента, на котором и оседает.

Вероятность столкновения и осаждения частиц на волокне при ламинарном движении газа может быть определена как функция безразмерного критерия Стокса

$$S_{tk} = \frac{V_z d_p^2 \rho_p}{18 \mu_c d_o},$$

где V_z – скорость движения газов, м/с;

d_p – диаметр (размер) частиц, м;

ρ_p – плотность частиц, кг/м³;

μ_c – вязкость газовой среды, Па·с;

d_o – диаметр волокна или зерна, м.

Чем больше значение S_{tk} , тем больше частиц сталкивается с волокном.

Степень очистки под действием сил инерции составляет

$$\eta_{st} = S_{tk}^3 (S_{tk}^3 + 0,77 S_{tk}^2 + 0,22). \quad (6.8)$$

Из приведенной зависимости следует, что с увеличением диаметра частиц, скорости движения газа и уменьшением диаметра волокна повышается степень улавливания частиц.

Диффузионный эффект.

За счет неуравновешенных ударов молекул, находящихся в броуновском движении, происходит смещение мелких частиц аэрозоля с линий тока и осаждение их на обтекаемых препятствиях.

Степень улавливания частиц за счёт диффузии определяется по формуле Ленгмюра

$$\eta_d = 2,16 \left[\frac{1}{2(2 - \ln Re)} \right]^{1/3} \cdot Pe^{-2/3}, \quad (6.9)$$

где Pe – критерий Пекле.

Из приведенной зависимости следует, что чем меньше частицы и меньше скорость течения, тем резче выражен этот эффект.

Гравитационный эффект.

Эффективность осаждения частиц на твёрдых элементах фильтровальной поверхности при вертикальном направлении потока газа может быть определена из выражения

$$\eta_G = \frac{V_g}{V_z} = \frac{S_{tk}}{Fr}, \quad (6.10)$$

где V_g – скорость витания частицы, м/с;

V_z – скорость движения газового потока, м/с;

Fr – критерий Фруда, характеризующий соотношение инерционных и гравитационных сил

$$Fr = \frac{V_z^2}{2gr_0}.$$

где r_0 – диаметр волокна или зерна, м.

Электростатический эффект.

В случае если волокно фильтра несет электростатический заряд или поляризовано внешним электрическим полем, оно создает вокруг себя неравномерное электрическое поле. Нейтральные частицы пыли поляризуются этим полем и притягиваются к поверхности волокна, причем знак заряда волокна в этом случае роли не играет.

Формула для определения степени улавливания частиц для этого случая имеет вид

$$\eta_E = \frac{E_0^2 \cdot r^2}{6V_z \cdot \mu \cdot r_0}, \quad (6.11)$$

где E_0 – напряженность электрического поля у поверхности волокна, Н/Кл.

Следовательно, эффективность электростатического захвата частиц растёт с увеличением напряженности поля E и размера частиц r и уменьшается с возрастанием скорости фильтрации V_z .

При фильтровании в той или иной мере могут проявляться все рассмотренные выше эффекты. На практике при определении степени улавливания частиц обычно выделяют и учитывают эффект, вносящий наиболее существенный вклад в процесс осаждения. Влиянием второстепенных эффектов в первом приближении пренебрегают.

Установлено, что на улавливание пыли в промышленных фильтрах наибольшее влияние оказывает осаждение частиц под действием сил инерции и касания.

6.3 Классификация фильтров

Фильтры, применяемые для очистки газов, классифицируются по различным признакам: назначению, форме фильтровальных элементов, способу подвода запыленных газов, форме корпуса, и т. д.

Наиболее общей является классификация по материалу, из которого изготовлена фильтровальная перегородка. Согласно этой классификации, различают:

- **фильтры с гибкими пористыми перегородками** (тканевые материалы из

природных, синтетических и минеральных волокон; нетканые волокнистые материалы: войлоки, клееные и иглопробивные материалы; ячеистые листы: губчатые резины, пенополиуритан);

- **зернистые фильтры** (неподвижные, насыпные, перемещающиеся материалы, псевдооживленные слои материала);

- **фильтры с жесткими пористыми перегородками** (пористая керамика и пластмасса, металлокерамика, сетки).

В зависимости от концентрации пыли в газе, поступающем на очистку, и назначения фильтры подразделяют на следующие типы:

- **фильтры тонкой очистки воздуха** – высокоэффективные фильтры для улавливания с к. п. д. более 99% высокодисперсных частиц при входной концентрации пыли 0,5-5 мг/м³ и скорости фильтрования менее 0,1 м/с. Фильтры обычно не подвергают регенерации;

- **фильтры для очистки воздушных потоков** (воздушные фильтры) используются в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха при концентрации пыли в очищаемом воздухе до 50 мг/м³. Скорость фильтрования 2,5-3 м/с. Изготавливают регенерируемые и нерегенерируемые воздушные фильтры;

- **промышленные фильтры для очистки промышленных газов** с входной концентрацией пыли до 60 г/м³ при повышенных температурах и содержании в газах агрессивных компонентов. Промышленные фильтры работают с регенерацией фильтрующих материалов.

Тканевые фильтры

Среди фильтров с гибкими пористыми перегородками для очистки больших объёмов воздуха (газов) со значительной концентрацией пыли широкое распространение получили тканевые фильтры. Фильтрующими элементами в этих аппаратах являются рукава или рулоны из специальной фильтровальной ткани.

Тканевые фильтры подразделяют:

- *по способу работы* на фильтры периодического и непрерывного действия;

- *по форме фильтрующей поверхности* на рукавные, картриджные и рулонные;

- *по способу подачи запыленного газа* на всасывающие и нагнетательные;

- *по числу секций* на однокамерные и многосекционные;

- *по способу регенерации фильтрующей поверхности* на фильтры с механическим встряхиванием фильтрующей поверхности; фильтры с обратной секционной продувкой; фильтры с импульсной продувкой сжатым воздухом; фильтры, регенерируемые струйной продувкой и др.;

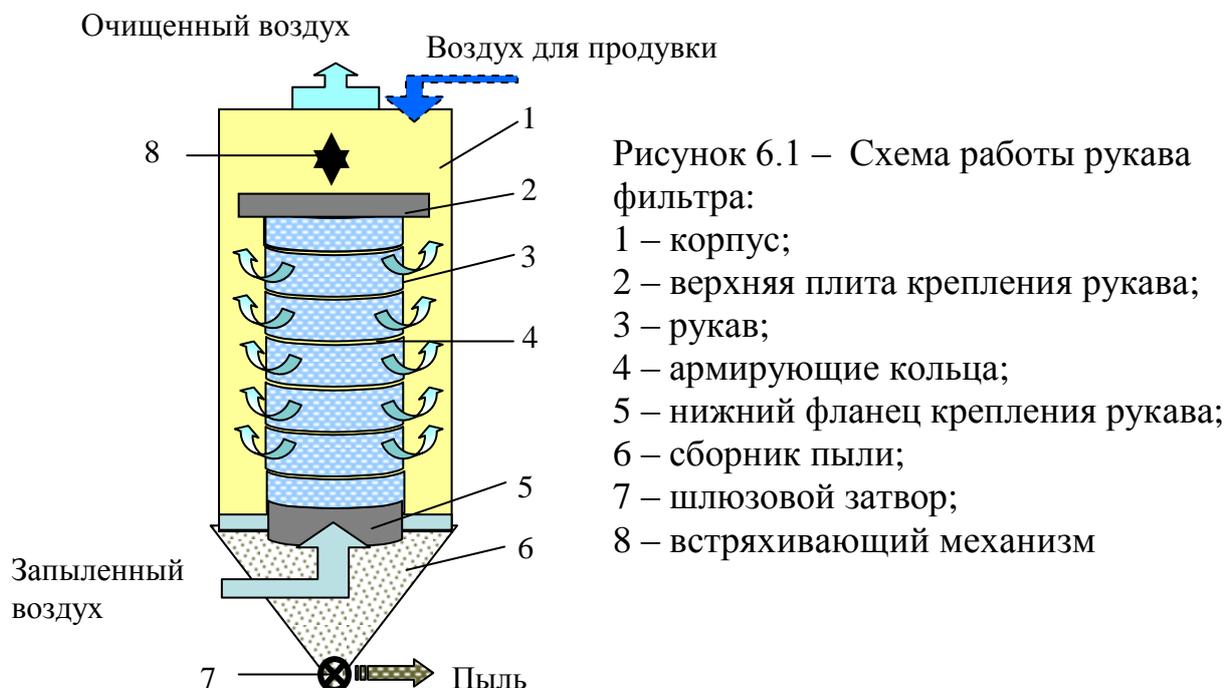
- *по способу подвода запылённого потока в рукав* на фильтры с нижним, верхним и двусторонним подводом.

Остановимся более подробно на конструктивных особенностях рукавных фильтров.

6.4.1 Рукавные фильтры

Рукавные фильтры являются наиболее распространённым типом тканевых фильтров. Главным элементом такого фильтра является рукав, изготовленный из фильтровальной ткани.

Устройство и принцип работы одинарной ячейки рукавного фильтра иллюстрируется на рис. 6.1.



В корпусе фильтра 1 к верхней сплошной плите 2 крепится рукав 3. Для предупреждения сплющивания рукава армируют металлическими кольцами 4. В нижней части рукав крепят к обечайке рукавной плиты 5 с помощью хомутов. В нижней части корпуса фильтра расположен сборник пыли 6, отделённый от корпуса нижней рукавной плитой. Для выгрузки пыли из сборника используется шлюзовой затвор 7. Для обеспечения достаточного натяжения материала рукавов при их работе верхнюю плиту рукава подвешивают на пружину. Иногда несколько рукавов подвешивают к раме, закрепленной с помощью пружины к корпусу или встряхивающему механизму 8.

Запыленный воздух подводится снизу через обечайку рукавной плиты внутрь рукава. Фильтруясь через ткань, газ проходит в корпус фильтра и через открытый выпускной клапан выходит из него, поступая в газопровод очищенного воздуха. Частицы пыли, содержащиеся в запыленном воздухе, оседают на внутренней поверхности рукава, в результате чего сопротивление рукава проходу воздуха постепенно увеличивается. При достижении заданного предельного значения гидравлического сопротивления фильтр переводится в режим регенерации. Подача запыленного воздуха в него прекращается и производится освобождение внутренней поверхности рукава от осевшей пыли.

Как уже указывалось выше, существуют различные способы регенерации. На рис. 6.1 показана комбинированная схема регенерации внутренней поверхности рукава при помощи механического встряхивания и обратной продувки. Продувочный воздух направляется внутрь корпуса через открытый продувочный клапан (выпускной клапан закрыт). Фильтруясь через рукав в обратном направлении, он разрушает слой пыли, образовавшийся на внутренней поверхности рукава, которая падает в сборник пыли. Отработавший продувочный воздух через подводящий патрубок удаляется в газопровод запыленного воздуха. В целях повышения эффективности регенерации одновременно с подачей продувочного воздуха производится механическое встряхивание рукава. После окончания цикла регенерации фильтр опять включается в работу.

Время работы рукавного фильтра между циклами регенерации определяется большим количеством факторов, что существенно затрудняет его расчёт. Поэтому обычно продолжительность межрегенерационного периода, соответствующего максимальной эффективности работы фильтра, определяется экспериментальным путём.

Представленная на рис. 6.1 схема работы фильтра является лишь частным случаем конструктивного разнообразия рукавных фильтров, которые различаются по способу работы, способу подачи пылегазового потока в рукава, виду ткани и принятой системе регенерации.

Способ работы.

В фильтрах периодического действия последовательно чередуются периоды накопления пыли и регенерации рукавов. Фильтры с непрерывным режимом работы разделены на отдельные секции. Некоторые из них, по мере необходимости, отключаются на регенерацию, в то время как остальные секции продолжают работать по очистке запыленного воздуха.

Способ подачи запыленного воздуха.

На рисунке 6.2 приведены три способа подвода запыленного потока в рукав.

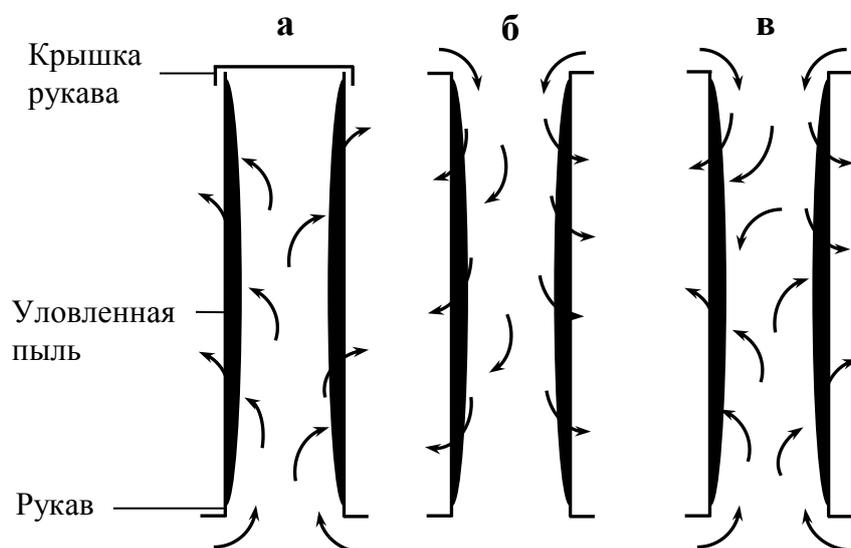


Рисунок 6.2 – Способ подвода газопылевого потока в рукав:
 а – с нижним подводом;
 б – с верхним подводом;
 в – с двусторонним подводом

При нижнем подводе (рис. 6.2, *а*) ограничивается возможная длина рукавов, так как трудно обеспечить выпадение накопленной пыли в течение короткого периода регенерации. Кроме того, за счёт фракционного отцеивания в верхней части рукавов накапливается очень тонкая пыль, которая плохо сбрасывается при регенерации.

При вводе сверху (рис. 6.2, *б*) направление потока запыленного воздуха способствует выпадению пыли в бункер. В ряде случаев это способствует созданию режима авторегенерации, обеспечивающего удалению пыли с поверхности рукавов без внешнего импульса системы регенерации. Подача сверху также даёт возможность использовать в фильтрах длинные рукава. Однако при этом усложняются устройства для натяжения рукавов.

Открытые с двух сторон рукава (рис. 6.2, *в*) используются в фильтрах с комбинированной подачей пылегазового потока, однако в этих аппаратах теряется основное преимущество фильтров с верхним подводом, так как восходящий поток препятствует осаждению крупных фракций пыли.

Кроме перечисленных способов подвода запыленного воздуха применяется также его подача со стороны наружной части рукава.

Фильтровальные ткани.

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

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

Ворс должен быть обращен навстречу запыленному потоку. При движении запыленного потока воздух прижимает ворсинки к ткани. При обратной продувке происходит выпучивание ворсинок, и накопившиеся пылевые частицы удаляются (рис. 6.3).

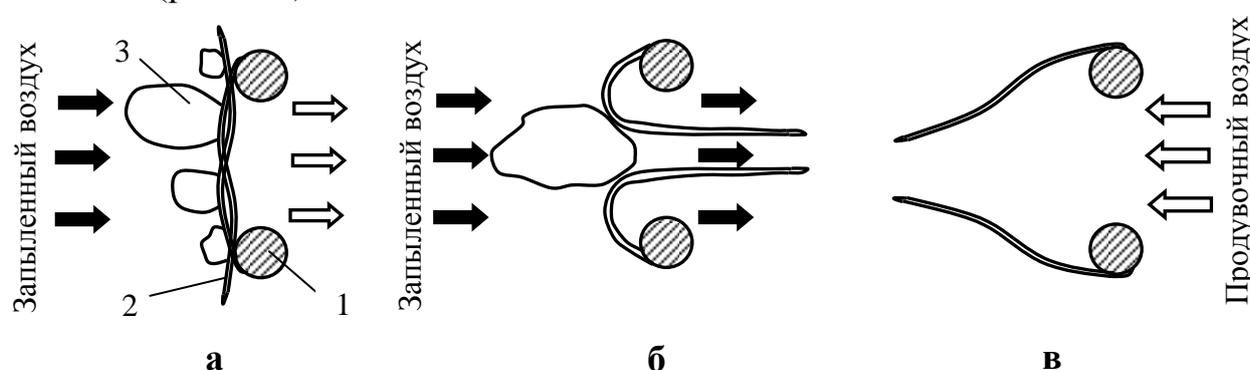


Рисунок 6.3 – Положение ворса фильтрованной ткани при различных режимах работы: а – рабочее положение ворса: 1 – нить ткани; 2 – нить ворса; 3 – частицы пыли; б – пылевой пробой ткани; в – обратная продувка

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

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

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

Фильтрующих материалов, полностью удовлетворяющих всем перечисленным требованиям, нет. Поэтому каждую ткань используют в наиболее благоприятных для неё условиях. Выбор ткани определяется в основном температурой, влагосодержанием и агрессивными свойствами газового потока, сроками службы ткани в рабочих условиях и стоимостью ткани (Приложение 4).

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

Хлопчатобумажные, льняные и шерстяные ткани отличаются небольшой стоимостью. Однако они могут применяться при фильтрации газов с температурой не более 90°C. Кроме того, они характеризуются повышенной гигроскопичностью, низкой механической прочностью, стойкостью к кислотам и щелочам.

Значительными преимуществами обладают фильтровальные ткани из *нитрона* и *лавсана*. Их волокна характеризуются прочностью, эластичностью, малой гигроскопичностью. При влажности воздуха 65% они поглощают из воздуха лишь 1% влаги. Нитрон и лавсан неограниченно долго без заметных последствий выдерживают температуру 120-130°C и ограниченное время 180°C. По сравнению с хлопком нитрон и лавсан в несколько раз устойчивее к кислотам, органическим растворителям. Они устойчивы также к действию микроорганизмов, моли.

Асбестовое волокно относится к группе естественных волокон минерального происхождения. Основным достоинством *волокон асбеста* является высокая термостойкость, неподверженность гнилостным процессам, стойкость по отношению к растворам щелочей и кислот. Прочность невелика.

Стекловолоконное обладает высокой термостойкостью, химической стойкостью, выдерживает значительные разрывные нагрузки. Стеклоткани применяют для очистки газов с температурой до 250°C. Фильтровальные стеклоткани обычно изготавливают из волокон диаметром 6-8 мкм. Стеклоткани аппретируют – покрывают кремнийорганическим соединением и графитируют. Благодаря этому срок службы стеклоткани увеличивается.

Фильтровальные материалы могут быть ткаными и неткаными, а в зависимости от состояния поверхности – ворсованными и гладкими. При изготовлении нетканых материалов из синтетических волокон сцепление этих волокон усиливают, пробивая слой волокон специальными иглами и получая, таким образом, иглопробивные материалы. Для этих же целей используют склеивающие добавки и др.

Фильтровальные ткани характеризуют следующими основными показателями: массой 1 м² ткани, которая колеблется от 0,37 до 0,5 кг, воздухопроницаемостью, толщиной нити и пределом прочности на разрыв.

Воздухопроницаемость фильтровальных тканей численно равна скорости фильтрации через 1 м² ткани при перепаде давлений, равном 49 Па. Она измеряется в м³/(м²·мин). Установлено, что при очистке газов в тканевых фильтрах скорость фильтрации должна быть от 0,5 до 1,2 м³/(м²·мин). При увеличении скорости фильтрации происходит значительное уплотнение пылевого слоя на поверхности ткани, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления. Кроме того, с увеличением скорости фильтрации наблюдается явление вторичного уноса пыли, особенно из отверстий между нитями. Вследствие этого концентрация пыли в очищенном газе возрастает.

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

Система регенерации.

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

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

Регенерацию шерстяных, хлопчатобумажных и синтетических тканей в большинстве случаев осуществляют механическим встряхиванием и обратной продувкой. В некоторых случаях воздух продувки подогревают для устранения конденсации паров на фильтроткани.

Рукава из гладкой ткани (синтетической, стеклянной) регенерируют только обратной продувкой воздухом.

Механическое встряхивание может выполняться несколькими способами. Нестойкие на изгиб ткани (например, из стекловолокна) регенерируют быстрым покачиванием из стороны в сторону без изменения натяжения. Фильтры из более эластичных и нетолстых тканей встряхивают волнообразным изменением натяжения ткани, поднимая и опуская вверх рукава. Большинство встряхивающих устройств

снабжается электроприводом. Иногда встряхивание комбинируют с продувкой тканей.

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

Струйная регенерация (рис. 6.4) характеризуется тем, что воздух обратной продувки проходит не через всю поверхность рукава, а лишь через узкий участок, расположенный напротив кольцевого сопла со щелью шириной от 0,8 до 6 мм. Сопло непрерывно перемещается по высоте рукава, обеспечивая поочередную очистку всей его поверхности. Кольцевая струя сжатого воздуха давлением 500-600 кПа со скоростью 10-30 м/с выдувает пыль из ткани внутрь рукава.

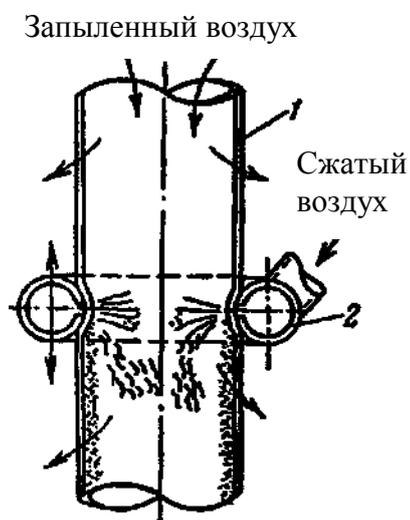


Рисунок 6.4 – Схема обратной струйной продувки рукавного фильтра:

- 1 – рукав;
- 2 – кольцо со щелью и патрубком для подвода сжатого воздуха

Это наиболее мощный способ регенерации, позволяющий выдуть даже частицы пыли, застрявшие в пространстве между нитками. Поэтому фильтры, оборудованные каретками струйной продувки, могут работать с повышенными нагрузками и перепадами давления. Струйная продувка позволяет применять скорость фильтрации до $3-5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ и не требует отключения фильтра на регенерацию.

Недостатки струйной продувки заключаются в сложности устройства перемещения каретки и истирании ею толстых фильтрующих материалов-войлоков, фетров, для которых в основном струйная продувка и используется.

Другая разновидность выдувания пыли – импульсная регенерация – используется в рукавных фильтрах при схеме подачи загрязненного воздуха снаружи внутрь рукава и отложениях пыли на его внешней поверхности (рис. 6.5). При импульсной продувке струя сжатого воздуха, исходящая из сопла распределительной трубы, подсасывает очищенный газ (воздух) и поступает в рукав. Под воздействием избыточного давления рукав раздувается, происходит разрушение слоя осевшей пыли и её выпадение в бункер.

Кроме эффекта продувки пульсирующий поток оказывает и механическое встряхивающее действие. Импульсную регенерацию выполняют без отключения секций.

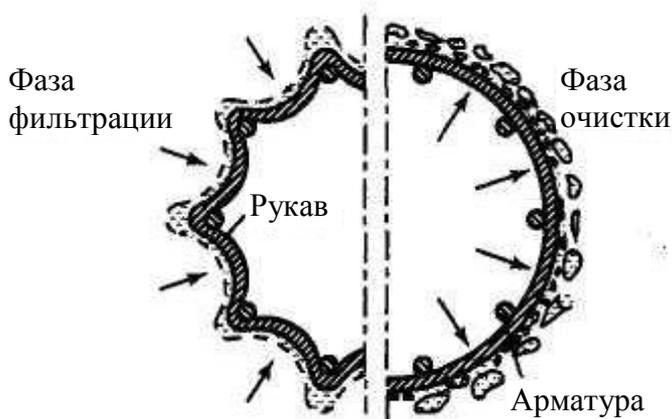


Рисунок 6.5 – Схема импульсной регенерации рукавного фильтра

Чтобы не происходило слишком интенсивной регенерации с удалением остаточного равновесного количества пыли (что приведет к большой величине уноса пыли в начальный период работы фильтра после регенерации), варьируют давление сжатого воздуха, продолжительность и частоту импульсов. Продолжительность импульса – от 0,1 до 0,2 с, частота – 10 импульсов в минуту, давление сжатого воздуха – 500-600 кПа. Расход сжатого воздуха составляет 0,1-0,2% от количества очищенного газа (воздуха).

Конструкции рукавных фильтров.

Рукавные фильтры применяются для очистки промышленных газов от пыли при концентрации до 100 г/м^3 . После рукавного фильтра очищенный воздух может содержать менее 10 мг/м^3 пыли.

Рукавные фильтры чаще применяются при температуре очищаемого газа в диапазоне температур $20-260^\circ\text{C}$, но так же существуют материалы, рассчитанные на работу при температуре до 350°C . В зависимости от гранулометрического состава пыли и начальной запыленности степень очистки (КПД) может составлять 98-99,9% при объёме фильтруемого газа $0,4-1,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$. Гидравлическое сопротивление их лежит в пределах 1000-3000 Па, наработка на отказ определяется 10000-20000 час.

В настоящее время выпускается и эксплуатируется множество разнообразных конструкций рукавных фильтров, отличающихся по наличию корпуса и его форме, способу подачи запылённого воздуха, числу секций, способу регенерации и ряду других признаков. Ниже приведено описание фильтров, различающихся способом регенерации фильтровальной ткани.

Фильтры с механическим встряхиванием.

Механическое встряхивание является самым старым способом регенерации фильтровального материала. Он основан на сотрясении рукавов в вертикальном или горизонтальном направлении. Фильтры с такими системами достаточно широко распространены на предприятиях отечественной промышленности и за рубежом.

Достоинствами фильтров с механическим встряхиванием является стабильность удаления осадка пыли и отсутствие дополнительной системы подачи воздуха на регенерацию ткани.

В качестве основных недостатков следует отметить сложность встряхивающего механизма, который требует постоянного внимания обслуживающего персонала, истирание и изломы рукавов в одних и тех же местах, чувствительность системы к усадке и вытяжке рукавов, необходимость отключения фильтра или отдельной секции на время проведения регенерации.

Необходимость в отключении отдельных секций на регенерацию устранена в конструкции рукавных фильтров РФУ (рис. 6.6).

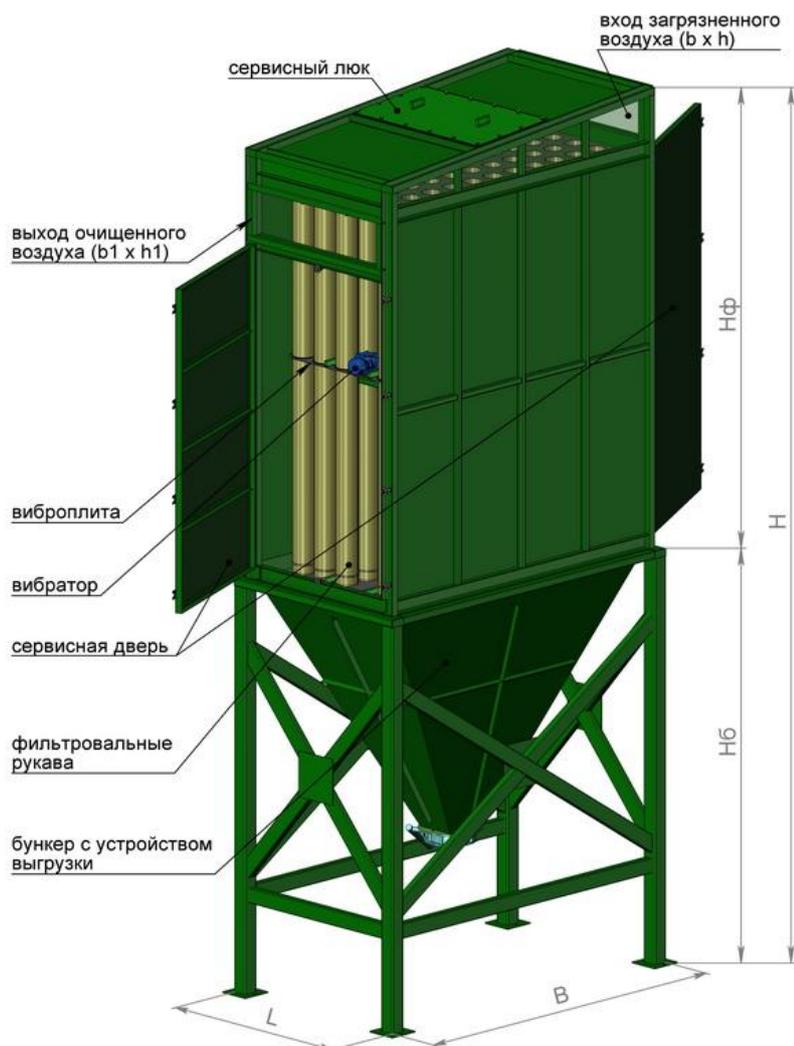


Рисунок 6.6 – Рукавный фильтр РФУ10 с вибровстряхиванием

Рукавные фильтры РФУ10 представляют собой типовые фильтровальные секции производительностью до $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Нарращивание производительности фильтра осуществляется путём добавления секций. Вход пылевоздушной смеси организован сверху.

Запыленный воздух поступает в камеру грязного воздуха в верхней части фильтра и опускается вниз внутри рукавов, фильтруясь наружу, при этом частицы пыли задерживаются на их внутренней поверхности, а очищенный воздух поступает в межукавное пространство и отводится из фильтра. Регенерация запыленных рукавов в рукавном фильтре осуществляется периодической вибрацией виброплиты, закреплённой между рукавами. Пыль, отряхиваемая с рукавов, осыпается в бункер и через устройство выгрузки удаляется из фильтра.

Регенерация проводится без остановки системы аспирации, поскольку нет «подпора» пыли воздухом снизу вверх.

Технические характеристики рукавных фильтров РФУ10 приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Технические характеристики рукавных фильтров РФУ10

Параметр	Ед. изм.	РФУ 10	РФУ 10x2	РФУ 10x3	РФУ 10x4	РФУ 10x5	РФУ 10x6	РФУ 10x8
Количество секций	шт.	1	3	4	8	6	8	12
Производительность по воздуху	тыс. м ³ /ч	5-10	10-20	15-30	20-40	25-50	30-60	40-80
Площадь фильтрования	м ²	80	160	240	320	400	480	640
Количество рукавов	шт.	65	130	195	260	325	390	520
Концентрация пыли на входе	г/м ³	100	100	100	100	100	100	100
Концентрация пыли на входе, не более	мг/м ³	20	20	20	20	20	20	20
Гидравлическое сопротивление, до	Па	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

Фильтры с механическим встряхиванием и посекционной продувкой.

Типичным рукавным фильтром с механической регенерацией и обратной продувкой является **многосекционный рукавный фильтр РФГ** конструкции Ги-процветмета (рис. 6.7, а). Он состоит из металлического корпуса 3, бункера 2 с приёмно-распределительной коробкой 8. В бункере предусмотрен шнек 1 для выгрузки пыли. Корпус разделен на секции, в которых смонтировано по 14 рукавов 4. В верхней части корпуса размещены встряхивающий механизм рукавов, коллектор 5 продувки рукавов воздухом, выхлопной патрубок 6 очищенных газов и дроссели 7 для газа и воздуха.

Запыленный газ через распределительную коробку подводится во все секции фильтра и через нижние штуцеры поступает внутрь рукавов. Рукава снабжены стальными кольцами, укрепляемыми на наружной поверхности с целью предотвращения сплющивания при обратной продувке воздуха при регенерации ткани. В верхней части рукава укреплены на сплошных колпаках, подвешиваемых к раме, соединенной с механизмом встряхивания.

После периода фильтрования газов продолжительностью 5-10 мин фильтровальную ткань регенерируют с помощью встряхивания рукава и обратной продувки сжатым воздухом. Стряхивающаяся пыль сбрасывается в бункер фильтра. Продолжительность регенерации рукавов примерно 1 мин. Пыль из бункера шнеком транспортируется к шлюзовому затвору, через который удаляется из бункера фильтра.

Рукавные фильтры выпускают однорядные типа РФГ-1 и двухрядные типа РФГ-2.

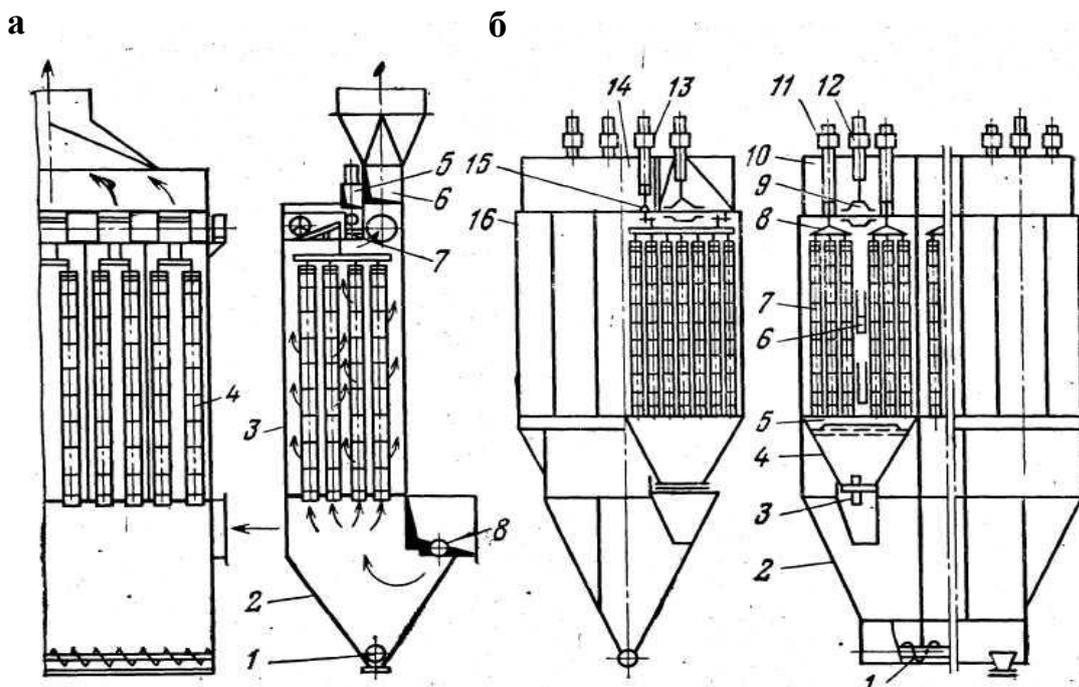


Рисунок 6.7 – Рукавные фильтры: а – РФГ; б – УРФМ

Укрупненный рукавный фильтр УРФМ (рис. 6.7, б) состоит из металлического корпуса 16, общего бункера 2 со шнеком 1. Корпус разделен на 20 секций, внутри которых смонтированы 42 рукава 7. В нижней части рукава крепятся к штуцерам, а в верхней – к крышкам, которые связаны с рамой 8, подвешенной к штоку пневмоцилиндра 11.

Запыленный газ подводится через распределительную решетку 5 внутрь рукавов. Очищенный газ через клапан 9 поступает в камеру 10, через которую выводится из фильтра. Положение клапана регулируется пневмоцилиндром 12.

Фильтроткань регенерируют посекционно. При регенерации клапан 9 закрывается и продувочный воздух из камеры сжатого воздуха 14 через клапан 15 подается в секцию. Одновременно с подачей воздуха осуществляется механическое встряхивание рукавов с помощью пневмоцилиндра 11.

Положение клапана 15 регулируется пневмоцилиндром 13. Пыль, стряхиваемая с рукавов, падает в бункера секции 4, из которых через затвор 3 поступает в общий бункер. Между рукавами предусмотрена обслуживающая площадка 6.

Рукавный фильтр УРФМ имеет бескаркасные рукава диаметром 220 и длиной 4063 мм. Основным материалом для них – нитрон. Общая площадь фильтрации составляет 2300 м².

Фильтры с обратной посекционной продувкой.

Фильтры типа ФР и ФРО просты по устройству, поскольку у них отсутствует механизм встряхивания. Фильтры различаются между собой в основном длиной рукавов, устройством газовых клапанов и системой управления.

Рукавные фильтры типа ФР предназначены для высокоэффективной очистки запыленных газов, не являющихся токсичными, агрессивными, пожаро- или взрывоопасными. Корпус фильтра (рис. 6.8) разделён на секции, внутри которых

размещены открытые снизу рукава. Нижняя часть рукавов прикреплена к решётке. Сверху рукава заглушены крышками, прикрепленными к общей раме подвеса.

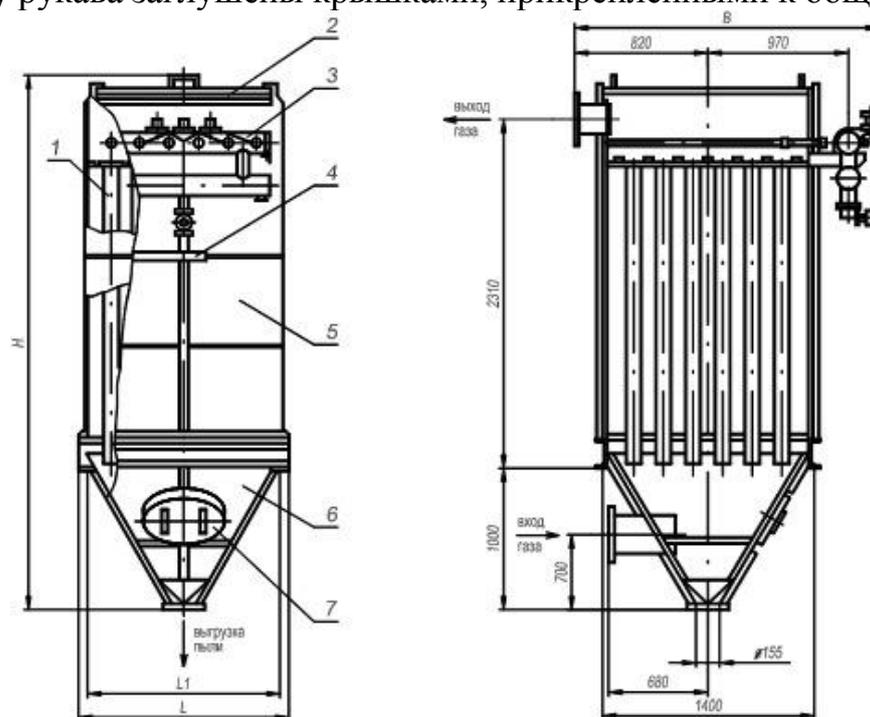


Рисунок 6.8 – Рукавный фильтр ФР-30

Газ поступает в рукава снизу, пыль осаждается на внутренней поверхности рукавов. Регенерация фильтровальных рукавов осуществляется посекционно обратной продувкой очищенным газом, который вентилятором забирается из коллектора очищенного газа и подаётся в коллектор продувочного газа. Для переключения секций на продувку в каждой из них предусмотрены два дроссельных клапана: один – на коллекторе очищенного газа, другой – на продувочном коллекторе. Во время регенерации дроссель секции на коллекторе очищенного газа закрыт, а на продувочном коллекторе – открыт. Переключения потоков неочищенного и чистого газа при обратной продувке производится с помощью дроссельных заслонок с пневмоцилиндрами, работающими при давлении 0,5 МПа.

В табл. 6.2 приведены технические характеристики фильтров типа ФР.

Таблица 6.2 – Технические характеристики фильтров типа ФР

Параметр	Ед. изм.	ФР-30	ФР-90	ФР-180	ФР-360	ФР-630	ФР-800	ФР-1250	ФР-1600
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Площадь фильтрования	м ²	30	90	180	360	606	808	1212	1616
Количество секций	шт.	1	3	4	8	6	8	12	16
Количество рукавов	шт.	36	108	140	288	216	288	432	576

Окончание таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметр рукав	мм	135	135	135	135	135	135	135	135
Длина рукава	м	2	2	2	3	6,8	6,8	6,8	6,8
Концентрация пыли на входе	г/м ³	20	20	20	20	50	50	50	50
Гидравлическое сопротивление	кПа	1,2-2	2	2	2	2	2	2	2
Давление продувочного воздуха	МПа	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6	0,3-0,6

Отличительной особенностью **фильтров ФРО** является использование рукавов большого диаметра и большой длины (табл. 6.3), а также применение клапанов тарельчатого типа с приводом от пневмоцилиндров для переключения секций на регенерацию. Запыленный поток подается в открытые снизу рукава, закрепленные на нижней решётке. Осажденная пыль периодически удаляется путем обратной продувки рукавов потоком воздуха или очищенного газа.

Таблица 6.3 – Технические характеристики фильтров типа ФРО

Марка фильтра	Общая площадь поверхности фильтра F, м ²	Число секций n, шт.	Общее число рукавов Z, шт.	Диаметр рукава d, мм	Длина рукава L, м
ФРО-1250-1	1266	6	252	200	8
ФРО-1650-1	1688	8	336		
ФРО-2500-1	2530	12	504		
ФРО-4100-2	4104	8	432	300	10
ФРО-5100-2	5130	10	540		
ФРО-6000-2	6156	12	648		
ФРО-7000-2	7182	14	756		
ФРО-8000-2	8208	16	864		
ФРО-20000-3	20520	10	2160		
ФРО-24000-3	24624	12	2592		

Фильтры типа ФРО используются для очистки больших объёмов запыленного воздуха (свыше 50 тыс. м³/ч) при температурах до 230°C. В качестве фильтрующих материалов применяется лавсан, стеклоткань и другие ткани. Корпуса фильтров рассчитаны на разрежение до 6 кПа.

Фильтры со струйной продувкой.

Рукавный фильтр со струйной продувкой РФСП-II (рис. 6.9) имеет 4 секции. Запыленный газ поступает сверху внутрь рукавов 9 диаметром 300 мм и длиной 4,8 м. В каждой секции 22 рукава. Общая площадь поверхности фильтрования составляет 370 м^2 . Для удаления пыли, осевшей на ткани внутри рукавов, по рукавам движется рама-каретка 8 с 22 отверстиями диаметром 300 мм (по диаметру рукава) и кольцеобразной щелью шириной 2 мм по всей периферии рукава для струйной продувки.

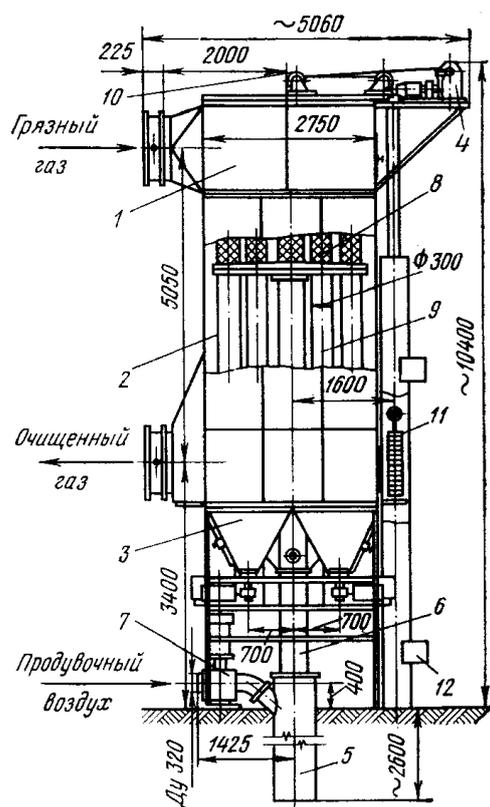


Рисунок 6.9 – Рукавный фильтр со струйной продувкой РФСП-II

Плотным прилеганием рамы-каретки к ткани рукавов достигают не только концентрированной подачи продуваемого воздуха, но и интенсивной ломки пылевого слоя при движении каретки по рукавам.

Воздух в раму-каретку подаётся через клапан 7 и затем через систему, состоящую из двух труб – наружной 5 и внутренней 6. Рама-каретка подвешена на двух тросах к двойному блоку 10. Конец одного троса закреплён на барабане лебёдки 4. К концу второго троса прикреплены грузы противовеса 11. На кожухе противовеса находятся аварийные конечные выключатели 12. Корпус аппарата включает камеру грязного газа 1, камеру чистого газа 2 и спаренный бункер 3. Пыль из бункера удаляется шнеками.

Давление продувочного воздуха перед клапаном должно быть $10\text{-}20 \text{ кН/м}^2$. При достижении заданного гидравлического сопротивления ткани (обычно не более $3,0 \text{ кН/м}^2$) автоматически осуществляется её регенерация. Секции регенерируются последовательно. После снижения последнего при регенерации подача

продувочного воздуха прекращается и механизм передвижения колец останавливается.

Преимуществом фильтра со струйной продувкой является то, что ткань регенерируют без отключения потока очищаемого воздуха. Их применяют для очистки больших объёмов малозапыленных газов (входная концентрация пыли в газах 300-500 мг/м³) от высокодисперсной пыли с достижением выходной запыленности около 2-4 мг/м³. Скорость фильтрации может быть повышена до 3-5 м/мин и более.

Кроме фильтра РФСП-П промышленностью выпускаются рукавные фильтры со струйной продувкой типа РФСП-1580. В аппарате 20 секций, расположенных в два ряда. В каждой секции 24 рукава диаметром 220 мм и длиной 5,0 м. Общая поверхность фильтрации аппарата составляет 1580 м², давление продувочного воздуха 60 кН/м.

Фильтры с импульсной продувкой.

Фильтры с импульсной продувкой типа ФРКИ, ФРИ, ФРКДИ и другие нашли применение почти во всех отраслях промышленности. Фильтры с импульсной продувкой отличаются тем, что в их конструкции нет встряхивающих механизмов, дросселей и обдувочных вентиляторов. Схема фильтра показана на рис. 6.10.

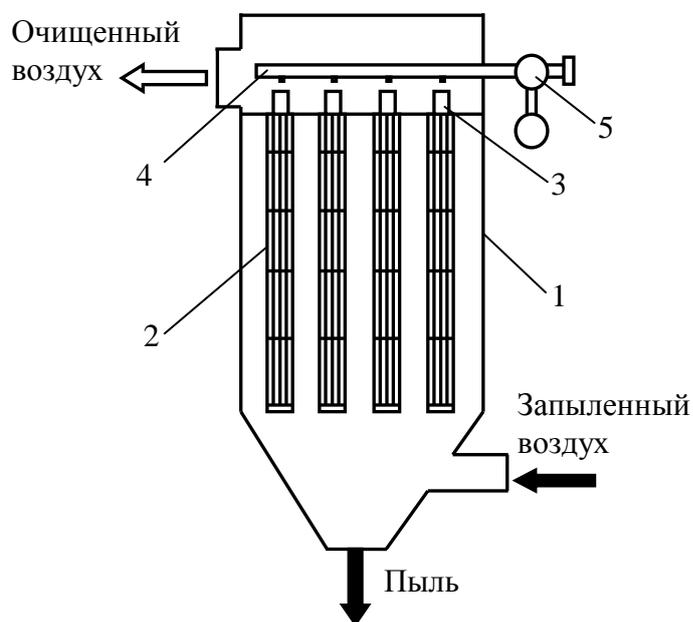


Рисунок 6.10 – Схема фильтра с односторонней импульсной продувкой:

- 1 – корпус фильтра;
- 2 – каркас рукава;
- 3 – эжекторный патрубок;
- 4 – воздухораспределительная труба;
- 5 – пневматический клапан

Фильтр состоит из корпуса 1, разделенного горизонтальной перегородкой на камеры чистого и запыленного газа. Фильтровальные рукава натянуты на каркасы 2, подвешенные на горизонтальной перегородке. В верхней части каждого каркаса установили эжекторный патрубок 3. В камере чистого газа установлены воздухораспределительные трубы 4 с соплами, расположенными соосно с диффузорами. Воздухораспределительные трубы через пневматический клапан 5 соединены с ресивером сжатого воздуха.

Запыленный воздух поступает в нижнюю часть фильтра, распределяется по рукавам и, проходя через фильтровальный материал, очищается от частиц пыли. Очищенный воздух из внутреннего объема рукава через эжекторные патрубки поступает в камеру чистого воздуха и выбрасывается в атмосферу. По мере запыления фильтровального материала растёт гидравлическое сопротивление фильтра. При достижении определенного, заранее заданного гидравлического сопротивления от прибора управления подаётся сигнал на включение пневматических клапанов. Струя напорного воздуха, выбиваясь из сопла, эжектирует находящийся в камере чистый газ внутрь рукава. Под действием избыточного давления в рукаве фильтровальный материал продувается. Импульсная подача сжатого воздуха внутрь рукава заставляет фильтровальный материал вибрировать, ударяться о каркас. Пылевой слой деформируется, обратным потоком продувочного воздуха отделяется от фильтровального материала и сбрасывается в бункерную часть фильтра.

В зависимости от конструкции фильтра регенерация проводится или при непрерывной работе фильтра, или при отключенной от потока газа секции. Достоинствами фильтров с импульсной продувкой является, прежде всего, экономичность в работе, относительно малые габариты, простота конструктивного оформления, надежность в работе. К основным недостаткам следует отнести: невозможность применения в качестве фильтровального материала стеклотканей, из-за их быстрого разрушения при трении о каркас; повышенные требования к монтажным работам, из-за необходимости тщательной центровки регенерирующих сопел с осью рукавов; необходимость наличия дополнительного пространства над фильтром для выемки каркасов; необходимость наличия сжатого воздуха давлением до 6 атм. Однако, в общей оценке, эти фильтры по сравнению с другими конструкциями имеют явные преимущества, особенно при применении их в малых аспирационных системах.

Фильтры типа ФРКИ являются аппаратами общепромышленного применения. Они предназначены для высокоэффективной очистки запыленных газов с температурой до 140°C, не являющихся токсичными, агрессивными, пожаро- и взрывоопасными. Принципиальная схема фильтра представлена на рисунке 6.11.

Фильтр состоит из корпуса, разделенного на камеры неочищенного и очищенного газов, фильтровальных элементов (каркасного типа), клапанной секции с управляющими электромагнитами, устройства управления регенерацией, бункеров со шнеками или без них, в зависимости от типоразмера фильтра.

В фильтре запыленный газ из нижней части корпуса направляется к рукавам и далее через фильтрующий материал во внутреннюю полость рукавов. Пыль задерживается на фильтровальном материале, а очищенные газы через эжекторные патрубки удаляются в камеру очищенного газа и далее к потребителю или в атмосферу. Регенерация фильтровальных рукавов осуществляется периодически по заданному циклу без отключения секций односторонней импульсной продувкой, сжатым воздухом. Система регенерации рассчитана на использование сжатого воздуха давлением до 0,6 МПа.

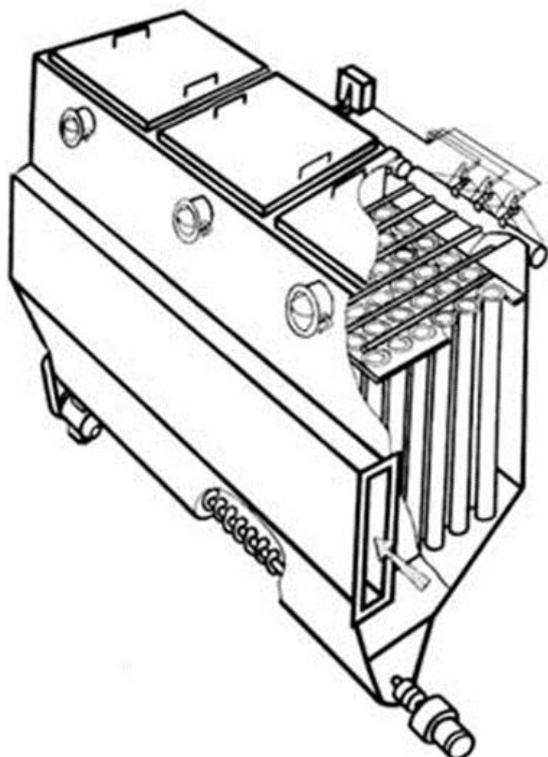


Рисунок 6.11 – Рукавный фильтр ФРКИ-90

Технические характеристики фильтров ФРКИ приведены в Приложении 5.

Фильтры с двухсторонней импульсной продувкой типа ФРКДИ предназначены для улавливания нетоксичных и невзрывоопасных пылей при температуре до 130-140°C. В отличие от фильтров ФРКИ фильтры ФРКДИ имеют рукава, открытые с верхнего и нижнего торца, длина которых равна 6 метров. Регенерация рукавов осуществляется при помощи импульсов сжатого воздуха одновременно сверху и снизу рукавов.

Технические характеристики фильтров ФРКДИ приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4 – Технические характеристики фильтров типа ФРКДИ

Параметр	Ед. изм.	ФРКДИ-550	ФРКДИ-720	ФРКДИ-1100
Площадь фильтрования	м ²	550	720	1100
Количество секций	шт.	6	8	12
Количество рукавов в секции	шт.	36	36	36
Диаметр рукав	мм	135	135	135
Длина рукава	м	6	6	6
Гидравлическое сопротивление, не более	кПа	2,8	2,8	2,8
Удельная газовая нагрузка, не более	м ³ /м ² ·мин	1,6	1,6	1,6

Принципиальная схема работы фильтров ФРКДИ показана на рисунке 6.12. Запыленный газ поступает в камеру неочищенного газа через коллектор, расположенный на одном из торцов фильтра. Пыль оседает на внешней поверхности

рукавов. Отфильтрованный газ из верхней части рукавов проходит в верхнюю камеру чистого газа, затем в коллектор. Примерно половина очищенного газа отбирается из нижней части рукавов коллекторами, на которых закреплены рукава снизу.

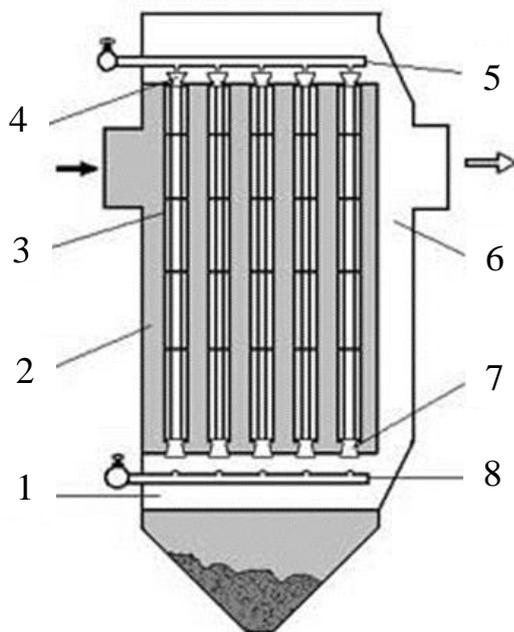


Рисунок 6.12 – Принципиальная схема рукавного фильтра ФРКДИ:
 1 – нижний коллектор чистого газа;
 2 – камера запыленного газа;
 3 – фильтровальные рукава с каркасами;
 4 – верхние эжекторные патрубки;
 5 – верхние воздухораспределительные трубы с соплами;
 6 – коллектор сбора чистого газа;
 7 – нижние эжекторные патрубки;
 8 – нижние воздухораспределительные трубы с соплами

Фильтры рукавные с импульсной продувкой ФРИ являются аппаратами общепромышленного применения. Они предназначены для высокоэффективной очистки запыленных газов с исходной запыленностью до 100 г/м^3 и с температурой до 250°C , не являющихся токсичными, агрессивными, пожаро- и взрывоопасными. Диапазон рабочих температур определяется типом применяемого фильтровального материала. Остаточная запыленность составляет, как правило, не больше 10 мг/м^3 . Система регенерации рассчитана на использование сжатого воздуха давлением до $0,6 \text{ МПа}$.

Рукавные фильтры ФРИ подразделяются на фильтры с односторонней импульсной продувкой, когда регенерация рукавов осуществляется путём подачи струи сжатого воздуха с одной стороны рукава (сверху), и фильтры с двухсторонней продувкой. По исполнению фильтры могут быть изготовлены с отключением секций на время регенерации и без отключения.

Временные параметры регенерации задаются микропроцессорным контроллером в зависимости от входной запыленности, скорости фильтрации и гидравлического сопротивления фильтра. Оптимизация задаваемых параметров осуществляется при пуско-наладочных работах при установившемся эксплуатационном режиме фильтра. Перепад давления между входом и выходом фильтра при этом не должен превышать 2000 Па .

Типоразмерный ряд включает в себя фильтры с площадью поверхности фильтрования от 25 до 1600 м^2 и длиной рукавов $1,65$; $3,3$; 6 метров. Максимальная газовая нагрузка – $1,6 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$.

Технические характеристики фильтров ФРИ приведены в Приложении 5.

Рукавные фильтры серии СРФ с регенерацией рукавов импульсами сжатого воздуха представляют собой типовые фильтровальные секции производительностью от 8000 до 50000 м³/ч (рис. 6.13). Нарращивание производительности фильтра осуществляется путём добавления секций [45].

Оптимальное "сотовое" расположение рукавов в корпусе фильтра позволяет плотнее упаковать рукава и получить фильтр большей производительности при меньших габаритах.

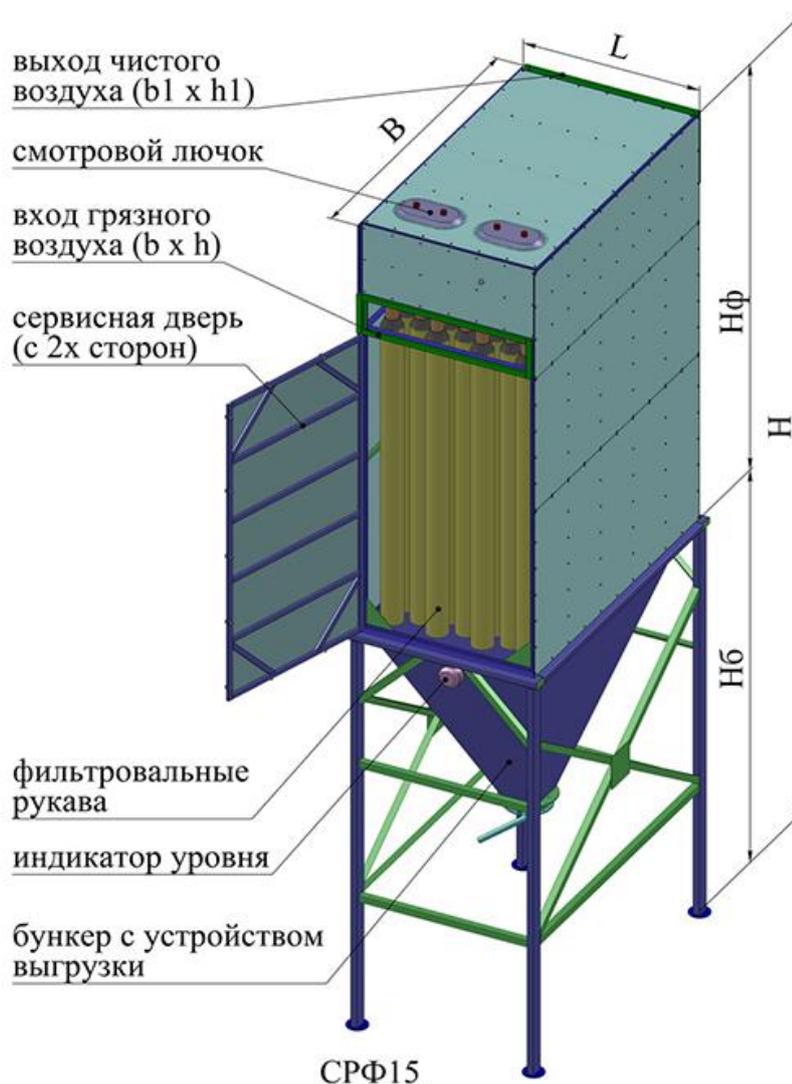


Рисунок 6.13 – Односекционный рукавный фильтр СРФ15 с импульсной продувкой

Поток запыленного воздуха внутри фильтра конструктивно направлен сверху вниз, что снижает пылевую нагрузку на фильтровальную ткань, уменьшает риск налипания пыли на рукава и облегчает их регенерацию.

Формирование импульса сжатого воздуха для регенерации рукавов осуществляется соленоидными клапанами. Клапаны характеризуются длительным сроком службы: не менее 1000000 срабатываний.

В качестве фильтрующих материалов используются современные иглопробивные материалы из синтетических волокон, включая высокотемпературные, антистатические, абразивостойкие, микроволокнистые, с повышенной эффективностью фильтрации и другие.

Для обеспечения возможности возврата уловленного продукта обратно в технологический цикл конструктивно предусматривается разделение фильтровальных секций и бункеров. При этом аспирационные воздуховоды от разных технологических процессов подключаются к разным фильтровальным секциям, что приводит к осаждению в бункерах не смешанных друг с другом продуктов, легко возвращаемых обратно в технологический процесс.

Регенерация фильтрующих рукавов импульсами сжатого воздуха происходит в автоматическом режиме. Система автоматического управления собирается на основе свободно программируемых цифровых контроллеров и легко адаптируется под специфику конкретного производства. Одновременно с регенерацией рукавов автоматика способна контролировать гидравлическое сопротивление фильтра, уровень заполнения бункера, давление в сети сжатого воздуха.

Принцип работы рукавного фильтра СРФ основан на улавливании пыли фильтрующей тканью при прохождении через неё запыленного воздуха. Пылевоздушная смесь по воздуховоду поступает в рукавный фильтр, в камеру «запыленного» воздуха, затем проходит сквозь фильтрующую ткань внутрь рукава. При этом частицы пыли задерживаются на наружной поверхности фильтрующего рукава, а очищенный воздух поступает в камеру «чистого» воздуха и отводится из фильтра. По мере увеличения толщины слоя пыли на поверхности рукавов возрастает сопротивление движению воздуха и снижается пропускная способность фильтра, во избежание чего предусмотрена регенерация запыленных рукавов импульсами сжатого воздуха.

К камере «запыленного» воздуха подключен ресивер сжатого воздуха с электромагнитными клапанами. Сжатый воздух из ресивера через электромагнитные клапана поступает в продувочные трубы. Пыль сбивается с поверхности рукавов импульсами сжатого воздуха, осыпается в бункер и через устройство выгрузки удаляется из фильтра.

Технические характеристики фильтров СРФ приведены в Приложении 5.

6.4.2 Картриджные фильтры

Картриджные (кассетные, патронные) фильтры с импульсной продувкой являются более эффективными по сравнению с рукавными фильтрами и предназначены для высокоэффективной очистки воздуха от любых мелкодисперсных сухих неслипающихся пылей (в том числе мелкодисперсных твердых аэрозолей). Фильтры предназначены для работы при концентрациях пыли в очищаемом воздухе до 10 г/м^3 . Фильтрующим элементом являются картриджи (кассеты, патроны) цилиндрической или прямоугольной формы. Фильтры имеют встроенный механизм регенерации картриджей импульсной продувкой сжатым воздухом.

Отличительной особенностью фильтров является оригинальная раскладка фильтровального материала, позволяющая разместить в рабочей камере значи-

тельное количество фильтровальной ткани, что существенно сокращает габариты фильтра, снижает его металлоёмкость.

Фильтры кассетные импульсные типа ФКИ (рис. 6.14, а) предназначены для очистки промышленных газов и аспирационного воздуха с температурой до 130°C. Очищаемые газы не должны содержать пожаро- и взрывоопасные вещества. Объём очищаемого газа – от 360 до 40000 м³/ч.

В кассетных фильтрах фильтроэлементы представляют собой кассеты с фильтровальной тканью, скомпонованной в виде сотовых ячеек, закрытых с верхнего торца и открытых с нижнего (рис. 6.14, б). Кассеты выполнены быстроразъемными, что облегчает обслуживание, ремонт и эксплуатацию фильтров.

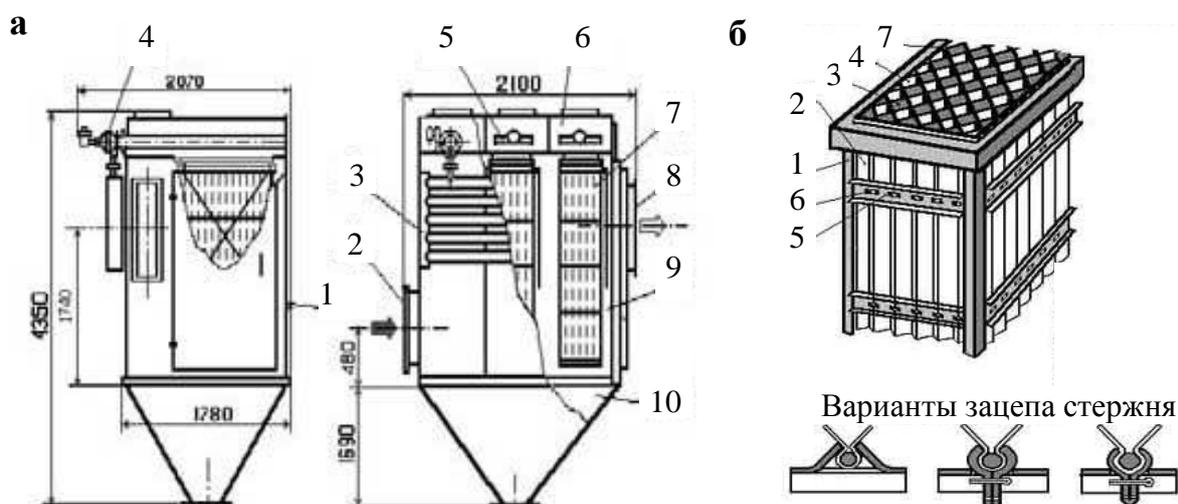


Рисунок 6.14 – Схема кассетного фильтра ФКИ-84 (а) и фильтровального элемента (б):

- а) 1 – корпус; 2 – патрубок входа запыленного газа; 3 – ресивер сжатого воздуха; 4 – электропневмоклапаны; 5 – импульсные трубы; 6 – камера очищенного газа; 7 – фильтрующие элементы; 8 – патрубок выхода очищенного газа; 9 – камера запыленного газа; 10 – пылесборный бункер;
- б) 1 – каркас; 2 – фильтроматериал; 3 – закрытая ячейка; 4 – открытая ячейка; 5 – жесткость; 6 – зацеп; 7 – стержень

Принцип работы фильтра ФКИ заключается в следующем. Пылегазовый поток поступает в коллектор запыленных газов через входной патрубок 2, движется вниз в бункер, огибает вертикальную перегородку, разделяющую коллектор и камеру запыленных газов 9, и распределяется по фильтровальным кассетам 7. В процессе фильтрования пыль осаждается на материале кассет, а газ выходит в камеру очищенных газов 6 и через открытые отверстия в горизонтальной перегородке – в коллектор очищенных газов и далее через патрубок 8 выводится из фильтра.

Регенерация фильтра осуществляется посекционно, согласно программе, заложенной в устройство управления регенерацией. Перед началом регенерации

секция отключается от потока фильтруемого газа с помощью поворотной заслонки.

Регенерирующее устройство состоит из следующих основных составных частей: ресивера сжатого воздуха 3 с выходящими из него магистральными трубами, которые через стенку фильтра входят в камеру чистого газа и расположены в ней параллельно друг другу над фильтровальной перегородкой; электропневматических клапанов 4, которые перекрывают магистральные трубы на выходе из ресивера; импульсных труб 5, пересекающихся с магистральными трубами и имеющих сопловые отверстия над каждой открытой ячейкой фильтровальной секции. Сопловые отверстия располагаются над фильтровальной перегородкой на расстоянии 100 мм.

Процесс регенерации осуществляется следующим образом. По команде управляющего устройства подается сигнал на закрытие поворотной заслонки. Через несколько секунд следует импульс сжатого воздуха. Сжатый воздух из магистральной трубы попадает в импульсные трубы и через сопловые отверстия остронаправленными струями входит в открытые полости ячеек. Происходит продувка фильтровальной перегородки. Через некоторый промежуток времени поворотная заслонка открывается и в секции продолжается процесс фильтрации. Поочередная регенерация остальных секций проводится с определенными интервалами времени. Выбор интервала задается в зависимости от характера роста гидравлического сопротивления фильтра.

Технические характеристики фильтров ФКИ представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Технические характеристики фильтров ФКИ

Обозначение фильтра	Площадь фильтрования, м ²	Габаритные размеры фильтра, мм			Производительность по очищаемому газу, м ³ /ч, не более
		длина	ширина	высота	
ФКИ-28	28	1496	1355	3440	2016
ФКИ-56	56	1593	4350	4032	2040
ФКИ-84	84	2215	2070	4350	6048
ФКИ-112	112	2700	2070	4400	8064
ФКИ-140	140	3370	1944	4340	10080
ФКИ-168	168	3970	2040	4340	12096
ФКИ-224	224	5400	2080	4340	16128
ФКИ-280	280	6600	2080	4350	20160
ФКИ-448	448	5400	4100	4340	32256
ФКИ-560	560	6600	4100	4350	40320

В картриджных фильтрах СРФ-К фильтрующим элементом являются картриджи (кассеты) цилиндрической формы [43].

Фильтры предназначены для работы при концентрациях пыли в очищаемом воздухе до 5 г/м³. Концентрация пыли на выходе из фильтра – не более 4 мг/м³.

Производительность по очищаемому воздуху – от 2000 до 90000 м³/ч, в зависимости от принятого типоразмера и числа секций.

Фильтры серии СРФ4К и СРФ8К представляют собой моноблочные картриджные фильтры, производительностью до 4000 м³/ч и до 8000 м³/ч, соответственно.

Фильтры серии СРФ15К (рис. 6.15) представляют собой типовые фильтровальные секции производительностью до 15000 м³/ч. Нарращивание производительности фильтра осуществляется путём добавления секций.

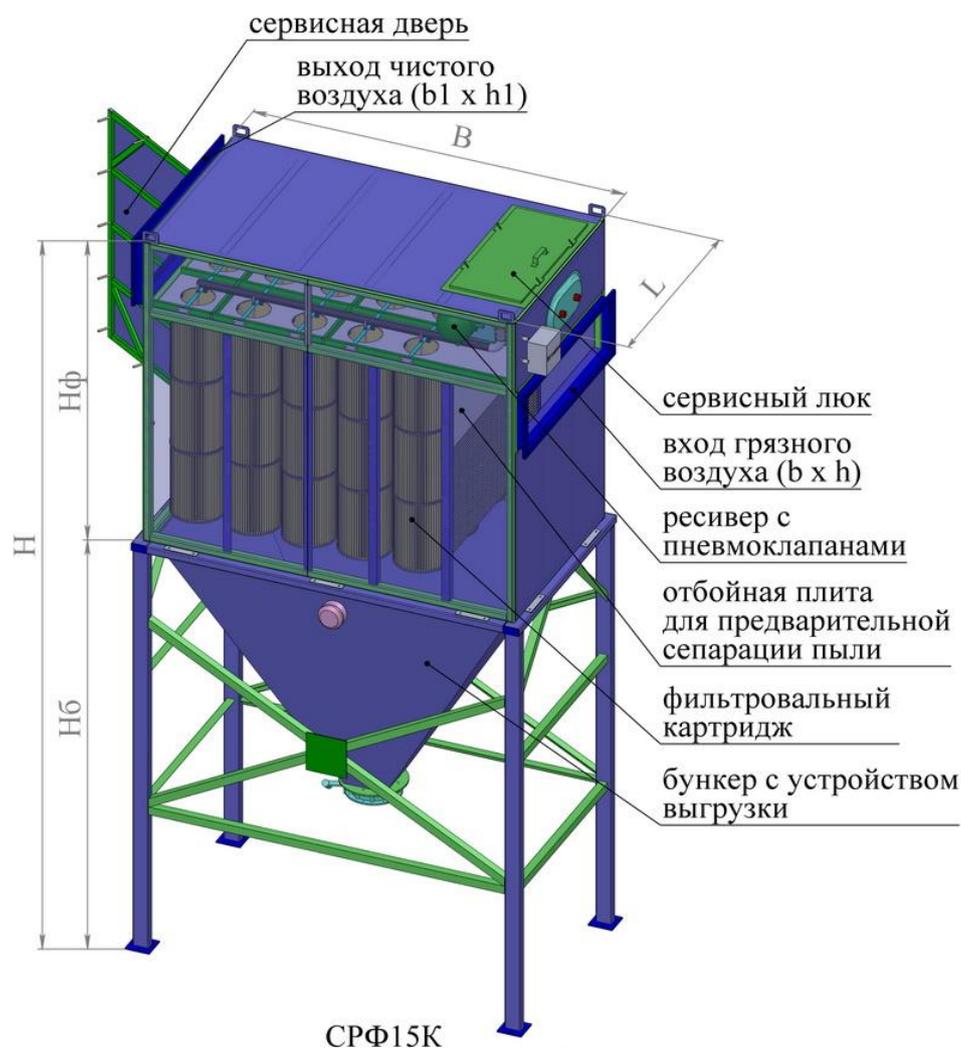


Рисунок 6.15 – Односекционный картриджный фильтра СРФ15К

Принцип работы картриджного (кассетного) фильтра СРФ15К заключается в следующем.

Пылевоздушная смесь по воздуховоду поступает в камеру «запыленного» воздуха. Благодаря наличию на входе фильтра отбойной плиты, происходит резкая смена направления газопылевого потока и предварительная сепарация пыли, часть которой сразу оседает в бункере, не доходя до фильтровальных картриджей. Оставшаяся пыль проходит через фильтровальные картриджи, при этом частицы пыли задерживаются на их наружной поверхности, а очищенный воздух поступает в камеру «чистого» воздуха и отводится из фильтра.

К камере «чистого» воздуха подключен ресивер сжатого воздуха с электромагнитными клапанами. Воздух из ресивера через электромагнитные клапаны поступает в продувочные трубы. Регенерация запыленных картриджей осуществляется импульсами сжатого воздуха. Пыль, стряхиваемая с картриджей, осыпается в бункер и через устройство выгрузки удаляется из фильтра.

Технические характеристики картриджных фильтров СРФ-К представлены в табл. 6.6.

Таблица 6.6 – Технические характеристики картриджных фильтров СРФ-К

Модель	Количество секций	Производительность по воздуху, до м ³ /ч	Площадь фильтрации, не более, м ²	Количество фильтровальных элементов, шт	Расход сжатого воздуха, л/мин
СРФ4К	1	4000	60	6	150
СРФ8К	1	8000	120	6	150
СРФ15К	1	15000	240	12	200
СРФ15x2К	2	30000	480	24	400
СРФ15x3К	3	45000	720	36	600
СРФ15x4К	4	60000	960	48	800
СРФ15x5К	5	75000	1200	60	1000
СРФ15x6К	6	90000	1440	72	1200
СРФ15x8К	8	120000	1920	96	1600
СРФ15x10К	10	150000	2400	120	2000

Низкая концентрация запыленного воздуха на входе в картриджные (касетные) фильтры (до 5 г/м³) несколько ограничивает область применения этих фильтров в промышленности, несмотря на то, что очищенный в них воздух можно направлять обратно в производственный процесс.

Для расширения сферы их использования разработан **двухступенчатый фильтр тонкой очистки с импульсной продувкой СРФ10КР**. Высокая эффективность очистки (не более 2 мг/м³) при больших концентрациях пыли на входе в фильтр, достигается за счет конструктивного размещения в одном корпусе двух фильтров – рукавного и картриджного. Двухступенчатая очистка воздуха проводится сначала в рукавном фильтре, затем в картриджном. Движение запыленного воздуха внутри первой ступени очистки (рукавный фильтр) происходит сверху вниз, что снижает пылевую нагрузку на фильтровальную ткань, уменьшает риск налипания пыли на рукава и облегчает их регенерацию.

Принципиальная схема работы двухступенчатого фильтра СРФ10КР представлена на рисунке 6.16.

Запыленный воздух по воздуховоду поступает в первую ступень очистки (рукавный фильтр), в камеру «запыленного» воздуха. Принцип работы первой ступени очистки основан на улавливании пыли фильтрующей тканью при прохождении через неё запыленного воздуха. Газопылевая смесь проходит через рукава из фильтровальной ткани, при этом частицы пыли задерживаются на их наружной поверхности, а очищенный до $10-20 \text{ мг/м}^3$ воздух поступает по промежуточному каналу в рабочую камеру второй ступени очистки (картриджный фильтр тонкой очистки). Далее, проходя через высокоэффективные фильтровальные картриджи, воздух доочищается до 2 мг/м^3 , поступает в камеру «чистого» воздуха и выбрасывается из фильтра в помещение. Регенерация фильтрующих элементов импульсами сжатого воздуха происходит в автоматическом режиме.

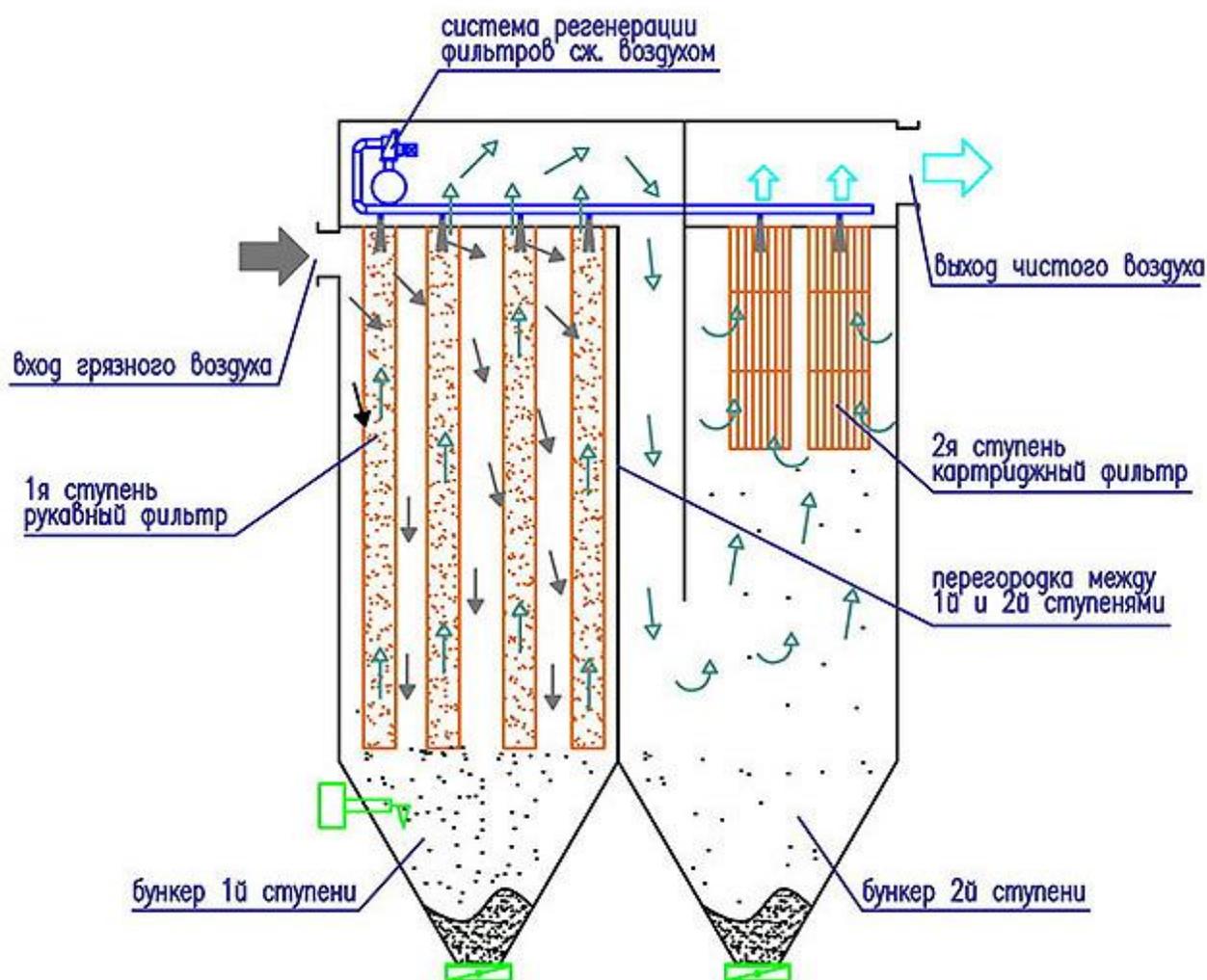


Рисунок 6.16 – Принципиальная схема двухступенчатого фильтра СРФ10КР

Фильтр серии СРФ10КР представляет собой типовые фильтровальные секции производительностью до $10000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Нарращивание производительности фильтра осуществляется путём добавления секций. Технические характеристики двухступенчатых фильтров приведены в табл. 6.7.

Таблица 6.7 – Технические характеристики двухступенчатых фильтров СРФ10КР

Модель	Количество секций	Максимальная производительность по воздуху, м ³ /ч	Гидравлическое сопротивление, Па	Максимальная концентрация на входе в фильтр, г/м ³	Концентрация пыли на выходе из фильтра, не более, мг/м ³
СРФ10КР	1	10000	до 2500	200	2
СРФ10КРх2	2	20000	до 2500	200	2
СРФ10КРх3К	3	30000	до 2500	200	2
СРФ10КРх4К	4	40000	до 2500	200	2
СРФ10КРх5К	5	50000	до 2500	200	2
СРФ10КРх6К	6	60000	до 2500	200	2

6.4.3 Рулонные фильтры

Рулонные фильтры применяют для очистки воздуха от пыли в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха при запыленности менее 10 мг/м³.

Рулонный фильтр (рис. 6.17, а) обычно представляет собой камеру, в верхней части которой расположена катушка с намотанным на неё фильтрующим материалом. Край материала пропускают через щели камеры и, огибая ролики, закрепляют на нижней катушке. Лента приводится в движение специальным приводным механизмом нижней катушки.

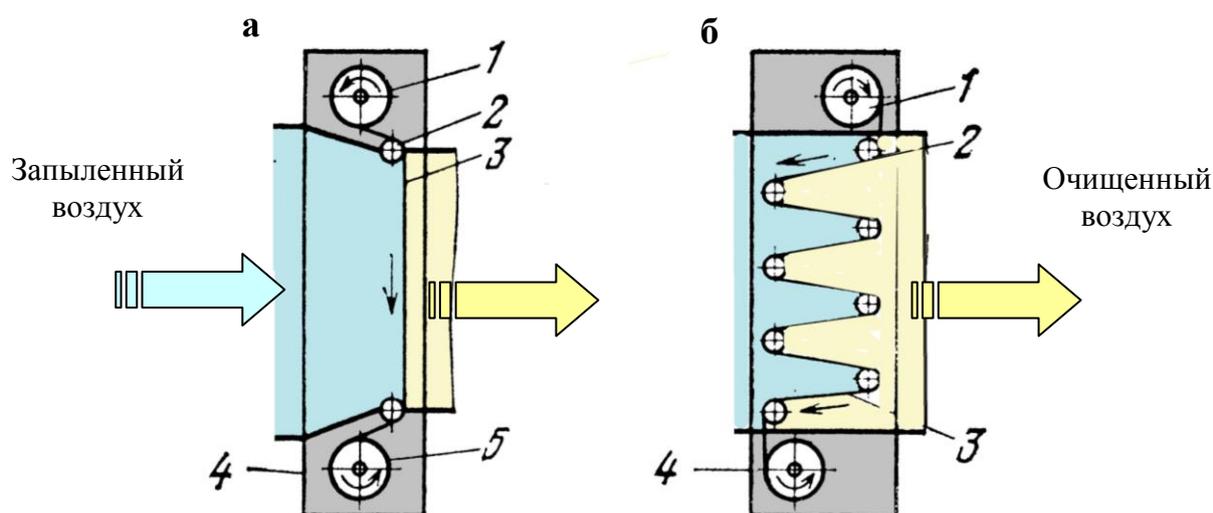


Рисунок 6.17 – Схема рулонного фильтра (а) и компактного рулонного фильтра (б):
 1 – верхняя катушка; 2 – натяжной ролик; 3 – фильтровальная ткань; 4 – корпус;
 5 – нижняя катушка

При достижении заданного перепада давлений на фильтрующей поверхности, материал перематывается на определенную длину. На одном каркасе фильтра обычно устанавливается несколько катушек с рулонным фильтрующим материалом, что позволяет компоновать фильтровальные установки любой пропускной способности [46, 47].

Для снижения сопротивления и повышения производительности камер рулонных фильтров в отдельных случаях увеличивают площадь фильтрующей поверхности, размещая фильтровальную ткань зигзагообразно (рис. 6.17, б). Валки приводятся в движение с помощью цепной передачи от приводного механизма, вращающего нижнюю катушку.

В качестве фильтрующего материала используют различные тканые и нетканые материалы из натуральных, синтетических и минеральных волокон. Фильтровальную ткань в рулонных фильтрах, как правило, не регенерируют. Срок непрерывной работы рулона (до его замены) обычно составляет около года. Разработаны также конструкции рулонных фильтров, предусматривающие регенерацию фильтровального волокна.

Рулонные фильтры ФРУ собираются из двух или трёх унифицированных секций шириной 1050 или 800 мм в зависимости от пропускной способности.

Схема трёхсекционного фильтра типа ФРУ показана на рис. 6.18.

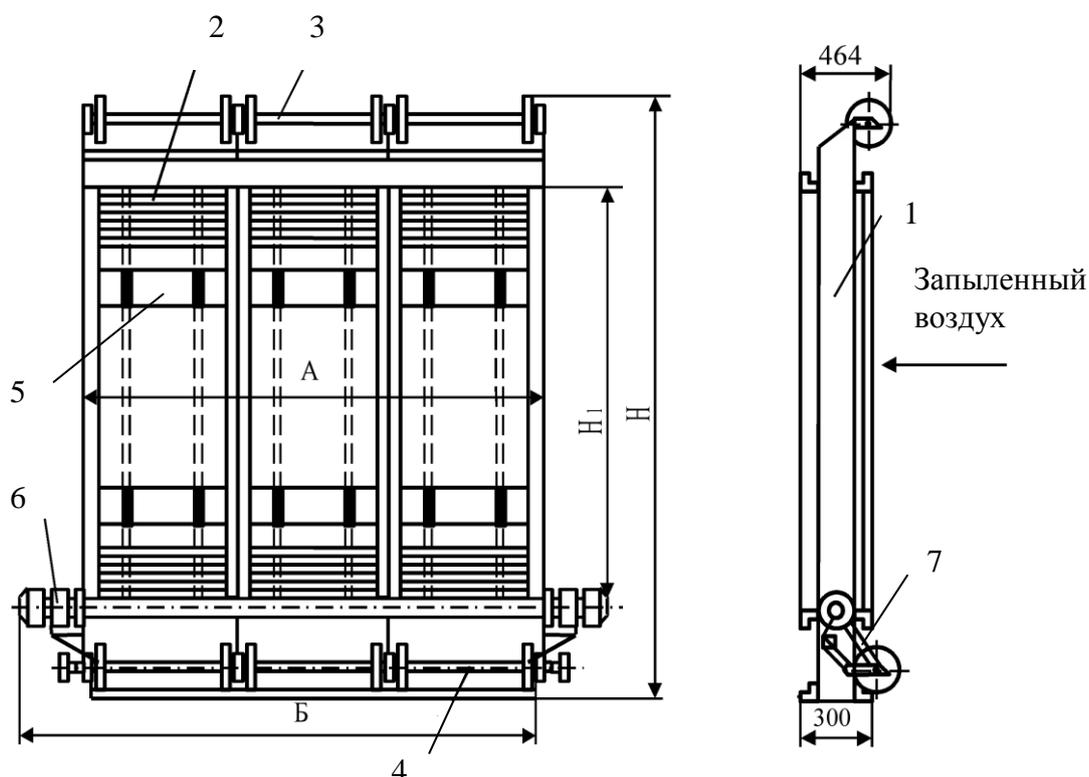


Рисунок 6.18 – Схема трёхсекционного фильтра типа ФРУ:

- 1 – корпус фильтра; 2 – подвижная опорная решетка; 3 – верхняя катушка;
4 – нижняя катушка; 5 – прижим; 6 – привод; 7 – цепь

Фильтрующий материал с верхних катушек 3 пропускается через уплотнительные щели верхних и нижних стенок фильтра, при этом он заполняет всё живое сечение и закрепляется на нижних катушках 4. В сечении фильтра материал поддерживается съёмными прижимами 5. Кромки полотнищ опираются на неподвижные направляющие уголки, образуя сплошную поверхность фильтрующего материала, через которую фильтруется запыленный воздух.

На нижнем валу секции установлен редукторный электропривод 6, обеспечивающий перемещение подвижных решеток и вращение нижних катушек фильтра. На нижние катушки вращение передается при помощи цепи 7.

Перемотка фильтрующего материала с верхних катушек на нижние производится периодически, по мере накопления в нём пыли и достижения установленной величины сопротивления.

Технические характеристики рулонных фильтров ФРУ представлены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Технические характеристики рулонных фильтров ФРУ

Типоразмер фильтра	Количество секций	Ширина секций, мм	Площадь рабочего сечения, м ²	Номинальная пропускная способность, м ³ /ч	Масса, кг
Ф12РУ1	3	1050	12	120 000	970
Ф8РУ2	3	1050	8	80 000	717
Ф6РУ6	1/2	1050/800	6	60 000	633
Ф4РУ4	2	1050	4	40 000	408
Ф2РУ7	2	880	2	20 000	360

Важное условие нормальной эксплуатации рулонных фильтров – поддержание оптимальной температуры очищаемых газов на входе в фильтр. При рабочих температурах газов, превышающих допустимый предел температуры для ткани данного типа, резко сокращается срок её службы. При фильтровании газов с температурой ниже точки росы возможна конденсация на поверхности ткани водяных паров, приводящая к снижению газопроницаемости ткани, коррозии аппарата.

Рулонные фильтры ФРП по устройству идентичны фильтрам ФРУ. Отличительной особенностью этих фильтров является применённая в них система пневматической регенерации фильтрующего материала.

Система состоит из щелевого пневматического насадка, выполненного в виде короба, расположенного над нижними катушками за пределами живого сечения фильтра. К коробу подсоединен вертикальный воздухопровод, по которому во время перемотки фильтрующего материала подаётся воздух для очистки его от пыли.

Система пневматической регенерации обеспечивает 6-7 кратное использование материала. Она может обслуживаться либо специально установленным вентилятором, либо присоединяется к централизованной системе пневмоуборки.

Рулонные фильтры ФРС унифицированы и собираются из двух базовых секций номинальной пропускной способностью 31,5 тыс. м³/ч и 40 тыс. м³/ч.

Фильтры Ф6РС и Ф8РС собираются из двух секций, установленных параллельно, фильтр Ф12РС собирается из четырех секций, установленных в два ряда по высоте и по две секции в каждом ряду.

Унифицированные секции представляют собой каркас с опорной решеткой для фильтрующего материала (рис. 6.19). Над секциями и под ними вне зоны прохода воздуха расположены катушки с намотанным фильтрующим материалом. В нижней части секций расположен щелевой пылеотсос, который с помощью воздуховодов соединяется с вентилятором отсоса.

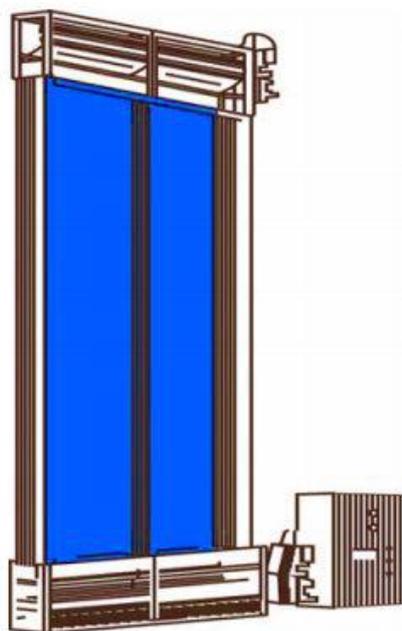


Рисунок 6.19 – Общий вид унифицированной секции рулонного фильтра ФРС

Под влиянием разрежения, создаваемого вентилятором вентсистемы, воздух просасывается через фильтрующий материал. Пыль, содержащаяся в воздухе, осаждаются на поверхности фильтрующего материала, образуя рыхлый слой, являющийся дополнительной фильтровальной средой.

По мере нарастания слоя сопротивление фильтра увеличивается. Для того, чтобы избежать ощутимого падения производительности системы, осуществляется регенерация фильтра, при которой включается система пылеотсоса и начинается перематка фильтрующего материала с верхней катушки на нижнюю. При движении фильтрующий материал проходит мимо отсасывающей щели и очищается от уловленной пыли.

Технические характеристики фильтров ФРС представлены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Технические характеристики рулонных фильтров ФРС

Типоразмер фильтра	Номинальная пропускная способность, м ³ /ч	Начальное сопротивление, Па	Эффективность очистки при сопротивлении до 300 Па, %	Масса, кг
Ф12РС	125 000	50	90±5	660
Ф8РС	80 000			538
Ф6РС	63 000			512
Ф4РС	40 000			305
Ф3РС	31 500			292

6.5 Зернистые фильтры

Зернистые фильтры применяют благодаря их низкой стоимости, возможности использования при фильтровании горячих и агрессивных газов, способности выдерживать значительные механические нагрузки и перепады давлений [48, 49]. Они могут использоваться при высоких температурах – до 500-800°С, в условиях воздействия агрессивной среды.

Различают зернистые фильтры двух основных типов: насыпные, в которых гранулы (куски, частицы) не связаны жестко друг с другом, и жесткие пористые, получившиеся в результате спекания, прессования или склеивания частиц.

В насыпных фильтрах в качестве фильтрующей среды используют песок, гальку, шлак, куски горных пород, опилки, крошки резины и пластмасс.

Насыпной слой может быть подвижным и неподвижным. В фильтрах с подвижным слоем последний может находиться во взвешенном состоянии или перемещаться под действием сил тяжести.

Насыпной слой регенерируют рыхлением слоя и обратной продувкой воздуха, вибровстряхиванием и обратной продувкой, удалением насыпного слоя.

На рис. 6.20 представлены принципиальные схемы работы насыпных фильтров с подвижным (а) и неподвижным слоем (б).

Зернистый фильтр с вертикальным продвигающимся слоем магнезита (рис. 6.20, а) состоит из корпуса 1, патрубков для вывода 2 и ввода 4 газов, бункера 3 для свежего магнезита, жалюзийных цилиндрических решеток 5, патрубков 6 для выгрузки пыли и 8 для удаления магнезита и шибера 7.

В качестве фильтрующего материала применен магнезит крупностью 0,3-5 мм. Магнезит из бункера поступает в пространство между концентрически расположенными решетками. Образующийся в этом пространстве зернистый фильтрующий слой перемещается сверху вниз под действием сил тяжести. Запыленный воздух через входной патрубок попадает внутрь корпуса фильтра и, проходя сквозь слой магнезита, очищается от мелкодисперсной пыли. Очищенный

воздух отводится по центральному выпускному патрубку. Отработанный магнетит заменяют на свежий при остановках барабана не менее чем на 0,5 ч. Расход магнетита составляет 600-700 кг/ч, заменяют от 1/4 до 1/3 фильтрующего материала. Такой фильтр применяют для очистки отходящих газов из сушильного барабана огнеупорного завода.

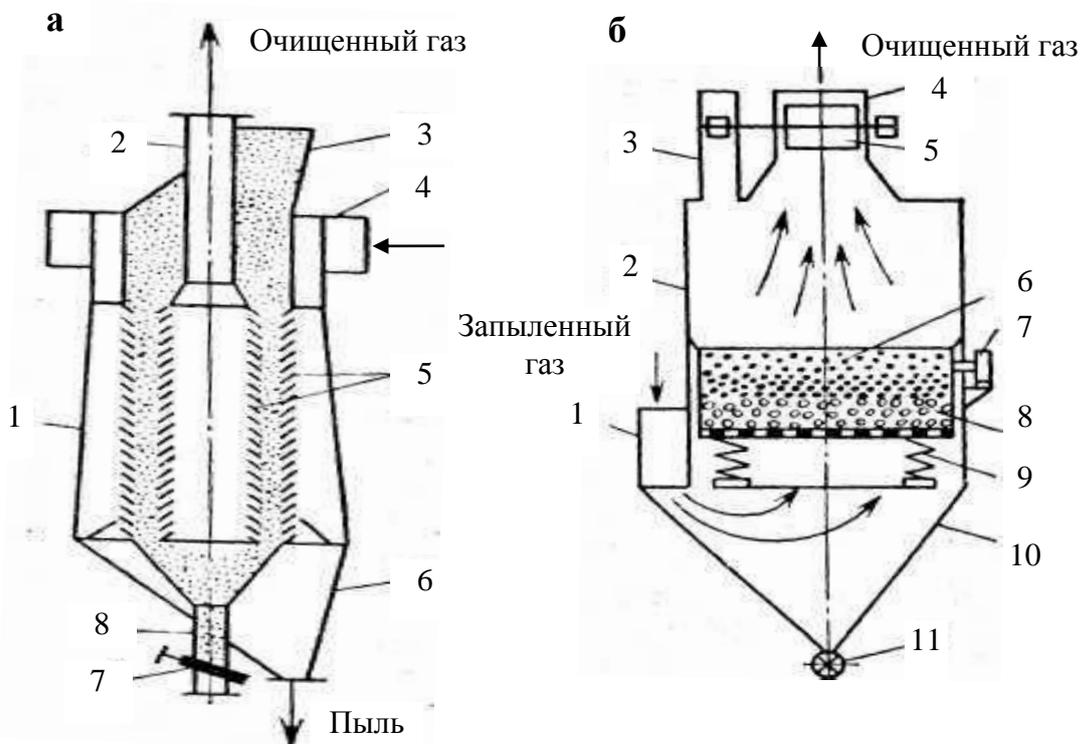


Рисунок 6.20 – Зернистые фильтры:

а – с вертикальным подвижным слоем; *б* – с неподвижным слоем и регенерацией методом обратной продувки и наложения вибрации

Зернистый фильтр с регенерацией методом обратной продувки и наложения вибраций (рис. 6.20, *б*) состоит из корпуса 2, снабженного входным 1 и выходным 4 патрубками, соответственно для запыленного и очищенного газов, продувочного патрубка 3, поворотной дроссельной заслонки 5. В нижней части корпуса расположен пылевой бункер 10 с пылеразгрузочным устройством 11. Внутри корпуса на пружинах 9 укреплен контейнер 8 с перфорированным дном. Контейнеру в период регенерации фильтрующего зернистого слоя 6 сообщают колебания от вибровозбудителя 7. Фильтрующий слой в контейнере формируют из материала различной крупности: нижний и средний слои высотой по 100 мм из частиц крупностью соответственно 5-10 и 3-5 мм, в верхнем слое укладывают материал крупностью 2,5-3 мм. Для предупреждения прохода запыленных газов между контейнером и корпусом фильтра предусмотрены гибкие резиновые уплотнения.

Запыленный газ по входному патрубку поступает в бункерную часть корпуса, а оттуда под контейнер с зернистым фильтрующим слоем. Газ, проходя через слои материала, очищается и через выходной патрубок выводится из фильтра. По мере осаждения пыли возрастает гидравлическое сопротивление фильт-

рующего слоя, поэтому через определенный промежуток времени насыпной слой подвергают регенерации. При регенерации перекрывается заслонка на выходном патрубке и открывается заслонка на патрубке, через который поступает сжатый воздух, одновременно включается вибровозбудитель. При вибрации контейнера пыль потоком продувочного воздуха выносится в бункер, в котором транспортируется шнеком к разгрузочному устройству.

Удельная производительность фильтра по очищаемым газам составляет 20-25 м³/(м²·мин). Концентрация пыли в очищенном газе колеблется от 10 до 40 мг/м³. Степень улавливания пыли не превышает 99%.

Керамические фильтрующие элементы изготавливают в форме патронов, усеченных пустотелых конусов, пластин и дисков методом спекания зёрен кварцевого песка определенного диаметра, шамота и других природных материалов. Керамические элементы обжигают при температуре 900-1300°С. Длина керамических патронов – от 0,5 до 1,2 м, диаметр – от 50 до 80 мм, толщина стенки составляет 6-10 мм. Скорость фильтрования через керамические фильтрующие элементы – от 0,01 до 0,5 м/с.

Сырьём для металлокерамических фильтрующих элементов являются металлические порошки из нержавеющей стали, бронзы, меди, никеля, титана, нихрома, алюминия. Фильтрующие элементы изготавливают прессованием порошков или прокаткой порошков с последующим спеканием при температуре 800-1300°С. Удельная производительность металлокерамических фильтров по очищаемым газам может изменяться от 0,2 до 10 м³/(м²·мин).

6.6 Расчёт рукавных фильтров

Расчёт рукавных фильтров сводится к определению общей поверхности его рукавов $F_{об}$:

$$F_{об} = z\pi dH, \quad (6.12)$$

где z – общее число рукавов;

d – диаметр рукава;

H – высота рукава.

В процессе эксплуатации фильтра часть рукавов отключают на регенерацию, поэтому общая поверхность рукавов определяется соотношением:

$$F_{об} = F_{\phi} \cdot z / (z - z_p) \quad (6.13)$$

где F_{ϕ} – расчётная поверхность фильтрации;

z_p – число рукавов, отключённых на регенерацию. Для односекционных фильтров можно принять $z_p = (0,15 \div 0,20)z$.

Для фильтров, имеющих n самостоятельных секций (Приложение 5), количество рукавов, работающих одновременно на продувку равно:

$$z_p = z/n, \quad (6.14)$$

Для фильтров с импульсной продувкой, в которых не предусматривается отключение секций на регенерацию, расчёт общей поверхности рукавов проводится только с учетом выражения (6.12).

Расчётная поверхность фильтрации находится:

$$F_{\phi} = V / \omega_2, \quad (6.15)$$

где V – объёмный расход газа, поступающего в аппарат, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω – допустимая скорость фильтрования через рукав, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

Она представляет собой скорость, при которой гидравлическое сопротивление заполненного фильтра достигает максимально допустимой величины, и может быть найдена экспериментально.

Обычно величина $\omega_2 = (0,8 \div 1,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{с}$.

где n – количество секций.

Общее количество газов, поступающих в рукавный фильтр, определяется по формуле:

$$V = V_2 + V_{np} + V_{n.B}, \quad (6.16)$$

где V_2 – расход запылённого газа, поступающего в аппарат, $\text{м}^3/\text{с}$;

$V_{np} = (0,1 \div 0,2) V_2$ – расход продувочного воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

$V_{n.B}$ – расход подсасываемого в аппарат воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;

Расход подсасываемого воздуха зависит от температуры запылённого газа, поступающего в фильтр. Если запылённый газ подходит к фильтру с высокой температурой t_2 , которую необходимо снизить до $t_{см}$ (смеси) ниже допустимой температуры t_{δ} (Приложение 4) за счёт подсоса холодного воздуха, то количество этого воздуха можно рассчитать:

$$V_{n.B} = V_2 \frac{\rho_2 (t_2 - t_{см})}{\rho_в (t_{см} - t_в)}, \quad (6.17)$$

где ρ_2 и $\rho_в$ – соответственно плотность газа и плотность подсасываемого из атмосферы воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$t_в$ – температура атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$ (для ориентировочных расчётов $t_в = 20^{\circ}$).

Если запылённый газ подходит к фильтру с температурой меньшей, чем допускаемая температура t_{δ} , то количество подсасываемого воздуха принимают:

$$V_{n.B} = (1,05 \div 1,10) V_2. \quad (6.18)$$

Расчитанная по (6.15) поверхность фильтрации должна быть проверена на допустимую запыляемость ткани:

$$F_{\phi} \geq G_n / G_{\delta}, \quad (6.19)$$

где G_n – исходное количество пыли в газе, $\text{г}/\text{с}$;

$G_{\delta} = (0,2 \div 0,3) \text{ г}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ – допустимая удельная запыляемость ткани.

Если рукавный фильтр используется как последующая ступень очистки при известной степени улавливания в предыдущей ступени η_1 , то количество твердой фазы, поступающей на рукавный фильтр, определяется по уравнению:

$$G_{n2} = G_{n1}(1 - \eta_1), \quad (6.20)$$

где G_{n1} – начальное количество твердой фазы в газе перед входом его в первую ступень очистки, г/с.

Концентрация твердой фазы рассчитывается по уравнению (6.20) с учётом объёмного расхода газа перед каждой ступенью очистки.

$$X_n = \frac{G_n}{V}; \quad X_k = \frac{G_k}{V}, \quad (6.21)$$

где V – расход газа, проходящего через пылеуловитель, м³/с;
 X_n, X_k – начальная и конечная концентрация пыли в газе, г/м³.

Пример.

Выбрать пылеулавливающий аппарат по следующим исходным данным: расход газа $V_{oz} = 13$ м³/с; температура газа $t_2 = 200^\circ\text{C}$; концентрация твердой фазы в газе $X_n = 65$ г/м³, $\rho_c = 2240$ кг/м³, дисперсный состав частиц: $d_m = 20$ мкм; $\sigma_c = 3,0$; разрежение в системе $P = 500$ Па; запылённый газ сухой, не агрессивный.

Решение.

1. Учитывая высокую дисперсность частиц, большую концентрацию их в газе и степень очистки, целесообразно применить двухступенчатую очистку: 1 стадия – в циклоне, вторая – в рукавном фильтре.

Для предварительной очистки можно использовать высокоэффективный циклон (НИИОгаз). Примем, что для рассматриваемого случая эффективность очистки газа на первой стадии в циклоне составит $\eta_1 = 0,8$.

Учитывая неагрессивность газов, выбираем в качестве фильтровальной ткани лавсан, допускающий максимальную температуру газа $t_d = 130^\circ\text{C}$ (Приложение 4).

2. Примем температуру газа на входе в фильтр (после смешения с подсасываемым воздухом) $t_{cm} = 120^\circ\text{C}$.

3. Расход газа, поступающего в фильтр, разрежение в котором $P = 500$ Па, составит:

$$V_2 = V_{oz} \frac{TP_o}{T_o P} = 13 \frac{(273 + 120) \cdot 1 \cdot 10^5}{273(1 \cdot 10^5 - 500)} = 18,72 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

4. Расход подсасываемого воздуха, обеспечивающего снижение температуры газа от 200°C до 120°C по (6.17), равен:

$$V_{n.B} = V_2 \frac{\rho_2(T_2 - t_{cm})}{\rho_6(t_{cm} - t_6)} = 18,72 \cdot 0,62 \frac{200 - 120}{120 - 20} = 9,28 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

$$\frac{\rho_z}{\rho_6} = \frac{\rho_0 \frac{T_0 P}{T_z P_0}}{\rho_0 \frac{T_0 P}{T_6 P_0}} = \frac{\rho_0 T_0 P \cdot T_6 \cdot P}{\rho_0 T_z P_0 \cdot T_0 \cdot P} = \frac{T_6}{T_z} = \frac{273 + 20}{273 + 200} = \frac{293}{473} = 0,62 \text{ — отношение}$$

плотностей горячего газа и подсасываемого воздуха.

5. Расход воздуха, подаваемого на продувку, примем:

$$V_{np} = 0,2V_z = 0,2 \cdot 18,72 = 3,74 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

6. Объёмный расход газа, поступающего в аппарат:

$$V = V_z + V_{np} + V_{n.B} = 18,72 + 3,74 + 9,28 = 31,74 \text{ м}^3/\text{с}.$$

7. Расчетная площадь поверхности фильтрации по (6.14) при $\omega_z = 0,009 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ составит:

$$F_\phi = \frac{18,72 + 3,74 + 9,28}{0,009} = 3526,66 \text{ м}^2.$$

8. Примем предварительно фильтр марки ФРО-4100-2 с основными параметрами: $F = 4104 \text{ м}^2$; $z = 432$; $n = 8$ (табл. 6.3). Тогда число рукавов, участвующих в продувке (регенерации), по (6.14) будет равно

$$z_p = 432/8 = 54.$$

9. Общая площадь поверхности фильтра по (6.13) составит

$$F = \frac{3526,66 \cdot 432}{432 - 54} = 4030,4 \text{ м}^2.$$

Следовательно, выбранный фильтр имеет общую площадь поверхности фильтрации, достаточную для принятого объема газа.

10. Расход пыли перед первой ступенью очистки равен:

$$G_{n1} = X_n \cdot V_{oz} = 65 \cdot 13 = 845 \text{ г/с}.$$

11. Количество твёрдой фазы, поступающей с газом в рукавный фильтр при степени очистки в первой ступени $\eta_1 = 0,8$, по (6.20) составит:

$$G_{n2} = G_{n1}(1 - \eta_1) = 845 (1 - 0,8) = 169 \text{ г/с}.$$

Площадь поверхности фильтрации по допустимым условиям запылённости ткани, согласно (6.19) равна $F_\phi \geq \frac{169}{0,2} = 845 \text{ м}^2$, что значительно меньше ранее выбранной площади поверхности фильтрации.

Таким образом, фильтр марки ФРО-4100-2 соответствует заданным условиям.

Вопросы для самоконтроля.

1. Укажите преимущества и недостатки способа улавливания пыли фильтрованием.

2. Охарактеризуйте основные свойства пористой перегородки.

3. Под воздействием каких факторов может проходить осаждение частиц пыли на твёрдых элементах пористой перегородки?
4. По каким признакам классифицируются тканевые фильтры?
5. Опишите принцип действия рукавного фильтра.
6. Какие способы применяются для подачи запыленного воздуха в рукав фильтра?
7. Какими свойствами должны обладать фильтровальные ткани?
8. Какие способы регенерация фильтровальной ткани рукавов Вы знаете?
9. Как проводится расчёт рукавных фильтров?
10. Укажите основные отличительные особенности картриджных фильтров.
11. Опишите принцип действия рулонных фильтров.
12. Охарактеризуйте основные типы зернистых фильтров.

Глава 7

МОКРЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

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

Для мокрого пылеулавливания используются **скрубберы**: аппараты, в которых осуществляется контакт газа с жидкостью [50]. В качестве орошающей жидкости чаще всего применяют воду. Её расход для разных типов аппаратов может изменяться от 0,1 до 10 м³ на 1000 м³ обрабатываемых газов.

Мокрые пылеуловители имеют ряд *преимуществ* перед аппаратами других типов:

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

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

- могут не только успешно конкурировать с такими высокоэффективными пылеуловителями, как рукавные фильтры, но и использоваться в тех случаях, когда эти аппараты обычно не применяются, например, при высокой температуре и повышенной влажности газов, при опасности возгорания и взрывов очищенных газов, в качестве теплообменников смешения.

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

Однако метод мокрого обеспыливания имеет и ряд *недостатков*:

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

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

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

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

Осаждение частиц пыли на поверхности жидкости происходит, в основном, под действием сил инерции и броуновского движения [51, 52].

Силы инерции действуют на частицы пыли и капли жидкости при их сближении. Эти силы, в свою очередь, зависят от массы капель и частиц, а также от скорости их движения. Частицы пыли малого размера (менее 1 мкм) не обладают достаточной кинетической энергией и при сближении обычно огибают капли и не улавливаются жидкостью.

Броуновское движение характерно для частиц малого размера (менее 1 мкм). При этом для достижения высокой эффективности очистки газа от частиц примесей за счёт броуновского движения необходимо уменьшить скорость движения газового потока в аппарате. Кроме основных сил на процесс осаждения влияют турбулентная диффузия, взаимодействие электрически заряженных частиц, процессы конденсации и др. Скорость осаждения может быть увеличена благодаря укрупнению частиц вследствие агломерации и конденсационного роста.

Во всех случаях очистки газа в мокрых пылеуловителях важным фактором является смачиваемость частиц жидкостью (чем лучше смачиваемость, тем эффективнее процесс очистки).

Существуют следующие аппаратные механизмы процессов мокрого улавливания частиц пыли:

- 1) улавливание каплями жидкости, двигающимися через газ;
- 2) улавливание пленками жидкости (обычно текущими по твердым поверхностям);
- 3) улавливание в пузырях газа;
- 4) улавливание при ударе газовых струй о жидкие или твердые поверхности.

В зависимости от способа организации поверхности контакта фаз и принципа действия мокрые пылеуловители можно подразделить на следующие группы [50]:

- полые скрубберы;
- центробежные скрубберы;
- тарельчатые скрубберы;
- ударно-инерционные скрубберы;
- скрубберы Вентури.

Так как основным недостатком мокрых способов обеспыливания является необходимость обработки загрязненных стоков, образовавшихся в процессе очистки газов, то приемлемыми могут быть лишь способы с минимальным водопотреблением. До принятия решения о применении мокрого способа очистки необходимо тщательно проанализировать свойства обрабатываемых выбросов. Необходимо учитывать растворимость, реакционную способность (возможность образования взрывоопасных, коррозионно-активных веществ и вторичных загрязнителей), коррозионную активность компонентов загрязнителя и газа-носителя. Для твердых загрязнителей важны также смачиваемость, схватываемость, слипаемость, для жидких – смачиваемость, плотность, параметры фазовых переходов.

Степень очистки газовых выбросов в мокрых пылеуловителях может быть найдена только на основе эмпирических сведений по конкретным конструкциям аппаратов.

7.1 Полые скрубберы

Самыми простыми мокрыми пылеуловителями являются полые форсуночные скрубберы. Они представляют собой колонны, имеющие прямоугольное или круглое сечение, где и происходит контакт очищаемого газа с жидкостью, которая распыливается при помощи форсунок. Захваченные каплями воды частицы пыли выводятся из аппарата в виде шлама (рис. 7.1).

Среди достоинств таких аппаратов следует выделить возможность очищения газов, содержащих большое количество пыли, а также небольшое гидравлическое сопротивление.

Полые скрубберы делятся по направлению движения газов на противоточные, прямоточные и скрубберы с поперечным приводом жидкости. При этом форсунки, из которых распыливается жидкость, могут располагаться как по центру аппарата, так и по его периметру. Чтобы унос жидкости из зоны контакта был незначительным, размер капель должен быть не менее 500 мкм, а скорость газового потока не должна превосходить 0,8-1,2 м/с.

Для уменьшения габаритов установки скорость потока увеличивают (иногда до 5 м/с и более) и устанавливают на выходе аппарата каплеуловители. Орошающую жидкость разбрызгивают чаще всего с помощью центробежных форсунок, поддерживая в них давление в пределах 0,3-0,4 МПа. Такие форсунки позволяют работать на оборотной воде, из которой удалена грубая взвесь. Диаметр зоны орошения одной форсунки принимают в пределах 500 мм. Из этих условий определяют число форсунок, устанавливаемых в скруббере.

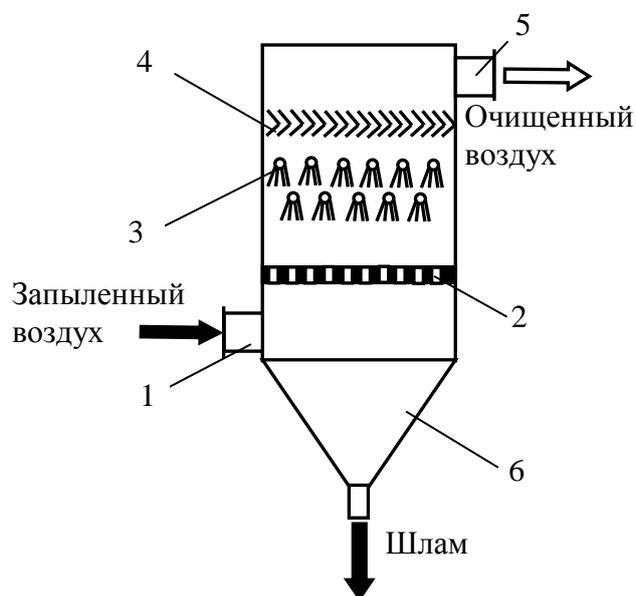


Рисунок 7.1 – Пыльный форсуночный скруббер:

- 1 – входной патрубок;
- 2 – газораспределительная решётка;
- 3 – форсунки;
- 4 – каплеуловитель;
- 5 – выходной патрубок;
- 6 – бункер

Эффективность очистки в скруббере зависит от дисперсности пыли, размера капель, скорости их падения, расхода жидкости, скорости пылегазового потока. В полном скруббере удельный расход жидкости находится в пределах 2-2,5 л/м³, гидравлическое сопротивление при отсутствии встроенного каплеуловителя – 220-250 Па.

Полые газопромыватели в основном находят применение для осаждения частиц крупнее 10 мкм. Эффективность обеспыливания по этой крупности в полых газопромывателях достигает 99%.

Принцип улавливания пыли на распыляемых в потоке воздуха каплях воды использован также в мокрых пылеуловителях более сложной конструкции.

На рисунке 7.2 представлена схема *мокрого пылеуловителя с вращающимся веерным распылителем (МПВ)*.

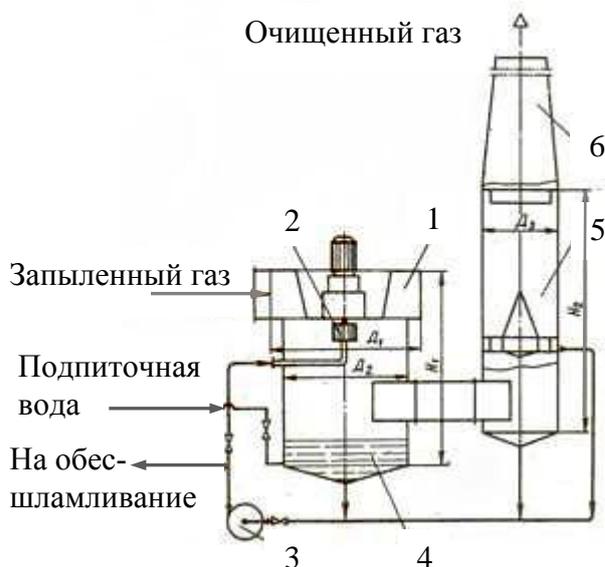


Рисунок 7.2 – Схема мокрого пылеуловителя МПВ:

- 1 – массообменная часть;
- 2 – распылитель жидкости;
- 3 – насос;
- 4 – сборник жидкости;
- 5 – циклон-каплеуловитель;
- 6 – труба

Принцип работы пылеуловителя заключается в следующем. Запыленный газ поступает в массообменную часть 1, где очищается от пыли, проходя через факел распыла орошающей жидкости, создаваемый вращающимся распылителем 2. Основная часть пыли с жидкостью отводится из массообменной части в сборник 4. Требуемая степень очистки от пыли достигается путем изменения скорости газа в зоне очистки, расхода орошающей жидкости, изменения степени турбулентности газового потока и др.

Техническая характеристика мокрого пылеуловителя (МПВ) следующие:

- расход очищаемого газа – 80-300 тыс. м³/ч;
- гидравлическое сопротивление – 1,0-1,3 кПа;
- удельное орошение газов – 0,3-1,0 л/м³;
- эффективность пылеулавливания – более 95%;
- общий удельный расход электроэнергии на очистку газов составляет 0,6-0,7 кВт·ч/1000м³.

На улавливание частиц пыли в мелкодисперсном аэрозоле воды, создаваемом вентиляторным колесом, основан принцип работы *мокрого пылеуловителя ПР-5000* (рис. 7.3).

Пылеулавливающий аппарат предназначен для мокрой очистки воздуха от угольной пыли в местах перегрузки и пересыпки угля на обогатительных фабриках и устанавливается непосредственно на укрытиях этих мест.

Аппарат может быть использован для локального обеспыливания другого аналогичного оборудования, имеющего узлы с интенсивным выделением пыли

(пересыпка, перегрузка, дробление, сортировка и т.д.)

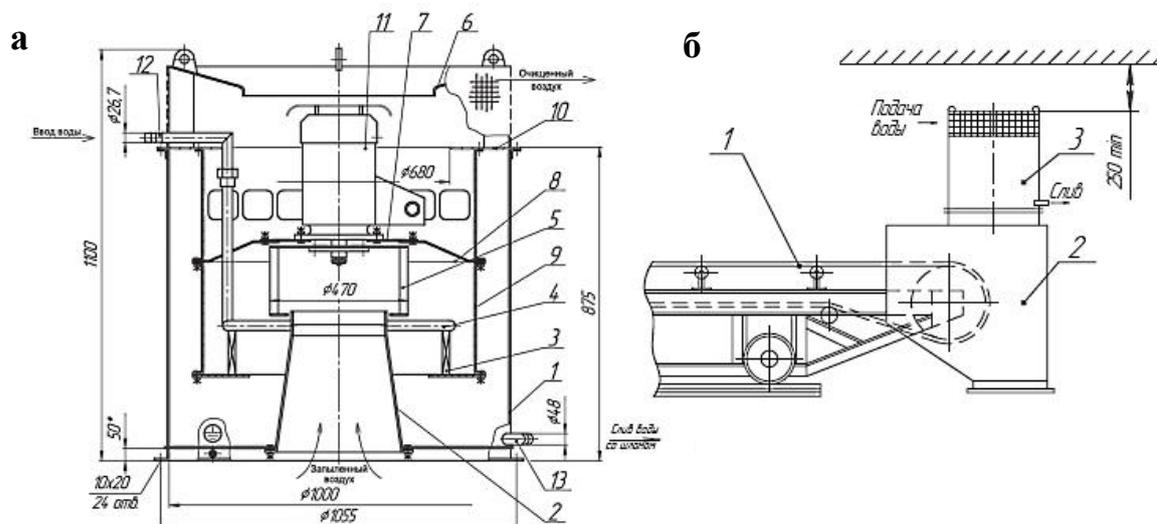


Рисунок 7.3 – Схема мокрого пылеуловителя ПР-5000 (а) и схема узла установки пылеуловителя ПР-5000 в месте разгрузки ленточного конвейера (б):

а) 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – завихритель; 4 – раздающий коллектор; 5 – колесо вентилятора; 6 – крышка; 7 – опорный диск; 8 – кольцо опорное; 9 – кожух камеры завихрителя; 10 – кольцо верхнее; 11 – электродвигатель; 12 – подающий штуцер; 13 – сливной патрубок;

б) 1 – конвейер; 2 – укрытие места разгрузки конвейера, 3 – пылеулавливающий аппарат

Технические характеристики мокрого пылеуловителя ПР-5000 следующие:

- производительность аппарата по воздуху $4750 \pm 250 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- расход воды через аппарат 0,28- 0,4 л/с;
- давление воды не менее 5 м и не более 60 м вод. ст.;
- качество подаваемой воды – допускается наличие взвешенных частиц до 1000 мг/л;
- допустимая концентрация пыли на входе в аппарат – до $30 \text{ г}/\text{м}^3$;
- степень очистки газа зависит от вида и размера частиц пыли, её концентрации на входе и может достигать 99%.

7.2 Центробежные скрубберы

В центробежных скрубберах подвод запыленного газового потока в аппарате осуществляется через тангенциально расположенный входной патрубок. Возникающие при вращении газового потока центробежные силы отбрасывают к внутренним стенкам аппарата частицы пыли. Эти частицы захватываются пленкой жидкости, стекающей по внутренней стенке, и выводятся из аппарата в виде шлама [53].

Для создания вращающегося воздушного потока в центробежных скрубберах также могут быть использованы внутренние направляющие завихрители.

На рисунке 7.4 представлена схема **центробежного скруббера ЦС**. Он состоит из цилиндрического корпуса с воздухоподводящим патрубком и воздухоотводящей улиткой. В нижней части корпуса расположен шламоотводящий конус, который при заполнении его шламом образует гидравлический затвор.

Запыленный воздух подводится по касательной к корпусу со скоростью в пределах от 15 до 23 м/с. Поверхность стенок аппарата орошается водой через коллектор с помощью сопел, расположенных равномерно в верхней части аппарата. Сопла находятся также во входном патрубке и предназначены для смыва отложений пыли. Давление воды перед соплами – 0,02-0,025 МПа. Расход воды на орошение стенок – от 0,17 до 0,73 л/с.

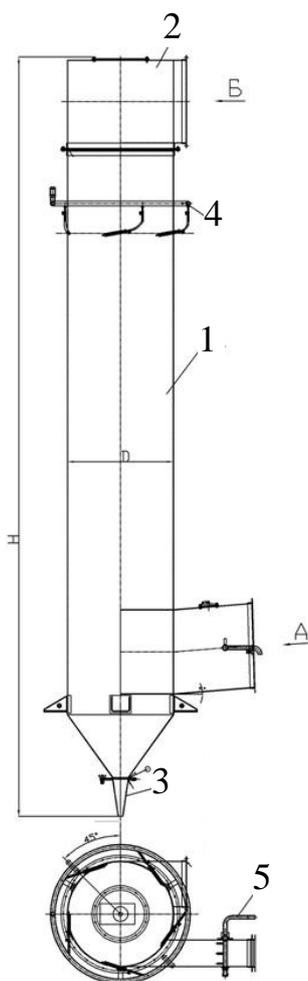


Рисунок 7.4 – Схема центробежного скруббера ЦС:

- 1 – корпус;
- 2 – улитка;
- 3 – конус;
- 4 – коллектор;
- 5 – смывное приспособление

Эффективность скруббера ЦС колеблется от 86 до 99% в зависимости от фракционного состава и удельного веса пыли, скорости воздуха во входном патрубке и диаметра цилиндрической части скруббера. Эффективность скруббера повышается с увеличением удельного веса пыли, с повышением скорости воздуха во входном патрубке и с уменьшением диаметра цилиндрической части скруббера.

Скрубберы ЦС могут быть использованы для вытяжных вентиляционных систем от дробильно-сортировочного оборудования (дробилки, элеваторы, узлы пересыпки и т.п.). Технические характеристики скрубберов приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Технические характеристики скрубберов ЦС

Наименование	Производительность по воздуху, м ³ /ч	Сопротивление, кг/м ²	Диаметр, D, мм	Высота, H, мм
Скруббер ЦС-3	1000-1500	40-85	300	2355
Скруббер ЦС-4	1600-2700	40-85	400	3015
Скруббер ЦС-5	2800-4200	40-85	500	3695
Скруббер ЦС-6	4300-6000	40-85	600	4365
Скруббер ЦС-7	6100-8000	50-80	700	5065
Скруббер ЦС-8	8100-10000	50-80	800	5715
Скруббер ЦС-9	10000-11000	60-90	1140	3240
Скруббер ЦС-11	13000-16000	60-90	1350	3800
Скруббер ЦС-13	17000-22000	60-90	1530	4325
Скруббер ЦС-15	23000-27000	60-90	1700	4800
Скруббер ЦС-16	28000-35000	60-90	1830	5680
Скруббер ЦС-19	36000-45000	60-90	2080	6530
Скруббер ЦС-21	46000-50000	60-90	2300	7170

Аналогичный принцип работы характерен и для *циклонов с водяной плёнкой ЦВП* (рис. 7.5).

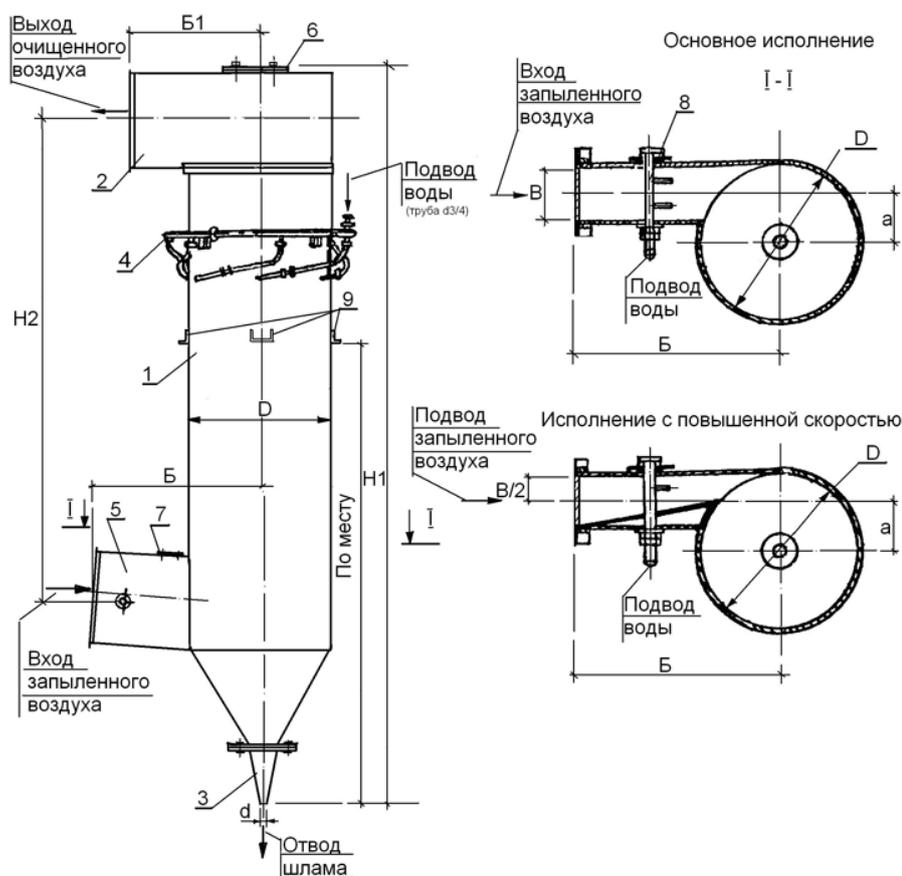


Рисунок 7.5 – Схема циклона с водяной плёнкой ЦВП:

1 – корпус; 2 – улитка; 3 – конусный патрубок; 4 – водный коллектор; 5 – входной патрубок; 6 – люк; 7 – лючок; 8 – смывное приспособление; 9 – опора

Циклоны ЦВП рекомендуется применять для улавливания любых видов нецементирующейся пыли, в том числе образующейся при обработке и транспортировании песка, глины, угля, известняка, абразивов и различных руд, а также влажной, липкой и содержащей волокнистые включения.

Они могут иметь следующие исполнения:

- а) по направлению движения воздуха в корпусе – правое и левое;
- б) по скорости входа воздуха в циклон – основное и с повышенной скоростью.

Циклон с повышенной скоростью отличается от циклона основного исполнения тем, что в воздухоподводящем патрубке вварена перегородка, уменьшающая вдвое ширину входного отверстия. Циклоны с повышенной скоростью обеспечивают более высокую степень очистки, но в то же время имеют более высокое сопротивление.

Производительность циклонов с водяной плёнкой ЦВП в зависимости от типоразмера и скорости на входе изменяется в пределах 1300-20500 м³/ч.

В отличие от циклонов ЦВП *скоростные промыватели СИОТ* (рис. 7.6) имеют внутри дополнительные завихрители, что позволяет их использовать для очистки больших объёмов газов (до 280 тыс. м³/ч) при начальной запыленности до 5 г/м³ без снижения эффективности.

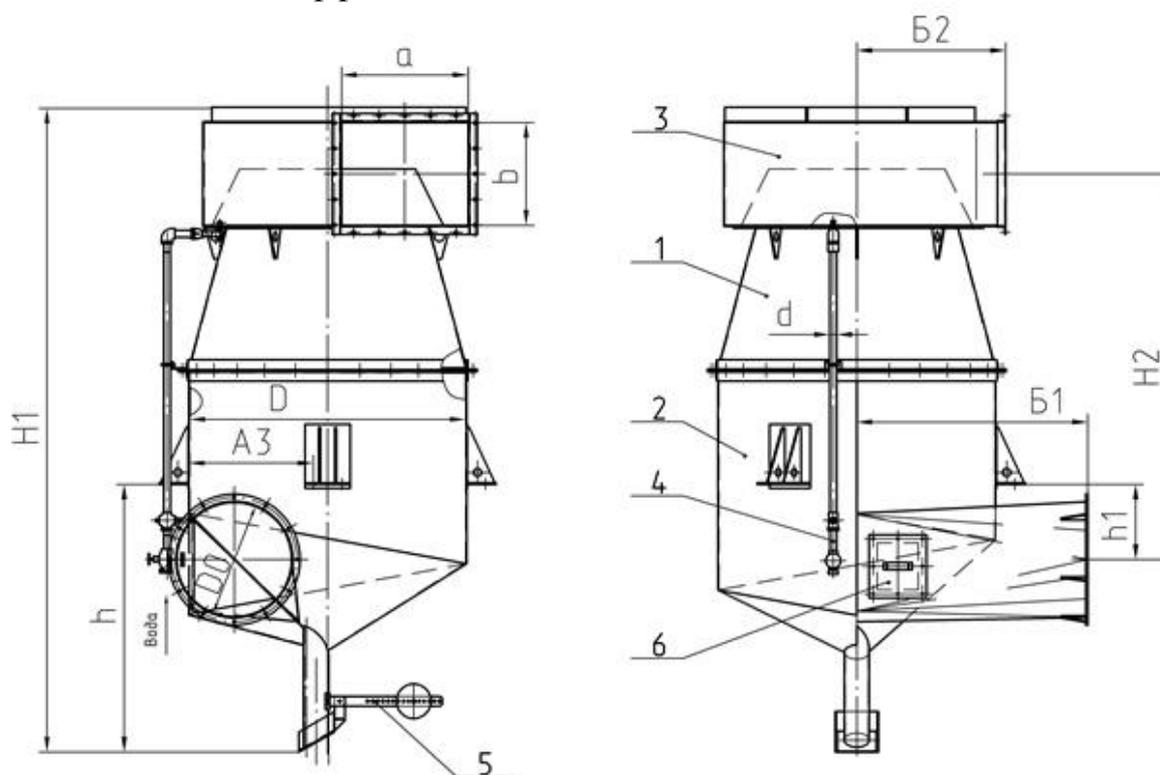


Рисунок 7.6 – Схема скоростного промывателя СИОТ:

- 1 – корпус конический; 2 – корпус цилиндрический; 3 – раскручиватель; 4 – водоподающая система; 5 – затвор; 6 – люк

Скоростной промыватель СИОТ – проточный мокрый пылеуловитель, в котором улавливание пыли происходит путем осаждения её на смоченные стенки

корпуса под действием центробежных сил, а также промывки воздуха распыляемой водой.

Основная часть воды через форсунки попадает в верхнюю зону промывателя на водораспределительное кольцо, с которого она стекает, смачивая стенки корпуса, а другая часть воды через нижнюю форсунку подается в нижнюю зону промывателя.

Вода, стекающая со стенок, поступает на винтовое коническое днище. Между образующими этого днища через входное сечение в промыватель подается воздух, под действием которого вода, поступающая на днище, увлекается потоком воздуха к верхней образующей (в направлении его вращения), срывается с неё и попадает на входящую в промыватель струю воздуха, распыляется и увлекается в среднюю часть промывателя. Благодаря этим эффектам (центробежной сепарации и промывки воздуха распыляемой водой) скоростные промыватели СИОТ более эффективны, чем пленочные циклоны, особенно при очистке от мелких фракций пыли.

В сливной патрубке поступает лишь тяжелая загрязненная часть вращающейся по дну пульпы, а остальная часть воды продолжает циркулировать и многократно использоваться в аппарате.

Днище выполнено в виде винтовой конической поверхности с вершиной на оси промывателя. Входной патрубок переходит с круглого сечения на треугольное, снизу и сбоку которого предусмотрен уступ, разграничивающий сухую и смоченную поверхности промывателя. Сливной патрубок в нижней части днища служит для удаления шлама через наклонную мигалку.

Вывод воздуха из скоростного промывателя СИОТ осуществляется через раскручиватель, выполненный в виде улитки.

Рекомендуемые скорости воздуха в круглом сечении входного патрубка находятся в пределах $V_o = 14-20$ м/с. При этих скоростях весь ряд промывателей перекрывает область пропускной способности от 12,5 до 280 тыс. м³/ч.

Степень очистки воздуха для частиц менее 5 мкм составляет 95% при $V_o = 20$ м/с и 90% при $V_o = 14$ м/с.

Циклоны-промыватели СИОТ при прочих равных условиях имеют габаритные размеры в 2,5-3 раза меньше, чем габаритные размеры скруббера ЦС и циклонов ЦВП, эффективность тех и других аппаратов примерно одинакова.

7.3 Тарельчатые скрубберы

Тарельчатый скруббер (пенный пылеуловитель) – это аппарат, в котором контакт газа с жидкостью осуществляется на решётках (тарелках с равномерно расположенными мелкими отверстиями), устанавливаемых внутри аппарата.

Очищаемый газ поступает через диффузор, расположенный в нижней части аппарата, и проходя снизу через отверстия решётки, вспенивает находящуюся на её поверхности воду. С момента возникновения пены резко увеличивается поверхность контакта фаз газа и жидкости. В слое образовавшейся пены (расчётная высота слоя 80-100 мм) происходит очистка газа от взвешенных в нём частиц. Очищенный воздух удаляется из верхней части корпуса. Для предотвращения

брызгоноса на пути выхода газа обычно устанавливается каплеуловитель. Вода с поверхности тарелки отводится через отверстия в тарелке и частично через слив, либо только через отверстия.

Для создания устойчивого пенного слоя на решётке необходимо поддерживать скорость газа в свободном сечении аппарата в пределах 1,0-2,5 м/с, расход воды – 0,4-0,9 л/м³ очищаемого газа.

Тарельчатые скрубберы предназначены для очистки от пыли нейтральных газов с температурой до 100°С, не дающих в процессе водной промывки кристаллизующихся солей, способных забивать отверстия решёток или давать твёрдые отложения на поверхностях аппарата.

Частицы пыли диаметром 15-20 микрон улавливаются в пенных пылеуловителях на 93-99%. При уменьшении диаметра частиц до 3-5 микрон коэффициент очистки снижается до 80% и менее. Поэтому самостоятельное применение пенных газоочистителей для очистки газа, содержащего тонкие пылевые частицы размером менее 5 микрон нецелесообразно.

По способу отвода жидкости с решётки тарельчатые скрубберы подразделяют на два основных типа: с переливными решётками и с провальными решётками (рис. 7.7.).

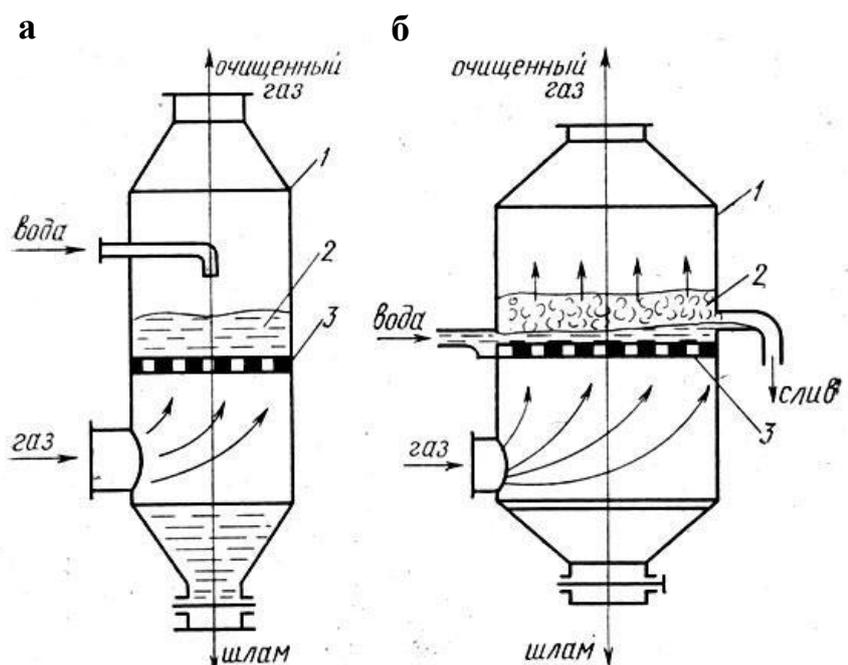


Рисунок 7.7 – Схемы тарельчатых скрубберов с провальной решёткой (а) и с переливной решёткой (б):

1 – корпус; 2 – пенный слой; 3 – решётка

В тарельчатом скруббере с переливной решёткой (рис. 7.7, б) вода подается на решётку через приёмную коробку, которая обеспечивает равномерное поступление воды по всей ширине решетки. При прохождении газа сквозь решётку на ней образуется слой пены высотой 100-200 мм. Пена со шламом через порог сливается в выходной патрубок и удаляется. С помощью порога регулируется высота слоя пены на решётке. Крупные частицы пыли осаждаются в коническую часть

пылеуловителя и отводятся из аппарата в виде шлама. Недостаток пылеуловителей с переливной решёткой – возможность забивания отверстий решётки твёрдыми частицами.

Этот недостаток устраняется в тарельчатых скрубберах с провальной решёткой (рис. 7.7, а), в котором подача воды осуществляется через форсунки непосредственно на решётку. В этих аппаратах осуществляется полное протекание воды через отверстия в решётке и удаление шлама только через сборный бункер.

Пенные газоочистители (скрубберы) ПГС-ЛТИ и ППП-ЛТИ предназначены для очистки газов с высокой начальной запыленностью. Аппарат состоит из корпуса с размещенными в нём одной или двумя рабочими решётками с системой подачи воды (рис. 7.8).

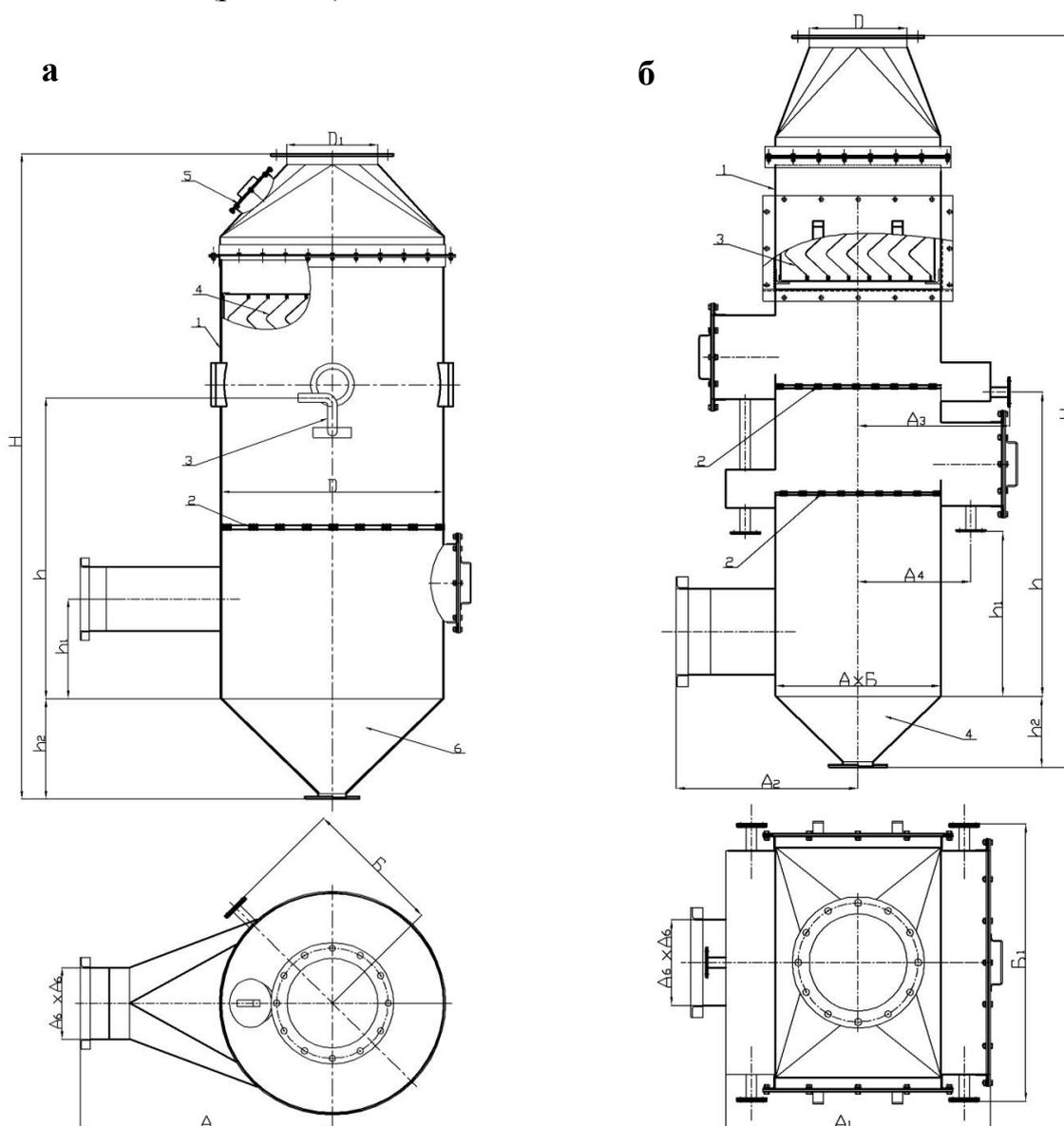


Рисунок 7.8 – Газоочистители пенные ППП-ЛТИ (а) и ПГС-ЛТИ-2 (б):
 а) 1 – корпус; 2 – решётка; 3 – система подачи воды; 4 – брызгоотбойник; 5 – люк;
 б) 1 – корпус; 2 – решётка; 3 – брызгоотбойник; 4 – сборный бункер

Аппараты ПГС-ЛТИ предусматривают отвод воды с решётки через сливное устройство и частично через отверстия решетки. Аппараты ППП-ЛТИ по конструкции относятся к скрубберам с провальной решёткой.

Число решёток зависит от двух факторов: начальной запыленности и требуемой степени очистки газа. При начальной запыленности газа до 15-20 г/м³ следует применять однополочные аппараты ПГС-ЛТИ и ППП-ЛТИ; при начальной запыленности до 300 г/м³ применяются двухполочные аппараты ПГС-ЛТИ-П.

Технические характеристики пенных газоочистителей ПГС-ЛТИ и ППП-ЛТИ приведены в Приложении 6.

В пенных аппаратах с провальными решетками (ПАСС) применяют так называемые стабилизаторы пенного слоя, что позволяет повысить скорость газа до 4 м/с.

В качестве стабилизатора рекомендуется использовать сотовую решётку высотой $h_{cm} = 60$ мм с ячейками размером от 35×35 до 45×45 мм.

Решётки промышленных аппаратов ПАСС могут быть дырчатыми с отверстиями величиной $d_o = 5-8$ мм и живым сечением от 14 до 22%, а также трубчатыми с трубами диаметром 20-32 мм и промежутками между ними $d_m = 3,0-6,5$ мм при живом сечении $S_o = 13,0-18,2\%$. Аппараты с трубчатыми решетками обозначаются ПАСС-Т, а с дырчатыми – ПАСС-Д.

Разработан нормализованный ряд аппаратов ПАСС с корпусами круглого сечения на расход газа $Q = 2,5-64$ тыс. м³/ч (табл. 7.2).

Таблица 7.2 – Нормализованный ряд аппаратов типа ПАСС

Тип аппарата	Расход газа, тыс. м ³ /ч	Скорость газа в свободном сечении аппарата, м/с	Основные размеры аппарата, мм			
			Высота, H	Диаметр, D	диаметр выходного патрубка, D_1	диаметр входного патрубка, D_2
ПАСС-Т(Д)-3	2,5- 3,4	2,9	3670	600	285	100
ПАСС-Т(Д)-4	3,4- 4,5	2,85	3790	700	355	100
ПАСС-Т(Д)-5	4,5- 6,2	2,96	3910	800	400	100
ПАСС-Т(Д)-7	6,2- 8,4	3,05	4160	920	450	100
ПАСС-Т(Д)-10	8,4- 11,7	2,94	4300	1100	500	100
ПАСС-Т(Д)-14	11,7- 16,5	2,95	4860	1300	560	100
ПАСС-Т(Д)-20	16,5-23,2	3,12	5300	1500	630	100
ПАСС-Т(Д)-30	23,2-32,6	3,05	6050	1800	800	150
ПАСС-Т(Д)-40	32,6-45,7	3,14	6710	2100	900	150
ПАСС-Т(Д)-55	45,7-64,0	3,10	7630	2500	1020	150

Расчёт тарельчатых скрубберов.

Расчёт тарельчатых скрубберов сводится к определению гидравлического сопротивления и степени очистки запыленного воздуха [21, 54].

Расчёт гидравлического сопротивления пенных аппаратов со стабилизатором слоя может быть проведен по зависимости

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_p + \Delta P_n + \Delta P_\sigma + \Delta P_a, \quad (7.1)$$

где ΔP_p , ΔP_n , ΔP_σ , ΔP_a – потери напора соответственно сухой решетки, слоя пены, за счёт сил поверхностного натяжения, корпуса аппарата.

Величина ΔP_p (в Па) может быть найдена по формуле

$$\Delta P_p = 1,82 (v_z^0)^2 \rho_z / 2S_0 \quad (7.2)$$

где v_z^0 – скорость газа в отверстиях решетки, м/с;

S_0 – относительная площадь свободного сечения решетки, м²/м².

Потеря напора ΔP_n (в Па) за счёт слоя пены на решетке

$$\Delta P_n = 0,447 H_n \rho_{\text{ж}} g / (v_z^0)^{0,5}, \quad (7.3)$$

где H_n – высота слоя пены, м;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³;

v_z^0 – скорость газа в отверстиях решетки, м/с.

В уравнении (7.3) высота слоя пены H_n (мм) может быть найдена по зависимости

$$H_n = 4,8 v_z^{0,79} m^{0,2} / (d_0^{0,14} S_0^{1,9}), \quad (7.4)$$

где m – плотность орошения, л/м³ газа;

d_0 – диаметр отверстий решетки, мм.

Потерю напора ΔP_σ (в Па) под действием сил поверхностного натяжения рассчитывают по формуле

$$\Delta P_\sigma = 4\sigma/d_0, \quad (7.5)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м.

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата ΔP_a (в Па) рассчитывают по зависимости

$$\Delta P_a = \xi_a v_z^2 \rho_z / 2, \quad (7.6)$$

где $\xi_a = 25 \div 28$ – коэффициент гидравлического сопротивления корпуса аппарата.

Степень фракционной очистки η_ϕ (в %) может быть рассчитана по зависимости

$$\eta_{\phi i} = 100 [1 - 87,1(1,37 - d_{mi}^{0,1}) / H_n^{0,9} \cdot v_z^{0,25}], \quad (7.7)$$

где d_{mi} – средний эквивалентный размер частиц фракции, мкм;

H_n – высота слоя пены, мм;

v_z – скорость газа в сечении аппарата, м/с.

Общую степень очистки определяют по уравнению

$$\eta = [\eta_{\phi 1} R(d_1) + \eta_{\phi 2} R(d_2) + \dots + \eta_{\phi n} R(d_n)]/100, \quad (7.8)$$

где $R(d_i)$ – содержание узких классов пыли с размером d_i , %.

Пример.

Рассчитать пенный аппарат для очистки технологических газов, удаляемых после сушилки с кипящим слоем. Общий расход газа $V = 41600 \text{ м}^3/\text{ч}$, плотность газа при рабочих условиях $\rho_g = 1,291 \text{ кг}/\text{м}^3$, коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma = 7,28 \cdot 10^{-2} \text{ Н}/\text{м}$. Пыль – плохо смачиваемая, начальная концентрация пыли $C_2 = 2 \text{ г}/\text{м}^3$. Дисперсный состав пыли приведен в таблице 7.2.

Таблица 7.3 – Дисперсный состав пыли

d_m , мкм	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-60
$R(d_m)$, %	6	9	24	28	27	6

Решение.

Принимаем за базовую конструкцию аппарат типа ПАСС, а скорость газа в сечении аппарата из условий устойчивости слоя пены $v_2^0 = 3 \text{ м}/\text{с}$.

Площадь сечения корпуса аппарата

$$S = V / (3600 v_2^0) = 41600 / (3600 \cdot 3) = 3,85 \text{ м}^2.$$

Диаметр корпуса аппарата

$$D_0 = (4S / \pi)^{0,5} = (4 \cdot 3,85 / 3,14)^{0,5} = 2,21 \text{ м}.$$

Примем (табл. 7.2) действительный диаметр корпуса равным 2500 мм. Тогда действительная скорость газа в сечении аппарата

$$v_2 = v_2^0 D_0^2 / D^2 = 3 \cdot 2,21^2 / 2,5^2 = 2,34 \text{ м}/\text{с}.$$

Расход жидкости принимаем с учетом оптимальной работы аппарата при плотности орошения $L_0 = 1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

$$L_{жк} = L_0 S_0 = 1 \cdot 4,91 = 4,91 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где, $S_0 = 0,785 D^2 = 4,91 \text{ м}^2$.

Относительную площадь свободного сечения дырчатой решетки S_0 ($\text{м}^2/\text{м}^2$) вычисляем при высоте слоя пены 100 мм, диаметре отверстий 5 мм и плотности жидкости $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$

$$\begin{aligned} S_0 &= 1,37 v_2^{0,458} L_0^{0,152} / (H_n^{0,61} d_0^{0,085} \rho_{жк}^{0,61}) = \\ &= 1,37 \cdot 2,34^{0,458} \cdot 1^{0,152} / (0,1^{0,61} \cdot 0,005^{0,085} \cdot 1000^{0,61}) = 0,19. \end{aligned}$$

Проверяем действительную высоту слоя пены по уравнению (7.4)

$$\begin{aligned} H_n &= 4,8 \cdot v_2^{0,79} \cdot m^{0,2} / (d_0^{0,14} \cdot S_0^{1,9}) = \\ &= 4,8 \cdot 2,34^{0,79} \cdot 0,02^{0,2} / (0,005^{0,14} \cdot 0,19^{1,9}) = 112 \text{ мм}, \end{aligned}$$

где, $m = L_0 / V = 1000/41600 = 0,02 \text{ л}/\text{м}^3$.

Здесь $L_0 = 1000 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Шаг между отверстиями в случае ромбической разбивки определяем по формуле

$$t = d_0(0,91/S_0)^{0,5} = 5(0,91/0,19)^{0,5} = 11 \text{ мм.}$$

Вычисляем полное гидравлическое сопротивление аппарата по формуле (7.1)

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_p + \Delta P_n + \Delta P_\sigma + \Delta P_a,$$

где, величины ΔP_p , ΔP_n , ΔP_σ , ΔP_a определяем по формулам (7.2-7.6)

$$\Delta P_p = 1,82 v_z^2 \rho_z / 2S_0 = 1,82 \cdot 2,34^2 \cdot 1,291 / 2 \cdot 0,19 = 33,9 \text{ Па};$$

$$\Delta P_n = 0,447 H_n \rho_{\text{ж}} g / (v_z)^{0,5} = 0,447 \cdot 0,112 \cdot 1000 \cdot 9,81 / 2,34^{0,5} = 321,1 \text{ Па};$$

$$\Delta P_\sigma = 4\sigma / d_0 = 4 \cdot 7,28 \cdot 10^{-2} / 0,005 = 58,2 \text{ Па};$$

$$\Delta P_a = \xi_a v_z^2 \rho_z / 2 = 27 \cdot 2,34^2 \cdot 1,291 / 2 = 95,4 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{\text{общ}} = 33,9 + 321,1 + 58,2 + 95,4 = 508,6 \text{ Па.}$$

Степень фракционной очистки определяем по формуле для плохо смачиваемой пыли (7.7)

$$\eta_{\phi i} = 100 [1 - 87,1(1,37 - d_{mi}^{0,1}) / H_n^{0,9} \cdot v_z^{0,25}],$$

где, $d_{m1} = (0 + 5) / 2 = 2,5 \text{ мкм}$; $d_{m2} = (5 + 10) / 2 = 7,5 \text{ мкм}$; $d_{m3} = (10 + 15) / 2 = 12,5 \text{ мкм}$ и т. д.

Значения d_{mi} в формулу подставляются в мкм, значения H_n – в мм, значения v_z – в м/с.

В результате вычислений получаем следующие фракционные степени очистки:

d_m , мкм	0-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-50
$\eta_{\phi i}$ %	84,42	91,66	95,30	97,81	100	100

Общая степень очистки

$$\eta = (84,42 \cdot 6 + 91,66 \cdot 9 + 95,30 \cdot 24 + 97,81 \cdot 28 + 100 \cdot 27 + 100 \cdot 6) / 100 = 96,6\%.$$

Остаточная концентрация пыли в газе на выходе из аппарата

$$C_{\text{вых}} = C_2 (100 - \eta) / 100 = 2(100 - 96,6) / 100 = 0,068 \text{ г}/\text{м}^3.$$

7.4 Ударно-инерционные скрубберы

В скрубберах ударно-инерционного действия контакт газа с жидкостью осуществляется за счёт удара газового потока о поверхность жидкости с последующим пропусканием газожидкостной взвеси через отверстия различной конфигурации [50]. Вся энергия, необходимая для создания смеси, подводится газовым потоком.

Наиболее простой по конструкции *импакторный пылеуловитель* ударно-инерционного типа показан на рисунке 7.9, а. Он представляет собой вертикальную

колонну, в нижней части которой находится слой жидкости. Запыленные газы со скоростью 20 м/с направляются сверху вниз на поверхность жидкости. При резком изменении направления движения газового потока (на 180°) взвешенные в газе частицы пыли по инерции отбрасываются на поверхность жидкости и захватываются ею, а очищенные газы направляются в выходной газопровод. Шлам из пылеуловителя удаляется периодически или непрерывно через гидрозатвор. Для удаления уплотненного осадка со дна применяют смывные сопла.

Аппараты этого типа удовлетворительно работают только при улавливании частиц размером более 20 мкм.

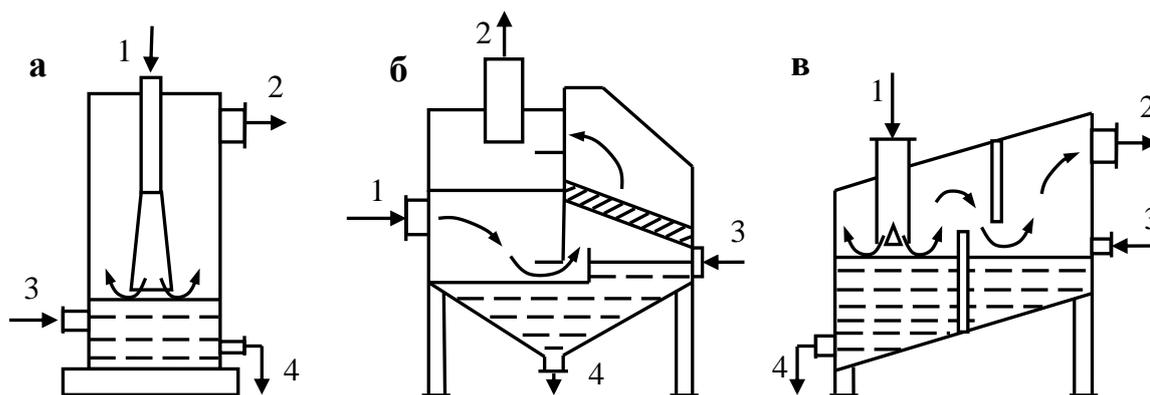


Рисунок 7.9 – Скрубберы ударно-инерционного действия: а – импакторный скруббер; б – газопромыватель типа ПВМ; в – скруббер Дойля;

1 – запыленный воздух; 2 – очищенный воздух; 3 – вода на подпитку; 4 – шлам

В *пылеуловителе типа ПВМ* загрязненные газы подаются непосредственно в корпус аппарата, а приобретают необходимую скорость для образования смеси уже в щелевом канале. Схема движения газового потока в камере этого аппарата приведена на рисунке 7.9, б.

В *скруббер Дойля* (рис. 7.9, в) газ на очистку поступает через трубы, в нижней части которых установлены конусы, увеличивающие скорость газовых потоков (до 35-55 м/с). С этой скоростью газовый поток ударяется о поверхность жидкости, создавая завесу из капель. Уровень жидкости в скруббере на 2-3 мм ниже кромки газоподводящей трубы.

Осаждение пыли в ударно-инерционных скрубберах происходит в 2 стадии. Крупные фракции пыли из-за инерции не могут повернуть после удара вместе с потоком газа. Мелкие фракции, увлекаемые газом, улавливаются каплями жидкости и вследствие образования газожидкостной смеси отделяются от потока после прохождения щели на сепараторе уноса.

Пылеуловитель вентиляционный мокрый типа ПВМ предназначен для очистки воздуха, удаляемого вытяжными вентиляционными системами от пыли средней и мелкой дисперсии (III и IV группы) во всех отраслях промышленности, в том числе взрыво- и пожароопасной пыли. Не рекомендуется применять в случаях, когда улавливаемая пыль способна цементироваться или кристаллизоваться в воде, образуя прочные отложения, для улавливания крупноволокнистой пыли и других плохо сма-

чиваемых пылей, обладающих способностью всплывать на поверхность. При начальной концентрации пыли более чем 10 г/м^3 рекомендуется применять в качестве второй ступени, предварительно очищая воздух в простейших сухих пылеуловителях в целях уменьшения расходов воды и количества шлама.

Различают несколько вариантов исполнения пылеуловителей ПВМ:

- пылеуловитель ПВМСА – удаление шлама осуществляется через задвижку, расположенную в нижней части пылеуловителя;

- пылеуловитель ПВМБ – удаление шлама через задвижку и боковые карманы. Предназначен для удаления тяжелых фракций, собирающихся на дне пылеуловителя, и легких всплывающих фракций, удаляемых через боковые карманы пылеуловителя;

- пылеуловитель ПВМКБ – механизированное удаление шлама при помощи конвейера.

На рисунке 7.10 представлена схема пылеуловителя ПВМСА.

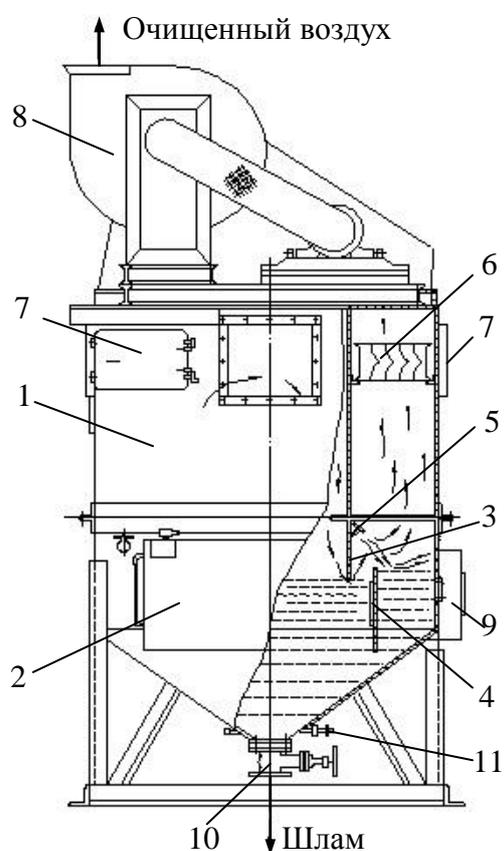


Рисунок 7.10 – Схема пылеуловителя ПВМСА:

- 1 – верхняя секция;
- 2 – нижняя секция;
- 3 – неподвижная перегородка;
- 4 – подвижная перегородка;
- 5 – каплеотбойники;
- 6 – каплеуловитель;
- 7 – боковые двери;
- 8 – вентагрегат;
- 9 – гидрозатвор;
- 10 – задвижка;
- 11 – смывное устройство

Корпус пылеуловителя состоит из двух секций: верхней 1 и нижней 2. Нижняя часть корпуса заполнена водой. В корпусе укреплены перегородки 3 и 4. Перегородка 3 – неподвижная, перегородка 4 может перемещаться в соответствии с высотой поддерживаемого уровня воды. К неподвижной перегородке 3 крепятся каплеотбойники 5. Каплеуловитель 6 представляет собой пакет изогнутых пластинок, установленных в пылеуловитель через двери 7 в боковых стенах.

На пылеуловитель установлен вентагрегат 8. Всасывающий патрубок вентилятора соединен с воздухопроводом при помощи гибкой ветви.

На стенах корпуса приваривается гидрозатвор 9 для регулирования и поддержания уровня воды. Шлам удаляется из нижней секции пылеуловителя через задвижку 10.

Очистка воздуха происходит следующим образом: запылённый воздух через входной патрубок входит в корпус, устремляясь с большой скоростью через щель между поверхностью воды и нижней кромкой перегородки 3, захватывая с собой воду. Увлечённая воздухом вода отклоняется каплеотбойником 5 и сливается в крайние отсеки. Очищенный воздух проходит через каплеуловители 6 и выбрасывается наружу вентилятором 8. Осевший в нижней части пылеуловителя шлам сливается через задвижку 10, расположенную на дне пылеуловителя. Для лучшего удаления шлама используется специальное смывное устройство, расположенное вблизи задвижки 11.

Потерю давления в ПВМ и эффективность улавливания пыли определяют по графикам (рис. 7.11) в зависимости от удельного расхода воздуха и расстояния от кромки перегородки до уровня воды [55, 56].

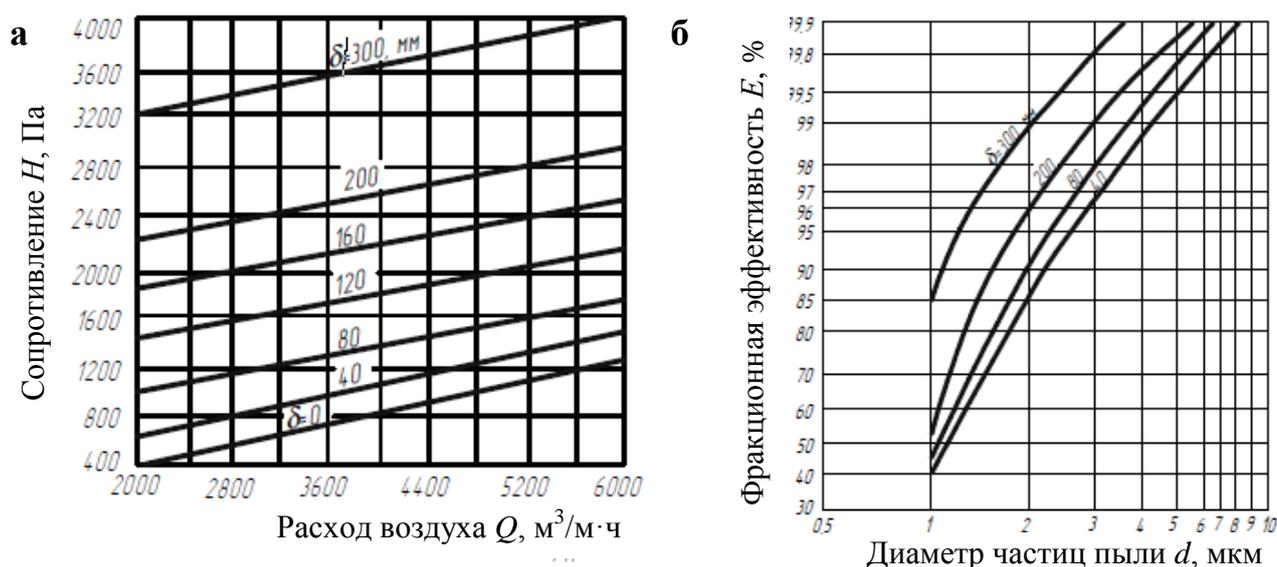


Рисунок 7.11 – Зависимость сопротивления H пылеуловителя типа ПВМ от расхода воздуха Q на 1 м длины перегородки при различных уровнях воды δ (а) и зависимость фракционной эффективности E от размера пылевых частиц при различных уровнях воды δ (б)

Технические характеристики ударных промывателей ПВМ приведены в Приложении 6.

7.5 Скрубберы Вентури

Среди мокрых пылеуловителей наибольшей эффективностью очистки газов от мелкодисперсной пыли обладают установки с трубой Вентури (СПУ Вентури). Это скруббер, в котором интенсивное дробление контактирующей с газом жидкости осуществляется за счёт высокой скорости газового потока, достигаемой в трубе-распылителе, имеющей форму трубы Вентури [50].

Более высокая эффективность пылеулавливания по сравнению с полыми газопромывателями достигается в скрубберах Вентури созданием развитой поверхности контакта фаз, что требует и значительно более высоких энергозатрат. Образование тонкодисперсного аэрозоля происходит при этом как за счёт механической диспергации промывочной жидкости, так и вследствие интенсивного испарения капель при резком падении давления в горловине. Очевидно, это приводит также к повышению влажности газа и интенсификации капиллярной конденсации влаги на поверхности частиц пыли. Последняя причина может служить объяснением того, что степень очистки пыли в скрубберах Вентури слабо зависит от её смачиваемости.

СПУ Вентури состоит из трубы-распылителя для измельчения жидкости под действием газового потока, движущегося с большой скоростью, и каплеуловителя (рис. 7.12). Основная часть скруббера – сопло Вентури, в конфузурную часть 1 которого подводится запыленный поток газа и через центробежные форсунки 2 жидкость на орошение.

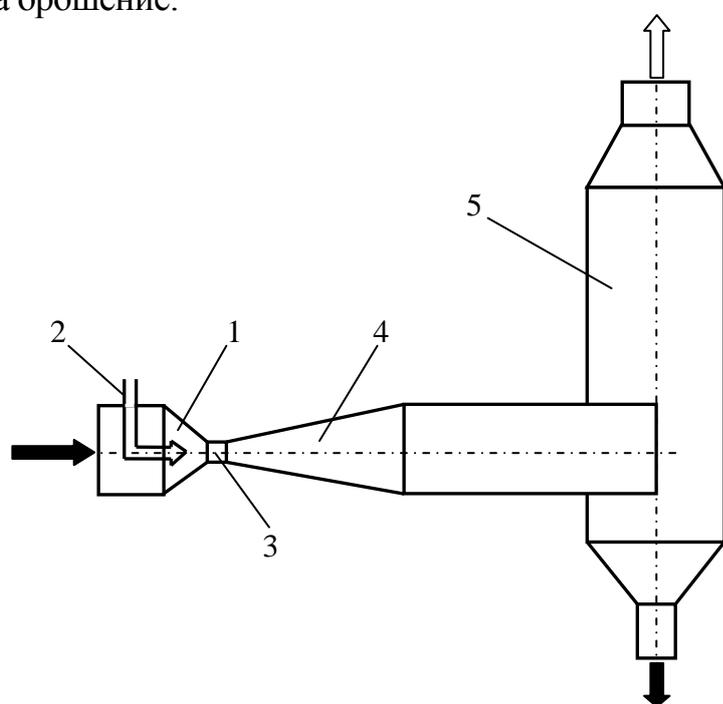


Рисунок 7.12 – Схема СПУ Вентури:

- 1 – конфузор;
- 2 – форсунка;
- 3 – горловина;
- 4 – диффузор;
- 5 – каплеуловитель

В конфузурной части сопла происходит разгон газа от входной скорости ($w_T = 15-20$ м/с) до скорости в узком сечении сопла (горловине 3) 40-200 м/с и более. Процесс осаждения частиц пыли на капли жидкости обусловлен массой жидкости, развитой поверхностью капель и высокой относительной скоростью частиц жидкости и пыли в конфузурной части сопла. Эффективность очистки в значительной степени зависит от равномерности распределения жидкости по сечению конфузурной части сопла.

В горловине 3 при падении градиента давления создаются определённые условия для выравнивания скоростей газа и капель воды. Плавный вывод потока во входной патрубке каплеуловителя осуществляется по диффузору 4. В диффузоре трубы происходит снижение скорости потока до 15-20 м/с, что способствует коагуляции мелких частиц. Укрупнение пылевых частиц в трубе Вентури в ходе коагуляции происходит под влиянием инерционных сил движения частиц, поляризационной и турбулентной диффузии, броуновского движения, электростатических сил, а во многом под

действием конденсации паров воды, образующейся при адиабатическом расширении газа. Из диффузора газовый поток выносит капли жидкости с осевшими на них частицами пыли в каплеуловитель 5, где происходит сепарация взвешенных частиц.

Для улавливания пыли после трубы Вентури возможно использование скрубберов, циклонов с водяной пленкой, циклона-промывателя СИОТ и др. В этих аппаратах осуществляется улавливание предварительно скоагулированных пылевых частиц.

Характерным элементом для данного устройства является труба Вентури (рис. 7.13), где происходит контакт воздушного (газового) потока, содержащего во взвешенном состоянии пылевые частицы, с тонкораспыленной водой.

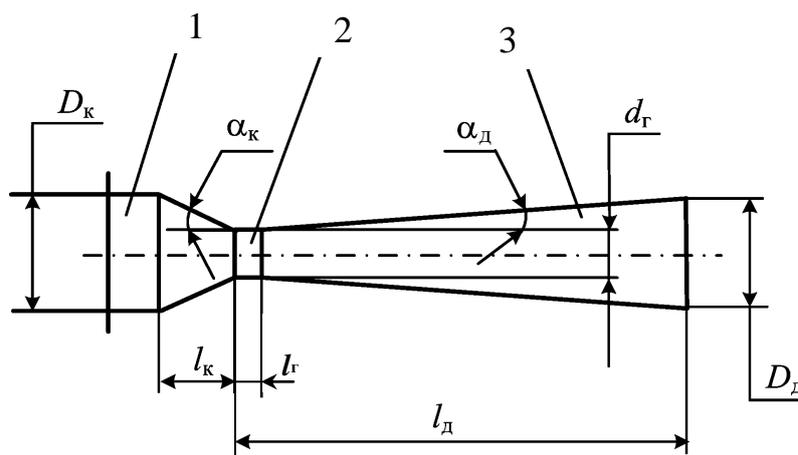


Рисунок 7.13 – Труба Вентури:
1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор

Оптимальная по аэродинамическим условиям движения газа труба Вентури имеет длину горловины $l_2 = 0,15d_2$, где диаметр горловины d_2 рассчитывается на скорость газа $w_2 = 60-150$ м/с; угол сужения конфузора $2\alpha_k = 25-28^\circ$ и угол раскрытия диффузора $2\alpha_d = 6-7^\circ$. Максимальные диаметры конфузора D_k и диффузора D_d рассчитываются по заданному расходу газа при его скорости 15-20 м/с [55].

Длины конфузора и диффузора определяются из геометрического построения трубы

$$l_k = (D_k - d_2) / (2 \operatorname{tg} \alpha_k) \quad (7.9)$$

$$l_d = (D_d - d_2) / (2 \operatorname{tg} \alpha_d) \quad (7.10)$$

Поперечное сечение горловины может быть не только круглым, но и щелевым или кольцевым. Трубы со щелевой горловиной имеют ширину сечения 100-150 мм. Длина щели определяется расходом газа. Трубы со щелевым и кольцевым сечением горловины используются тогда, когда в процессе пылеочистки изменяется расход запыленного газа. Поддержание определенной скорости газа в горловине при изменении его расхода достигается за счёт изменения площади сечения горловины. В горловине щелевого сечения это осуществляется поворотными заслонками, а в кольцевой – за счёт перемещения вдоль оси трубы регулирующего конуса.

Жидкость в трубы Вентури чаще всего подается через форсунки, устанавливаемые в конфузоре с осевым направлением факела распыла. Число форсунок определя-

ется расходом жидкости, подаваемой на орошение. В трубе с круглым сечением горловины равномерное распределение жидкости, подаваемой через одну форсунку, обеспечивается лишь при $d_2 < 300$ мм. Кроме центрального (рис. 7.14, а) форсуночное орошение может быть периферийное (рис. 7.14, б), плёночное с подачей жидкости в виде плёнки в центральную зону (рис. 7.14, в) и бесфорсуночное с подводом жидкости за счёт энергии газового потока (рис. 7.14, г).

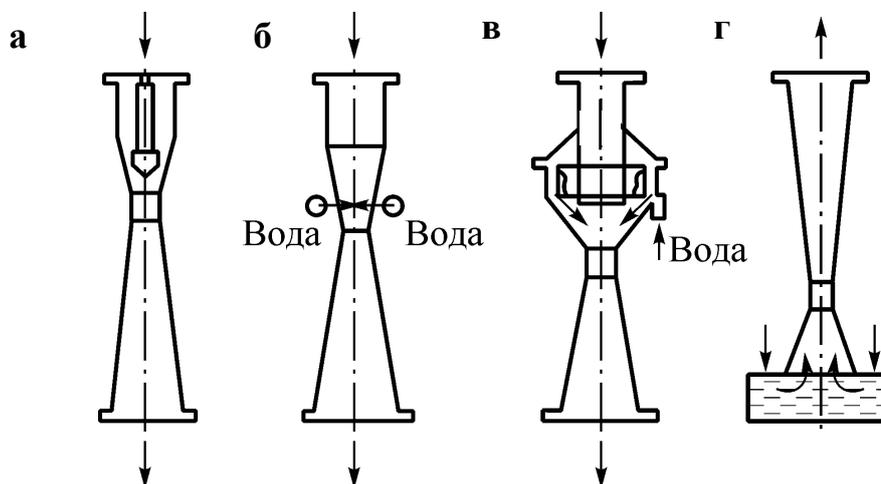


Рисунок 7.14 – Способы подачи жидкости в трубу Вентури:

а – центральный (форсуночный) подвод жидкости; б – периферийное орошение; в – плёночное орошение; г – бесфорсуночное орошение

Бесфорсуночное орошение предпочтительно при использовании сильно загрязненной оборотной жидкости. Возможно совместное пленочное и форсуночное орошение. Однако следует отметить, что форсуночное орошение обеспечивает более тонкое диспергирование капель и более высокую степень пылеулавливания по сравнению с плёночным.

Типоразмеры труб Вентури обеспечивают производительность по газу в диапазоне 2000-500000 м³/ч. Иногда при больших объёмах очищаемых газов применяют батарейные или групповые компоновки скрубберов Вентури.

По гидродинамическим характеристикам скрубберы Вентури можно условно подразделить на высоконапорные и низконапорные. Первые применяются для тонкой очистки газов от микронной и субмикронной пыли и характеризуются высоким гидравлическим сопротивлением (до 20000-30000 кПа). Низконапорные скрубберы с сопротивлением распылителя до 5000 Па применяются для улавливания пыли с размерами частиц более 20 мкм.

Среди низконапорных скрубберов Вентури широкое распространение получили **коагуляционные мокрые пылеуловители (КМП)**, которые представляют собой аппарат с совмещенной трубой-коагулятором и циклоном ЦВП. Общий вид аппарата представлен на рис. 7.15.

Труба-коагулятор состоит из корпуса, форсунки с водоподводящей трубой и водяной камеры для пленочного орошения внутренней поверхности конфузора. Кор-

пус трубы сварной и состоит из воздухо-подводящего патрубка, конфузора, горловины и диффузора.

Основная подача воды осуществляется через форсунку с отбойником, установленную по оси трубы. Для удобства проведения ревизий соединение форсунки с трубой выполнено легкоразъёмным.

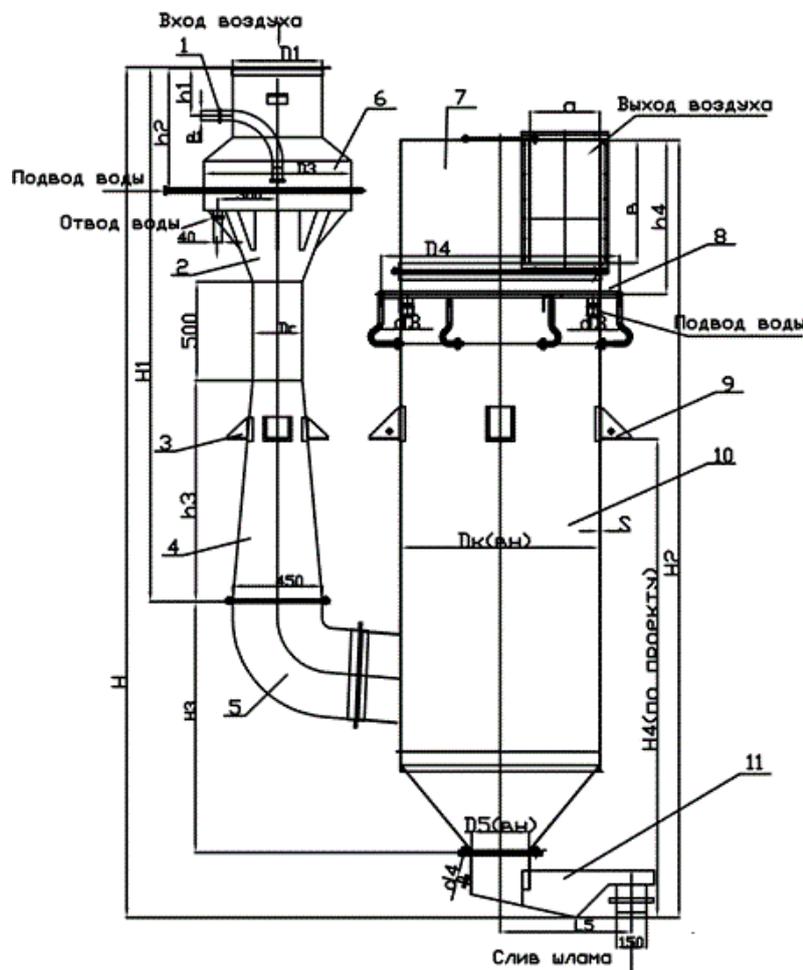


Рисунок 7.15 – Коагуляционный мокрый пылеуловитель типа КМП:

- 1 – форсунка с водоподводящей трубкой; 2 – корпус трубы-коагулятора; 3 – опора трубы-коагулятора; 4 – труба-коагулятор; 5 – отвод соединительный с прямоугольным фланцем; 6 – водяная камера; 7 – улитка воздухоотводящая; 8 – установка сопел орошения стенок каплеуловителя; 9 – опора каплеуловителя; 10 – каплеуловитель; 11 – гидрозатвор

Для предотвращения отложений шлама на границе раздела сухой и мокрой поверхности корпуса предусмотрена дополнительная подача воды в виде пленки, равномерно стекающей из водяной камеры по всей поверхности конфузора. По конструктивным особенностям водяная камера для труб с диаметром горловины 250 и 320 мм выполнена герметичной, а для остальных – при заполнении камеры водой образуется гидравлический затвор, предотвращающий подсос воздуха из окружающей среды. Вода к камере подводится через полукольцевой коллектор и два штуцера, приваренных к обечайке камеры.

Каплеуловитель выполнен по схеме циклона с водяной пленкой ЦВП. Он состоит из корпуса с воздухоподводящим патрубком и воздухоотводящей улиткой, присоединенной к верхнему фланцу корпуса.

К нижней части корпуса приварен фланец, к которому крепится гидрозатвор для отвода шлама. Для периодического орошения стенок каплеуловителя с целью его промывки в верхней части корпуса установлены сопла. Вода к соплам подается через резиновые трубки, присоединенные к кольцевому коллектору. Для наблюдения за работой сопел и осмотра каплеуловителя на воздухоотводящем патрубке установлен люк. На гидрозатворе имеется штуцер подвода воды для взмучивания шлама и периодической промывке гидрозатвора.

Очищаемый воздух поступает через входной патрубок в конфузор трубки-коагулятора, куда через центральное сопло с отбойником впрыскивается вода. Под действием большой скорости воздуха 40-70 м/с в горловине трубки-коагулятора осуществляется диспергирование воды в мелкие частицы и, благодаря столкновению пылинок с частицами воды, происходит их захват.

Капли воды со взвешенными в них частицами пыли входят в каплеуловитель через тангенциальный патрубок, приобретая вращательное движение, и под влиянием центробежной силы отбрасываются к стенкам корпуса, и по ним стекают в конусную часть, откуда выводятся через сливной патрубок, снабженный гидрозатвором.

Очищенный воздух отсасывается вентилятором через воздухоотводящую улитку пылеуловителя.

Пылеуловитель КМП устанавливаются на основание, к которому крепится с помощью опор на корпусе трубы и каплеуловителя при монтаже.

Пылеуловители типа КМП предназначены для очистки воздуха, удаляемого вытяжными вентиляционными системами, от зернистой пыли средней и мелкой дисперсности при начальной запыленности воздуха до 90 г/м³. Перепад давлений – 600-3500 Па, расход воды – 0,2 - 0,6 л/м³.

Технические характеристики пылеуловителей КМП приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4 – Технические характеристики пылеуловителей типа КМП

Наименование	Производительность по воздуху, м ³ /ч	Диаметр горловины, мм	длина L, мм	ширина В, мм	высота Н, мм
КМП-2,5	7000-14000	250	2300	1415	3350
КМП-3,2	12000-20000	320	2800	1845	4990
КМП-4,0	18000-35000	400	3540	2240	5630
КМП-5,0	28000-55000	500	3980	2705	7645
КМП-6,3	45000-86000	630	4480	3190	8360
КМП-7,1	58000-110000	710	5240	3695	9290
КМП-8,0	70000-140000	800	5720	4105	10060

Аппараты мокрого пылеулавливания типа МПР предназначены для окончательной очистки запыленных газов мокрым способом в системах аспирации и промышленной вентиляции и на углеобогатительных фабриках.

Аппарат (рис. 7.16) включает в себя трубу Вентури 1, смесительную камеру 3 с системой орошения 2 (форсункам), каплеуловитель 4, бункер 6 и гидравлический затвор 7.

Запыленные газы поступают в смесительную камеру, орошаемую цельнофакельными форсунками. Затем газожидкостная смесь в виде закрученного потока направляется в трубу Вентури, на выходе из которой сепарируется основная часть отработанной жидкости. Доулавливание капель происходит в каплеуловителе, оснащенный лопастной решеткой 5.

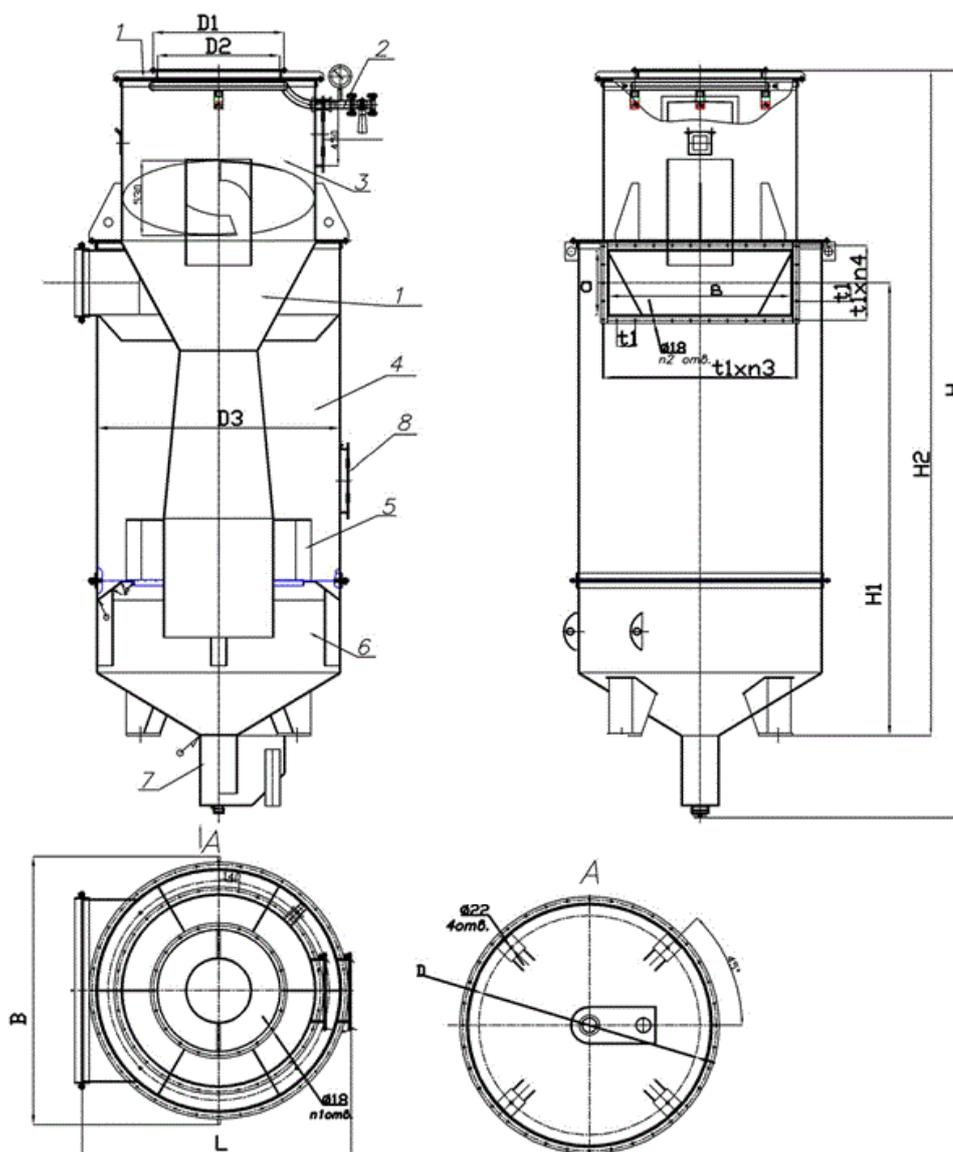


Рисунок 7.16 – Аппарат мокрого пылеулавливания МПР:
1 – труба Вентури; 2 – система орошения; 3 – смесительная камера; 4 – каплеуловитель; 5 – лопастная решётка; 6 – бункер; 7 – гидрозатвор; 8 – люк

Очищенные газы выбрасываются в атмосферу. Отработанная жидкость через гидрозатвор отводится в систему оборотного водоснабжения предприятия. Для осмотра и обслуживания предусмотрены люки 8.

Рекомендуемые режимы работы пылеуловителей МПР: допустимая запыленность очищаемого газа – не более 15 г/м^3 ; гидравлическое сопротивление аппарата – 1300-1500 Па; удельный расход воды – 0,05-0,2 л/м³; эффективность улавливания пыли (диаметр частиц 10 мкм, плотность 1400 кг/м^3) – не менее 97%.

Технические характеристики пылеуловителей МПР приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5 – Технические характеристики пылеуловителей МПР

Наименование	Производительность по воздуху, м ³ /ч	длина L, мм	ширина В, мм	высота Н, мм	Масса, кг
МПР-15	12000-15000	1400	1400	4200	1500
МПР-25	25000-30000	1900	1900	5500	2650
МПР-35	35000-40000	2200	2200	6700	3400
МПР-50	50000-60000	2500	2400	7950	3350
МПР-75	75000-85000	3000	3000	10000	4800
МПР-100	100000-125000	3350	3300	10500	6000

Вопросы для самоконтроля.

1. Укажите преимущества и недостатки процесс мокрого пылеулавливания.
2. Перечислите основные аппаратные механизмы процессов мокрого улавливания частиц пыли.
3. Опишите принцип действия полого форсуночного скруббера.
4. За счёт чего происходит обеспыливание в центробежных скрубберах?
5. Опишите принцип работы циклона с водяной плёнкой ЦВП.
6. Укажите основные различия в конструкции тарельчатых скрубберов с провальной и с переливной решёткой.
7. Что применяется в пенных аппаратах с провальными решетками для повышения скорости очищаемого газа?
8. Как проводится расчёт пенного аппарата?
9. На чём основан принцип действия скрубберов ударно-инерционного действия?
10. Опишите схему работы СПУ Вентури.
11. Какие способы подачи жидкости в трубу Вентури Вы знаете?

Глава 8

ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ

Под электрической очисткой газа понимают процесс, при котором твёрдые частицы удаляются из газообразной среды под воздействием электрических сил.

Фундаментальным отличием процесса электростатического осаждения от механических методов сепарации частиц является то, что в этом случае осаждающая сила действует непосредственно на частицы, а не создается косвенно воздействием на поток газа в целом. Это прямое и чрезвычайно эффективное использование силового воздействия и объясняет такие характерные черты электростатического метода, как умеренное потребление энергии и малое сопротивление потоку газа. Даже мельчайшие частицы субмикрометрового диапазона улавливаются эффективно, поскольку и на эти частицы действует достаточно большая сила. Принципиальных ограничений степени очистки нет, поскольку эффективность может быть повышена путём увеличения продолжительности пребывания частиц в электрофильтре [57-59].

К преимуществам электрофильтров можно отнести следующее [28, 60].

Электрофильтр относится к наиболее эффективным пылеулавливающим аппаратам. Эффективность очистки достигает 99,9% в широких пределах концентраций (от нескольких мг до 200 г/м³) и дисперсности частиц (до долей мкм) и невысокой затрате электроэнергии (около 0,1-0,5 кВт·ч на 1000 м³ газов).

Гидравлическое сопротивление электрофильтра при его правильной эксплуатации не превышает 100-150 Па, т. е. значительно ниже, чем у большинства других пылеуловителей.

Электрофильтр может обеспыливать влажную и коррозионноактивную газовую среду с температурой до 450°C под давлением и под разрежением.

Производительность электрофильтров достигает сотен тысяч м³/ч очищаемого газа.

Работа электрофильтров может быть полностью автоматизирована.

К недостаткам электрофильтров относится их высокая чувствительность к поддержанию параметров очистки, высокая металлоёмкость и большие габариты, а также высокая требовательность к уровню монтажа и обслуживания.

Применение электрической фильтрации имеет ряд ограничений.

Электрофильтр не может быть использован для улавливания пылей, обладающих очень высоким электрическим сопротивлением. Нельзя направлять в электрофильтры взрывоопасные газовые выбросы, в том числе и такие, которые могут стать взрывоопасными в процессе обработки. Не следует использовать электроочистку, если осаждение взвешенных частиц может сопровождаться электрохимическими реакциями с выходом токсичных продуктов, и тем более, добавлять таковые (например, SO₃, NH₄ и др.) для интенсификации процесса электрофильтрации.

Электрофильтры, как более сложное и дорогостоящее оборудование, обеспечивающее тонкую очистку воздуха, обычно komponуют с другими пылеулавли-

вающими устройствами, устанавливаемыми на начальных ступенях очистки. В результате повышается экономичность использования электрофильтров и обеспечивается более полная очистка.

8.1. Принцип действия электрофильтров

Электрофильтры представляют собой устройства, в которых очистка газов от взвешенных твёрдых и жидких частиц происходит под действием электрических сил. Частицам сообщается электрический заряд, и они под действием электрического поля осаждаются из газового потока.

Процесс обеспыливания в электрофильтре состоит из следующих стадий:

- зарядка взвешенных в газе пылевых частиц;
- перемещение заряженных частицы к электродам с противоположным знаком;
- осаждение частиц на электродах;
- удаление частиц пыли, осевших на электродах.

Зарядка частиц – первый основной шаг процесса электростатического осаждения. Большинство частиц, с которыми приходится иметь дело при промышленной газоочистке, сами по себе несут некоторый заряд, приобретенный в процессе их образования. Однако эти заряды слишком малы, чтобы обеспечить эффективное осаждение. На практике для зарядки частиц используется электрическое поле с коронным разрядом. Для этого электроды должны иметь такую конфигурацию, при которой создаётся резко неравномерное электрическое поле.

Основными элементами электрофильтра являются коронирующий и осадительный электроды. Первый электрод в простейшем виде представляет собой проволоку, натянутую в трубке или между пластинами, второй – представляет собой поверхность трубки или пластины, окружающей коронирующий электрод (рис. 8.1).

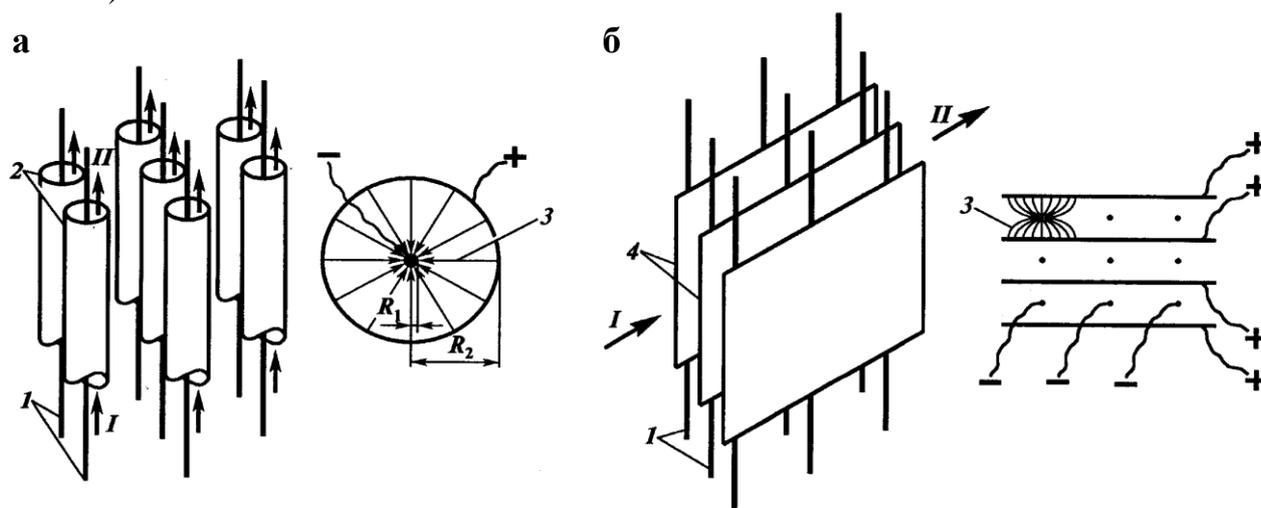


Рисунок 8.1 – Конструктивная схема электродов:

а – электрофильтр с трубчатыми электродами; б – электрофильтр с пластинчатыми электродами; 1 – коронирующие электроды; 2 – осадительные электроды; 3 – линии электрического поля

На коронирующие электроды подается постоянный ток высокого напряжения. Коронирующий электрод обычно имеет отрицательную полярность, осадительный электрод заземлён. Это объясняется тем, что корона при такой полярности более устойчива, подвижность отрицательных ионов выше, чем положительных.

Схема работы элементарной ячейки электрофильтра представлена на рис. 8.2.

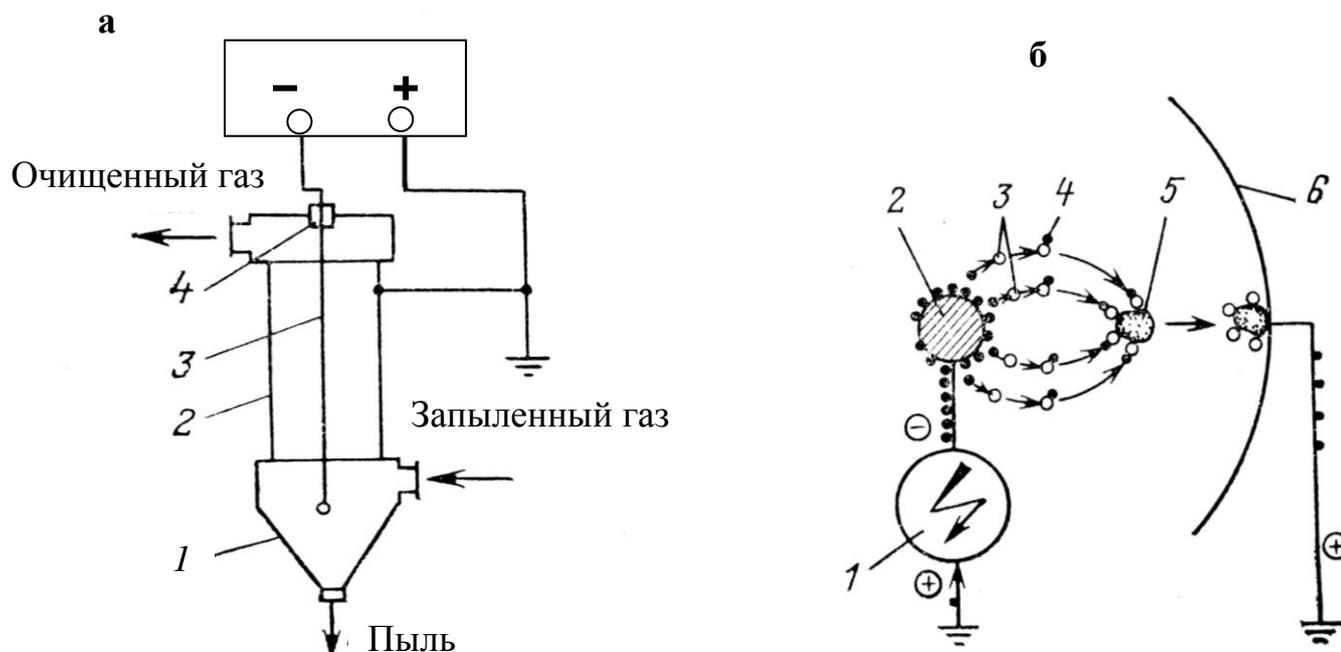


Рисунок 8.2 – Схема ячейки электрофильтра (а) и схема осаждения частиц на осадительном электроде (б):

- а) 1 – сборник пыли; 2 – осадительный электрод; 3 – коронирующий электрод;
4 – изолятор
- б) 1 – агрегат электропитания; 2 – коронирующий электрод; 3 – молекула газа;
4 – электрон; 5 – осаждаемая частица; 6 – осадительный электрод

В рабочей ячейке фильтра с помощью коронирующего и осадительного электродов создаётся неоднородное электрическое поле, в которое подаётся запыленный газ.

При достаточно большом напряжении, приложенном к межэлектродному промежутку, у поверхности коронирующего электрода происходит интенсивная ударная ионизация газа, сопровождающаяся возникновением *коронного разряда* (короны). Этот коронный разряд не достигает другого (осадительного) электрода, т.к. напряженность электрического поля вблизи него уменьшается, соответственно снижается скорость ионов и электронов.

Газовые ионы различной полярности, образующиеся в зоне коронного разряда, под действием сил электрического поля движутся к разноименным электродам, вследствие чего в межэлектродном промежутке возникает электрический ток, называемый *током короны*.

Улавливаемые частицы из-за адсорбции на их поверхности ионов приобретают электрический заряд и под влиянием сил электрического поля движутся к электродам, осаждаясь на них.

Во внутренней зоне коронного разряда в равном количестве образуются ионы положительного и отрицательного знаков. Положительные ионы заряжают частицы пыли, проходящие во внутренней зоне коронного разряда, и нейтрализуются на отрицательном коронирующем электроде. Отрицательные ионы, двигаясь от внутренней зоны коронного разряда, заряжают частицы в межэлектродном промежутке, и способствуют их осаждению на положительном осадительном электроде.

Ввиду того, что внутренняя зона коронного разряда относительно мала, основная масса загрязненного газа проходит между короной и осадительным электродом и получает заряд отрицательного знака. Поэтому большая часть пыли осаждается на положительном осадительном электроде и лишь относительно небольшая – на отрицательном коронирующем электроде.

Процесс в целом протекает очень быстро, на полное осаждение частиц требуется всего несколько секунд. По мере накопления частиц на электродах их стряхивают или смывают.

В поле короны электрофильтра реализуются два различных механизма зарядки частиц. Наиболее важна зарядка ионами, которые движутся к частицам под действием внешнего электрического поля. Вторичный процесс зарядки обусловлен диффузией ионов, скорость которой зависит от энергии теплового движения ионов, но не от электрического поля. Зарядка в поле преобладает для частиц диаметром более 0,5 мкм, а диффузионная – для частиц мельче 0,2 мкм; в промежуточном диапазоне (0,2-0,5 мкм) важны оба механизма.

8.2 Устройство электрофильтров

В настоящее время в промышленности применяется два вида электрофильтров: *однозонные* и *двухзонные*.

В однозонных электрофильтрах зарядка и осаждение частиц осуществляется в одной зоне. Эти фильтры используются для очистки промышленных газов.

В двухзонных электрофильтрах процессы зарядки и осаждения протекают в двух разных зонах – ионизаторе и осадителе. Двухзонные фильтры применяют для очистки воздуха с очень малой концентрацией пыли (до 10 мг/м³) в системах точной вентиляции, обеспечивая при этом эффективное улавливание очень тонких частиц. В двухзонных электрофильтрах на коронирующие электроды ионизатора подается положительный заряд, так как количество озона, образующегося в активной зоне при положительной короне, значительно меньше, чем при отрицательной.

Так как в этой работе мы рассматриваем способы обеспыливания промышленных газов, основное внимание уделим устройству однозонных электрофильтров.

Современные однозонные электрофильтры (рис. 8.3) представляют собой газоплотный корпус, в котором размещаются системы электродов, а также устройства,

обеспечивающие равномерное распределение газа по сечению аппарата и вывод из него уловленных частиц.

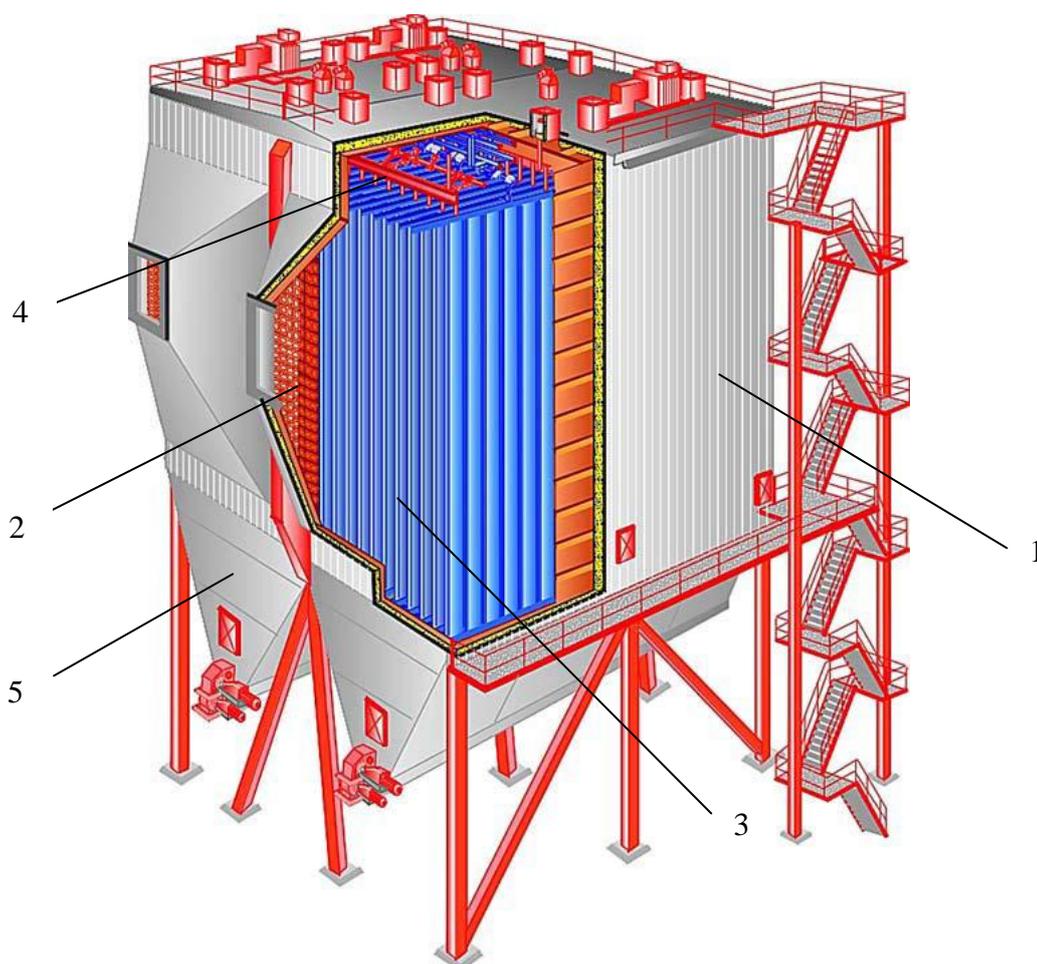


Рисунок 8.3 – Общий вид электрофильтра:

1 – корпус; 2 – газораспределительная система впуска; 3 – осадительные электроды; 4 – коронирующие электроды; 5 – бункер для сбора пыли

Корпус электрофильтра выполняют из листовой стали, бетона, кирпича и других материалов в зависимости от температуры и агрессивности газов. При необходимости корпус футеруют или снабжают наружной теплоизоляцией. Корпус может быть прямоугольным и цилиндрическим. В нём размещены коронирующие и осадительные электроды и собирается уловленная пыль.

Подвод газов к электрофильтру и отвод из него должны обеспечивать равномерное распределение газов в аппарате. Сечение подводящих и отводящих газопроводов определяют, исходя из скорости газа около 20 м/с, обеспечивающей отсутствие осаждения пыли в газопроводе. При присоединении газопроводов к электрофильтру устанавливают диффузоры и конфузоры, необходимые для осуществления плавного перехода от скорости газа в газопроводе к значительно более низкой скорости газа в электрофильтре.

Рабочая часть электрофильтра с размещенными в ней осадительными и коронирующими электродами, в которой под действием приложенного напряжения су-

ществует электрическое поле, называется *активной зоной* или активным объёмом электрофильтра.

Активная зона электрофильтра может разделяться на несколько полей, через которые очищаемый газ проходит последовательно. Системы коронирующих электродов каждого поля электрически изолированы друг от друга и имеют самостоятельный токопровод. Наличие нескольких последовательных полей в электрофильтре улучшает условия улавливания частиц из-за возможности дифференциации электрического режима и режима встряхивания электродов по полям. В зависимости от количества полей электрофильтры бывают *однополюсными* или *многополюсными* [61].

Кроме деления на отдельные поля, электрофильтры в некоторых случаях разбиваются на параллельные по ходу газа секции. Это позволяет отключать секцию по газу в работающем аппарате для очистки электродов или производства ремонтных работ, обеспечивая пропуск газа с повышенной скоростью через не отключенную часть электрофильтра. В зависимости от числа секций электрофильтры бывают *односекционными* или *многосекционными*.

В зависимости от направления движения газа электрофильтры подразделяют на *горизонтальные* и *вертикальные*. Вертикальные аппараты занимают в плане значительно меньше места, но при прочих равных условиях коэффициенты очистки в них ниже. Активная длина поля вертикального электрофильтра совпадает с активной высотой его электродов.

В зависимости от вида улавливаемых частиц и способа их удаления с электродов электрофильтры подразделяют на *сухие* и *мокрые*.

К сухим относят электрофильтры, улавливающие сухие твёрдые частицы, которые удаляют с электродов посредством встряхивания через определенные промежутки времени. Встряхивание электродов может производиться соударением или при помощи специальных ударно-молотковых механизмов. Соударения применяют в основном для встряхивания коробчатых электродов. Остальные типы коронирующих и осадительных электродов встряхивают ударами вращающихся молотковых механизмов по наковальням, прикрепленным к этим электродам.

Очищаемый газ в сухих электрофильтрах должен иметь температуру, превышающую точку росы во избежание конденсации влаги. Появление влаги способствует образованию трудноудаляемых отложений и коррозии аппарата.

К мокрым относят аппараты, улавливающие жидкие или значительно увлажненные твёрдые частицы, а также электрофильтры, электроды которых очищаются самотёком (конденсатом уловленного жидкого аэрозоля) или посредством периодической смывки осевших частиц жидкостью. Соответственно, промывка электродов в мокрых электрофильтрах может производиться непрерывно или периодически.

В первом случае на поверхности осадительных электродов образуется непрерывно текущая пленка воды, которая и смывает осаждающиеся частицы пыли. Во втором случае смыв осуществляется при помощи периодически включающихся брызгал и форсунок, направляющих смывающую жидкость на поверхность электродов при отключенном напряжении. На время промывки секции подачу газа прекращают.

Все мокрые электрофильтры, нашедшие применение в промышленности, имеют вертикальную компоновку. Сухие аппараты могут быть как вертикальными, так и

горизонтальными. Преимущественное применение среди сухих электрофильтров имеют аппараты с горизонтальным ходом газа – горизонтальные многопольные аппараты, в которых очищаемый газ проходит последовательно через несколько электрических полей.

По конструкции осадительных электродов электрофильтры подразделяются на **трубчатые** и **пластинчатые**.

Трубчатые электрофильтры состоят из большого числа элементов, имеющих круглое или сотообразное сечение. По оси трубчатого элемента расположен коронирующий электрод (рис. 8.4, а). В пластинчатом электрофильтре имеется большое количество параллельных пластин. Между ними находятся натянутые коронирующие электроды (рис. 8.4, б).

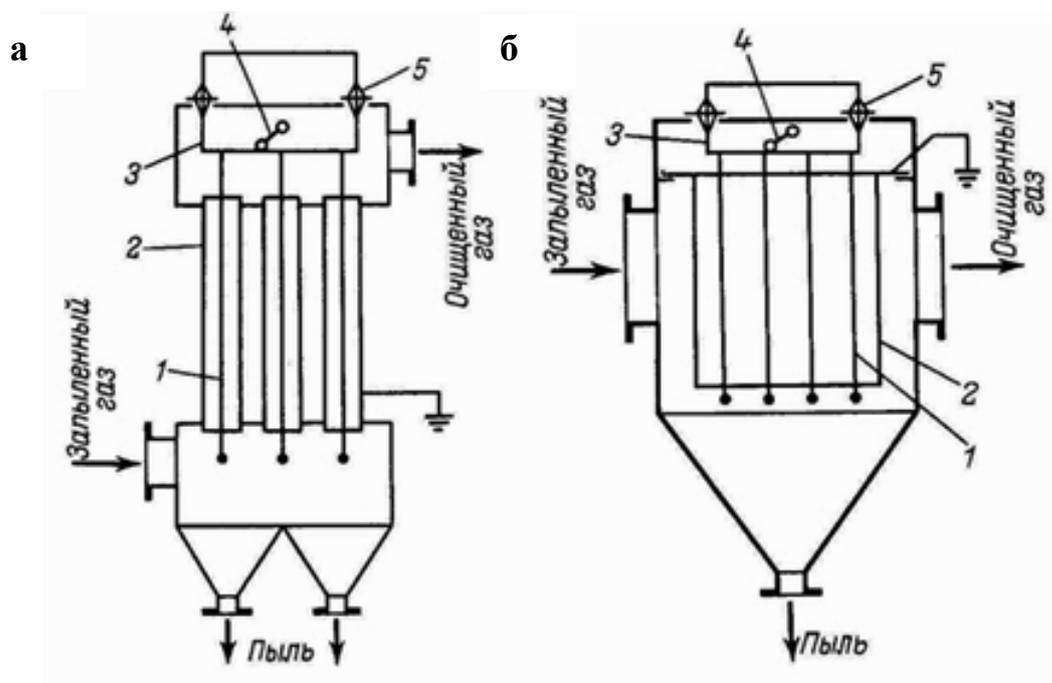


Рисунок 8.4 – Трубчатый (а) и пластинчатый (б) электрофильтры:
1 – коронирующие электроды; 2 – осадительные электроды; 3 – рама; 4 – устройства для встряхивания электродов; 5 – изоляторы

На обогатительных фабриках чаще применяют пластинчатые фильтры. Трубчатые применяют для более глубокой очистки газов.

Осадительные электроды трубчатых электрофильтров чаще всего выполняют из труб круглого сечения диаметром 200-300 мм, длиной 3-5 м. Иногда применяют трубы квадратного или шестиугольного сечений.

Гладкие пластинчатые осадительные электроды применяют иногда только в мокрых электрофильтрах, так как в сухих при удалении пыли с электродов встряхиванием они дают значительный вторичный унос. В целях снижения вторичного уноса применяют коробчатые и желобчатые электроды.

Коробчатый осадительный электрод представляет собой двустенную коробку, в которую направляется отряхиваемая с электродов пыль. Таким образом, пыль выводится из зоны движения газового потока и падает вниз внутри изолированной от

потока коробки. Коробчатые электроды бывают карманными, перфорированными, тюльпанообразными (при вертикальном потоке газов). Общий недостаток коробчатых электродов – сложность изготовления, значительный расход металла.

Для сбора пыли, уловленной в электрофильтрах, служат бункера, размещенные в нижней части аппарата. Как правило, каждое поле снабжают отдельным бункером. При большой влажности пыли во избежание слеживания, бункера теплоизолируют, а иногда снабжают обогревом. Если пыль склонна к налипанию, бункер может быть оборудован вибратором. Оптимальный цикл работы вибратора подбирают на месте в зависимости от свойств пыли. Обычно вибратор включают на 15-20 с через каждые 5-6 мин.

Во избежание больших присосов воздуха пыль выгружается из бункера периодически. Для выгрузки применяют роторные (ячейковые) питатели, шнеки или скребковые транспортеры. Датчиками для автоматического включения питателей могут служить сигнализаторы уровня пыли в бункере.

8.3 Эффективность пылеулавливания в электрофильтрах

Степень очистки газов от дисперсных примесей в электрофильтрах зависит практически от всех параметров газов и взвешенных частиц, от конструктивных характеристик аппаратов, режимов эксплуатации и ряда других факторов [62, 63].

Улавливаемая в электрофильтре частица получает электрический заряд и под действием сил электрического поля приобретает составляющую скорости в сторону осадительного электрода, которая называется *скоростью дрейфа*.

Чтобы осадить частицу на поверхности электрода необходимо обеспечить определенное соотношение между скоростью газа, скоростью дрейфа частицы и размерами межэлектродного промежутка.

Выражение для определения парциальной эффективности электрофильтра было предложено Дейчем:

- для электрофильтров с трубчатыми осадительными электродами

$$\eta_n = 1 - e^{\frac{-2\omega_d L}{WR}} ; \quad (8.1)$$

- для электрофильтров с пластинчатыми осадительными электродами

$$\eta_n = 1 - e^{\frac{-\omega_d L}{WH}} ; \quad (8.2)$$

где ω_d – скорость дрейфа частиц, м/с;

L – длина активной зоны электрофильтра, м;

W – скорость газа в активном сечении, м/с;

R – радиус трубчатого осадительного электрода, м;

H – расстояние между коронирующим электродом и пластинчатым осадительным электродом, м.

Для упрощения выражения 8.2 вводится понятие удельной поверхности осаждения f

$$f = \frac{S}{Q} = \frac{Lh}{WHh} = \frac{L}{WH}, \quad (8.3)$$

где S – площадь поверхности осаждения пластинчатого электрода, м²;
 h – высота пластинчатого осадительного электрода, м;
 Q – объёмный расход очищаемого газа, м³/с.

Подставив выражение 8.3 в формулу для определения эффективности 8.2, получим

$$\eta_n = 1 - e^{-\omega_0 f}. \quad (8.4)$$

Из формулы 8.4 следует, что степень очистки в электрофильтре зависит от скорости дрейфа и удельной поверхности осаждения.

В свою очередь скорость дрейфа для частиц крупностью более 1 мкм прямо пропорциональна её размеру и квадрату напряженности электрического поля:

$$\omega = 0,059 \cdot 10^{-10} \frac{E^2 d_p}{\mu}, \quad (8.5)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м;
 d_p – диаметр частицы, м;
 μ – динамическая вязкость газа при рабочих условиях, Па·с.

8.4 Факторы, влияющие на эффективность пылеулавливания в электрофильтрах

8.4.1 Скорость газа в активном сечении аппарата

Является определяющим фактором. Из формулы Дейча (8.1-8.2) следует, что для обеспечения необходимой степени очистки увеличение скорости газа может быть компенсировано увеличением активной длины электрофильтра.

Однако, превышение определенного предела скорости независимо от длины электрофильтра не может предотвратить снижение его эффективности. Это связано с резким увеличением вторичного уноса пыли с электродов. Увеличение скорости газа в сухом электрофильтре с 1,5 до 3 м/с приводит к возрастанию уноса пыли при встряхивании в 8-10 раз. Поэтому для фильтров с плоскими осадительными электродами скорость газа принимается обычно в пределах до 0,8-1,0 м/с. В сухих электрофильтрах с профилированными электродами верхний предел скорости газа не превышает обычно 1,5-1,7 м/с.

В соответствии с формулой Дейча эффективность улавливания и скорость газа связаны экспоненциальной зависимостью (рис. 8.5). Это означает, что местное увеличение скорости запыленного газового потока даже на 20-30% от её среднего значения вызовет резкое снижение эффективности [62].

Для равномерного распределения газа в активном сечении электрофильтра применяют газораспределительные решетки, направляющие лопатки.

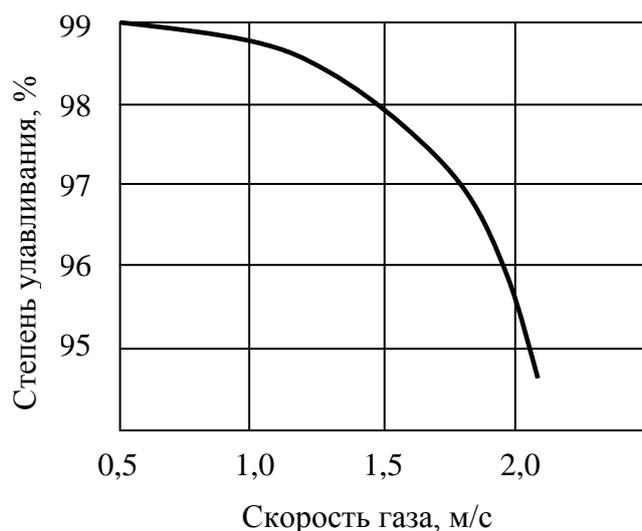


Рисунок 8.5 – Зависимость степени улавливания электрофильтров от скорости газа

8.4.2 Электрические параметры электрофильтра

Степень очистки газов зависит от подведенной мощности электрофильтра, которая определяется напряжением на электродах и силой тока короны. Чем выше значения этих параметров, тем эффективнее улавливается пыль. Для повышения эффективности пылеулавливания увеличивают число полей в электрофильтре и поддерживают максимальное напряжение на электродах. При этом, благодаря созданию оптимального электрического режима, снижается вторичный унос пыли. Напряжение на электродах может быть повышено до определенного предела, при достижении которого электрическая прочность пространства между электродами будет нарушена искровым или дуговым электрическим разрядом.

Возможность поддержания максимального напряжения на электродах зависит от:

- точности центровки электродов;
- параметров пылегазового потока, определяющих пробойное напряжение;
- качества электротехнического оборудования (его способность автоматически поддерживать на электродах максимальное напряжение, близкое к пробойному).

8.4.3 Концентрация и дисперсность частиц

Большая входная концентрация частиц пыли (их объёмный заряд) приводит к затуханию тока коронного разряда.

В чистом газе ток короны всегда больше, чем в запыленном. Это объясняется тем, что скорость ионов ($W_u = 60-100$ м/с) значительно выше скорости заряженных пылевых частиц ($W_n = 0,2-0,4$ м/с). Поэтому появление заряда на частицах пыли уменьшает ток короны.

В поле электрофильтра ток короны можно представить состоящим из двух слагаемых:

$$i_o = i_u + i_n,$$

где i_u , i_n – токи, вызываемые движущимися ионами и движущимися частицами пыли, соответственно.

Вследствие малой скорости движения пылевых частиц составляющая тока i_n в нормально работающем электрофилт্রে не превышает 1-2% общего тока. С повышением запыленности газа ток короны уменьшается и при концентрации 25-35 г/м³ может упасть почти до нуля – наступает «запирание короны». Таким образом, «запирание короны» наступает, когда объёмный заряд частиц пыли становится равным объёмному заряду генерируемых ионов, т.е. ионная составляющая тока короны обращается в нуль.

Решающую роль в этом процессе играет счетная концентрация частиц – количество частиц в единице объёма. Поэтому, при улавливании очень мелких (субмикронных) частиц, затухание короны может происходить при небольших входных массовых концентрациях.

Для предотвращения запирания короны рекомендуется:

- снижения входной запыленности (механическая предочистка);
- повышение рабочего напряжения на электродах;
- уменьшение скорости газа в электрофилт্রে;
- применение многопольных электрофилтров.

8.4.4 Удельное электрическое сопротивление пыли

Оказывает существенное влияние на процесс осаждения и удаления пыли из электрофилтра. По величине удельного электрического сопротивления пыли делятся на три группы (п. 3.7):

- 1 – хорошо проводящая;
- 2 – со средней проводимостью;
- 3 – высокоомная.

Хорошо проводящие пыли мгновенно разряжаются, попадая на электрод. Пылинки не агломерируются за счёт аутогезионных сил и большая часть осажженной пыли вновь уносится газовым потоком, если скорость газа превышает 0,5 м/с. Скорость дрейфа при улавливании в электрофилтрах таких пылей обычно не превышает 0,06 м/с [64].

Нормальный процесс осаждения и удаления с электродов характерен для пылей второй группы. При осаждении на электродах эти пыли разряжаются не сразу, а через некоторое время. Этого времени достаточно для накопления слоя и формирования из мелких осажженных частиц агломератов под действием электростатических и аутогезионных сил. Размер агломератов обеспечивает попадание в бункер значительной части пыли при встряхивании и незначительный вторичный унос. Пыли второй группы улавливаются в электрофилтрах наиболее эффективно. Скорость дрейфа при их осаждении в электрофилтрах составляет 0,07-0,15 м/с.

Высокоомные пыли, осаждаясь на электроде, образуют пористый изолирующий слой. При превышении некоторого критического напряжения в слое происходит электрический пробой пористого слоя – образуется тонкий канал, заполненный положительными ионами. Развивается мощный обратный коронный разряд

(обратная корона), действующий навстречу основному. Эффективность электрофилтра, работающего в режиме обратной короны, резко снижается. Скорость дрейфа частиц при улавливании пылей третьей группы обычно не превышает 0,3-0,4 м/с.

8.4.5 Свойства очищаемого газа

Из параметров газового потока наибольшее влияние на осаждение оказывают влажность и температура. Влияние температуры очищаемого газа и его влажности на эффективность улавливания в сухих электрофилтрах определяется связью этих параметров с пробивным напряжением и удельным электрическим сопротивлением слоя пыли (рис. 8.6).

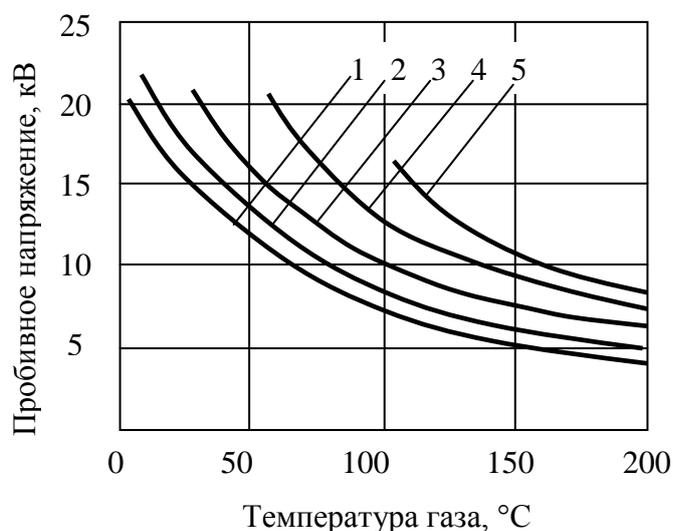


Рисунок 8.6 – Зависимость пробивного напряжения от температуры и влажности газа:
1 – 1%; 2 – 5%; 3 – 10%;
4 – 15%; 5 – 20%

Значение пробивного напряжения возрастает с увеличением плотности газа, поэтому при снижении температуры пробивное напряжение увеличивается, обеспечивая устойчивую работу электрофилтра при более высоком напряжении.

Наличие водяных паров в газе увеличивает его плотность, тем самым увеличивает пробивное напряжения, обеспечивая лучшие условия улавливания.

Температурная зависимость удельного электрического сопротивления слоя описывается кривой с максимумом [65]. Соответственно изменяется и степень улавливания частиц пыли (рис. 8.7).

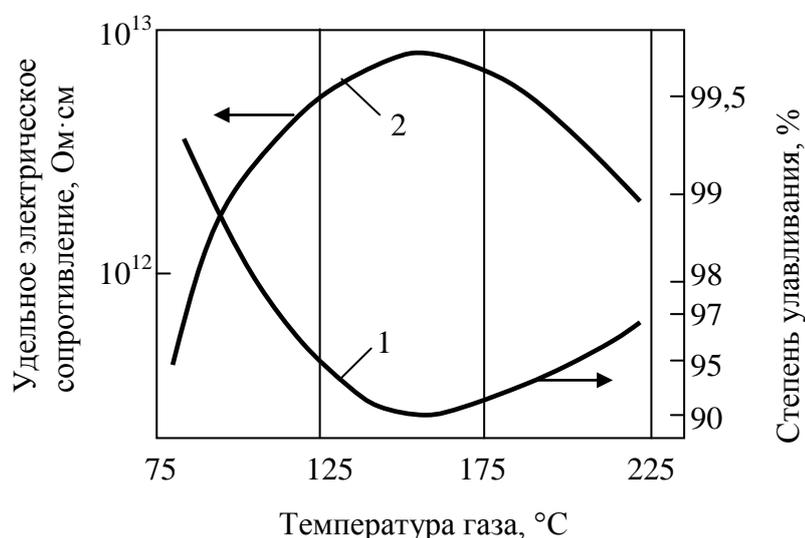


Рисунок 8.7 – Зависимость степени улавливания (1) и удельного электрического сопротивления (2) от температуры

В зависимости от конкретных условий эксплуатации электрофильтров удельное электрическое сопротивление пыли может быть уменьшено путём увеличения или снижения температуры обрабатываемого газа.

8.5 Конструкции электрофильтров

Для промышленной газоочистки из аппаратов отечественного производства могут быть рекомендованы электрофильтры общего назначения типов УГ, ЭГА, ЭГВ, ЭГАВ, ЭГВМ (горизонтальные сухие), УВ, ЭВ (вертикальные сухие), а также ряд специализированных типов электрофильтров (рис. 8.8).

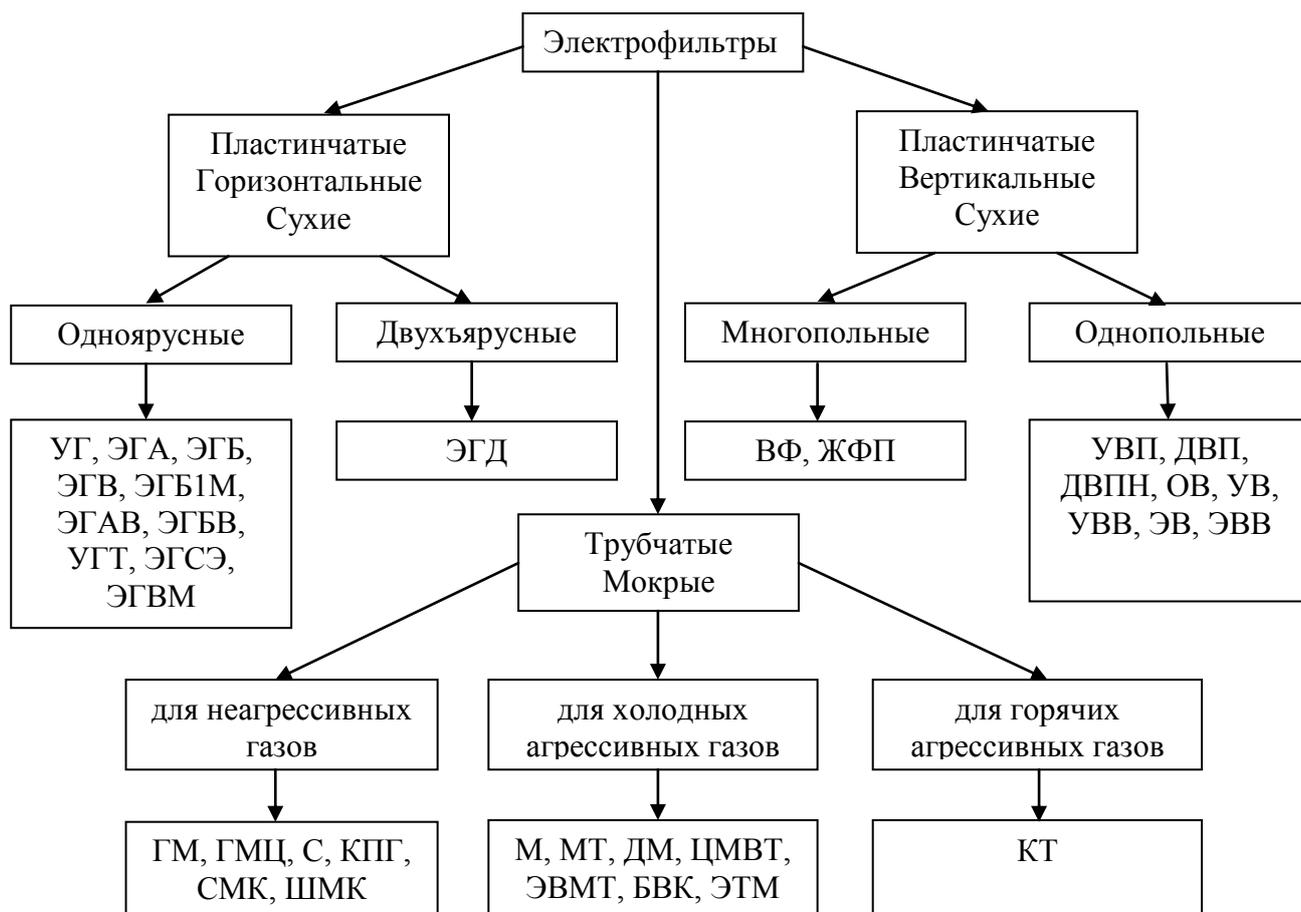


Рисунок 8.8 – Классификация промышленных электрофильтров по конструктивным и технологическим признакам [62]

8.5.1 Электрофильтры пластинчатые, горизонтальные, сухие

Электрофильтры УГ (унифицированные, горизонтальные) (рис. 8.9) предназначены для очистки от пыли неагрессивных невзрывоопасных газов и аспирационного воздуха на предприятиях энергетической, горной промышленности, черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов и других отраслей промышленности.

Фильтр состоит из корпуса 1, осадительных 2 и коронирующих 3 электродов, механизмов встряхивания коронирующих 4 и осадительных электродов 5, газораспределительной решетки 6, бункеров 7 для приёма пыли.

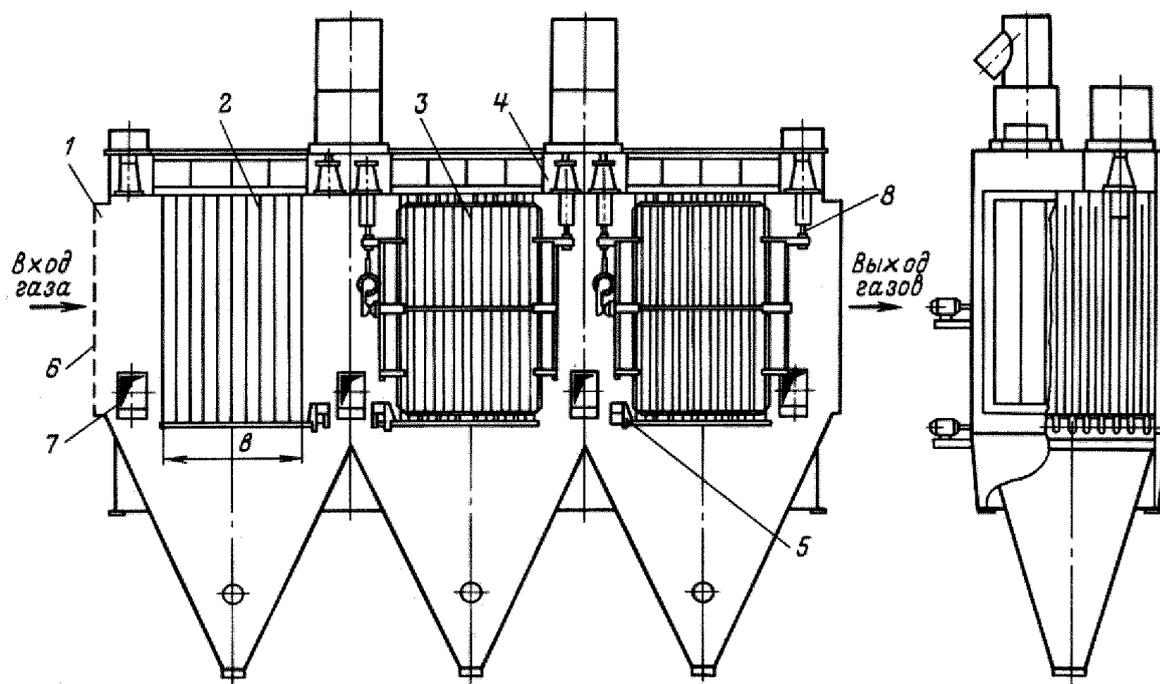


Рисунок 8.9 – Электрофильтр УГ:

1 – корпус; 2 – электроды осадительные; 3 – электроды коронирующие; 4 – механизм встряхивания коронирующих электродов; 5 – механизм встряхивания осадительных электродов; 6 – газораспределительная решетка; 7 – бункер для пыли; 8 – изолятор

Запыленный газ вводят в электрофильтр через газораспределительную решетку. Решетка предназначена для обеспечения постоянства скоростей газового потока по сечению электрофильтра.

Осадительные электроды изготавливают из тонкостенных широкополосных (ширина 350 мм) элементов S-образной формы. Межэлектродный шаг принят 275 мм. Молотковый встряхиватель размещают внизу электродов. При вращении вала молоток ударяет по полосе встряхивания. Удар передается на подвешенные элементы осадительного электрода.

Коронирующие электроды представляют собой профильные ленточные элементы со штампованными иглами, укрепленные в специальной рамке. Для удаления осевшей на электродах золы предусмотрены встряхивающие устройства в виде молотков, ударяющих по наковальням электродов.

Электрофильтры УГ выпускают с двумя, тремя и четырьмя электрическими полями. Электрические поля имеют самостоятельное питание и систему встряхивания. На рис. 8.9 показан трёхполюсный электрофильтр типа УГ. В первом поле оседает наибольшее количество пыли, в последнем – минимальное.

Эффективность работы электрофильтра зависит от режима регенерации электродов. Электроды, расположенные в первом поле, должны встряхиваться чаще, чем те, которые расположены во втором и третьем полях, так как в первом поле улавливается наибольшее число частиц пыли.

Электрофильтры типа УГ подразделяются на три габарита, которые отличаются активной высотой коронирующих электродов: УГ1 – первый габарит с активной высотой коронирующих электродов 4200 мм; УГ2 – второй габарит с активной высотой 7460 мм и УГ3 – третий габарит с активной высотой 11900 мм.

Каждый габарит включает в себя несколько типоразмеров, которые характеризуются величиной площади активного сечения, количеством последовательно расположенных самостоятельных электрических полей, через которые проходит очищаемый газ. Характеристика различных типоразмеров электрофильтров УГ приведена в Приложении 7.

В зависимости от типоразмера электрофильтры способны обеспечивать необходимую степень очистки газов (99,9%) при их расходе от 25000 до 1000000 м³ и более, при температурах газов: минимальной – не ниже точки росы, максимальной – 250°С.

Выбор типоразмеров по их активному сечению и количеству полей осуществляется не только по расходу газов, подлежащих очистке, но также по составу газов, температуре и влажности, свойствам пыли (золы) и т.д.

Допустимое разряжение газов на входе в корпус составляет 400 Па, гидравлическое сопротивление электрофильтра – 150 Па, допустимая концентрация взвешенных частиц пыли в газе – 50 г/м³. Удельный расход электроэнергии на очистку 1000 м³/ч газа – 0,3 кВт·ч.

Электрофильтры типа ЭГА предназначены для обеспыливания неагрессивных невзрывоопасных технологических газов и аспирационного воздуха температурой до 330°С в энергетике, промышленности строительных материалов, черной и цветной металлургии и других отраслях промышленности. Начали серийно выпускаться с 1981 г.

Электрофильтры – одно- или двухсекционные аппараты прямоугольной формы (рис. 8.10). Корпуса аппаратов – стальные, покрытые снаружи теплоизоляцией. Активная зона электрофильтров состоит из осадительных электродов (плоских полотен, набранных из пластинчатых элементов специального профиля) и коронирующих электродов (трубчатых рам, в которых натянуты коронирующие элементы). Расстояние между соседними осадительными электродами (300 мм) является также шириной единичного газового прохода. Удаление уловленной пыли с электродов – механическое, путём периодического встряхивания их ударами молотков.

Типоразмер электрофильтра определяется числом газовых проходов в его поперечном сечении, высотой электродов, длиной поля, эквивалентной ширине осадительного электрода, и количеством полей в аппарате (Приложение 7). Электрофильтры с числом проходов от 10 до 40 – односекционные; от 48 до 88 – двухсекционные. Электрофильтры комплектуются современными коронирующими электродами в зависимости от свойств улавливаемой пыли, надежными мотор-редукторами с частотным регулированием оборотов вала механизма встряхивания

электродов, агрегатами питания с усовершенствованными регуляторами, автоматической системой контроля и управления электрофильтром.

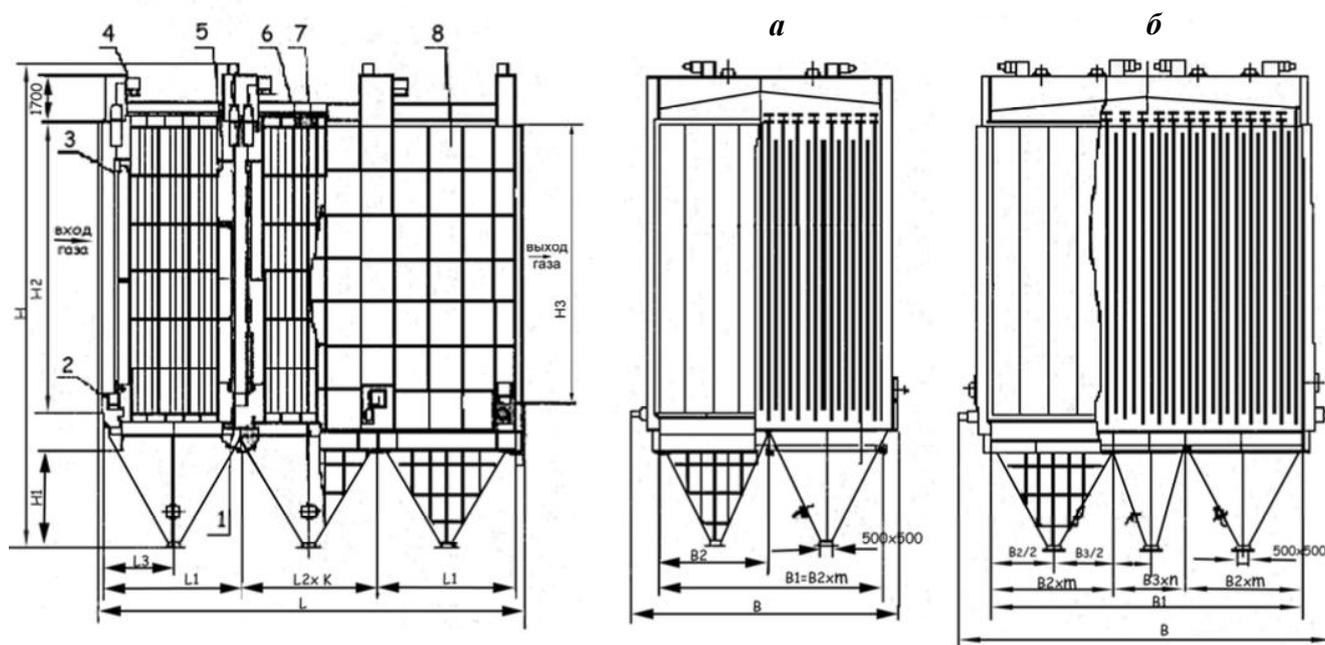


Рисунок 8.10 – Электрофильтры типа ЭГА:

а – односекционные; б – двухсекционные;

- 1 – механизм встряхивания осадительных электродов; 2 – люк обслуживания;
 3 – газораспределительная решетка; 4 – защитная коробка для подвода тока;
 5 – механизм встряхивания коронирующих электродов; 6 – коронирующий электрод; 7 – осадительный электрод; 8 – корпус

Основные технические характеристики электрофильтров типа ЭГА:

- допустимая концентрация взвешенных частиц пыли в газе – 50 г/м^3 ;
- допустимое разрежение газов на входе в корпус – 500 Па;
- высота осадительных электродов: 6; 7,5; 9; 12 м;
- количество электрических полей: 2; 3; 4;
- площадь активного сечения: $16,5\text{-}285,6 \text{ м}^2$;
- производительность при скорости газа в активной зоне 1 м/с составляет $59,6\text{-}1028 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$.

К современным разработкам горизонтальных пластинчатых электрофильтров можно отнести электрофильтры типа ЭГАВ, ЭГВ, ЭГВМ, ЭГСЭ. Эти аппараты при одних и тех же условиях занимают на 40% меньший объём по сравнению с предыдущими, до 20% уменьшена их металлоёмкость. Они имеют новую процессорную систему управления встряхиванием осадительных электродов с диапазоном регулирования от 0,2 оборота в минуту с защитой от заклинивания молотков встряхивания. Высота электродов электрофильтров – до 18 метров. Электрофильтры снабжены самонастраивающейся системой управления электропитанием [66-68].

Электрофильтры типа ЭГАВ – горизонтальные, модификации А, с верхним размещением механизмов встряхивания коронирующих электродов.

Предназначены для очистки неагрессивных невзрывоопасных технологических газов и аспирационного воздуха от пыли.

Новое конструктивное решение узлов встряхивания и их верхнее размещение, применение коронирующих элементов с пониженным напряжением зажигания коронного разряда и ряда других усовершенствований позволили улучшить технические характеристики аппаратов типа ЭГАВ по сравнению с аппаратами, разработанными до 1985 года:

- площадь осаждения (в объёме заданного корпуса) увеличена на 35-50%;
- время пребывания в активной зоне увеличено на 35-50%;
- удельная металлоёмкость снижена на 6-20%;
- повышена степень очистки газов до уровня, обеспечивающего современные нормы выбросов.

Компоновка и размеры внутреннего механического оборудования ЭГАВ позволяют производить реконструкцию аппаратов типа ЭГА, УГ и др., устанавливая это оборудование в существующие корпуса. В зависимости от условий подвода и отвода газов, электрофильтры комплектуются соответствующими диффузорами, конфузорами и газораспределительными устройствами.

Технические характеристики и типоразмеры электрофильтров типа ЭГАВ представлены в табл. 8.1 и Приложении 7.

Таблица 8.1 – Технические характеристики электрофильтров типа ЭГАВ

Показатели	Значения
Условная высота электродов, м	4; 6; 7,5; 9; 10,5; 12; 13,5; 15; 16,5; 18
Межэлектродный шаг, мм	300; 350; 400; 460; 500
Количество газовых проходов, шт.	от 8 до 88
Длина электрического поля, м	2,56; 3,2; 3,84; 4,48
Количество полей, шт.	2-6
Производительность по очищаемому газу (при условной скорости в активной зоне 1 м/с), тыс. м ³ /ч	50-1500
Температура очищаемого газа, °С, не более	330
Запыленность газов на входе, г/м ³ , не более	90
Коронирующие элементы	СФ1; СФ2; СФТ; ЛЗ
Осадительные элементы	ЭКОМК 4x160; СЧС-640; ЭКОМК 6x160
Привода встряхивания	мотор-редуктор с частотным регулятором скорости вращения вала встряхивания

Электрофильтры типа ЭГВ, ЭГВМ – горизонтальные, модификации В, М – модернизированные.

Электрофильтры типа ЭГВ, ЭГВМ предназначены для очистки от пыли невзрывоопасных технологических газов и аспирационного воздуха температурой до 330°C, разряжением до 5 кПа.

Электрофильтры – одно- или двухсекционные аппараты прямоугольной формы с наружной теплоизоляцией; состоят из 2-8 электрических полей, установленных последовательно по ходу газа.

Активная зона электрофильтра состоит из пластинчатых осадительных электродов и коронирующих электродов. Осадительные электроды каждого поля, размещенные параллельно оси входа газа, делят поперечное сечение электрофильтра на отдельные газовые проходы, по центру которых расположены коронирующие электроды.

В электрофильтрах ЭГВМ вместо расщепленных коронирующих электродов, принятых в электрофильтрах ЭГВ, использованы электроды типа СФ-2 с высотой игл 40 мм и с сохранением разрядного расстояния 190 мм между концами игл и поверхностью осадительных электродов.

Технические характеристики электрофильтров типа ЭГВ приведены в Приложении 7. Модернизированные электрофильтры типа ЭГВМ могут изготавливаться с высотой электродов до 18 м, иметь площадь активного сечения до 545 м² и производительность до 1965000 м³/ч при условной скорости газа 1 м/с.

Коронирующие электроды установлены на рамах подвеса, которые опираются на изоляторы, расположенные в ригелях корпуса. Шаг по осям одноименных электродов для базового типоразмера 460 мм. Такой шаг между электродами позволяет установить максимальное количество электродов в корпусах электрофильтров типа УГ, ЭГА, обеспечить наибольшее активное сечение и снизить массу внутреннего оборудования по сравнению с электрофильтрами типа УГ и ЭГА.

Удаление уловленной пыли с электродов и газораспределительных решеток – механическое с периодическим встряхиванием их ударами молотков.

Массовая концентрация пыли на выходе из электрофильтра может составлять не более 50 мг/м³ при правильном выборе типоразмера аппарата.

Электрофильтры типа ЭГСЭ – горизонтальные, сухие, для энергетики с верхним расположением механизмов встряхивания электродных систем.

Электрофильтры типа ЭГСЭ предлагаются для тепловых электрических станций.

В зависимости от условий подвода и отвода газов, электрофильтры комплектуются соответствующими диффузорами, конфузорами и газораспределительными устройствами. Электрофильтры имеют новую процессорную систему управления встряхиванием электродов с диапазоном регулирования от 0,2 до 10 оборотов в минуту с защитой от заклинивания молотков встряхивания. Для управления питанием электрофильтры комплектуются системами регулирования, совместимыми с АСУТП энергоблока.

При нормальных условиях эксплуатации обеспечивают выбросы твёрдых частиц в атмосферу ниже 50 мг/м^3 .

Технические характеристики электрофильтров типа ЭГСЭ представлены в табл. 8.2.

Таблица 8.2 – Технические характеристики электрофильтров типа ЭГСЭ

Показатели	Значения
Условная высота электродов, м	4,0 – 18,0
Межэлектродный шаг, мм	300; 350; 400
Количество газовых проходов, шт.	от 8 до 88
Длина электрического поля, м	2,56; 3,2; 3,84; 4,48
Количество полей, шт.	2-6
Производительность по очищаемому газу (при условной скорости в активной зоне 1 м/с), тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$	50-2100
Температура очищаемого газа, °С, не более	300
Запыленность газов на входе, г/м^3 , не более	90

8.5.2 Электрофильтры пластинчатые вертикальные сухие

Основное достоинство вертикальных электрофильтров – относительно малая занимаемая площадь. Можно также отметить определенные преимущества вертикальных электрофильтров при исполнении их во взрывобезопасном варианте.

Электрофильтры типа ЭВ – вертикальные. Предназначены для очистки от пыли неагрессивных газов и аспирационного воздуха с температурой до 250°C . Массовая концентрация пыли на выходе из электрофильтра – до $0,1 \text{ г/м}^3$. Гидравлическое сопротивление – не более $0,15 \text{ кПа}$, давление – до $0,5 \text{ кПа}$, разрежение – до $3,5 \text{ кПа}$.

Применяются на предприятиях чёрной и цветной металлургии, горной, энергетической промышленности и в других отраслях. Целесообразна установка электрофильтра в производствах с ограниченными площадями размещения, где невозможна установка горизонтальных электрофильтров.

Электрофильтры ЭВ одно-, двух-, трёх- и четырёхсекционные аппараты прямоугольной формы в стальном корпусе (рис. 8.11). Направление газового потока в каждой секции – снизу вверх. При неисправности одной из секций имеется возможность отключить её и направить газ через остальные секции.

Активная зона состоит из осадительных электродов (полотен, набранных из широкополосных элементов специального профиля типа ЭФ или S-350) и коронирующих электродов (трубчатых рам, в которых установлены ленточно-игольчатые элементы). Удаление уловленной пыли с электродов – механическое, периодическим встряхиванием их ударами молотков.

Технические характеристики электрофильтров типа ЭВ приведены в табл. 8.3.

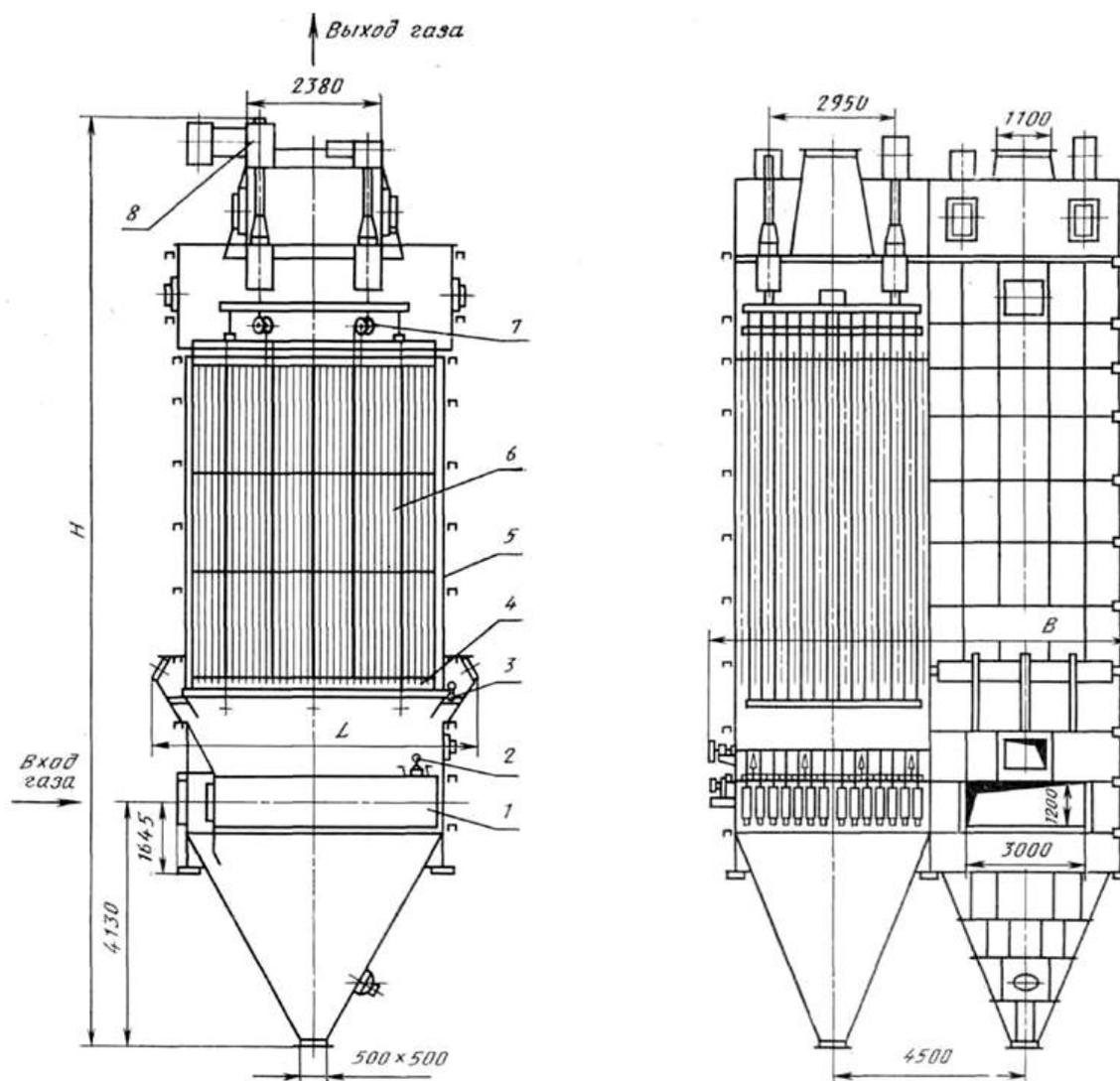


Рисунок 8.11 – Электрофильтр типа ЭВ:

1 – газораспределитель; 2 – механизм встряхивания газораспределителя;
 3 – механизм встряхивания осадительных электродов; 4 – осадительный электрод;
 5 – корпус; 6 – коронирующий электрод; 7 – механизм встряхивания коронирующих электродов; 8 – защитная коробка для подвода тока

Таблица 8.3 – Технические характеристики электрофильтров типа ЭВ

Типоразмер электрофильтра	Производительность по очищаемому газу, м ³ /ч	Площадь осаждения, м ²	Габаритные размеры, мм (не более)	Масса механического оборудования, кг
ЭВ1-7,5-2x10	74 500	1080	5300×20150×6880	27137
ЭВ1-7,5-3x10	112 000	1620	5300×20150×9885	40111
ЭВ1-7,5-1x16	58 000	840	5300×20150×5380	19960
ЭВ1-7,5-2x16	116 000	1680	5300×20150×9880	38717
ЭВ1-7,5-2x24	174 000	2520	7500×21700×9930	57769
ЭВ1-7,5-3x24	261 000	3780	7500×21700×14430	85803
ЭВ1-7,5-4x24	348 000	5040	7500×21700×19450	115055

Электрофильтр типа ЭВВ (электрофильтр вертикальный, В – исполнение, учитывающее взрывоопасность среды) предназначен для улавливания угольной пыли из газов и газоздушных смесей в процессе сушки твёрдого топлива, а также из аспирационного воздуха шаровых мельниц в различных отраслях промышленности.

Секции аппаратов разделены сплошными перегородками. Активная зона электрофильтра состоит из широкополосных осадительных и ленточно-игольчатых коронирующих электродов. Расстояние между соседними осадительными электродами 350 мм. Удаление пыли с электродов механическое, периодическим встряхиванием ударами молотков.

В связи с возможностью возникновения в электрофильтре взрывоопасной ситуации, при нарушениях технологического режима, верхняя часть корпуса аппарата изготовлена в виде открытых (в атмосферу) шахт с дополнительными откидными предохранительными клапанами.

Электрофильтр рассчитан на величину массовой концентрации пыли в очищаемом газе на входе не более 20 г/м³.

Электрофильтры ЭВВ имеют производительность от 28800 до 86400 м³/ч при скорости газа в активной зоне 1 м/с.

8.5.3 Электрофильтры мокрые

Мокрые электрофильтры применяют для тонкой очистки технологических газов от пыли, туманов, смол и других веществ.

Улавливание в мокрых электрофильтрах жидкости позволяет исключить в этих аппаратах механизмы встряхивания, что упрощает их конструкцию. С другой стороны, в этих электрофильтрах необходимо применять специальные материалы для борьбы с коррозией, а также устройства смыва уловленного продукта.

Мокрые электрофильтры предпочтительно использовать для улавливания частиц с неблагоприятными (с точки зрения улавливания их в сухих фильтрах) свойствами пыли.

Все виды пыли в мокрых электрофильтрах не подвергаются вторичному уносу, а высокоомная пыль, кроме того, не образует обратную корону на осадительных электродах [35].

Электрофильтр ЭТМ2-7,2-3,8-482 – мокрый двухсекционный электрофильтр с осадительным электродом сотового типа с размером ячейки 250 мм. Предназначен для очистки газов, содержащих химически агрессивные вещества, на предприятиях черной и цветной металлургии, химических и других вредных производств.

Газы на очистку подаются снизу вверх, проходя через коронирующую систему, частицы получают заряд и осаждаются на осадительной системе электрофильтра. Далее очищенные газы выходят через верхний патрубок (рис. 8.12).

По мере накопления на осадительных электродах загрязняющих веществ происходит их удаление смывом водой через установленные в верхней части электрофильтра распылители. Для предотвращения образования конденсата на

изоляторах при запуске фильтра подаётся воздух в изоляторные коробки. Питание на коронирующую систему подается через преобразователь типа ОПМД-250.

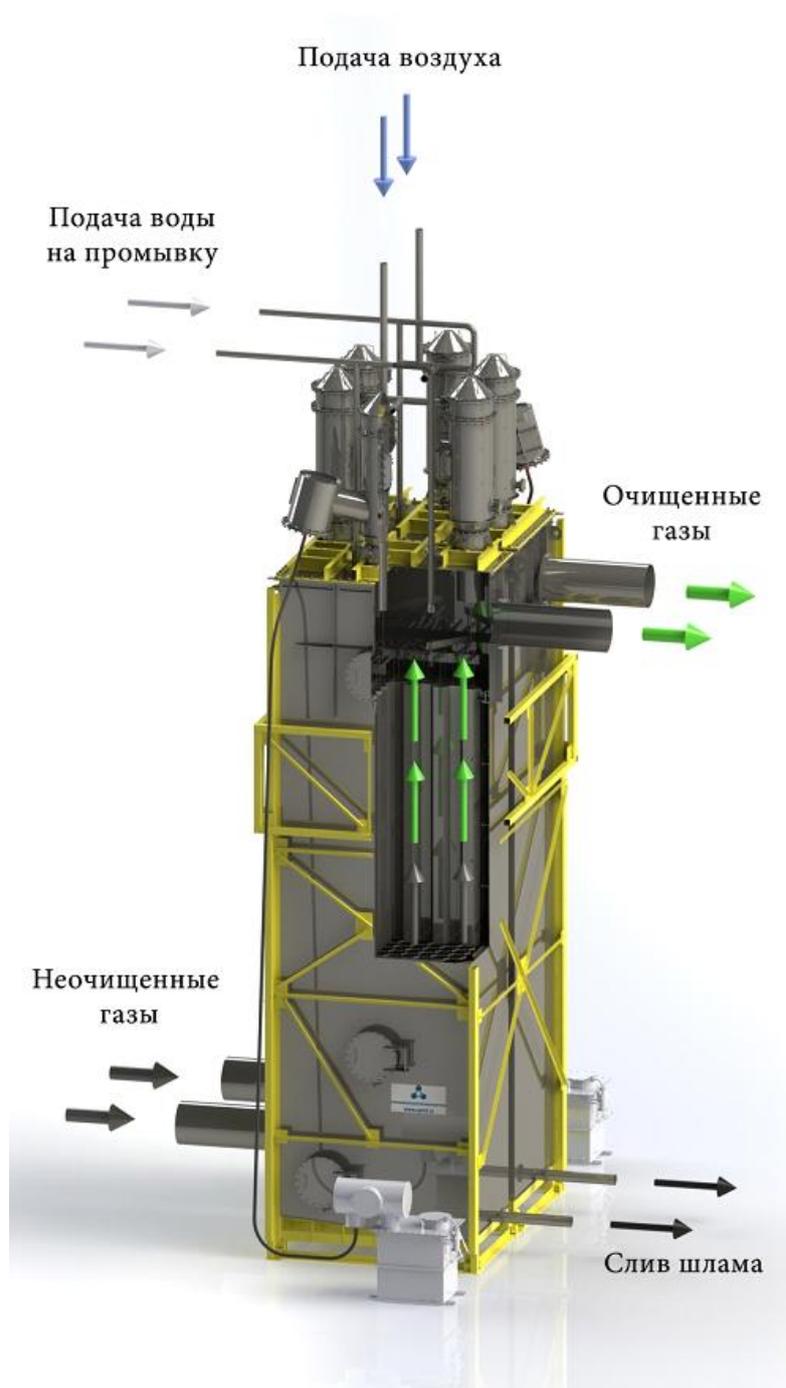


Рисунок 8.12 – Электрофильтр ЭТМ2-7,2-3,8-482

Технические характеристики электрофильтра ЭТМ2-7,2-3,8-482:

- степень очистки – 99,96%;
- запыленность газа – 0,096 г/м³;
- рабочая температура – 70-80°С;
- площадь осаждения – 462 м²;
- количество полей – 1 шт.;
- размеры, (длина x высота x ширина) – 5000x3400x12730 мм.

В мокрых электрофильтрах типа ЭТМ применен специальный полимерный композиционный материал [69].

Полимерный материал конструкций осадительных и коронирующих электродов обладает целым комплексом свойств, в совокупности придающих электрофильтру неоспоримые преимущества перед зарубежными аналогами: хорошая тепло- и электропроводность, химическая стойкость в агрессивных средах, устойчивость к электрическим пробоям, гидрофобность, технологичность, позволяющая при изготовлении легко создавать конфигурации электродов различного профиля.

Системы коронирующих и осадительных электродов представляют собой конструкцию модульного типа, набираемую из отдельных элементов различного профиля и конфигурации. Все элементы конструкции легко заменяются, таким образом, ремонтпригодность рабочей части электрофильтров не имеет конкуренции среди известных конструктивных решений.

8.6 Расчёт электрофильтров

При выборе типа электрофильтра исходят из расхода, физико-химических параметров газа и дисперсной примеси, а также условий размещения фильтра. Основные рекомендации могут быть сведены к следующему. Мокрые аппараты имеют более высокие коэффициенты очистки из-за уменьшения вторичного уноса, однако им присущи и общие недостатки мокрых способов: необходимость обработки или удаления загрязненных стоков и шлама, коррозия металлических узлов аппаратов, усложнение эксплуатации очистного устройства и т. д. Поэтому для осаждения твердых примесей сухие аппараты предпочтительнее мокрых. Из конструкций сухих электрофильтров вертикальную компоновку применяют при недостатке производственной площади, низкой начальной запыленности и не слишком мелкодисперсной пыли, так как время пребывания в них намного меньше, чем в горизонтальных [28, 70].

Остановимся более подробно на выборе и расчёте пластинчатых горизонтальных сухих электрофильтров для удаления пыли из газов и аспирационного воздуха.

Важнейшим фактором, влияющим на размеры электрофильтров, является время, необходимое для того, чтобы улавливаемая частица достигла осадительного электрода t_{oc} . Эту величину определяют по формуле

$$t_{oc} = H / \omega_{\partial}, \quad (8.6)$$

где H – расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м;
 ω_{∂} – скорость дрейфа частицы, м/с.

Скорость дрейфа частиц крупностью более 1 мкм определяется по формуле 8.5. Для вычисления скорости дрейфа частиц диаметром 1 мкм и менее используется следующая зависимость:

$$\omega_{\partial} = 0,17 \cdot 10^{-11} \frac{E C_k}{\mu}, \quad (8.7)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м;

μ – динамическая вязкость газа при рабочей температуре, Па·с.

C_k – поправка Каннингема: для частиц диаметром 1 мм $C_k = 1,176$; для частиц диаметром 0,1 мм $C_k = 3,015$; для частиц диаметром 0,01 мм $C_k = 23,775$ [31].

Время осаждения t_{oc} должно быть всегда меньше общего времени пребывания частиц в воздушном потоке, проходящем через электрофильтр t_n , т. е. условие нормальной работы электрофильтра имеет вид

$$t_{oc} \leq t_n. \quad (8.8)$$

Величина t_n может быть выражена следующим образом:

$$t_n = L / W, \quad (8.9)$$

где L – путь движения запыленного газа в аппарате (длина активной зоны электрофильтра), м;

W – скорость движения газа в фильтре, м/с.

Необходимая величина активного сечения электрофильтра определяется по формуле

$$F = Q / (3600 \cdot W), \quad (8.10)$$

где Q – объем очищаемого газа, м³/ч.

По найденной величине активного сечения выбирается из Приложения 7 требуемый электрофильтр.

Определив длину активной зоны, вычисляется величина t_n . После этого проводится проверка необходимого условия осаждения частиц в данном электрофильтре в соответствии с выражением 8.8.

Эффективность очистки запыленного газа в выбранном электрофильтре определяется по формуле 8.4.

Пример.

Выбрать электрофильтр для очистки запыленного газа температурой 120°C после барабанной сушилки при следующих исходных данных: объем очищаемого газа при рабочей температуре – 100 000 м³/ч, размер частиц в потоке газа – от 5 до 40 мкм, динамическая вязкость газа при рабочей температуре – $2,25 \cdot 10^{-5}$ Па·с, эффективность очистки газа должна быть не ниже 99,7%.

Решение.

Определяем величину скорости дрейфа частиц размером 5 и 40 мкм. Напряженность электрического поля в ходе очистки примем равной $30 \cdot 10^4$ В/м, что характерно для электрофильтров сухой очистки:

$$\omega_d(5) = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot d_p / \mu = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot (30 \cdot 10^4)^2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} / 2,25 \cdot 10^{-5} = 0,118 \text{ м/с};$$

$$\omega_d(40) = 0,059 \cdot 10^{-10} \cdot (30 \cdot 10^4)^2 \cdot 40 \cdot 10^{-6} / 2,25 \cdot 10^{-5} = 0,944 \text{ м/с}.$$

Скорость газа в активном сечении электрофильтра принимаем $W = 1 \text{ м/с}$.

Определяем время, необходимое для осаждения частиц с минимальным размером. Предварительно выбираем электрофильтр типа ЭГВ с межэлектродным шагом равным 460 мм. Следовательно, расстояние между осадительным и коронирующим электродами для данного типа электрофильтров составляет 230 мм.

Расчёт времени осаждения частиц крупностью 5 мкм проводим по формуле 8.6:

$$t_{oc}(5) = H / \omega_{\partial}(5) = 0,230 / 0,118 = 1,95 \text{ с.}$$

Определяем необходимую величину активного сечения электрофильтра по формуле 8.10:

$$F = Q / (3600 \cdot W) = 100000 / (3600 \cdot 1) = 27,78 \text{ м}^2.$$

По найденной величине активного сечения из Приложения 7 выбираем электрофильтр ЭГВ1-9-7,5-4-4 (1 – количество секций; 9 – количество газовых проходов; 7,5 – номинальная высота электродов; 4 – количество элементов в осадительном электроде; 4 – количество электрических полей по длине электрофильтра) с площадью активного сечения $29,5 \text{ м}^2$ и площадью поверхности осаждения $F_{oc} = 1420 \text{ м}^2$.

При площади активного сечения $F = 29,5 \text{ м}^2$ и номинальной высоте электродов $h = 7,5 \text{ м}$ длина активной зоны электрофильтра составляет

$$L = F / h = 29,5 / 7,5 = 3,93 \text{ м.}$$

С учётом полученного значения величины L определяем время пребывания частиц в воздушном потоке, проходящем через электрофильтр t_n по формуле 8.9:

$$t_n = L / W = 3,93 / 1 = 3,93 \text{ с.}$$

Проводим проверку необходимого условия осаждения частиц в данном электрофильтре в соответствии с выражением 8.8:

$$t_{oc}(5) < t_n = 1,95 < 3,93.$$

Следовательно, выбранный электрофильтр соответствует требованиям по условиям осаждения.

Эффективность очистки газа в данном электрофильтре определяем по формуле 8.4:

$$\eta_n = 1 - e^{-\omega_{\partial} f},$$

где f – удельная поверхность осаждения электрофильтра, $\text{м}^2/(\text{м}^3/\text{с})$.

Вычисляем удельную поверхность осаждения электрофильтра по формуле 8.3:

$$f = \frac{F_{oc}}{Q / 3600} = \frac{1420 \cdot 3600}{100000} = 51,12 \text{ м}^2/(\text{м}^3/\text{с}).$$

Эффективность очистки газа в данном электрофильтре от частиц минимального размера 5 мкм составляет

$$\eta_n = 1 - e^{-\omega_{\partial}(5) f} = 1 - e^{-0,118 \cdot 51,12} = 1 - \frac{1}{2,718^{6,032}} = 0,9976.$$

Полученная величина эффективности очистки выше заданной (99,7%), поэтому электрофильтр ЭГВ1-9-7,5-4-4 выбран верно.

Вопросы для самоконтроля.

1. Укажите основное отличие процесса электростатического осаждения от механических методов сепарации.
2. Перечислите стадии процесса обеспыливания в электрофильтре.
3. Опишите схему работы элементарной ячейки электрофильтра.
4. Что означает термин «активная зона электрофильтра»?
5. Охарактеризуйте основные факторы, влияющие на эффективность пылеулавливания в электрофильтрах.
6. Как классифицируются промышленные электрофильтры по конструктивным и технологическим признакам?
7. Опишите принцип действия электрофильтров УГ.
8. Укажите основные достоинства вертикальных электрофильтров.
9. Для каких целей используются мокрые электрофильтры?
10. Как проводится расчёт электрофильтров?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в учебном пособии материалы дают возможность оценить в полном объёме задачи по обеспыливанию исходного продукта и пылеулавливанию, возникающие на предприятиях по переработке полезных ископаемых.

Широкое применение операций обеспыливания в соответствующих условиях будет способствовать повышению эффективности процессов обогащения, улучшению качества конечного продукта.

Разработка мероприятий по снижению запыленности воздуха производственных помещений и выбор оптимальной схемы пылеулавливания позволит снизить значения ПДК и ПДВ до безопасного уровня.

Имеющиеся в данном учебном пособии теоретические разработки, сведения о конструктивных особенностях и технических характеристиках оборудования, методики расчёта и выбора этого оборудования могут послужить исходной базой для успешного решения практических задач на производстве, в процессе проектирования или реконструкции систем обеспыливания или пылеулавливания.

В процессе отбора оборудования, представленного в учебном пособии, автор стремился к наиболее полному охвату существующих типов и моделей, выпускаемых промышленностью. Однако не стоит забывать, что наука не стоит на месте. Возникают новые направления в области улавливания твёрдых частиц, совершенствуются существующие методы и конструкции пылеулавливающего оборудования. Поэтому, при решении вопросов, связанных с обеспыливанием и пылеулавливанием, помимо изучения изложенного в учебном пособии материала, нужно проводить поиск современных технических материалов в периодических изданиях, материалах конференций, в интернете.

Данное учебное пособие не охватывает всего спектра методов и технических решений по улавливанию вредных выбросов в атмосферу. Помимо изложенных способов пылеулавливания для обезвреживания отходящих газов от газообразных и парообразных токсичных веществ применяют следующие методы: звуковой коагуляции, абсорбции (физической и хемосорбции), адсорбции, каталитические, термические, конденсации и компримирования.

Звуковая и ультразвуковая коагуляция, а также предварительная электризация пока мало применяются в промышленности и находятся в основном в стадии разработки. Они основаны на укрупнении аэрозольных частиц, облегчающем их улавливание традиционными методами. Аппаратура звуковой коагуляции состоит из генератора звука, коагуляционной камеры и осадителя.

Абсорбционные методы очистки отходящих газов подразделяют по следующим признакам:

- по абсорбируемому компоненту;
- по типу применяемого абсорбента;
- по характеру процесса – с циркуляцией и без циркуляции газа;
- по использованию абсорбента – с регенерацией и возвращением его в цикл (циклические) и без регенерации (не циклические);
- по использованию улавливаемых компонентов – с рекуперацией и без рекуперации;

- по типу рекуперлируемого продукта;
- по организации процесса – периодические и непрерывные;
- по конструктивным типам абсорбционной аппаратуры.

Для физической абсорбции на практике применяют воду, органические растворители, не вступающие в реакцию с извлекаемым газом, и водные растворы этих веществ. При хемосорбции в качестве абсорбента используют водные растворы солей и щелочей, органические вещества и водные суспензии различных веществ.

Выбор метода очистки зависит от многих факторов: концентрации извлекаемого компонента в отходящих газах, объёма и температуры газа, содержания примесей, наличия хемосорбентов, возможности использования продуктов рекуперации, требуемой степени очистки. Выбор производят на основании результатов технико-экономических расчетов.

Адсорбционные методы очистки газов используют для удаления из них газообразных и парообразных примесей. Методы основаны на поглощении примесей пористыми телами-адсорбентами. Процессы очистки проводят в периодических или непрерывных адсорберах. Достоинством методов является высокая степень очистки, а недостатком – невозможность очистки запыленных газов.

Каталитические методы очистки основаны на химических превращениях токсичных компонентов в нетоксичные на поверхности твёрдых катализаторов. Очистке подвергаются газы, не содержащие пыли и катализаторных ядов. Методы используются для очистки газов от оксидов азота, серы, углерода и от органических примесей. Используемые в практике установки каталитической очистки различаются конструкцией контактных аппаратов, способами повышения до необходимого уровня температуры поступающих газов, используемыми катализаторами, приёмами рекуперации тепла, наличием рецикла обезвреженных газов.

В основе *метода конденсации* лежит явление уменьшения давления насыщенного пара растворителя при понижении температуры. Смесь паров растворителя с воздухом предварительно охлаждают в теплообменнике, а затем конденсируют. Достоинствами метода являются простота аппаратного оформления и эксплуатации рекуперационной установки. Однако проведение процесса очистки паровоздушных смесей методом конденсации сильно осложнено, поскольку содержание паров летучих растворителей в этих смесях обычно превышает нижний предел их взрываемости. К недостаткам метода относятся также высокие расходы холодильного агента и электроэнергии и низкий процент конденсации паров.

Метод компримирования базируется на том же явлении, что и метод конденсации, но применительно к парам растворителей, находящихся под высоким давлением. Недостатки: сложность аппаратного выполнения, невозможность работы с парами с низкой концентрацией.

Термические методы (методы прямого сжигания) применяют для обезвреживания газов от легко окисляемых токсичных, а также дурно пахнущих примесей. Методы основаны на сжигании горючих примесей в топках печей или факельных горелках. Преимуществом метода является простота аппаратуры, универсальность использования. Недостатки: дополнительный расход топлива при

сжигании низкоконцентрированных газов, а также необходимость дополнительной абсорбционной или адсорбционной очистки газов после сжигания.

При желании более подробную информацию по перечисленным методам очистки газов от вредных примесей можно найти в специализированной литературе.

Мы же в этом учебном пособии ограничимся данными по традиционным методам пылеулавливания твёрдых частиц, характерным для условий работы обогатительных фабрик. И не будем забывать, что совершенствование пылеулавливания – непрерывный процесс, являющийся составной частью технического прогресса. Он обусловлен всё возрастающими экологическими и санитарно-гигиеническими требованиями и основан на достижениях во многих областях науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корчевский, А. Н. Опыт применения процессов и аппаратов вибрационного пневматического обогащения сырьевых ресурсов : монография / А. Н. Корчевский. – Донецк : Схід. вид. дім, 2015. – 233 с.
2. Чуянов, Г. Г. Вспомогательные процессы обогащения. Обезвоживание и пылеулавливание : учеб. для вузов / Г. Г. Чуянов. – 2-е изд., перераб. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2006. – 204 с.
3. Руденко, К. Г. Обеспыливание и пылеулавливание при обработке полезных ископаемых / К. Г. Руденко, А. В. Калмыков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1987. – 264 с.
4. Абдурахманов, Э. А. Технология обогащения нерудных полезных ископаемых / Э. А. Абдурахманов, Н. А. Донияров. – Навои : [б. и.], 2008. – 144 с.
5. Самойлик, В. Г. Специальные и комбинированные методы обогащения полезных ископаемых : учеб. пособие / В. Г. Самойлик. – Донецк : Схід. вид. дім, 2015. – 164 с.
6. Машиностроение : энциклопедия : т. IV-12. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств / М. Б. Генералов [и др.] ; под общ. ред. М. Б. Генералова. – Москва : Машиностроение, 2004. – 832 с. : ил.
7. Оборудование для переработки сыпучих материалов : учеб. пособие / В. Я. Борщев [и др.]. – Москва : Машиностроение-1, 2006. – 208 с.
8. Справочник по обогащению руд : т. 1. Подготовительные процессы / гл. ред. О. С. Богданов. – Москва : Недра, 1982. – 367 с.
9. Мизонов, В. Е. Аэродинамическая классификация порошков / В. Е. Мизонов, С. Г. Ушаков. – Москва : Химия, 1989. – 160 с. : ил.
10. Пневмокласификаторы [Электронный ресурс] // Завод пневмотранспортного оборудования : сайт. – Электрон. дан. – Тольятти, 2018. – Режим доступа: <http://www.zpto-tlt.ru/production/pnevмокlassifikator>. – Загл. с экрана.
11. Пневмокласификаторы (охладители) [Электронный ресурс] // ООО «Строймаш». Проектирование и изготовление оборудования : сайт. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург, 2018. – Режим доступа: <http://www.ooo-stroymash.ru/pnevмокlass.php>. – Загл. с экрана.
12. Дамдинова, Д. Р. Машины и оборудование для измельчения и сортировки строительных материалов : учеб. пособие / Д. Р. Дамдинова, В. Г. Дондуков. – Улан-Удэ : ВСГТУ, 2004. – 104 с.
13. Калмыков, А. В. Техника и технология сухого обеспыливания углей на обогатительных фабриках передовых угледобывающих стран / А. В. Калмыков, В. В. Трайнис. – Москва : ЦНИЭИуголь, 1979. – 18 с.
14. Репин, К. В. Оборудование ОАО «НИИПРОЕКТАСБЕСТ» – предприятиям стройиндустрии [Электронный ресурс] / К. В. Репин // BaltiMix : сайт. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург, 2018. – Режим доступа: http://www.baltimix.ru/confer/confer_archive/reports/doclad12/NIIProektAsbest.pdf. – Загл. с экрана.

15. Исаковский, И. Н. Применение грохотов ГИД для классификации мелких сыпучих материалов сухим способом стройиндустрии [Электронный ресурс] / И. Н. Исаковский, Д. В. Кочнев // НИИПРОЕКТАСБЕСТ : сайт. – Электрон. дан. – Асбест, 2018. – Режим доступа: http://www.niiasbest.ru/files/publishers/41_16.pdf. – Загл. с экрана.
16. Временное руководство по применению средств борьбы с пылью на углеобогащительных фабриках и сортировках шахт. – Москва : Недра, 1971. – 106 с.
17. ГОСТ Р 55175-2012. Атмосфера рудничная. Методы контроля запыленности. – Введен в д. 2013-12-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 20 с.
18. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Введен в д. 01.01.1989. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 48 с.
19. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны [Электронный ресурс] : с изм. на 29 июня 2017 г. – Электрон. дан. – Москва, 2018. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901862250>. – Загл. с экрана.
20. Положение о пылегазовом режиме на углеобогащительных фабриках (установках) [Электронный ресурс] : утв. 01.12.2011. – Электрон. дан. – Москва, 2013. – Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293780/4293780615.htm>. – Загл. с экрана.
21. Ветошкин, А. Г. Процессы и аппараты пылеочистки : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
22. Алиев, Г. М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г. М.-А. Алиев. – Москва : Metallurgia, 1986. – 544 с.
23. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер [и др.] ; под общ. ред. А. А. Русанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
24. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – 3-е изд. перераб. – Ленинград : Химия, 1987. – 264 с.
25. Коузов, П. А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей / П. А. Коузов, Л. Я. Скрябина. – Ленинград : Химия, 1983. – 143 с.
26. Зиганшин, М. Г. Проектирование аппаратов газоочистки / М. Г. Зиганшин, А. А. Колесников, В. Н. Посохов. – Москва : Экопресс-ЗМ, 1998. – 505 с.
27. Рекомендации по проектированию очистки воздуха от пыли в системах вытяжной вентиляции / ЦНИИПромзданий. – Москва : Стройиздат, 1985. – 36 с.
28. Ветошкин, А. Г. Теоретические основы защиты окружающей среды : учеб. пособие / А. Г. Ветошкин. – Пенза : Изд-во ПГАСА, 2002. – 290 с.
29. Гордон, Г. М. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии / Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов. – Москва : Мир, 1981. – 392 с. : ил.
30. Пылеулавливание в металлургии : справ. изд. / В. М. Алешина [и др.]. – Москва : Metallurgia, 1984. – 336 с.
31. Швыдкий, В. С. Очистка газов : справ. изд. / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев. – Москва : Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.

32. Газоочистное оборудование. Циклоны [Электронный ресурс] // Ventilator : интернет-магазин вентиляции. – Электрон. дан. – Киев, 2018. – Режим доступа: https://ventilator.ua/pdf_swf/cikloni.pdf. – Загл. с экрана.
33. Каталог циклонов ЦН [Электронный ресурс] // Котельный завод : сайт. – Электрон. дан. – [Россия], 2018. – Режим доступа: <http://cyklon-cn.ru/catalog.html>. – Загл. с экрана.
34. Циклоны и пылеуловители [Электронный ресурс] // Свердловский завод теплотехнического оборудования и металлоконструкций : сайт. – Электрон. дан. – Екатеринбург, 2018. – Режим доступа: <http://zavodtm.ru/produkcija/ciklony-i-pyleuloviteli/>. – Загл. с экрана.
35. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов / под ред. Л. В. Чекалова. – Ярославль : Русь, 2004. – 424 с.
36. Щукина, Л. В. Сухая очистка запыленных газов : учеб. пособие / Л. В. Щукина, А. А. Асламов, Е. В. Подоплелов. – Ангарск : АГТА, 2006. – 100 с.
37. Азаров, В. Н. Пылеуловители со встречными закручивающими потоками. Опыт внедрения : монография / В. Н. Азаров. – Волгоград : РПК «Политехник» ВолГТУ, 2003. – 136 с.
38. Вихревые пылеуловители ВЗП [Электронный ресурс] // Сибирский завод газоочистного оборудования : сайт. – Электрон. дан. – Новосибирск, 2018. – Режим доступа: <http://sibgzo.ru/cyclones/sukhaya-ochistka-gazov/vikhrevye-pyleuloviteli-vzp/>. – Загл. с экрана.
39. Пылеуловитель ВЗП-М со встречными закручивающимися потоками [Электронный ресурс] // Формула. Завод технологического оборудования : сайт. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург, 2018. – Режим доступа: https://e-formula.ru/Cyclons/Cyclons_VZP_M.htm. – Загл. с экрана.
40. Бекетов, В. Е. Аппараты сухой очистки газов / В. Е. Бекетов, Г. П. Евтухова. – Харьков : ХНУГХ, 2013. – 64 с.
41. Оборудование для очистки газов промышленных печей : электрон. конспект лекций / С. А. Козлова [и др.]. – Красноярск : СФУ, 2007. – 156 с.
42. Стрекалова, В. А. Процессы и аппараты защиты атмосферы : учеб. пособие к теорет. курсу / В. А. Стрекалова, Т. А. Стрекалова, Д. Ю. Егорихина. – Красноярск : СФУ, 2008. – 119 с.
43. Рукавные и картриджные фильтры СРС [Электронный ресурс] : каталог // Экофильтр – изготовитель пылеулавливающего оборудования : сайт. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург, 2018. – Режим доступа: <https://e-f.ru/contacts/>. – Загл. с экрана.
44. Фильтры рукавные типа ФРКИ [Электронный ресурс] // СФ НИОГАЗ, 1962-2014 : сайт. – Электрон. дан. – Семибратово, 2018. – Режим доступа: <https://sfniogaz.ru/equipment/9/128/>. – Загл. с экрана.
45. Газоочистка и аспирация. Рукавные фильтры нового поколения [Электронный ресурс] // Вектор&Инжиниринг : сайт. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург, 2018. – Режим доступа: <http://www.vec-ing.ru/?do=menu&id=101>. – Загл. с экрана.
46. Системы воздухообеспечения промышленных предприятий : учеб. пособие / Н. В. Калинин [и др.]. – Смоленск : Смол. фил. ГОУВПО «МЭИ (ТУ)», 2005. – 122 с.

47. Руководство по проектированию очистки воздуха от пыли в системах приточной вентиляции и кондиционирования / ЦНИИпромзданий. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1984. – 97 с.
48. Аэродинамика воздухоочистных устройств с зернистым слоем : монография / А. Пушнов [и др.]. – Вильнюс : Техника, 2010. – 48 с.
49. Красовицкий, Ю. В. Обеспыливание газов зернистыми фильтрами / Ю. В. Красовицкий, В. В. Дуров. – Москва : Химия, 1991. – 192 с.
50. ГОСТ 31826-2012. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Фильтры рукавные. Пылеуловители мокрые. Требования безопасности. Методы испытаний. – Введ. в д. 2014-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 14 с.
51. Блумберг, Д. М. Мокрая очистка газов : учеб. пособие / Д. М. Блумберг. – Рига : РПИ, 1987. – 118 с.
52. Мошкарнев, Л. М. Комплексная технология очистки воздуха от пыли в аппаратах мокрого пылеулавливания / Л. М. Мошкарнев. – Иркутск : ИПУ, 1984. – 200 с.
53. Юрлов, А. М. Высокоэффективные мокрые пылеуловители : учеб. пособие / А. М. Юрлов, Ю. Г. Ярошенко. – Свердловск : УПИ, 1990. – 65 с.
54. Ермилов, В. В. Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности : учеб. пособие для практ. занятий / В. В. Ермилов. – Череповец : ФГБОУ ЧГУ, 2013. – 43 с.
55. Пылеулавливающее оборудование [Электронный ресурс] : [каталог] // Светерком.ру. Вентиляция и отопительное оборудование : сайт. – Электрон. дан. – Новосибирск, 2018. – Режим доступа: <http://www.svetercom.ru/pyleuloviteli>. – Загл. с экрана.
56. Яблокова, М. А. Оборудование для очистки газовых выбросов промышленных предприятий : учеб. пособие : ч. 2. Аппараты для мокрой очистки газов от пыли / М. А. Яблокова, С. И. Петров. – Санкт-Петербург : СПбГТИ(ТУ), 2006. – 30 с.
57. Бочкарев, В. В. Теоретические основы технологических процессов охраны окружающей среды : учеб. пособие / В. В. Бочкарев ; ТПУ. – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 317 с.
58. Бородин, Ю. В. Промышленная экология : учеб. пособие / Ю. В. Бородин, М. Э. Гусельников ; ТПУ. – Томск : Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.
59. Саранчук, В. И. Электрические поля в потоке аэрозолей / В. И. Саранчук. – Киев : Наук. думка, 1981. – 112 с.
60. Кропп, Л. И. Интенсификация работы электрофильтров кондиционированием газов : учеб. пособие / Л. И. Кропп, И. Н. Шмиголь. – Москва : ВИПКэнерго, 1986. – 102 с.
61. ГОСТ Р 51707-2001. Электрофильтры. Требования безопасности и методы испытаний. – Введ. в д. 2001-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2001. – 14 с.
62. Санаев, Ю. И. Обеспыливание газов электрофильтрами / Ю. И. Санаев. – Семипалатинск : Кондор-Эко, 2009. – 163 с.
63. Бекетов, В. Е. Конспект лекций по дисциплине «Прикладная аэрология» / В. Е. Бекетов, Г. П. Евтухова ; Харьк. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Харьков : ХНУГХ, 2013. – 64 с.

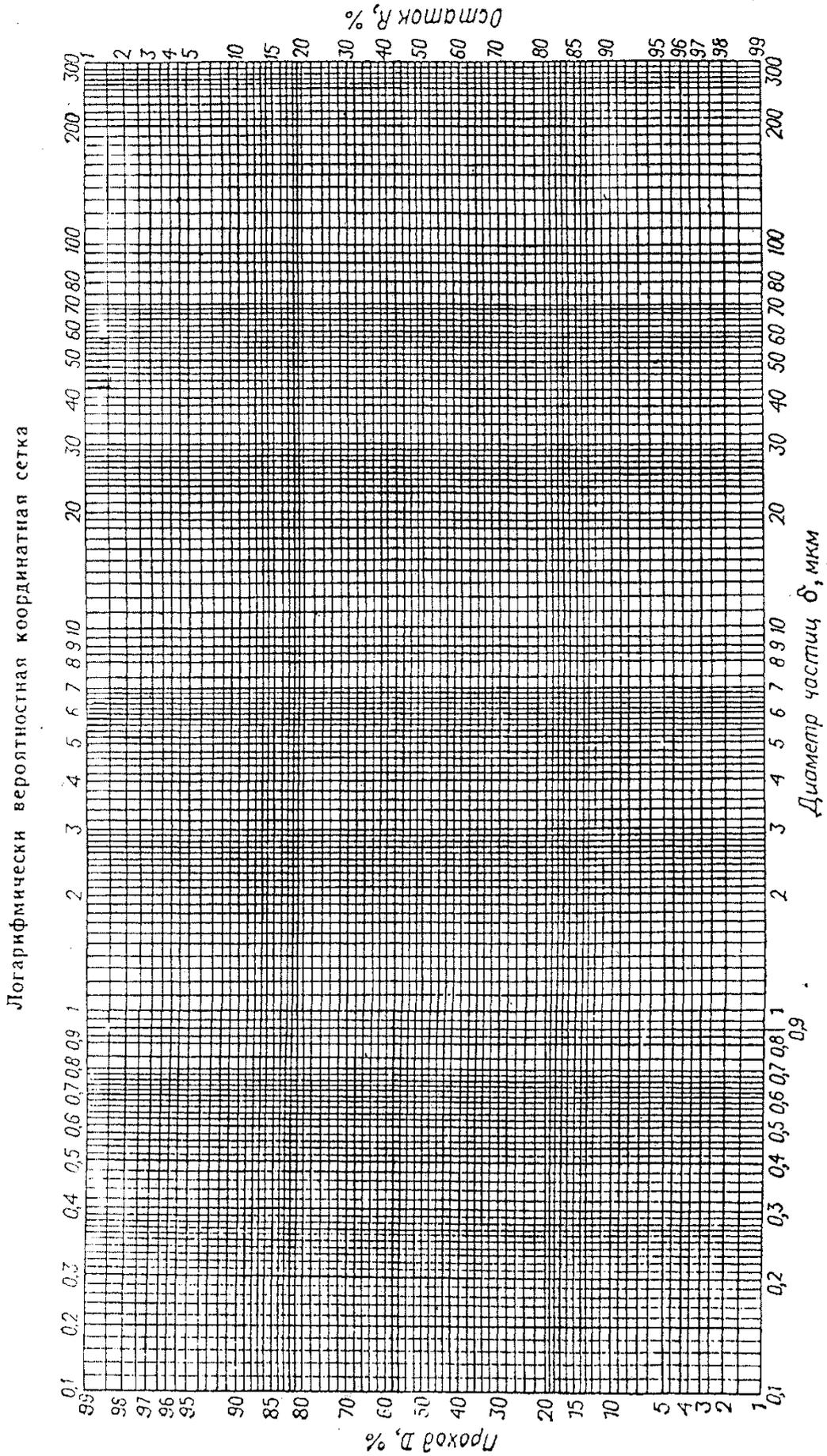
64. Санаев, Ю. И. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) пыли (золы) в электрофильтрах / Ю. И. Санаев, Л. В. Чекалов. – Семибратово : Кондор-Эко, 2016. – 39 с.
65. Чекалов, Л. В. Свойства промышленных пылей и эффективность электрофильтров / Л. В. Чекалов, Ю. И. Санаев. – Семибратово : Кондор-Эко, 2018. – 45 с.
66. Чекалов, Л. В. Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л. В. Чекалов. – Москва : МЭИ, 2007. – 30 с.
67. Чекалов, Л. В. Формула газоочистки. История, проблемы и разработки отечественной экотехники [Электронный ресурс] / Л. В. Чекалов. – Электрон. дан. - Семибратово : Кондор-Эко, 2008-2010. – Режим доступа: <http://www.gazoochistca.ru>. – Загл. с экрана.
68. Каталог пылеулавливающего оборудования / под ред. Л. В. Чекалова. – Ярославль : Кондор-Эко, 2006. – 240 с.
69. Мокрые электрофильтры [Электронный ресурс] // ОАО «НИИОГАЗ» : сайт. – [Россия], 2018. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://niiogaz.ru/elektricheskaya-ochistka-gazov/mokrye-elektrofiltry.html>. – Загл. с экрана.
70. Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Вспомогательные процессы обогащения» / сост.: В. Г. Самойлик. – Донецк : ДОННТУ, 2017. – 68 с.

Приложение 1

Значения нормальной функции распределения Гаусса

x	F(x)	x	F(x)	x	F(x)	x	F(x)	x	F(x)	x	F(x)
-2,70	0,0035	-1,36	0,0869	-0,58	0,2810	0,16	0,5636	0,94	0,8264	1,66	0,9515
-2,60	0,0047	-1,34	0,0901	-0,56	0,2877	0,18	0,5714	0,96	0,8315	1,68	0,9535
-2,50	0,0062	-1,32	0,0934	-0,54	0,2946	0,20	0,5793	0,98	0,8365	1,70	0,9554
-2,40	0,0082	-1,30	0,0968	-0,52	0,3015	0,22	0,5871	1,00	0,8413	1,72	0,9573
-2,30	0,0107	-1,28	0,1003	-0,50	0,3085	0,24	0,5948	1,02	0,84C1	1,74	0,9591
-2,20	0,0139	-1,26	0,1038	-0,50	0,3085	0,26	0,6026	1,04	0,8508	1,76	0,9608
-2,10	0,0179	-1,24	0,1075	-0,48	0,3156	0,28	0,6103	1,06	0,8554	1,78	0,9625
-2,00	0,0228	-1,22	0,1112	-0,46	0,3228	0,30	0,6179	1,08	0,8599	1,80	0,9641
-1,98	0,0239	-1,20	0,1151	-0,44	0,3300	0,32	0,6255	1,10	0,8643	1,82	0,9656
-1,96	0,0250	-1,18	0,1190	-0,42	0,3372	0,34	0,6331	1,12	0,8686	1,84	0,9671
-1,94	0,0262	-1,16	0,1230	-0,40	0,3446	0,36	0,6406	1,14	0,8729	1,86	0,9686
-1,92	0,0274	-1,14	0,1271	-0,38	0,3520	0,38	0,6480	1,16	0,8770	1,88	0,9699
-1,90	0,0288	-1,12	0,1314	-0,36	0,3594	0,40	0,6554	1,18	0,8810	1,90	0,9713
-1,88	0,0301	-1,10	0,1357	-0,34	0,3669	0,42	0,6628	1,20	0,8849	1,92	0,9726
-1,86	0,0314	-1,08	0,1401	-0,32	0,3745	0,44	0,6700	1,22	0,8888	1,94	0,9738
-1,84	0,0329	-1,06	0,1446	-0,30	0,3821	0,46	0,6772	1,24	0,8925	1,96	0,9750
-1,82	0,0344	-1,04	0,1492	-0,28	0,3897	0,48	0,6844	1,22	0,8888	1,98	0,9761
-1,80	0,0359	-1,02	0,1539	-0,26	0,3974	0,50	0,6915	1,24	0,8925	2,00	0,9772
-1,78	0,0375	-1,00	0,1587	-0,24	0,4052	0,52	0,6985	1,24	0,8925	2,10	0,9821
-1,76	0,0392	-0,98	0,1635	-0,22	0,4129	0,54	0,7054	1,26	0,8962	2,20	0,9861
-1,74	0,0409	-0,96	0,1685	-0,20	0,4207	0,56	0,7123	1,28	0,8997	2,30	0,9893
-1,72	0,0427	-0,94	0,1736	-0,18	0,4286	0,58	0,7190	1,30	0,9032	2,40	0,9918
-1,70	0,0446	-0,92	0,1788	-0,16	0,4364	0,60	0,7257	1,32	0,9066	2,50	0,9938
-1,68	0,0465	-0,90	0,1841	-0,14	0,4443	0,62	0,7324	1,34	0,9099	2,60	0,9953
-1,66	0,0485	-0,88	0,1894	-0,12	0,4522	0,64	0,7389	1,36	0,9131	2,70	0,9965
-1,64	0,0505	-0,86	0,1949	-0,10	0,4602	0,66	0,7454	1,38	0,9162		
-1,62	0,0526	-0,84	0,2005	-0,08	0,4681	0,68	0,7517	1,40	0,9192		
-1,60	0,0548	-0,82	0,2061	-0,06	0,4761	0,70	0,7580	1,42	0,9222		
-1,58	0,0571	-0,80	0,2119	-0,04	0,4840	0,72	0,7642	1,44	0,9251		
-1,56	0,0594	-0,78	0,2177	-0,02	0,4920	0,74	0,7703	1,46	0,9279		
-1,54	0,0618	-0,76	0,2236	-0,00	0,5000	0,76	0,7764	1,48	0,9306		
-1,52	0,0643	-0,74	0,2297	0,00	0,5000	0,78	0,7823	1,50	0,9332		
-1,50	0,0668	-0,72	0,2358	0,02	0,5080	0,80	0,7881	1,52	0,9357		
-1,48	0,0694	-0,70	0,2420	0,04	0,5160	0,82	0,7939	1,54	0,9382		
-1,46	0,0721	-0,68	0,2483	0,06	0,5239	0,84	0,7995	1,56	0,9406		
-1,44	0,0749	-0,66	0,2546	0,08	0,5319	0,86	0,8051	1,58	0,9429		
-1,42	0,0778	-0,64	0,2611	0,10	0,5398	0,88	0,8106	1,60	0,9452		
-1,40	0,0808	-0,62	0,2676	0,12	0,5478	0,90	0,8159	1,62	0,9474		
-1,38	0,0838	-0,60	0,2743	0,14	0,5557	0,92	0,8212	1,64	0,9495		

Логарифмическая вероятностная координатная сетка



Основные технические характеристики циклонов ЦН-15

Обозначение циклона	Площадь сечения цилиндрической части корпуса, м ²	Производительность, м ³ /ч		Рабочий объём бункера, м ³
		при V=2,5 м/с	при V=4,0 м/с	
Циклон ЦН-15-200х1УП	0,0314	283	452	0,04
Циклон ЦН-15-300х1УП	0,07	630	1000	0,082
Циклон ЦН-15-400х1УП	0,125	1110	1800	0,13
Циклон ЦН-15-500х1УП	0,196	1800	2800	0,32
Циклон ЦН-15-600х1УП	0,282	2500	4100	0,43
Циклон ЦН-15-700х1УП	0,384	3500	5500	0,58
Циклон ЦН-15-800х1УП	0,502	4500	7200	1,03
Циклон ЦН-15-900х1УП	0,635	5700	9200	1,65
Циклон ЦН-15-1000х1УП	0,785	7100	11300	2,50
Циклон ЦН-15-1200х1УП	1,13	10200	16200	3,73
Циклон ЦН-15-1400х1УП	1,538	13900	22200	6,44
Циклон ЦН-15-1600х1УП	2,00	18000	28800	8,2
Циклон ЦН-15-1800х1УП	2,50	22500	36000	13,4
Циклон ЦН-15-2000х1УП	3,00	27000	43200	16,0
Циклон ЦН-15-300х2УП (СП)	0,14	1270	2000	0,20
Циклон ЦН-15-400х2УП (СП)	0,25	2300	3600	0,31
Циклон ЦН-15-500х2УП (СП)	0,392	3500	5600	0,50
Циклон ЦН-15-600х2УП (СП)	0,564	5100	8100	0,60
Циклон ЦН-15-700х2УП (СП)	0,768	6900	11100	0,83
Циклон ЦН-15-800х2УП (СП)	1,004	9000	14400	1,15
Циклон ЦН-15-900х2УП (СП)	1,27	11400	18300	1,45
Циклон ЦН-15-400х4УП (СП)	0,50	4500	7200	0,76

Циклон ЦН-15-500х4УП (СП)	0,784	7000	11300	1,10
Циклон ЦН-15-600х4УП (СП)	1,128	10200	16300	1,50
Циклон ЦН-15-700х4УП (СП)	1,536	13800	22000	2,03
Циклон ЦН-15-800х4УП (СП)	2,008	18100	28900	2,61
Циклон ЦН-15-900х4УП (СП)	2,54	22800	36600	3,01
Циклон ЦН-15-500х6УП (СП)	1,176	10600	16900	2,72
Циклон ЦН-15-600х6УП (СП)	1,692	15300	24400	4,45
Циклон ЦН-15-700х6УП (СП)	2,304	20800	33100	6,2
Циклон ЦН-15-800х6УП (СП)	3,012	27100	43300	10,2
Циклон ЦН-15-900х6УП (СП)	3,81	34300	54900	13,1
Циклон ЦН-15-500х8УП (СП)	1,568	14100	22600	6,2

Технические характеристики циклонов ЦН-11

Обозначение циклона	Производительность по воздуху м ³ /ч	Диаметр, мм	Высота, мм	Масса, кг
Циклон ЦН-11-400	970-1270	400	1862	66
Циклон ЦН-11-500	1510-1980	500	2300	88
Циклон ЦН-11-630	2403-3140	630	2870	247
Циклон ЦН-11-800	3880-5070	800	3615	391

Технические характеристики циклонов ЦН-11 с улиткой и пирамидальным бункером

Обозначение циклона	Производительность по воздуху м ³ /ч	А, мм	Б, мм	Высота, мм	Масса, кг
Циклон ЦН-11-400×1УП	970-1270	800	800	3452	66
Циклон ЦН-11-500×1УП	1510-1980	800	800	3910	88
Циклон ЦН-11-630×1УП	2403-3140	1250	1250	4804	247
Циклон ЦН-11-800×1УП	3880-5070	1250	1250	5584	391
Циклон ЦН-11-400×4СВП	3620-4710	1250	1250	4340	697
Циклон ЦН-11-500×4СВП	5660-7360	1600	2000	5030	1077
Циклон ЦН-11-630×4СВП	8980-11680	1600	2000	5650	1978

Циклон ЦН-11-800×4СВП	14500-18200	2000	2500	6880	2943
Циклон ЦН-11-400×4СВП	3620-4710	1250	1250	3990	668
Циклон ЦН-11-500×4СВП	5660-7360	1600	2000	4600	1039
Циклон ЦН-11-630×4СВП	8980-11680	1600	2000	5280	1943
Циклон ЦН-11-800×4СВП	14500-18200	2000	2500	6580	2922

Основные типоразмеры циклона ЦН-24 и технические характеристики

Обозначение	Производительность м ³ /ч при V=3,5 м/с	Размеры, мм		
		D	H	Патрубок a x b
Циклон ЦН-24-400	2 000	400	1704	444 x 80
Циклон ЦН-24-500	3 200	500	2130	555 x 100
Циклон ЦН-24-600	4 600	600	2556	666 x 120
Циклон ЦН-24-700	6 200	700	2982	777 x 140
Циклон ЦН-24-800	8 100	800	3408	888 x 160
Циклон ЦН-24-900	10 300	900	3834	999 x 160
Циклон ЦН-24-1000	12 700	1000	4260	1110 x 200
Циклон ЦН-24-1200	18 300	1200	5112	1332 x 240
Циклон ЦН-24-1400	25 000	1400	5964	1554 x 280
Циклон ЦН-24-1600	32 600	1600	6816	1776 x 320
Циклон ЦН-24-1800	41 200	1800	7668	1998 x 360
Циклон ЦН-24-2000	50 900	2000	8520	2220 x 400
Циклон ЦН-24-2400	73 200	2400	10224	2664 x 480
Циклон ЦН-24-3000	114 400	3000	12780	3330 x 600

Циклоны ЦН-24 могут изготавливаться как в комплекте с улиткой, так и без улитки. Улитка применяется при установке вентилятора после циклона для уменьшения нагрузки на вентилятор и гидравлического сопротивления системы.

Основные типоразмеры циклона СДК-ЦН-33 и технические характеристики

Обозначение	Производительность по воздуху, м ³ /ч	Размеры, мм		
		D	H	Входной патрубок а x b
Циклон СДК-ЦН-33-400	1100	400	1538	214x106
Циклон СДК-ЦН-33-500	1800	500	1923	267x132
Циклон СДК-ЦН-33-600	2500	600	2286	321x158
Циклон СДК-ЦН-33-700	3500	700	2660	375x185
Циклон СДК-ЦН-33-800	4500	800	3033	428x211
Циклон СДК-ЦН-33-1000	7100	1000	3761	535x264
Циклон СДК-ЦН-33-1200	10200	1200	4488	642x317
Циклон СДК-ЦН-33-1400	13800	1400	5235	749x370
Циклон СДК-ЦН-33-1600	18100	1600	5982	856x422
Циклон СДК-ЦН-33-1800	22900	1800	6731	963x475
Циклон СДК-ЦН-33-2000	28300	2000	7478	1070x528
Циклон СДК-ЦН-33-2400	40700	2400	8972	1284x634
Циклон СДК-ЦН-33-3000	63600	3000	11215	1605x792

Основные типоразмеры циклона СК-ЦН-34 и технические характеристики

Обозначение	Производительность по воздуху, м ³ /ч	Размеры, мм		Масса, кг
		D	H	
Циклон СК-ЦН-34-400	1100	400	1174	35
Циклон СК-ЦН-34-500	1800	500	1468	54
Циклон СК-ЦН-34-600	2500	600	1740	77
Циклон СК-ЦН-34-700	3500	700	2022	105
Циклон СК-ЦН-34-800	4500	800	2305	137
Циклон СК-ЦН-34-900	5700	900	2578	172
Циклон СК-ЦН-34-1000	7100	1000	2850	211
Циклон СК-ЦН-34-1200	10200	1200	3396	302

Циклон СК-ЦН-34-1400	13800	1400	3961	411
Циклон СК-ЦН-34-1600	18100	1600	4526	536
Циклон СК-ЦН-34-1800	22900	1800	5083	677
Циклон СК-ЦН-34-2000	28300	2000	5658	838
Циклон СК-ЦН-34-2400	40700	2400	6788	1206
Циклон СК-ЦН-34-3000	63600	3000	8485	1885

Технические характеристики циклонов СЦН-40

Обозначение циклона	Производительность по воздуху м ³ /ч	Диаметр, мм	Высота, мм	a, мм	b, мм	Масса, кг
Циклон СЦН-40-300	330-480	300	1210	100	48	33
Циклон СЦН-40-400	590-860	400	1580	125	62	40
Циклон СЦН-40-500	920-1340	500	1940	150	73	46
Циклон СЦН-40-600	1320-1930	600	2293	200	98	57
Циклон СЦН-40-700	1800-2630	700	2642	250	123	69
Циклон СЦН-40-800	2350-3435	800	3014	300	148	85
Циклон СЦН-40-900	2975-4350	900	3377	350	173	108
Циклон СЦН-40-1000	3670-5370	1000	3762	400	198	139
Циклон СЦН-40-1100	4475-6500	1200	4098	450	223	178
Циклон СЦН-40-1200	5290-7730	1000	4468	500	248	139

Технические характеристики групповых циклонов СЦН-40

Обозначение циклонов	Производительность по воздуху м ³ /ч	Диаметр, мм	Высота, мм	Ширина, мм	Масса, кг
Циклон СЦН-40-300×4	1630-1930	300	1210	920	200
Циклон СЦН-40-400×4	2890-3430	400	1580	1150	360
Циклон СЦН-40-500×4	4520-5370	500	1940	1440	570
Циклон СЦН-40-600×4	6500-7730	600	2293	1680	1000
Циклон СЦН-40-700×4	8950-10630	700	2642	1920	1380

Циклон СЦН-40-800×4	11570-13740	800	3014	2140	1880
Циклон СЦН-40-900×4	14650-17400	900	3377	2412	2350
Циклон СЦН-40-1000×4	18100-21480	1000	3762	2662	2980
Циклон СЦН-40-1100×4	21900-26000	1200	4098	2902	4880
Циклон СЦН-40-1200×4	25880-30730	1000	4468	3165	5770

Технические характеристики циклонов СЦН-50

Обозначение циклона	Производительность по воздуху м ³ /ч	Диаметр, мм	Высота, мм	a, мм	b, мм	Масса, кг
Циклон СЦН-50-300	623-890	300	1055	150	75	38
Циклон СЦН-50-400	1130-1582	400	1380	200	100	64
Циклон СЦН-50-500	1760-2473	500	1705	250	125	97
Циклон СЦН-50-600	2543-3560	600	2030	300	150	141
Циклон СЦН-50-700	3462-4846	700	2355	350	175	187
Циклон СЦН-50-800	4522-6330	800	2680	400	200	246
Циклон СЦН-50-900	5723-8012	900	3005	450	225	305
Циклон СЦН-50-1000	7065-9891	1000	3330	500	250	380
Циклон СЦН-50-1200	10174-14243	1200	3980	600	300	543
Циклон СЦН-50-1400	13843-19386	1400	4630	700	350	721
Циклон СЦН-50-1600	18086-25320	1600	5280	800	400	939
Циклон СЦН-50-1800	22891-32046	1800	5930	900	450	1189
Циклон СЦН-50-2000	28260-39564	2000	6580	1000	500	1446
Циклон СЦН-50-2200	34195-47872	2200	7230	1100	550	1654
Циклон СЦН-50-2400	40694-56972	2400	7880	1200	600	1966
Циклон СЦН-50-2600	47759-66863	2600	8530	1300	650	2418
Циклон СЦН-50-2800	55390-77545	2800	9180	1400	700	2749
Циклон СЦН-50-3000	63585-89019	3000	9830	1500	750	3250

Основные свойства текстильных волокон, применяемых для
фильтровальных тканей

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

Окончание таблицы

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

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

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

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ ФРКИ [44]

Общие данные: диаметр рукава – 135 мм; тип фильтровального материала – фильтровальное полотно из полиэфирных волокон; давление сжатого воздуха для регенерации – 0,5-0,6 МПа; мощность электропневмоклапана – 15 Вт; мощность электродвигателя для шнека – 1500 Вт, конструктивно фильтры изготавливаются в 6-ти исполнениях.

Обозначения: F – площадь поверхности фильтрования; n_p – количество рукавов; L_p – длина рукава; Q – объём очищаемого газа, не более; Д, Ш, В – габариты /длина, ширина, высота/; $n_{кл}$ – количество электропневмоклапанов;

Тип фильтра	Исполнение	F, м ²	n_p , шт.	L_p , м	Q, м ³ /ч	Д,Ш,В, м	$n_{кл}$, шт.
1	2	3	4	5	6	8	9
ФРКИ-5-П1-1-1	1	5	12	1	480	1,9/0,6/2,6	2
ФРКИ-10-П1-2-1		10	12	2	960	1,9/0,6/3,6	2
ФРКИ-15-П1-2-1		15	18	2	1440	1,9/0,8/3,6	3
ФРКИ-20-П1-2-1		20	24	2	1920	1,9/1,0/3,5	4
ФРКИ-30-П1-2-1		30	36	2	2880	1,9/1,5/3,6	6
ФРКИ-30М-П1-2-1		30	36	2	2880	1,6/1,4/3,6	6
ФРКИ-30К-П1-2-1		30	36	2	2880	1,7/1,4/3,8	6
ФРКИ-40-П1-2-1		40	48	2	3840	1,9/1,9/3,9	8
ФРКИ-45-П1-3-1		45	36	3	4320	1,9/1,5/4,6	6
ФРКИ-60-П1-3-1		60	48	3	5760	2,0/1,9/4,9	8
ФРКИ-120-П1-2-1		120	144	2	11520	3,0/3,0/4,8	12
ФРКИ-180-П1-3-1		180	144	3	17280	3,0/3,0/5,7	12
ФРКИ-60-П2-2-1	2	60	72	2	5760	2,9/1,9/4,1	12
ФРКИ-60М-П2-2-1		60	72	2	5760	2,6/1,6/3,6	12
ФРКИ-60-П2-2-2		60	72	2	5760	2,9/2,1/3,6	12
ФРКИ-80-П2-2-1		80	98	2	7680	2,8/1,8/3,6	14
ФРКИ-90-П2-3-1		90	72	3	8640	2,9/1,9/5,1	12
ФРКИ-90-П3-2-1		90	108	2	8640	4,0/1,9/3,6	18
ФРКИ-90М-П3-2-1		90	108	2	8640	3,8/1,6/3,6	18
ФРКИ-90-П2-3-2		90	72	3	8640	4,0/1,5/5,1	12
ФРКИ-180-П4-3-1		180	144	3	17280	5,3/1,9/4,6	24
ФРКИ-290М-П4-3,5-1		290	196	3,5	27840	5,6/2,2/6,0	28
ФРКИ-360-П2-3-1		360	288	3	34560	5,4/3,2/5,7	24
ФРКИ-600-П2-5-1		600	288	5	57600	5,4/3,2/7,8	24
ФРКИ-60К-П2-2-2	3	60	72	2	5760	2,9/2,1/3,6	12
ФРКИ-90К-П3-2-2		90	108	2	8640	4,1/1,8/3,8	18
ФРКИ-90-П2-3-3	4	90	72	3	8640	4,0/1,5/4,7	12
ФРКИ-270-П6-3-3		270	288	3	25920	4,4/4,2/5,0	36
ФРКИ-360-П8-3-3		360	288	3	34560	5,8/4,2/4,8	48
ФРКИ-450-П10-3-3		450	360	3	43200	7,2/4,2/4,9	60
ФРКИ-60-Щ1-2-2		60	72	2	5760	2,9/2,0/4,1	12

ФРКИ-90-Щ1-2-2	5	90	108	2	8640	4,2/2,0/4,1	18
ФРКИ-90-Щ1-3-2		90	72	3	8640	2,8/2,0/4,6	12
ФРКИ-120-Щ1-2-2		120	144	2	11520	5,6/2,1/4,1	24
ФРКИ-120М-Щ1-3-2		120	98	3	11520	3,0/1,9/4,7	14
ФРКИ-135-Щ1-3-2		135	108	3	12960	4,3/1,9/5,1	18
ФРКИ-180-Щ1-3-2		180	144	3	17280	5,6/2,1/5,1	24
ФРКИ-180М-Щ1-3-2		180	147	3	17280	4,3/1,9/4,7	21
ФРКИ-360-Щ1-3-1		360	288	3	34560	5,6/3,2/6,0	24
ФРКИ-240-Щ2-2-3	6	240	288	2	23040	5,6/4,0/4,1	48
ФРКИ-270-Щ2-3-3		270	288	3	25920	4,5/3,3/4,8	36
ФРКИ-300-Щ2-2.5-3		300	288	2,5	28800	5,6/3,2/4,6	48
ФРКИ-450-Щ2-3-3		360	245	3,5	34560	7,0/2,2/5,9	35

Исполнение 1: односекционные с пирамидальным бункером.

Исполнение 2: многосекционные с пирамидальными бункерами.

Исполнение 3: с кассетной компоновкой рукавов.

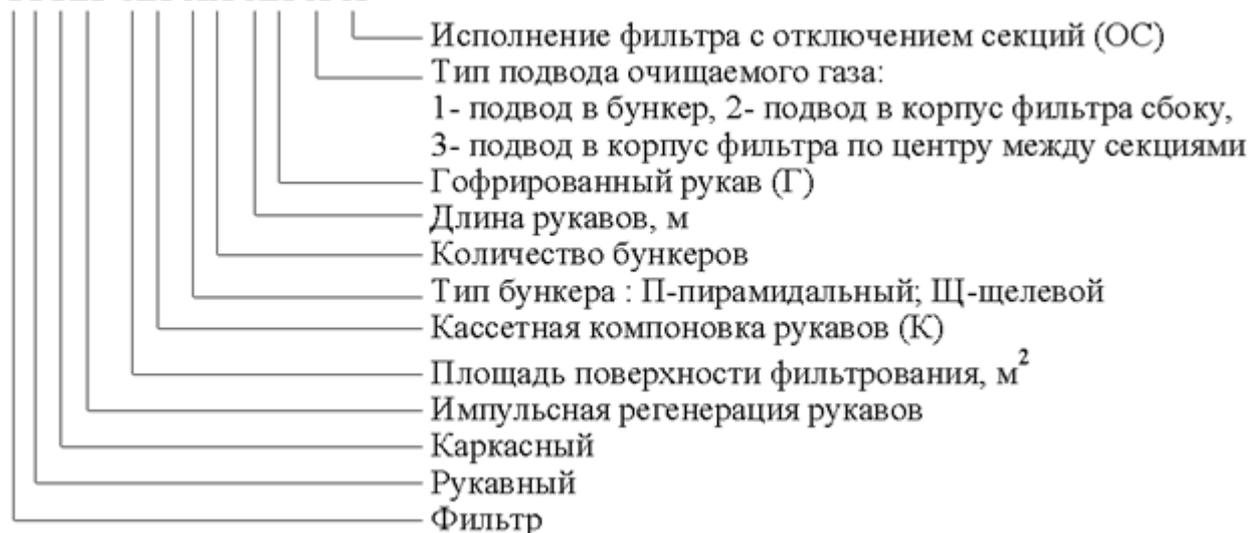
Исполнение 4: многосекционные с пирамидальными бункерами и двухрядной компоновкой секций.

Исполнение 5: многосекционные с одним щелевым бункером и однорядной компоновкой секций.

Исполнение 6: многосекционные со щелевыми бункерами и двухрядной компоновкой секций.

Схема обозначения фильтра:

ФРКИ -XX-XX-XX-X-X



ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ ФРИ С ОДНОСТОРОННЕЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПРОДУВКОЙ

Техническая характеристика	ФРИ-30	ФРИ-60*	ФРИ-90*	ФРИ-180*	ФРИ-360*
Производительность по очищаемому газу, м ³ /ч, не более	2790	5580	8370	16740	33480
Площадь поверхности фильтрования, м ² , не менее	30	60	90	180	360
Количество секций	1	2	3	4	8
Количество рукавов	36	72	108	144	288
Диаметр рукава, мм	135	135	135	135	135
Длина рукава, м	2	2	2	3	3
Количество мембранных клапанов	6	12	18	24	48
Удельная газовая нагрузка, м ³ /м ² .мин, не более	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
Массовая концентрация пыли в очищаемом газе на входе, г/м ³ , не более	50	50	50	50	50
Массовая концентрация пыли в очищаемом газе на выходе, г/м ³ , не более	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Гидравлическое сопротивление, кПа (кгс/м ²), не более	1,5(150)	1,5(150)	1,5(150)	1,5(150)	1,5(150)
Давление продувочного воздуха, МПа (кгс/см ²)	0,3-0,6(3-6)	0,3-0,6(3-6)	0,3-0,6(3-6)	0,3-0,6(3-6)	0,3-0,6(3-6)
Расход продувочного воздуха, в % от объема очищаемого газа, не более	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Допустимое давление (разрежение) внутри аппарата, кПа (кгс/м ²), не более	5 (500)	5 (500)	5 (500)	5 (500)	5 (500)
Масса, кг, не более	1150	1950	2800	4200	9000

*-имеют два исполнения: со щелевым бункером и с пирамидальными бункерами.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ ФРИ с двухсторонней импульсной продувкой с отключением секций на время регенерации

Техническая характеристика	<u>ФРИ-630-</u> <u>ОСД</u>	<u>ФРИ-800-</u> <u>ОСД</u>	<u>ФРИ-1250-</u> <u>ОСД</u>	<u>ФРИ-1600-</u> <u>ОСД</u>
Производительность по очищаемому газу, м ³ /ч, не более	58176	77576	116352	155136
Площадь поверхности фильтрования, м ² , не менее	606	808	1212	1616
Количество секций	6	8	12	16
Количество рукавов	216	288	432	576
Диаметр рукава, мм	135	135	135	135
Длина рукава, м	6,82	6,82	6,82	6,82
Количество мембранных клапанов	72	96	144	192
Количество пневмоцилиндров	6	8	12	16
Удельная газовая нагрузка, м ³ /м ² .мин, не более	1,55	1,55	1,55	1,55
Массовая концентрация пыли в очищаемом газе на входе, г/м ³ , не более	20	20	20	20
Массовая концентрация пыли в очищаемом газе на выходе, г/м ³ , не более	0,02	0,02	0,02	0,02
Гидравлическое сопротивление, кПа (кгс/м ²), не более	2(200)	2(200)	2(200)	2(200)
Давление продувочного воздуха, МПа (кгс/см ²)	0,6 (6)	0,6 (6)	0,6 (6)	0,6 (6)
Расход продувочного воздуха, в % от объема очищаемого газа, не более	0,15	0,15	0,15	0,15
Допустимое давление (разрежение) внутри аппарата, кПа (кгс/м ²)	5 (500)	5 (500)	5 (500)	5 (500)
Масса, кг, не более	14700	18200	25600	33700

Технические характеристики рукавных фильтров СРФ

Модель	СРФ8	СРФ8x2	СРФ8x3	СРФ8x4	СРФ8x5	СРФ8x6
Количество секций	1	2	3	4	5	6
Максимальная производительность по воздуху, м ³ /ч	8000	16000	24000	32000	40000	48000
Гидравлическое сопротивление, Па	до 2000					
Максимальная концентрация на входе в фильтр, г/м ³	200	200	200	200	200	200
Концентрация пыли на выходе из фильтра, не более, мг/м ³	20	20	20	20	20	20
Давление сжатого воздуха, бар	5...8	5...8	5...8	5...8	5...8	5...8
Расход сжатого воздуха, л/мин	50	100	150	200	250	300

Модель	СРФ15	СРФ15x2	СРФ15x3	СРФ15x4	СРФ15x5	СРФ15x6
Количество секций	1	2	3	4	5	6
Максимальная производительность по воздуху, м ³ /ч	15000	30000	45000	60000	75000	90000
Гидравлическое сопротивление, Па	до 2000					
Максимальная концентрация на входе в фильтр, г/м ³	200	200	200	200	200	200
Концентрация пыли на выходе из фильтра, не более, мг/м ³	20	20	20	20	20	20
Давление сжатого воздуха, бар	5...8	5...8	5...8	5...8	5...8	5...8
Расход сжатого воздуха, л/мин	100	200	300	400	500	600

Модель	СРФ22	СРФ22x2	СРФ22x3	СРФ22x4	СРФ22x5
Количество секций	1	2	3	4	5
Максимальная производительность по воздуху, м ³ /ч	22000	44000	66000	88000	110000
Гидравлическое сопротивление, Па	до 2000				
Максимальная концентрация на входе в фильтр, г/м ³	200	200	200	200	200
Концентрация пыли на выходе из фильтра, не более, мг/м ³	20	20	20	20	20
Давление сжатого воздуха, бар	5...8	5...8	5...8	5...8	5...8
Расход сжатого воздуха, л/мин	100	200	300	400	500

Модель	СРФ22x6	СРФ22x7	СРФ22x8	СРФ22x9	СРФ22x10
Количество секций	6	7	8	9	10
Максимальная производительность по воздуху, м ³ /ч	132000	154000	176000	198000	220000
Гидравлическое сопротивление, Па	до 2000				
Максимальная концентрация на входе в фильтр, г/м ³	200	200	200	200	200
Концентрация пыли на выходе из фильтра, не более, мг/м ³	20	20	20	20	20
Давление сжатого воздуха, бар	5...8	5...8	5...8	5...8	5...8
Расход сжатого воздуха, л/мин	600	700	800	900	1000

Модель*	СРФ-Б50	СРФ-Б100	СРФ-Б300	СРФ-Б600	СРФ-Б800	СРФ-Б1200
Площадь фильтрации, м ²	520	1040	3120	6240	8320	12480
Скорость фильтрации, м/мин	1...2	1...2	1...2	1...2	1...2	1...2
Производительность по очищаемому газу, тыс. м ³ /ч **	31...60	62...120	186...360	372...720	496...960	744...1440
Гидравлическое сопротивление, Па	до 2000	до 2000	до 2000	до 2000	до 2000	до 2000
Максимальная концентрация на входе в фильтр, г/м ³	60	60	60	60	60	60
Концентрация пыли на выходе из фильтра, не более, мг/м ³	10	10	10	10	10	10
Давление сжатого воздуха, бар	5...8	5...8	5...8	5...8	5...8	5...8
Расход сжатого воздуха, л/мин	800	1600	3200	4800	6400	9600

* - в таблице приведен не полный перечень моделей и характеристик фильтра, ** - производительность фильтра зависит от скорости фильтрации, которая подбирается в зависимости от свойств улавливаемой пыли.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗООЧИСТИТЕЛЕЙ ПЕННЫХ ПГС-ЛТИ

Наименование	Производительность, м ³ /час	Площадь поперечного сечения, м ²	Сечение решетки, м ²	Сопротивление, кгс/м ²	Расход воды, л/м ³	Масса, кг
ПГС-ЛТИ-3	2100-3900	0,42	18,7	50-60	0,20	673
ПГС-ЛТИ-5,5	3850-7100	0,77	18,7	50-60	0,21	920
ПГС-ЛТИ-10	7000-13000	1,40	18,7	50-60	0,23	1360
ПГС-ЛТИ-16	12000-20000	2,24	18,7	50-60	0,25	1900
ПГС-ЛТИ-23	18500-28500	3,22	15,7	50-60	0,25	2844
ПГС-ЛТИ-30	24000-37500	4,20	15,7	50-60	0,28	3483
ПГС-ЛТИ-40	33000-48000	5,60	15,7	50-60	0,30	4250
ПГС-ЛТИ-50	42500-60000	7,00	15,7	50-60	0,30	5113
ПГС-ЛТИ-2-3	2100-3900	0,42	18,7/15,7	50-60	0,20	881
ПГС-ЛТИ-2-5,5	3850-7100	0,77	18,7/15,7	50-60	0,21	1180
ПГС-ЛТИ-2-10	7000-13000	1,40	18,7/15,7	50-60	0,23	1705
ПГС-ЛТИ-2-16	12000-20000	2,24	18,7/15,7	50-60	0,25	2280

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗООЧИСТИТЕЛЕЙ ПЕННЫХ ППП-ЛТИ

Наименование	Производительность, м ³ /час	Площадь поперечного сечения, м ²	Сечение решетки, м ²	Сопротивление, кгс/м ²	Расход воды, л/м ³	Масса, кг
ППП-ЛТИ-3,5	2600-4300	0,50	19,3	50-60	0,80	588
ППП-ЛТИ-5,5	4500-6800	0,78	19,3	50-60	0,82	770
ППП-ЛТИ-8	6900-9500	1,13	19,3	50-60	0,82	985
ППП-ЛТИ-11	9400-12800	1,54	19,3	50-60	0,82	1170
ППП-ЛТИ-14,5	14500-16700	2,05	19,3	50-60	0,85	1502
ППП-ЛТИ-18	15500-21000	2,54	19,3	50-60	0,85	1800
ППП-ЛТИ-23	19000-26000	3,14	19,3	50-60	0,87	1874
ППП-ЛТИ-28	23000-31400	3,80	19,3	50-60	0,87	2465
ППП-ЛТИ-32	27600-37400	4,50	19,3	50-60	0,90	2835
ППП-ЛТИ-44	37500-51000	6,15	19,3	50-60	0,90	3880

Технические характеристики пылеуловителей ПВМСА

Наименование параметра	Производительность по воздуху, м ³ /час	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Пылеуловитель ПВМЗСА	3 000	1315x1145x3185	610
Пылеуловитель ПВМ5СА	5 000	1590x1370x3575	670
Пылеуловитель ПВМ10СА	10 000	2390x1514x4140	1750
Пылеуловитель ПВМ20СА	20 000	2360x2290x4575	2400
Пылеуловитель ПВМ40СА	40 000	4385x2314x5010	4720

Технические характеристики пылеуловителей ПВМБ

Наименование параметра	Производительность по воздуху, м ³ /час	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Пылеуловитель ПВМЗБ	3 000	1315x1145x3185	750
Пылеуловитель ПВМ5Б	5 000	1590x1370x3575	950
Пылеуловитель ПВМ10Б	10 000	2390x1514x4140	1820
Пылеуловитель ПВМ20Б	20 000	2360x2290x4575	2560
Пылеуловитель ПВМ40Б	40 000	4385x2314x5010	5320

Технические характеристики пылеуловителей ПВМКБ

Наименование параметра	Производительность по воздуху, м ³ /час	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Пылеуловитель ПВМ5КБ	5 000	3040x1536x3660	1620
Пылеуловитель ПВМ10КБ	10 000	3450x1500x4140	2550
Пылеуловитель ПВМ20КБ	20 000	4200x2114x4575	2835
Пылеуловитель ПВМ40КБ	40 000	6200x2204x5010	6200

Типоразмеры электрофильтров УГ

Тип электро- фильтров	Габариты, м					
	ширина	длина	высота	корпуса	оборудо- вания	общая
УГ1-2-10	5,19	9,6	12,31	23,8	19,0	42,8
УГ1-2-15	6,5	9,6	12,31	26,8	26,0	52,8
УГ1-3-10	5,19	14,1	12,31	35,4	29,0	64,4
УГ1-3-15	6,5	14,1	12,31	38,7	38,0	76,7
УГ2-3-26	6,54	14,1	15,38	50,2	49,0	99,2
УГ2-3-37	8,19	14,1	15,38	56,4	65,0	121,4
УГ2-3-53	10,72	14,1	15,38	82,1	94,0	176,1
УГ2-3-74	13,98	14,1	15,38	98,1	126,0	224,1
УГ2-4-26	6,54	18,6	15,38	64,6	65,0	129,6
УГ2-4-37	8,19	18,6	15,38	72,6	86,0	158,6
УГ2-4-53	10,72	18,6	15,38	105,4	125,0	230,4
УГ2-4-74	13,98	18,6	15,38	126,7	165,0	291,7
УГ3-3-88	11,27	18,8	21,75	140,6	175,0	315,6
УГ3-3-115	14,02	18,8	21,75	166,3	236,0	402,3
УГ3-3-177	20,1	18,8	21,75	221,2	343,0	564,2
УГ3-3-230	26,73	18,8	21,75	298,8	468,0	766,8
УГ3-3-265	29,95	18,8	21,75	339,8	525,0	864,8
УГ3-4-88	11,27	24,8	21,75	191,2	233,0	424,2
УГ3-4-115	14,02	24,8	21,75	218,1	314,0	532,1
УГ3-4-177	20,1	24,8	21,75	286,8	455,0	741,8
УГ3-4-230	26,73	24,8	21,75	387,3	622,0	1009,3
УГ3-4-265	29,95	24,8	21,75	452,4	698,0	1150,4

Примечание. Условное обозначение типоразмера электрофильтра:

- У – унифицированный;
- Г – с горизонтальным ходом газа;
- цифра после букв обозначает номер габаритной группы;
- следующая цифра – количество электрических полей;
- последние цифры – площадь активного сечения, м².

Технические характеристики электрофильтров ЭГА

Типоразмер электрофильтра	Площадь активного сечения, м ²	Площадь осаждения, м ²	Габаритные размеры, мм	Масса, т	
				общая	В том числе оборудования (не более)
Односекционные электрофильтры					
ЭГА1-10-6-4-2-330-5	16,5	634	9260x4890x12400	38,9	15,9
ЭГА1-10-6-4-3-330-5		952	13440x4890x12400	55,3	23,5
ЭГА1-10-6-6-2-330-5		952	11820x4920x13400	48,6	20,6
ЭГА1-10-6-6-3-330-5		1428	17280x4920x13400	69,8	30,6
ЭГА1-14-7,5-4-3-330-5	28,7	1656	13440x6120x13900	73,3	33,3
ЭГА1-14-7,5-4-4-330-5		2208	17620x6120x13900	95,2	44,2
ЭГА1-14-7,5-6-2-330-5		1656	11820x6190x14900	66,8	30
ЭГА1-14-7,5-6-3-330-5		2484	17280x6190x14900	95,9	44,6
ЭГА1-20-7,5-4-3-330-5	41	2366	13440x7920x15400	95,2	44,5
ЭГА1-20-7,5-4-4-330-5		3152	17620x7920x15400	124	58,9
ЭГА1-20-7,5-6-2-330-5		2366	11820x7990x15400	84,8	40,6
ЭГА1-20-7,5-6-3-330-5		3549	17280x7990x15400	121,3	60,3
ЭГА1-20-9-6-2-330-5	49	2826	11820x7990x16900	99	46,8
ЭГА1-20-9-6-3-330-5		4239	17280x7990x16900	142,1	69,6
ЭГА1-20-9-6-4-330-5		5652	22740x7990x16900	185,3	92,4
ЭГА1-30-7,5-4-3-330-5	61,4	3549	13440x10950x14900	139,9	65,5
ЭГА1-30-7,5-4-4-330-5		4732	17620x10950x14900	181,8	86,8
ЭГА1-30-7,5-6-2-330-5		3549	11820x10990x14900	122,5	59,8
ЭГА1-30-7,5-6-3-330-5		5322	17280x10990x14900	176,5	88,9
ЭГА1-30-9-6-2-330-5	73,4	4240	11820x10990x16400	139,8	69,2
ЭГА1-30-9-6-3-330-5		6360	17280x10990x16400	201,3	102,9
ЭГА1-30-9-6-4-330-5		8480	22740x10990x16400	262,7	136,6
ЭГА1-30-12-6-3-330-5	97,4	8433	17280x10990x19400	240,2	128
ЭГА1-30-12-6-4-330-5		11244	22740x10990x19400	313,5	170
ЭГА1-40-7,5-4-3-330-5	81,9	4731	13440x13920x15400	172,2	85,5
ЭГА1-40-7,5-4-4-330-5		6308	17620x13920x15400	223,8	113,4
ЭГА1-40-7,5-6-2-330-5		4731	11820x13990x15400	150	78,6
ЭГА1-40-7,5-6-3-330-5		7095	17280x13990x15400	217,3	117
ЭГА1-40-9-6-2-330-5	97,9	5652	11820x13990x16900	170,5	90,6
ЭГА1-40-9-6-3-330-5		8478	17280x13990x16900	244	134,8
ЭГА1-40-9-6-4-330-5		11304	22740x13990x16900	322,9	178

ЭГА1-40-12-6-3-330-5	129,8	11244	17280x13990x19900	296,5	166,6
ЭГА1-40-12-6-4-330-5		14992	22740x13990x19900	387,7	221,2
Двухсекционные электрофильтры					
ЭГА2-48-12-6-3-330-5	155,8	13494	17280x17540x19900	364,5	206,7
ЭГА2-48-12-6-4-330-5		17992	22740x17540x19900	476,4	274,5
ЭГА2-56-12-6-3-330-5	181,7	15738	17280x19940x19900	413,8	240,7
ЭГА2-56-12-6-4-330-5		20984	22740x19940x19900	544,4	319,6
ЭГА2-76-12-6-3-330-5	246,6	21360	17280x25940x19900	532,1	316,9
ЭГА2-76-12-6-4-330-5		28480	22740x25940x19900	696,2	420,8
ЭГА2-88-12-6-3-330-5	285,6	24732	17280x29540x19900	623,7	369,2
ЭГА2-88-12-6-4-330-5		32976	22740x29540x19900	817,3	490,4

Условное обозначение:

- Э – электрофильтр;
- Г – горизонтальный;
- А – модификации.

Цифры после букв:

- первая – количество секций;
- вторая – количество газовых проходов;
- третья – номинальная высота электродов (м);
- четвертая – количество элементов в осадительном электроде;
- пятая – количество электрических полей по длине электрофильтра;
- шестая – температура в электрофильтре (°С);
- седьмая – разрежение в электрофильтре (кПа);
- далее – дополнительные данные (тип бункеров и т. д.).

Технические характеристики электрофильтров ЭГАВ

Типоразмер электрофильтра	Производительность по очищаемому газу, м ³ /ч	Площадь осаждения, м ²	Площадь активного сечения, м ²	Энергетические затраты на очистку 1000 м ³ газа, кВт/ч
ЭГАВ1-10-4-4-4	38160	819,2	10,6	0,4-1,3
ЭГАВ1-10-4-6-3	38160	921,6	10,6	
ЭГАВ1-14-7,5-4-4	100170	2150,4	27,8	
ЭГАВ1-14-7,5-6-3	100170	2419,2	27,8	
ЭГАВ1-20-7,5-4-4	143100	3072,0	39,8	
ЭГАВ1-20-7,5-6-3	143100	3456,0	39,8	
ЭГАВ1-30-7,5-4-4	214650	4608,0	59,6	
ЭГАВ1-30-7,5-6-3	214650	5184,0	59,6	
ЭГАВ1-40-7,5-4-4	286200	6144,0	79,5	
ЭГАВ1-40-7,5-6-3	286200	6912,0	79,5	
ЭГАВ1-40-9-4-4	343440	7372,8	95,4	
ЭГАВ1-40-9-6-3	343440	8294,4	95,4	
ЭГАВ1-40-12-4-4	467280	9830,4	129,8	
ЭГАВ1-40-12-6-3	467280	11059,2	129,8	
ЭГАВ2-56-9-6-3	480816	11612,2	133,6	
ЭГАВ2-56-9-4-4	480816	10321,9	133,6	
ЭГАВ2-76-9-6-3	652536	15759,4	181,3	

Электрофильтр ЭГАВ:

Э – электрофильтр;

Г – горизонтальный;

А – модификация;

В – верхнее размещение механизмов встряхивания коронирующих электродов.

Цифры после букв:

- первая – количество секций;
- вторая – количество газовых проходов;
- третья – номинальная высота электродов (м);
- четвертая – количество элементов в осадительном электроде;
- пятая – количество электрических полей по длине электрофильтра.

Технические характеристики электрофильтров ЭГВ

Типоразмер электрофильтра	Производительность по очищаемому газу, м ³ /ч, не более	Активный объем, м ³	Площадь активного сечения, м ² , не менее	Площадь поверхности осаждения, м ² , не менее	Массовая концентрация пыли в очищаемом газе на входе, г/м ³ , не более	Гидравлическое сопротивление, кПа, кгс/м ²
Односекционные электрофильтры						
ЭГВ1-6-4-4-2 ЭГВ1-6-4-4-2А	38520	54,8	10,7	260	90	0,2(20)
ЭГВ1-6-4-4-3 ЭГВ1-6-4-4-3А		82,2		390		
ЭГВ1-6-4-6-3 ЭГВ1-6-4-6-3А		123,3		580		
ЭГВ1-6-6-4-2 ЭГВ1-6-6-4-2А	56880	80,9	15,8	380	90	0,2(20)
ЭГВ1-6-6-4-3 ЭГВ1-6-6-4-3А		121,3		570		
ЭГВ1-6-6-6-2 ЭГВ1-6-6-6-2А		121,3		570		
ЭГВ1-6-6-6-3 ЭГВ1-6-6-6-3А		182		860		
ЭГВ1-9-7,5-4-3 ЭГВ1-9-7,5-4-3А	106200	226,6	29,5	1060	90	0,2(20)
ЭГВ1-9-7,5-4-3У		302,1		1420		
ЭГВ1-9-7,5-4-4 ЭГВ1-9-7,5-4-4А						
ЭГВ1-9-7,5-4-4У		226,6		1060		
ЭГВ1-9-7,5-6-2 ЭГВ1-9-7,5-6-2А		339,8		1600		
ЭГВ1-9-7,5-6-3 ЭГВ1-9-7,5-6-3А		302,6 403,5		39,4		
ЭГВ1-12-7,5-4-3У ЭГВ1-12-7,5-4-4У	153360	327,2	46,2	1540	90	0,2(20)
ЭГВ1-13-7,5-4-3 ЭГВ1-13-7,5-4-3А		436,2		2050		
ЭГВ1-13-7,5-4-4 ЭГВ1-13-7,5-4-4А		327,2		1540		
ЭГВ1-13-7,5-6-2 ЭГВ1-13-7,5-6-2А		490,8		2310		
ЭГВ1-13-7,5-6-3 ЭГВ1-13-7,5-6-3А	183240	390,9	50,9	1840	90	0,2(20)
ЭГВ1-13-9-6-2 ЭГВ1-13-9-6-2А		586,4		2760		
ЭГВ1-13-9-6-3 ЭГВ1-13-9-6-3А		781,8		3670		
ЭГВ1-13-9-6-4 ЭГВ1-13-9-6-4А						

ЭГВ1-15-9-5-3	211680	1129	58,8	5300	90	0,2(20)
ЭГВ1-18-7,5-4-3У ЭГВ1-18-7,5-4-4У	212400	453,1 604,2	59	2130 2840	90	0,2(20)
ЭГВ1-19-7,5-4-3 ЭГВ1-19-7,5-4-3А	224280	478,5	62,3	2250	90	0,2(20)
ЭГВ1-19-7,5-4-4 ЭГВ 1-19-7,5-4-4А		638		3000		
ЭГВ1-19-7,5-6-2 ЭГВ1-19-7,5-6-2А		478,5		2250		
ЭГВ1-19-7,5-6-3 ЭГВ 1-19-7,5-6-3А		717,7		3370		
ЭГВ1-19-9-6-2 ЭГВ1-19-9-6-2А	268200	572,2	74,5	2680	90	0,2(20)
ЭГВ1-19-9-6-3 ЭГВ1-19-9-6-3А		858,2		4030		
ЭГВ1-19-9-6-4 ЭГВ1-19-9-6-4А		1144,3		5370		
ЭГВ1-19-12-6-3А	355680	1138,2	98,8	5340	90	0,2(20)
ЭГВ1-19-12-6-4А		1517,6		7120		
ЭГВ1-23-7,5-5-3	271440	724,4	75,4	3400	90	0,2(20)
ЭГВ1-25-7,5-4-3У ЭГВ1-25-7,5-4-4У	295200	629,8 839,7	82	2960 3940	90	0,2(20)
ЭГВ1-25-9-4-3	352800	1505,3	98	7070	90	0,2(20)
ЭГВ1-25-12-6-3У ЭГВ1-25-12-6-4У	467640	1496,4 1995,3	129,9	7030 9370	90	0,2(20)
ЭГВ1-26-7,5-4-3 ЭГВ1-26-7,5-4-3А	307080	655,1	85,3	3070	90	0,2(20)
ЭГВ1-26-7,5-4-4 ЭГВ1 -26-7,5-4-4А		873,5		4100		
ЭГВ1-26-7,5-6-2 ЭГВ1-26-7,5-6-2А		655,1		3070		
ЭГВ1-26-7,5-6-3 ЭГВ 1 -26-7,5-6-3А		982,7		4610		
ЭГВ1-26-9-6-2 ЭГВ1-26-9-6-2А	366840	782,6	101,9	3670	90	0,2(20)
ЭГВ1-26-9-6-3 ЭГВ1-26-9-6-3А		1173,9		5510		
ЭГВ1-26-9-6-4 ЭГВ1-26-9-6-4А		15652		7350		
ЭГВ1-26-12-6-3 ЭГВ 1-26-12-6-3А	486360	1556,4	135,1	7310	90	0,2(20)
ЭГВ1-26-12-6-4 ЭГВ 1-26-12-6-4А		2075,1		9740		
ЭГВ1-26-12-6-5		2594		12180		

ЭГВ1-26-12-6-6	486360	3112,8	135,1	14620	90	0,2(20)
ЭГВ1-26-12-6-7		3631,6		17060		
ЭГВ1-26-12-6-8		4150,2		19490		
Двухсекционные электрофильтры						
ЭГВ2-30-9-6-3 ЭГВ2-30-9-6-3А	423360	1354,8	117,6	6360	90	0,2(20)
ЭГВ2-30-9-6-4 ЭГВ2-30-9-6-4А		1806,3		8480		
ЭГВ2-30-9-6-5		2257,9		10600		
ЭГВ2-30-12-6-3 ЭГВ2-30-12-6-3А	561240	1796	155,9	8430	90	0,2(20)
ЭГВ2-30-12-6-4 ЭГВ2-30-12-6-4А		2394,6		11240		
ЭГВ2-30-12-6-5		2993,3		14050		
ЭГВ2-32-12-6-4	598680	2554,9	166,3	11990	90	0,2(20)
ЭГВ2-32-12-6-5		3193,6		14990		
ЭГВ2-32-12-6-6		3832,4		17990		
ЭГВ2-32-12-6-7		4471,1		20990		
ЭГВ2-32-12-6-8		5109,8		23980		
ЭГВ2-36-12-6-3А ЭГВ2-36-12-6-4А	673560	2155,2 2874	187,1	10120 13490	90	0,2(20)
ЭГВ2-38-9-6-3	536040	1715,3	148,9	8050	90	0,2(20)
ЭГВ2-38-9-6-4		2287,1		10740		
ЭГВ2-38-9-6-5		2858,9		13420		
ЭГВ2-38-12-6-3	711000	2275,2	197,5	10680	90	0,2(20)
ЭГВ2-38-12-6-3У		2274,7		14240		
ЭГВ2-38-12-6-4		3033,6				
ЭГВ2-38-12-6-4У		3033		17800		
ЭГВ2-38-12-6-5		3792		21360		
ЭГВ2-38-12-6-6		4550,4		24920		
ЭГВ2-38-12-6-7		5308,8				

ЭГВ2-44-9-6-3	620640	1986	172,4	9330	90	0,2(20)
ЭГВ2-44-9-6-4		2648,1		12440		
ЭГВ2-44-9-6-5		3310,1		15540		
ЭГВ2-48-12-6-3А ЭГВ2-48-12-6-4А	897840	2874 3831,6	249,4	13490 17990	90	0,2(20)
ЭГВ2-50-12-6-3У	935640	2994	259,9	14050	90	0,2(20)
ЭГВ2-50-12-6-4У		3992,1		18740		
ЭГВ2-50-12-6-5		4990,1		23420		
ЭГВ2-50-12-6-6		5988		28100		
ЭГВ2-56-12-6-3У	1047600	3352,3	291	15740	90	0,2(20)
ЭГВ2-56-12-6-4А		4469,8		20990		
ЭГВ2-56-12-6-5		5587,2		26230		
ЭГВ2-56-12-6-6		6704,6		31480		
ЭГВ2-56-12-6-7		7822,1		36730		
ЭГВ2-56-12-6-8		8939,6		41980		
ЭГВ2-70-12-6-6	1309680	8381,4	363,8	39340	90	0,2(20)
ЭГВ2-70-12-6-7		9778,3		45900		
ЭГВ2-70-12-6-8		11175,2		52460		

Цифры после букв:

- первая – количество секций;
- вторая – количество газовых проходов;
- третья – номинальная высота электродов (м);
- четвертая – количество элементов в осадительном электроде;
- пятая – количество электрических полей по длине электрофильтра;
- А и У – означают, что комплект механического оборудования электрофильтра типа ЭГВ может быть установлен в корпусе электрофильтра соответственно ЭГА и УГ при их реконструкции.