Библиотека СОК

В.Б. Пономарев

А.Е. Замураев

«АСПИРАЦИЯ И ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ И СБРОСОВ»

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет–УПИ»

В.Б. Пономарев
А.Е. Замураев

«АСПИРАЦИЯ И ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ И СБРОСОВ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО КУРСУ «МАШИНЫ И АГРЕГАТЫ ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

Научный редактор – проф., канд. техн. наук В.Я.Дзюзер

Екатеринбург
2007

УДК 666.9.001.575 (042.4)
ББК 35.41в6
П 56
Рецензенты:

Пономарев В.Б.
П56 Аспирация и очистка промышленных выбросов и сбросов: методические указания по курсу «машины и агрегаты предприятий строительных материалов» / В.Б. Пономарев, А.Е. Замураев. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2007. 44 с.
ISBN

Методические указания разработаны в соответствии с учебным планом специальности 270101 – Механическое оборудование и технологические комплексы предприятий строительных материалов, изделий и конструкций для студентов очной и заочной форм обучения, а также рекомендованы для специальностей:
240304 – Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов;
270106 – Производство строительных материалов, изделий и конструкций.

Библиогр.: 20 назв. Рис. 59. Табл. 39.

УДК 666.9.001.575 (042.4)
ББК 35.41в6
ISBN
© ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет–УПИ», 2007
© В.Б. Пономарев, А.Е. Замураев, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ …… 4
2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ…….11
3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ…… 31
3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ГАЗА……..….. 31
3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛИ……. 42
3.3 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ ……. 52
4. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ ДВИЖЕНИЮ ЧАСТИЦ …….. 55
5. АСПИРАЦИЯ И ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ВОЗДУХА…….. 66
6. МЕТОДЫ ПЫЛЕОЧИСТКИ……. 81
6.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ……..…… . 81
6.2 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ……. 84
7. СУХИЕ ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩИЕ АППАРАТЫ……..…. 90
7.1. ПЫЛЕОСАДИТЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ…… . 90
7.2. ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕВЫЕ КАМЕРЫ…… . 100
7.3. ЖАЛЮЗИЙНЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ…… . 102
7.4. ЦИКЛОНЫ…….. 116
7.5. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ЦИКЛОНОВ…….. 143
7.6. СПИРАЛЬНЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ…… . 147
7.7. ПОРИСТЫЕ ФИЛЬТРЫ……. 149
7.8. ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ……. 167
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ…… . 186

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

До определенного этапа развития человеческого общества, в частности индустрии, в природе существовало экологическое равновесие, т.е. деятельность человека не нарушала основных природных процессов или очень незначительно влияла на них. Экологическое равновесие в природе с сохранением естественных экологических систем существовало миллионы лет, и после появления человека на Земле. Так продолжалось до конца XIX в. Двадцатый век вошел в историю как век небывалого технического прогресса, бурного развития науки, промышленности, энергетики, сельского хозяйства. Одновременно как сопровождающий фактор росло и продолжает расти вредное воздействие индустриальной деятельности человека на окружающую среду. В результате происходит в значительной мере непредсказуемое изменение экосистем и всего облика планеты Земля.

Атмосфера всегда содержит определенное количество примесей, поступающих от естественных и антропогенных источников. К числу примесей, выделяемых *естественными* источниками, относятся: пыль (растительного, вулканического, космического происхождения, возникающая при эрозии почвы, частицы морской соли); туман, дымы и газы от лесных и степных пожаров; газы вулканического происхождения; различные продукты растительного, животного и микробиологического происхождения и др.

Уровень загрязнения атмосферы естественными источниками является фоновым и мало изменяется с течением времени.

Антропогенное воздействие может быть различным по своему составу и зависит от типа предприятия (например, машиностроительное, химическое, торфяное, энергетическое). Масштабы антропогенного загрязнения также зависит от мощности предприятия, их количества и сосредоточенности в рассматриваемом регионе. Основными источниками этих загрязнений является энергетика, промышленность, транспорт, сельское хозяйство и другие виды хозяйственной деятельности человека. Среди отраслей промышленности наибольшее

количество загрязнений дает горнодобывающая, металлургическая, химическая промышленность, меньшее – машиностроительная и приборостроительная.

Самыми распространенными токсичными веществами, загрязняющими атмосферу, являются: оксид углерода CO, диоксид серы SO ,оксид азота NO_x, углеводороды C_nH_m, аэрозоли и пыль.

Твердые частицы в дисперсных системах могут образоваться в результате процессов измельчения, конденсации и различных химических реакций. Под воздействием газовых или воздушных потоков они переходят во взвешенное состояние и при определенных условиях образуют то, что принято называть пылью или аэрозолью.

Аэрозоль [5] представляет собой дисперсную систему с газообразной дисперсионной средой и дисперсной фазой, состоящей из твердых и жидких частиц, которые могут находиться во взвешенном состоянии неопределенно долгое время. Скорость оседания частиц аэрозоля весьма незначительна. Наиболее тонкие аэрозольные частицы по размерам приближаются к крупным молекулам, а наиболее крупные достигают 0,2 – 1,0 мкм. Понятие грубый аэрозоль с твердой дисперсной фазой часто отождествляют с пылью.

По характеру образования различают диспергационные и конденсационные аэрозоли.

Диспергационные аэрозоли возникают:

а) при разбрызгивании жидкостей – таковы, например, водяные туманы, образующиеся в форсунках скрубберов;

б) при измельчении твёрдых тел и взмучивании порошков, например, в камнедробилках, мельницах при подготовке шлакообразующих смесей.

Конденсационные аэрозоли появляются при конденсации паров, например, при выплавке металлов пары их сгорают, а продукты горения конденсируются с образованием дыма, состоящего из твердых частиц металлических окислов. Примерно так же образуется дым при горении топлива в печах.

Пыль [13] – это дисперсная малоустойчивая система, содержащая больше крупных частиц, чем аэрозоли с размером частиц примерно от 1 до 100 мкм.

Неорганическая пыль в промышленных газовых выбросах образуется при горных разработках, переработке руд, металлов, минеральных солей и удобрений, строительных материалов, карбидов и других неорганических веществ.

Промышленная пыль *органического* происхождения – это, например, угольная, древесная, торфяная и др.

К **дымам** относятся аэродисперсные системы с малой скоростью осаждения под действием силы тяжести. Дымы образуются при сжигании топлива, а также в результате химических реакций, например при взаимодействии аммиака и хлороводорода, при окислении паров металлов в электрической дуге и т.д. Размеры частиц в дымах много меньше, чем в пыли, и составляют от 5 мкм до субмикронных размеров, т.е. менее 0,1 мкм.

Туманы состоят из капелек жидкости, образующихся при конденсации паров или распылении жидкости. В промышленных выхлопах туманы образуются главным образом из кислоты: серной, фосфорной и др.

В числовом виде выбросы в атмосферу предприятий и транспортных средств ежегодно по всему миру составляют 10 млрд.т газов и пыли и столько же сажи, а в водоемы, реки и озера > 500 млрд.куб.м загрязняющих стоков.

В настоящее время, когда безотходная технология находится в периоде становления, и полностью безотходных предприятий еще нет, основной задачей газоочистки служит доведение содержания токсичных примесей в газовых примесях до предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных санитарными нормами. В табл. 1.1 выборочно приведены ПДК некоторых атмосферных загрязнителей.

При содержании в воздухе нескольких токсичных соединений их суммарная концентрация не должна превышать 1, т.е.

$$c_1/ПДК_1 + c_2/ПДК_2 + ... + c_n/ПДК_n = 1$$

где c_1, c_2, …, c_n – фактическая концентрация загрязнителей в воздухе, мг/м^3;

$ПДК_1$, $ПДК_2$, ..., $ПДК_n$ – предельно допустимая концентрация, мг/м^3.

ПДК некоторых веществ. Таблица 1.1

ВЕЩЕСТВА	ПДК, мг/м^3	
	Максимально разовая	Средне суточная
Оксид углерода (CO)	3,0	1,0
Оксиды азота (в пересчете на N_2O_5)	0,085	0,085
Оксиды фосфора (в пересчете на P_2O_5)	0,15	0,05
Свинец	–	0,0007
Серы диоксид SO_2	0,5	0,05
Фенол	0,01	0,01
Формальдегид	0,035	0,012

При невозможности достигнуть ПДК очисткой иногда применяют многократное разбавление токсичных веществ или выброс газов через высокие дымовые трубы для рассеивания примесей в верхних слоях атмосферы.

При проведении расчетов высоты трубы стремятся к тому, чтобы максимальная приземная концентрация не превышала максимальной разовой ПДК.

Согласно [8] при неблагоприятных метеорологических условиях можно определить максимально приземную концентрацию как

$$C_M = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V\Delta T}} \qquad (1.1)$$

где A – параметр, характеризующий переносные свойства атмосферы. На территории СНГ значения A для различных районов изменяются в диапазоне 140 – 250 с$^{2/3}$ мг/К$^{1/3}$г;

M – интенсивность источника примеси, г/с;

$V = \frac{\pi D_0^2 w_0}{4}$ – объемный расход газовоздушной смеси, м^3/с;

w_0 – скорость истечения, м/с;

$\Delta T = T_0 - T_{ат}$ – разность температур газовоздушной смеси на выходе из трубы и атмосферного воздуха, К;

D_0 – диаметр устья трубы, м;

H – высота трубы, м.

F – безразмерный множитель, учитывающий оседание загрязнителя в атмосфере. Для газообразных веществ и мелкодисперсных аэрозолей, скорость оседания которых практически равна нулю, $F = 1$; для иных аэрозолей $F = 2$ при степени очистки выбросов ε не менее 90%; $F = 2,5$ при $\varepsilon = 75 - 90\%$ и $F = 3$ при $\varepsilon < 75\%$.;

η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа. В случае ровной местности или местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, $\eta = 1$;

m и n – коэффициенты, значения которых зависят от параметров

$$V_м = 0,65\sqrt{\frac{V\Delta T}{H}}, \text{ м/с},$$

$$f = 1000\frac{w_0^2 D_0}{H^2 \Delta T}, \text{ м/с}^2\text{К},$$

характеризующих условия истечения газовоздушной смеси, и находятся по графикам на рис.1.1, 1.2.

Для маломощных слабо нагретых (холодных) выбросов, к которым относится большинство вентиляционных выбросов, расчет максимальной приземной концентрации при "опасной" скорости ветра ведется по формуле

$$C_M = \frac{AMFn\eta D_0}{8H^{4/3}V}, \qquad (1.2)$$

где m – параметр, определяемый по графику (рис. 1.1).

Значение безразмерного множителя n также определяется по рис.1.2, но параметр V_M вычисляется по формуле $V_M = 1{,}3\frac{w_0 D_0}{H}$

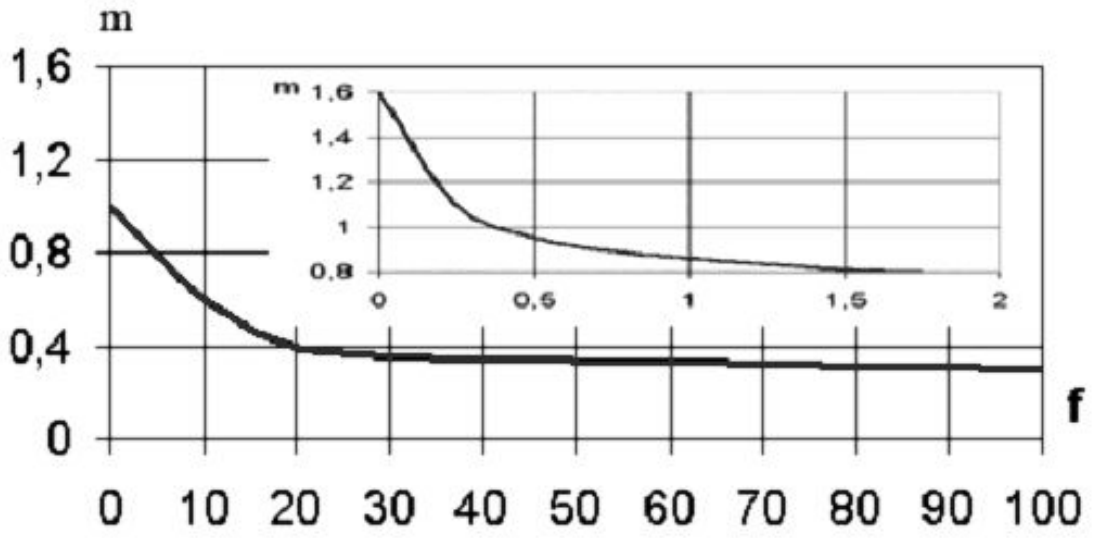


Рис. 1.1 Определение коэффициента m

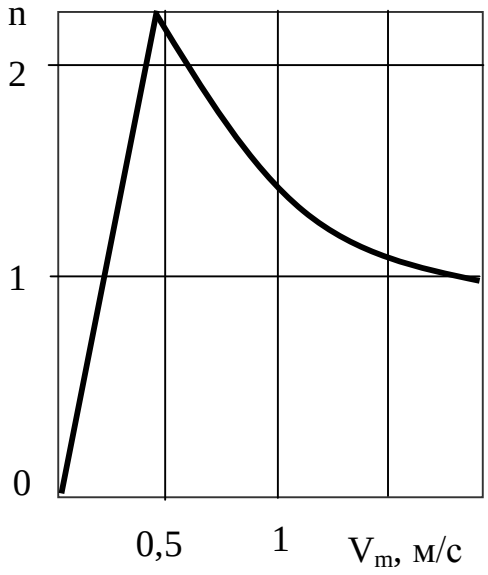


Рис. 1.2 Определение коэффициента n

В конечном итоге можно определить высоту выброса H, если известны интенсивность источника примеси и условия истечения газовоздушной смеси. Полагая $C_м$ = ПДК, получаем: для $\Delta T > 0$ – нагретые выбросы

$$H = \sqrt{\frac{AMFmn\eta}{ПДК \cdot V^{1/3} \Delta T^{1/3}}}, \qquad (1.3)$$

для $\Delta T < 0$ – холодные выбросы

$$H = \left(\frac{AMFD_0 n\eta}{8V \cdot ПДК} \right)^{3/4}. \qquad (1.4)$$

Поскольку значения коэффициентов m и n зависят от H, задача решается путем последовательных приближений, то есть подбором ищутся значения H, при которых уравнения (1.3), (1.4) будут удовлетворяться.

Предельно допустимые выбросы (ПДВ) в атмосферу также могут быть рассчитаны с помощью уравнений (1.1), (1.2). Полагая в них $C_м$ = ПДК, M = ПДВ, находим для нагретых выбросов

$$ПДВ = \frac{ПДК \cdot H^2}{AFmn\eta} \sqrt[3]{V\Delta T},$$

для холодных выбросов

$$ПДВ = \frac{ПДК \cdot H^{4/3}}{AFn\eta} \frac{8V}{D_0}.$$

Напомним, что в формулах фигурирует максимально разовое значение ПДК.

Метод достижения ПДК с помощью «высоких труб» не предохраняет ат-

мосферу, а лишь переносит загрязнения из одного района в другие. Поэтому очистка выбросов источников загрязнения атмосферы, является наиболее актуальным методом защиты окружающей среды.

Современные промышленные выбросы состоят на 90% из газообразных веществ и на 10% из аэрозолей. Таким образом, они подвергаются очистке от пыли, а затем от газов. В первом случае применяются пылеулавливающие аппараты, а во втором случае – довольно сложные газоулавливающие установки, в которых используются соответствующие методы очистки.

В настоящее время в мире в атмосферу ежегодно попадает около 25 млрд.т только двуокиси углерода (в том числе в России – 1,6 млрд.т).

Снижение выбросов до предельно допустимых норм (ПДВ) можно осуществить путем внедрения новых и интенсификации существующих технологических процессов очистки.

2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ

Свойства пылегазового потока зависят от метода переработки сырьевых материалов. Например, пыли механических процессов состоят из частиц размеров 5 – 50 мкм и более, взвеси, образующиеся от термических и химических процессов, состоят из частиц размером до 3 мкм. Очень мелкие частицы во многих случаях могут соединяться в более крупные хлопьевидные частицы. Такое явление укрупнения частиц называется **коагуляцией**.

Химический состав. По химическому составу пыли судят о ее токсичности, выбирают сухой или мокрый способ очистки. Если пыль содержит компоненты, способные образовывать с водой или другой жидкостью соединения, которые при оседании на стенках аппаратов и газоходов трудно удалить, применять мокрый способ очистки нельзя. При наличии в составе пыли оксидов кремния и аналогичных им соединений принимают меры по защите аппаратов и газоходов от механического истирания.

Абразивность. Сыпучие материалы, истирающие стенки аппаратов и бункеров, называют абразивными. К ним относятся апатитовый концентрат, боксит, бура, зола, кокс, окиси алюминия и кремния, руда, формовочная земля, цемент и др. Умеренно абразивными являются каменный уголь, зерно.

С учетом абразивности частиц выбирают скорости движения дисперсных потоков в каналах, материалы, толщину стенок, формы конструктивных элементов и фасонных частей очистного оборудования и газоходов, типы тягодутьевых установок.

Хрупкость. К хрупким относятся сыпучие материалы, частицы которых легко подвергаются разрушению (дроблению) в процессе перемещения, погрузки и выгрузки. Хрупкими материалами являются кокс, антрацит, семенное зерно и т. п.

Коррозийность. Влажные порошки (зола, песок), а также некоторые сухие, химически взаимодействующие с материалом стенок аппаратов и бункеров (селитра аммиачная, солод, соль поваренная и т. п.), вызывающие коррозию их стенок, называют коррозийными.

Воспламеняемость и взрывоопасность. Чем меньше размеры и пористее структура частиц, тем больше их удельная поверхность и выше физическая и химическая активность пыли. Окисление частиц пыли сопровождается повышением температуры. Поэтому в местах скопления пыли возможны ее самовоспламенение и взрыв. По степени пожаро – и взрывоопасности пыли делят на две группы и четыре класса:

- группа А – взрывоопасные пыли с нижним концентрационным пределом взрываемости до 65 г/м^3:
  - I класс пыли – нижний предел взрываемости до 15 г/м^3;
  - II класс – предел взрываемости от 15 г/м^3 до 65 г/м^3;
- группа Б – нижний концентрационный предел взрываемости выше 65 г/м^3;
  - III класс – температура воспламенения до 250 ^{0}С;
  - IV класс – температура воспламенения выше 250 ^{0}С.

Взрыв взвешенной в воздухе пыли – это резкое увеличение давления в ре-

зультате очень быстрого сгорания ее частиц. Первичный взрыв возникает при небольших скоплениях пыли вблизи источников воспламенения. Взрывная волна и вибрация от первичного взрыва могут поднять в воздух крупные скопления пыли и тем самым вызвать вторичный взрыв значительно большей силы.

Минимальные взрывоопасные концентрации взвешенной в воздухе пыли 20 – 500 г/м^3 , максимальные около 700 – 8000 г/м^3.

Самовозгораемость – свойство некоторых насыпных материалов загораться под действием тепла, выделяющегося при протекании в них химических процессов. К самовозгорающимся материалам относятся влажный уголь, опилки, стружки и щепки древесные, карбид кальция, сера, промасленные металлические опилки и т. п.

В свою очередь промышленные производства по степени взрывопожароопасности разделены на 6 категорий.

1. Производства, использующие вещества и материалы в виде газов с нижним концентрационным пределом взрываемости 10 % и менее от объема воздуха в газовоздушной смеси, жидкости с температурой вспышки паров до 28^0 С включительно, если количества указанных газов и (или) жидкостей достаточно для образования взрывоопасных смесей в объеме, превышающем 5 % объема воздуха в помещении, а также вещества, способные взрываться и (или) гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и(или) одно с другим, относят к категории А – взрывопожароопасной.

2. Производства, использующие в качестве веществ и материалов газы с нижним концентрационным пределом взрываемости более 10 %, жидкости с температурой вспышки паров от 28^0 С до 61^0 С включительно, жидкости, нагретые по условиям технологии до температуры вспышки и выше, пыли и волокна с нижним концентрационным пределом взрываемости 65 г/м^3 и менее, если количества перечисленных веществ достаточно для образования взрывоопасных смесей в объеме, превышающем 5 % объема воздуха в помещении, относят к категории Б – взрывоопасной.

3. Производства, использующие в качестве веществ и материалов жидко-

сти с температурой вспышки паров выше 61^0 С, пыли или волокна с нижним концентрационным пределом взрываемости более 65 г/м^3 , твердые сгораемые вещества и материалы, а также вещества, способные гореть, не взрываясь, при взаимодействии с водой, кислородом и (или) одно с другим, относят к категории В – пожароопасной.

4. Производства, использующие в качестве веществ и материалов несгораемые вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и (или) пламени, а также твердые вещества, жидкости и газы, которые используются или утилизируются в качестве топлива, относят к категории Г.

5. Производства, имеющие несгораемые вещества и материалы в холодном состоянии относят к категории Д.

6. Производства, имеющие в качестве веществ и материалов горючие газы, не имеющие жидкой фазы, и (или) взрывоопасные пыли в количестве, достаточном для образования взрывоопасных смесей в объеме, превышающем 5% объема воздуха в помещении, если в нем по условиям технологического процесса возможен только взрыв без последующего горения, а также вещества, способные взрываться без последующего горения при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и (или) одно с другим, относят к категории Е – взрывоопасной.

Смачиваемость пыли. Характеризует ее способность смачиваться водой. Чем меньше размер частиц пыли, тем меньше их способность смачиваться. Смачиваемость пыли зависит и от ее химического состава. Смоченные частицы лучше отделяются от газа в аппаратах газоочистки. Смачиваемость определяют путем измерения доли смоченного и погрузившегося на дно сосуда порошка, насыпанного тонким слоем на поверхность воды. Разделяют на три группы:

- гидрофобная (плохо смачиваемая менее 30 %);
- умеренно смачиваемая (30 – 80 %);
- гидрофильная (хорошо смачиваемая).

Гигроскопичность. Пыли, склонные впитывать атмосферную влагу (соль поваренная, селитра аммиачная, опилки сухие древесный, сульфат натрия технический, суперфосфат и др.), носят название гигроскопических.

Влажность порошка определяется просушиванием при температуре около 105^0 С с периодическим взвешиванием пробы Просушивание продолжается до тех пор, пока не наступит постоянство массы.

Влажность w находят по формуле

$$w = (M_1 – M_2) / M_2,$$

где M_1, M_2 – масса порции до просушивания и после просушивания.

Влага, удаляемая при просушивании, состоит из внутренней, впитываемой частицами пыли из окружающей атмосферы (гигроскопическая влага), и внешней, покрывающей частицы в виде пленок (пленочная или молекулярная влага) и заполняющей поры между частицами (гравитационная, или свободная, влага).

Объемной массой (плотностью) сыпучего материала называется масса вещества, содержащегося в единице объема, занимаемого этим материалом. При свободной насыпке объемную массу определяют с помощью мерного сосуда 1 (рис. 2.1) со штырем, вокруг которого может поворачиваться рамка 3. Высота сосуда равна двум его внутренним диаметрам, а высота рамки – 1/3. высоты сосуда. При определении объемной массы сыпучих материалов диаметр сосуда должен не менее чем в 10 раз превышать размер типичных кусков материала. Поворотную раму устанавливают так, чтобы ее стенки являлись продолжением стенок сосуда; затем в сосуд насыпают материал до верха рамки, которая, поворачиваясь вокруг штыря, срезает излишек порошка. Оставшийся в сосуде материал взвешивают и определяют объемную массу по формуле

$$\rho_н = M_1/ V_1,$$

где M_1 – масса порошка в сосуде, кг;

V_1 – объем сосуда, $м^3$.

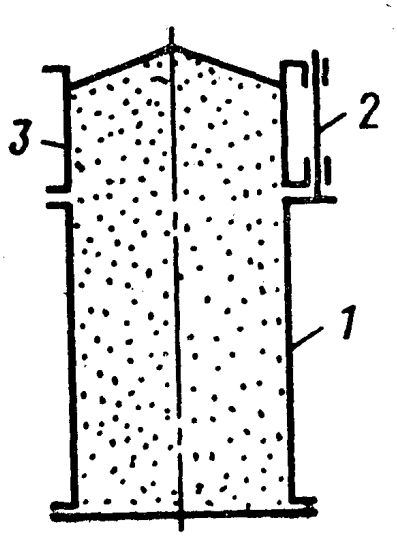


Рис. 2.1. Мерный сосуд

Истинной плотностью сыпучего материала называется средняя плотность (удельная масса) его твердых частиц. Для определения плотности взвешивают порцию насыпного материала и смешивают ее с определенным объемом жидкости, смачивающей, но не растворяющей материал. Затем находят объем полученной суспензии. Плотность определяют по формуле

$$\rho_м = \frac{M_{гр}}{V_с - V_ж},$$

где $M_{гр}$ – масса порции порошка, кг;

$V_с$ – объем суспензии, м^3;

$V_ж$ – объем жидкости, м^3.

Истинная плотность пыли обусловлена химическим составом материала, из которого она образована. Насыпная плотность в отличие от истинной учитывает наличие воздушных зазоров между отдельными частицами и изменяется в зависимости от способа заполнения (уплотнения) пыли в заданном объеме. Для крупной пыли насыпная плотность примерно в 2,5 раза меньше истинной плотности, а для мелкой пыли в 20 раз. Чем больше плотность частицы пыли, тем

лучше они осаждаются в аппаратах пылеулавливания.

Адгезионные свойства частиц. Эти свойства частиц определяют их склонность к слипаемости. Повышенная слипаемость частиц может привести к частичному или полному забиванию аппаратов.

Чем меньше размер частиц пыли, тем легче они прилипают к поверхности аппарата. Пыли, у которых 60 – 70 % частиц имеют диаметр меньше 10 мкм, ведут себя как слипающиеся, хотя те же пыли с размером частиц более 10 мкм обладают хорошей сыпучестью.

По слипаемости пыли делятся на 4 группы (табл. 2.1).

Характеристика слипаемости пыли Таблица 2.1

Характеристика пыли	Вид пыли
Неслипающаяся	Сухая шлаковая, кварцевая; сухая глина
Слабослипающаяся	Коксовая; магнезитовая сухая; апатитовая сухая; доменная; колошниковая летучая зола, содержащая много несгоревших продуктов; сланцевая зола
Среднеслипающаяся	Торфяная, влажная магнезитовая; металлическая, содержащая колчедан, оксиды свинца, цинка и олова, сухой цемент; летучая зола без недожига; торфяная зола; сажа, сухое молоко; мука, опилки
Сильнослипающаяся	Цементная; выделенная из влажного воздуха; гипсовая и алебастровая; содержащая нитрофоску, двойной суперфосфат, клинкер, соли натрия; волокнистая (асбест, хлопок, шерсть)

Со слипаемостью тесно связана другая характеристика пыли – ее сыпучесть. Сыпучесть пыли оценивается по углу естественного откоса, который принимает пыль в свеженасыпанном состоянии.

Угол естественного откоса пыли представляет собой угол обрушения пыли в процессе или после наполнения пылью бункеров аппаратов газоочистки. Его отсчитывают между горизонтальной плоскостью и образующей конуса,

получаемого при насыпании пыли на плоскость. По углу естественного откоса делают угол наклона бункеров пылеуловителей.

Различают статический и динамический углы откоса.

Метод измерения **статического** угла откоса заключается в измерении угла наклона поверхности материала, образовавшегося в результате обрушения слоя частиц при удалении подпорной стенки (рис. 2.2).

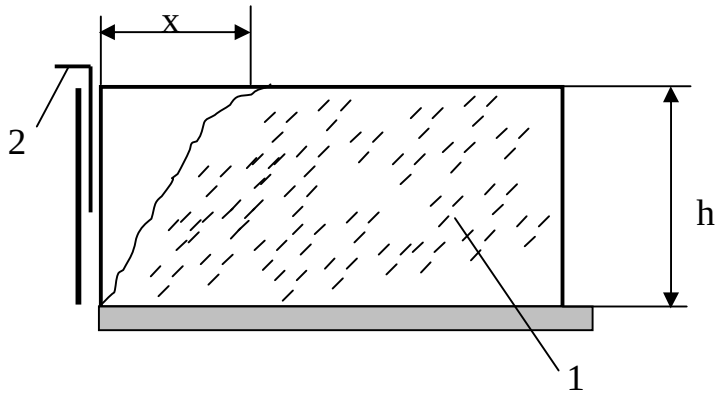


Рис. 2.2. Измерение статического угла естественного откоса:
1 – стеклянный сосуд, 2 – съемная стенка.

Измерительный сосуд выполнен из стекла, одна из торцевых стенок – съемная. Сосуд заполняется исследуемым сыпучим материалом, излишек которого удаляют линейкой вровень с кромками сосуда. Открывают съемную стенку, замеряют с точностью до 0,5 мм величины x , h. Статический угол подсчитывают по формуле

$$\alpha_{\text{стат}} = \operatorname{arctg}\left(\frac{h}{x}\right).$$

Проводиться не менее 6 параллельных опытов с подсчетом среднеарифметического.

Метод измерения **динамического** угла откоса заключается в непосредственном измерении угла, под которым располагается наружная поверхность зернистого материала при падении частиц на плоскую поверхность (рис. 2.3).

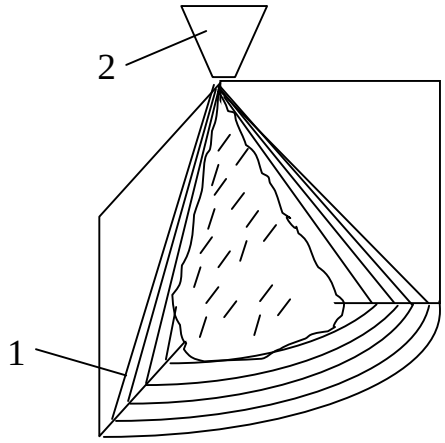


Рис. 2.3. Определение динамического угла естественного откоса:
1 – угломерная шкала, 2 – воронка.

Устройство представляет собой угол с тремя плоскостями, на которых нанесены угломерные шкалы. Материал высыпается из воронки до тех пор, пока вершина высыпаемого порошка не достигнет вершины угломерного устройства.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС). Величина УЭС слоя пыли на электродах электрофильтра является одним из важных факторов, влияющих на эффективность работы электрофильтров.

В большинстве случаев взвешенные частицы обладают положительным или отрицательным электрическим зарядом. Пыли заряжаются в процессе дробления или распыления материала, при трении, движении через раскаленную среду. Этот естественный электрический заряд взвешенных частиц условно называется **трибозарядом**.

Ядовитость. Кроме ядовитых пылей (свинцовые белила, мышьяковистокислый калий, соли мышьяка и порошкообразный мышьяк, фтористый натрий, семена клещевины и др.), к вредным для здоровья рабочих, обслуживающих пылеулавливающие устройства, относятся пылящие грузы, способные вызывать заболевания глаз, органов дыхания и нервной системы (известь хлорная, криолит пылевидный, цемент и т. п.).

Эти пыли называют **токсичными**.

Глубина проникновения частиц пыли в органы дыхания человека зависит от величины частиц. Особенно опасны в этом отношении туманы.

Если относительно крупные пылинки при вдыхании в большой степени задерживаются в верхних дыхательных путях и постепенно удаляются оттуда со слизью, то мелкая пыль проходит в легкие и оседает там, на длительный срок. Постепенно вокруг каждой пылинки разрастается соединительная ткань, которая не способна воспринимать кислород из вдыхаемого воздуха. Соединительная ткань постепенно замещает легочную, снижая, таким образом, основную функцию легких.

Под названием «пневмокониозы» (от греч. pneumon – легкие, konis – пыль) объединяют ряд заболеваний, обусловленных попаданием в легкие большого количества пылевых частиц в течение длительного времени.

Наиболее опасной является пыль, содержащая свободную двуокись кремния, в частности в виде мелких кристаллов, т. е. частиц кварца.

Наиболее опасна мелкодисперсная пыль, состоящая из частиц диаметром 0,5 – 7 мкм. Концентрация пыли определяется в миллиграммах на кубический метр воздуха. В соответствии с существующими санитарными правилами предельно допустимая концентрация (ПДК) фиброгенной пыли колеблется от 1 до 10 мг в 1 $м^3$ в зависимости от содержания в ней свободной двуокиси кремния.

По воздействию на человеческий организм промышленные загрязнители разделяют на 4 класса опасности:

I. чрезвычайно опасные, с летальной (среднесмертельной) дозой $ЛД_{50}$ введенной в желудок, менее 15 мг на 1 кг живого веса;

II. высокоопасные, с $ЛД_{50}$ = 15...150 мг/кг;

III. умеренно опасные, с $ЛД_{50}$ = 150...5000 мг/кг;

IV. малоопасные, с $ЛД_{50}$ > 5000 мг/кг.

В какой–то мере дает представление об опасности загрязнителя и величина предельно допустимой концентрации в воздухе рабочей зоны ПДК. Принято классифицировать:

I класс опасности – вещества с ПДК < 0,1 $мг/м^3$;

П класс опасности – вещества с ПДК = 0,1 ... 1 мг/м^3;

III класс опасности – вещества с ПДК = 1 ... 10 мг/м^3 ;

IV класс опасности – вещества с ПДК > 10 мг/м^3 .

Состав взвешенных частиц характеризуют концентрацией и дисперсностью.

Концентрацию дисперсной фазы чаще всего представляют как массу частиц в единице объема дисперсионной фазы.

Концентрация взвешенных частиц в некоторых промышленных газах приведена в табл. 2.2.

Концентрация взвешенных частиц Таблица 2.2

Источник образования пыли	Средняя концентрация частиц, г/м^3
Сушилки извести и гипса	5 – 20
Вращающиеся печи в цементной промышленности	20 – 50
Сушилки для сырья	20 – 80
Цементные мельницы	20 – 50
Колосниковый холодильник	30 – 40

Дисперсностью называют совокупность размеров всех частиц гетерогенной системы, которую для удобства описания разбивают на интервалы. Частицы с размерами, составляющими какой–либо интервал. относят к соответствующей фракции. Совокупность всех фракций аэрозоля называют фракционным составом его дисперсной фазы, которую можно представлять графически. Откладывая по оси абсцисс значения интервалов, составляющих фракции, а по оси ординат доли или процентные содержания частиц соответствующих фракций, получают гистограммы – ступенчатые графики фракционного состава.

Размер частиц пыли является одной из основных характеристик, определяющих выбор типа аппарата для очистки газов. Крупная пыль лучше, чем мелкая оседает из газового потока и может быть уловлена в аппарате простейшего типа. Для очистки мелкой пыли иногда требуется ряд последовательно ус-

тановленных аппаратов.

Частицу произвольной формы условно считают шарообразной, а ее размер определяют по эквивалентному диаметру. Так для частиц кубической формы диаметром будет длина ребра куба, для частиц неправильной формы эквивалентный диаметр можно определить по главным измерениям – длине l, толщина t и ширине b параллелепипеда, в который вписывается частица пыли. При этом используют все размеры или только некоторые из них.

1. $\delta = b$ – ширина параллелепипеда;
2. $\delta = \frac{l+b}{2}$ – среднеарифметическое из длины и ширины;
3. $\delta = \frac{l+b+t}{3}$ – то же, из длины, ширины и толщины;
4. $\delta = \sqrt{lb}\delta$ – среднегеометрическое из длины и ширины;
5. $\delta = \sqrt[3]{lbt}$ – соответствует ребру куба, равновеликого параллелепипеду по объему;
6. $\delta = \frac{\sqrt{lb+lt+bt}}{3}$ – ребро куба, равновеликого параллелепипеду по поверхности;
7. $\delta = \frac{3lbt}{lb+lt+bt}$ – ребро куба, равновеликого параллелепипеду по удельной поверхности.

Различают также *седиментационный* диаметр, равный диаметру шара, скорость оседания и плотность которого соответственно равны скорости оседания и плотности частицы неправильной формы.

Дисперсный состав измельченного материала удобно описывать функцией распределения $D(\delta)$ массы материала по диаметрам частиц или связанной с ней функцией $R(\delta)$.

Функция $D(\delta)$ (проход) равна выраженному в процентах или в долях отношению всех частиц, диаметр которых меньше δ, к общей массе материала.

Функция R(δ) (остаток) определяется как выраженное в процентах отношение массы всех частиц, диаметр которых больше δ, к общей массе материала.

Пояснить это можно следующим примером. Кривая D – процент материала, прошедший сквозь сито с ячейкой δ, а кривая R остаток на сите. При этом выполняется соотношение D + R = 100 %.

Так пыль цемента имеет примерно следующий фракционный состав (по полным проходам D(δ) % и по полным остаткам R(δ) %, табл. 2.3).

Фракционный состав цементной пыли. Таблица 2.3

δ, мкм	< 5	10	20	40	60	100	> 100
D(d), %	8	16	40	60	80	95	100
R(d), %	92	84	60	40	20	5	0

Графически функции распределения изображаются в виде кривых распределения. По оси абсцисс откладываются значения диаметра частиц δ, а по оси ординат процентное содержание всех частиц, диаметр которых больше или меньше δ, т.е. значения функций R(δ) или D(δ) (рис.2.4).

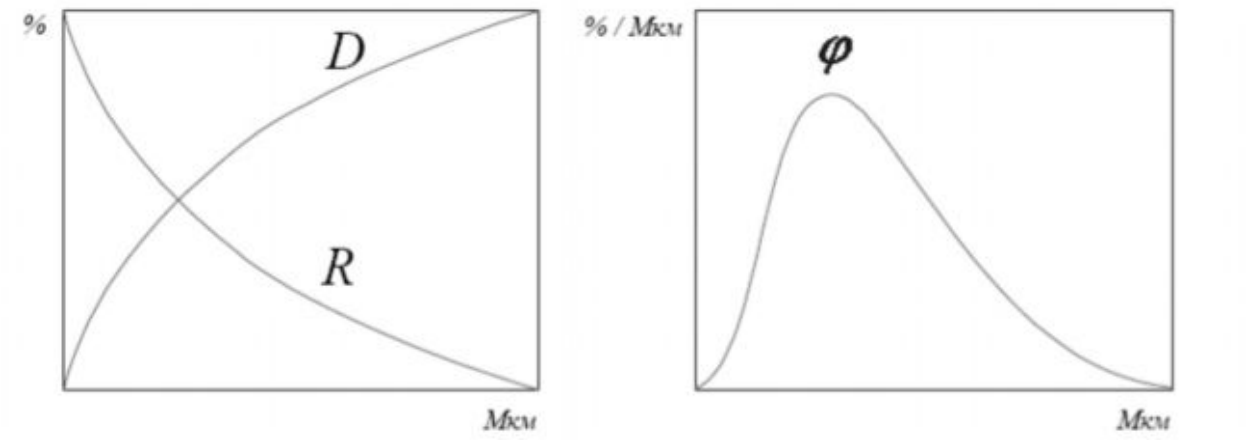


Рис. 2.4. Общий вид функций D, R, φ

Дифференцирование функции распределения $D(\delta)$ по δ дает функцию плотности распределения $\varphi(\delta)$

$$\varphi(\delta) = \frac{dD(\delta)}{d\delta} = -\frac{dR(\delta)}{d\delta}.$$

При этом выполняется соотношение

$$\int_{\delta_{min}}^{\delta_{max}} \varphi(\delta) d(\delta) = D(\delta_{max}) - D(\delta_{min}).$$

Кривые распределения D и R могут быть получены путем последовательного суммирования и накопления процентного содержания частиц различных размеров.

Процентные содержания отдельных фракций, полученных в результате анализа, изображаются в виде гистограммы (рис. 2.5), которая дает наглядное представление о дисперсном составе порошкообразного материала.

По оси абсцисс откладываются размеры частиц, а по оси ординат – относительные содержания фракций, т.е. процентное содержание каждой фракции, отнесенное к массе всего материала.

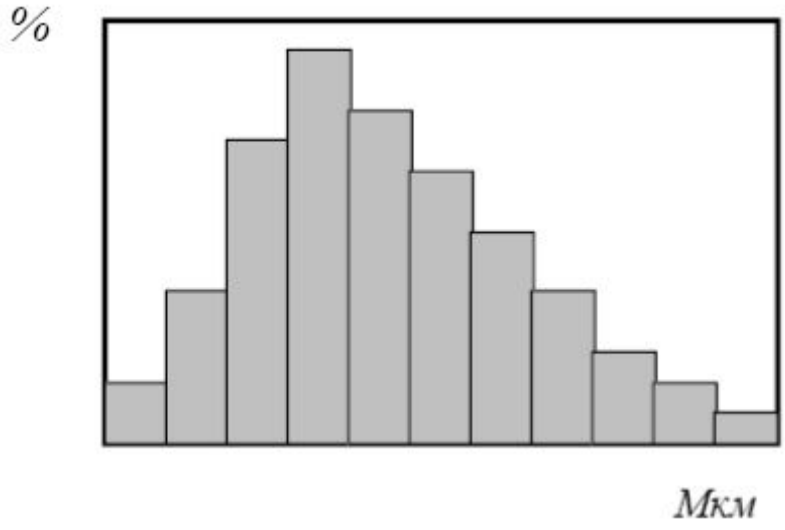


Рис. 2.5. Общий вид гистограммы

Для аналитического описания кривых распределения и плотности распределения однокомпонентных измельченных материалов применяются различные формулы, которые получаются по результатам анализа дисперсного состава. Они могут быть одно–, двух– и трехпараметрическими и могут быть разделены на теоретические и эмпирические [8].

Для описания фракционного состава порошков на практике применяются в основном четыре формулы: Годена – Андреева, Розина – Раммлера, нормального и логарифмически нормального законов распределения.

Формула Годена – Андреева выведена на основе обобщения результатов ситового анализа различных минералов, измельченных на различном производственном оборудовании и имеет вид

$$D(\delta) = 0{,}8\left(\frac{\delta}{A}\right)^{l}.$$

Параметр l характеризует направление и степень изгиба кривой распределения: при $l = 1$ кривая превращается в прямую линию; при $l < 1$ кривая $D(\delta)$ выпуклая; при $l > 1$ кривая $D(\delta)$ вогнутая.

При ее дифференцировании получается функция плотности распределения

$$\varphi(\delta) = 0{,}8l\frac{1}{A^{l}}\delta^{l-1}.$$

В формуле Розина – Раммлера, при рассмотрении распределения частиц по размерам в измельченных материалах, кривые распределения по данным ситовых анализов могут быть выражены уравнением

$$D(\delta) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{\delta}{B}\right)^{A}\right),$$

где A и B – постоянные, легко определяемые в логарифмической форме этого уравнения по опытным данным.

Из этого уравнения следует, что плотность распределения массы по диаметрам определяется формулой

$$\varphi(\delta) = \frac{A}{\delta}\left(\frac{\delta}{B}\right)^{A} \exp\left(-\left(\frac{\delta}{B}\right)^{A}\right).$$

Если $A < 1$, то при $\delta \to 0$ плотность распределения $\varphi(\delta) \to \infty$, хотя $D(\delta)$ при $\delta = 0$ остается конечной. Поэтому при $A < 1$ данная формула не дает правильного описания распределения очень мелких фракций.

Нормальное распределение это нормальная Гауссова функция, имеющая следующий вид

$$D(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{\delta} \exp\left[-\frac{(\delta - \delta_{50})^2}{2\sigma^2}\right] d\delta,$$

где δ_{50} – медиана распределения (размер частиц, при котором масса всех частиц в анализируемой пыли мельче или крупнее δ_{50} составляет 50%);

σ – среднеквадратическое отклонение диаметров от их среднего значения.

Дифференцирование функции распределения $D(\delta)$ по δ дает функцию плотности распределения

$$\varphi(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\delta - \delta_{50})^2}{2\sigma^2} \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} F(t),$$

где $0 < \delta < \infty$; $F(t) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{t^2}{2} \right)$, t – нормированная нормально распределенная величина, которую можно найти в справочнике или вычислить следующим образом

$$t = \frac{\lg \delta - \lg \delta_{50}}{\lg \sigma},$$

$\lg\sigma$ – стандартное (среднеквадратичное) отклонение логарифмов диаметров.

$$\lg \sigma = \lg \delta_{84,1} - \lg \delta_{50} = \lg \delta_{50} - \lg \delta_{15,9},$$

$$\sigma = \frac{\delta_{84,1}}{\delta_{50}} = \frac{\delta_{50}}{\delta_{15,9}}.$$

Логарифмически нормальное распределение (ЛНР) получается, если в нормальную Гауссову функцию распределения подставить в качестве аргумента не диаметр частиц, а логарифм диаметра.

Функция ЛНР по диаметрам частиц имеет вид

$$D(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ln(\sigma)} \int_{-\infty}^{\ln(\delta)} \exp\left[-\frac{(\ln(\delta) - \ln(\delta_{50}))^2}{2\ln^2(\sigma)} \right] d\ln(\delta).$$

Дифференцирование функции распределения $D(\delta)$ по δ дает функцию плотности распределения

$$\varphi(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ln(\sigma)} \exp\left[- \frac{(\ln(\delta) - \ln(\delta_{50}))^2}{2\ln^2(\sigma)} \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ln(\sigma)} F(t),$$

где $0 < \delta < \infty$; $F(t) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(- \frac{t^2}{2} \right)$.

Если распределение массы частиц по размерам подчиняется логарифмически нормальному закону, то ему же будут подчинены и численное распределение частиц по размерам и удельная поверхность.

Наиболее точную оценку параметров, входящих в формулы описания распределения частиц по размерам можно получить методом наименьших квадратов из кривой $D(\delta)$. Для этого вышеперечисленные интегральные уравнения необходимо представить в линейном виде $y = a + bx$.

Интегральную формулу Годена – Андреева можно привести к линейному виду путем логарифмирования

$$\ln(D(\delta)) = (\ln 0{,}8 - l \cdot \ln A) + l \cdot \ln(\delta).$$

Производя замену переменных, получаем

$$y = \ln(D(\delta)),\ a = (\ln 0{,}8 - l \cdot \ln A),\ b = l,\ x = \ln(\delta).$$

При решении полученного уравнения методом наименьших квадратов можно получить параметры формулы Годена – Андреева

$$l = b,\ A = \frac{\ln 0{,}8 - a}{l}.$$

Интегральную формулу Розина – Раммлера можно привести к линейному виду путем двойного логарифмирования

$$\ln\left(-\ln\left(1-D\left(\delta\right)\right)\right)=-A\ln B+A\ln\delta.$$

Производя замену переменных, получаем

$$y=\ln\left(-\ln\left(1-D\left(\delta\right)\right)\right),\ b=A,\ a=-A\ln B,\ x=\ln\left(\delta\right).$$

При решении полученного уравнения методом наименьших квадратов можно получить параметры формулы Розина – Раммлера

$$A=b,\ B=\exp\left(\frac{-a}{A}\right).$$

Уравнение нормального закона распределения линейно в координатах

$$D\left(\delta\right)=\delta_{50}+\sigma t.$$

В данном уравнении не требуется замена переменных, поскольку параметры пишутся в явном виде.

Уравнение логарифмически нормального закона распределения линейно в координатах

$$\ln\left(D\left(\delta\right)\right)=\ln\left(\delta_{50}\right)+\ln\left(\sigma\right)t.$$

В данном уравнении также не требуется замена переменных.

Для приведенного метода расчета можно использовать программу электронных таблиц Microsoft Excel, в которой реализованы следующие полезные

функции:

– для вычисления величины t предназначена функция НОРМСТОБР(D(δ));

– вычисление коэффициентов линейного уравнения:

– для коэффициента a функция ОТРЕЗОК(Y1:YN;X1:XN),

– для коэффициента b функция НАКЛОН(Y1:YN;X1:XN).

Более простым методом определения параметров логарифмически нормального распределения является метод, приведенный в ГОСТ 11.009–79 [12]. Он применим, например, для обработки данных микроскопического анализа и не требует предварительного фракционирования результатов.

Для получения параметров распределения числа частиц порошка по размерам необходимо произвести расчет по следующим формулам:

$$\lg \delta_{50} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \lg \delta_i ,$$

$$\lg^2(\sigma) = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} \left(\lg \delta_i - \lg \delta_{50}\right)^2 ,$$

$$\lg(\sigma) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} \left(\lg \delta_i - \lg \delta_{50}\right)^2} .$$

Доверительные границы для параметров $\lg(\delta_{50})$ и $\lg(\sigma)$

$$\begin{cases} \left(\lg \delta_{50}\right)_{low} = \lg \delta_{50} - \dfrac{t_\gamma \lg \sigma}{\sqrt{n}} \\ \left(\lg \delta_{50}\right)_{high} = \lg \delta_{50} + \dfrac{t_\gamma \lg \sigma}{\sqrt{n}}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\lg \sigma\right)_{low} = z_{low} \lg \sigma \\ \left(\lg \sigma\right)_{high} = z_{high} \lg \sigma, \end{cases}$$

где t_γ – коэффициент Стьюдента, определяемый ГОСТ 11.009–79 в зависимости от односторонней доверительной вероятности γ;

z_{low} и z_{high} находят по ГОСТ 11.009–79 в зависимости от односторонней доверительной вероятности γ.

3. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ГАЗА

Для проектирования пылеочистных аппаратов в первую очередь необходимо знать количество проходящего через аппарат газового потока.

Расход газа V,м^3/с определяется как произведение площади S,м^2 поперечного сечения газохода на среднюю скорость газового потока $W_{ср}$,м/с

$$V = S \cdot W_{ср}.$$

Скорость потока W измеряется, как правило, пневмометрическими трубками, используя соотношение

$$W = \sqrt{\frac{2P_д}{\rho_г}},$$

где $P_д$ – динамическое давление газов, Па, ($P_д = P_{полн} – P_{ст}$);

$\rho_г$ – плотность газов, кг/м^3;

$P_{полн}$ – полное давление потока, Па;

$P_{ст}$ – статическое давление газов, Па.

Плотность газа при рабочих условиях исчисляется по формуле:

$$\rho_г = 0{,}359\rho_0 \frac{B + P_{ст}}{273 + t},$$

где ρ_0 – плотность газа при нормальных условиях, кг/м^3,

B – барометрическое давление, Па,

t – температура газа в газоходе, ^{0}С.

Пневмометрическая трубка имеет два канала, один из которых всегда воспринимает полное давление, а другой в зависимости от конструкции трубки статическое, статическое за вычетом динамического или искаженное динамическое.

При подключении обоих каналов к показывающему прибору, он фиксирует либо динамическое, либо примерно удвоенное динамическое давление. Поэтому для различных пневмометрических трубок вводят поправочный коэффициент К.

ВИДЫ ПНЕВМОМЕТРИЧЕСКИХ ТУБОК

Трубка Прандтля (рис. 3.1) состоит из полусферического наконечника 1 и корпуса с узкими щелями 2. Отверстие наконечника и каналы от щелей соединяются с патрубками отбора давления. Поправочный коэффициент трубки $К = 1 \pm 0{,}04$.

Измерение трубкой расхода газового потока показано на рис. 3.2. В произвольном сечении внутренней трубки напор на величину $W^2/2g$ больше, чем в расположенном в той же горизонтальной плоскости сечении внешней трубки; соответственно давление P_a во внутренней трубке больше, чем давление P_b во

внешней на величину $\rho_г g \frac{W^2}{2}$.

В соответствии с этим уровень жидкости в колене дифференциального манометра, присоединенном к внешней трубке, располагается выше, чем в колене, присоединенном к внутренней трубке.

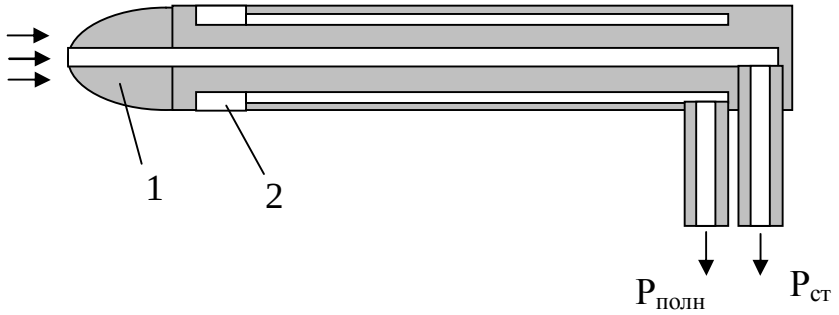


Рис. 3.1. Пневмометрическая трубка Прандтля

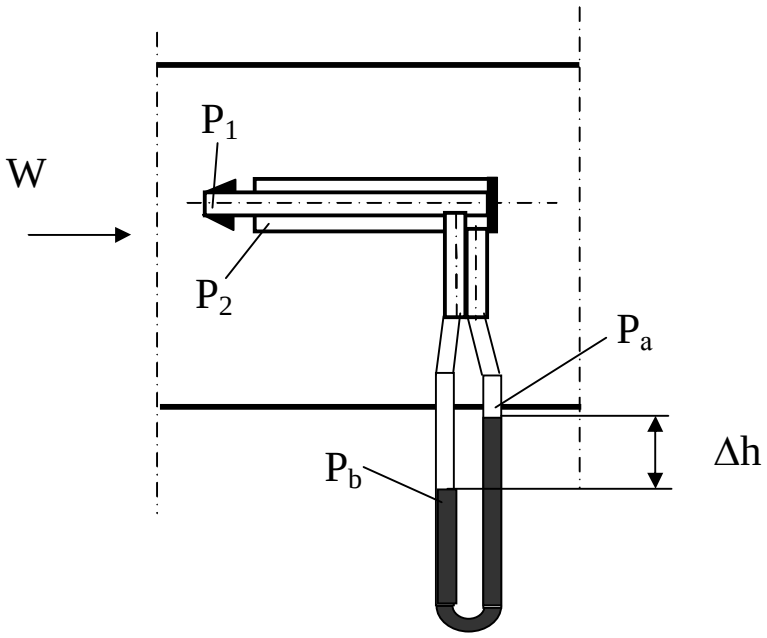


Рис. 3.2. Измерение расхода трубкой Прандтля

Если Δh – разность этих уровней и ρ_1 – плотность жидкости, залитой в дифференциальный манометр, то $P_a = P_b + g(\rho_1 - \rho_г)\Delta h$.

В то же время $$P_a - P_b = \rho_г g \frac{W^2}{2} \ .$$

Отсюда $$W = \sqrt{2g\Lambda h\left(\frac{\rho_1}{\rho_г} - 1\right)}. \qquad (3.1)$$

Учитывая, что при замерах скорости течения газов, плотности которых в тысячу раз меньше плотности жидкости в манометре, то есть симплекс $\rho_1 / \rho_г$ во много раз больше единицы, выражение (3.1) принимает вид

$$W = \sqrt{K2g\Lambda h\frac{\rho_1}{\rho_г}}$$

Основной недостаток трубки Прандтля – высокая чувствительность трубки к забиванию узких щелей пылью.

Меньше забиваются пылью трубки Пито (рис. 3.3) и НИИОГаз (рис. 3.4), но они имеют меньшую точность замера.

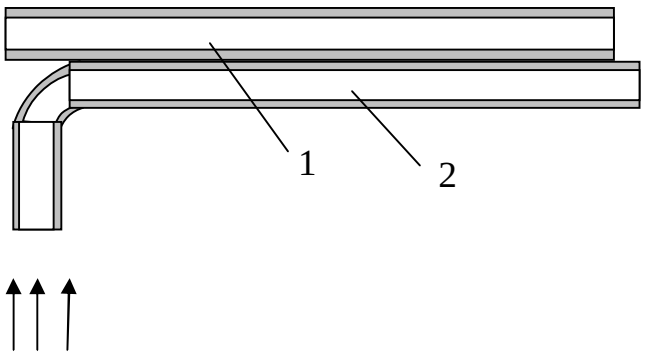


Рис. 3.3. Пневмометрическая трубка Пито (К = 1 ± 0,1):
1 – трубка статического давления, 2 – трубка полного давления.

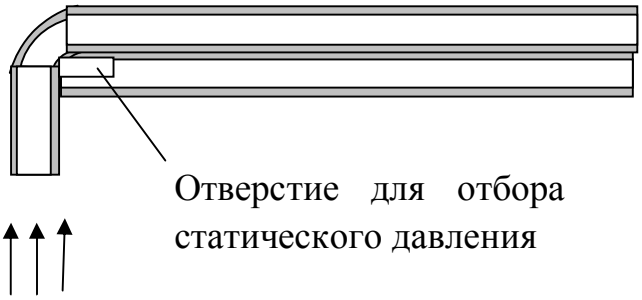


Рис. 3.4. Пневмометрическая трубка НИИОГаз **(**К = 0,51 ± 0,023).

Кроме обычных трубок ПИТО существует обратная трубка (рис. 3.5), преимуществом которой является простота ввода в газоход и большая разность давлений. Скорость газа может быть рассчитана из эмпирического соотношения

$$W = 1{,}256\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \text{ м/с,}$$

где ΔP – разность давлений, Па;

ρ – плотность газа, $м^3/с$.

В качестве регистрирующего прибора применяются U – образные манометры, тягонапорометры (ТНЖ), микроманометры (ММН) и др.

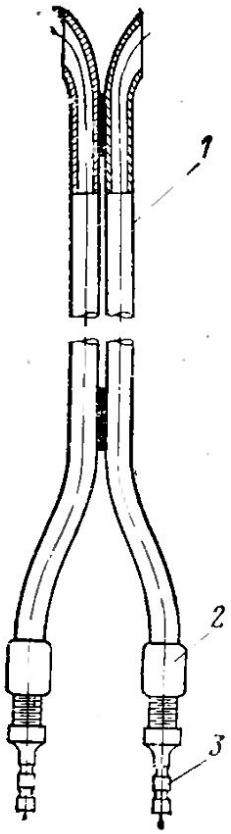


Рис. 3.5. Сдвоенная или реверсивная трубка Пито:
1 – трубка из нержавеющей стали; 2 – муфта; 3 – переходник

Альтернативой трубкам являются механические и электрические приборы замера расхода газа.

АНЕМОМЕТРЫ

Чашечный анемометр (рис. 3.5) состоит из вертушки 1 (четырех чашечек), укрепленной на вертикальной оси 2, устанавливаемой перпендикулярно направлению потока. Вращение вертушки под действием движения газов передается счетчику 3. Счетчик включается и выключается рычажком 4. Связь между числом оборотов вала и скоростью движения газов устанавливают при тарировке анемометра.

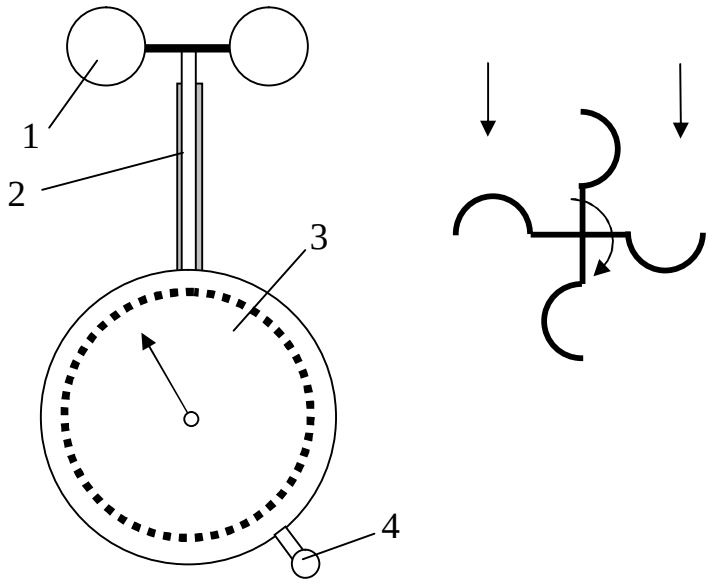


Рис. 3.6. Чашечный анемометр:

1 – вертушка, 2 – ось, 3 – шкала счетчика, 4 – рычаг.

Для измерения малых скоростей (< 1 м/с) применяют термоанемометры (рис. 3.7), в которых активное сопротивление уменьшается в зависимости от скорости потока (интенсивности охлаждения).

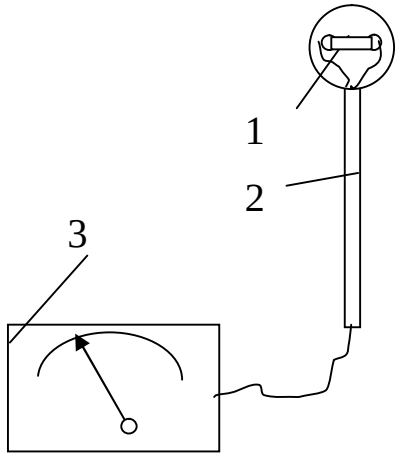


Рис. 3.7. Термоанемометр:

1 – термосопротивление, 2 – держатель, 3 – регистрирующий прибор.

Для получения достоверных результатов замеров, необходим правильный выбор сечения трубопровода.

Сечение должно располагаться на прямом участке, расстояние от фасонных частей (колена, шибера, диафрагмы, …) не менее 8 – 9 условных диаметров трубопровода.

Измерение пневмометрической трубкой и анемометрами производят в нескольких точках сечения и по ним определяют среднеарифметическое значение скорости потока. Для этого сечение газохода разбивают условно на ряд концентрических колец. Замеры проводят в четырех точках каждого кольца по взаимно перпендикулярным диаметрам (рис. 3.8).

В зависимости от диаметра газохода (D) выбирают количество условных колец (n) (табл. 3.1):

Выбор количества условных колец в зависимости от D Таблица 2.1

D, мм	200	200 – 400	400 – 600	600 – 800	800 – 1000	> 1000
n, шт	3	4	5	6	8	10

Координаты точек замера каждого кольца:

$$l_x = R \cdot \sqrt{\frac{2x-1}{2n}}$$

где l_x – расстояние точки замера от центра газохода,

x – порядок номера кольца,

n – число колец.

Средняя скорость газа по сечению газохода будет равна

$$W_{ср} = \frac{W_1 + W_2 + ... + W_m}{m}.$$

Коэффициент a распределения скоростей находится из соотношения

средней скорости и скорости в центре потока

$$a = \frac{W_{ср}}{W_0}.$$

Зная среднюю скорость газа в газоходе и его сечение, определяют расход газа при рабочих условиях

$$V = 3600 \cdot W_{ср} \cdot F, \text{ м}^3/\text{час}.$$

Для удобства оценки работы газоочистных аппаратов пересчитывают расход газа к нормальным условиям по формуле

$$V_0 = \frac{V(B \pm P_{ст})}{3{,}46(273 + t)(0{,}804 + f)},$$

где f – влажность газа, кг/м^3.

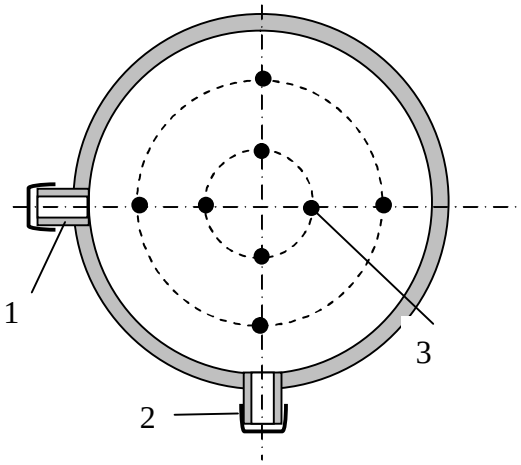


Рис. 3.8. Схема замера скоростей потока:
1 – штуцер, 2 – крышка, 3 – точки замера

ДИАФРАГМЫ И ТРУБЫ ВЕНТУРИ

Для измерения расходов жидкостей и газов с успехом применяют дроссельные приборы – диафрагмы и трубы Вентури, посредством которых между сечениями потока искусственно создают некоторый перепад давлений. По величине перепада давлений, пользуясь уравнением Бернулли, определяют расход жидкости или газа.

Диафрагма (рис. 3.9) представляет собой плоский диск 1 с отверстием, зажатым между фланцами трубопровода 2. Труба Вентури (рис. 3.10) состоит из двух конических участков, сопряженных узкими сечениями. Расход газа определяют по перепаду давлений между трубопроводом и наиболее узким сечением трубы, в котором поток плавно меняет скорость. У труб Вентури гидравлическое сопротивление меньше, чем у диафрагмы, но их размеры больше.

Средняя скорость движения газа в сечении II – II за диафрагмой или в узком сечении трубы Вентури:

$$W_2 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1-\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}}.$$

Действительный расход газа ($м^3/с$)

$$V = \alpha F_2 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1-\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}}.$$

Здесь α – коэффициент расхода, зависящий от диаметра сечений и числа Рейнольдса (Re),

F_2 – площадь сечения диафрагмы, $м^2$,

Δh – разность статистических напоров, замеряемая манометром, м,

d_1, d_2 – диаметры трубопровода и диафрагмы соответственно, м.

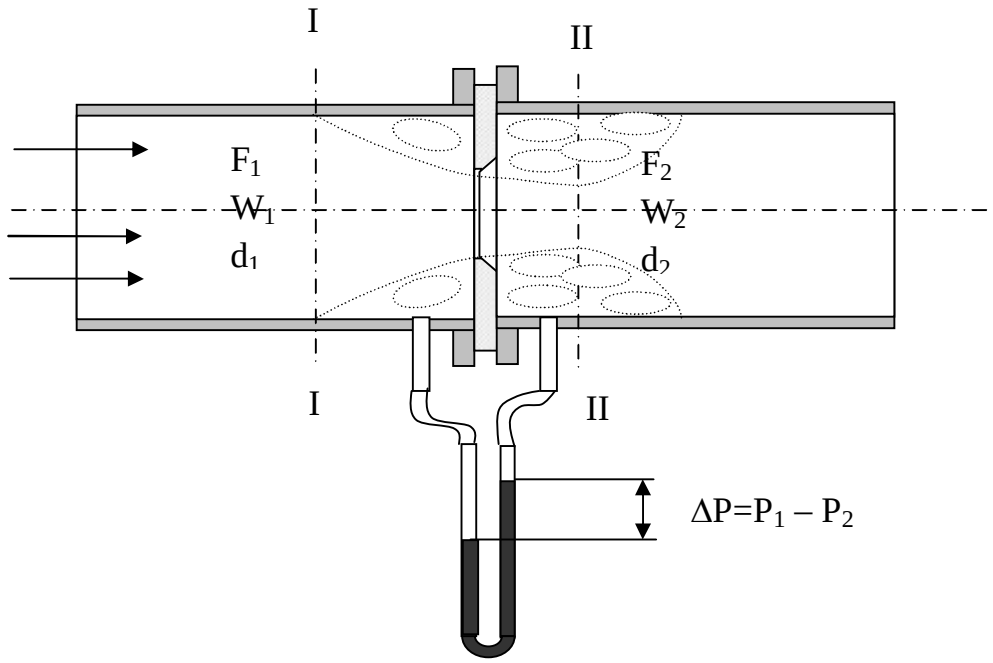


Рис. 3.9. Конструкция диафрагмы

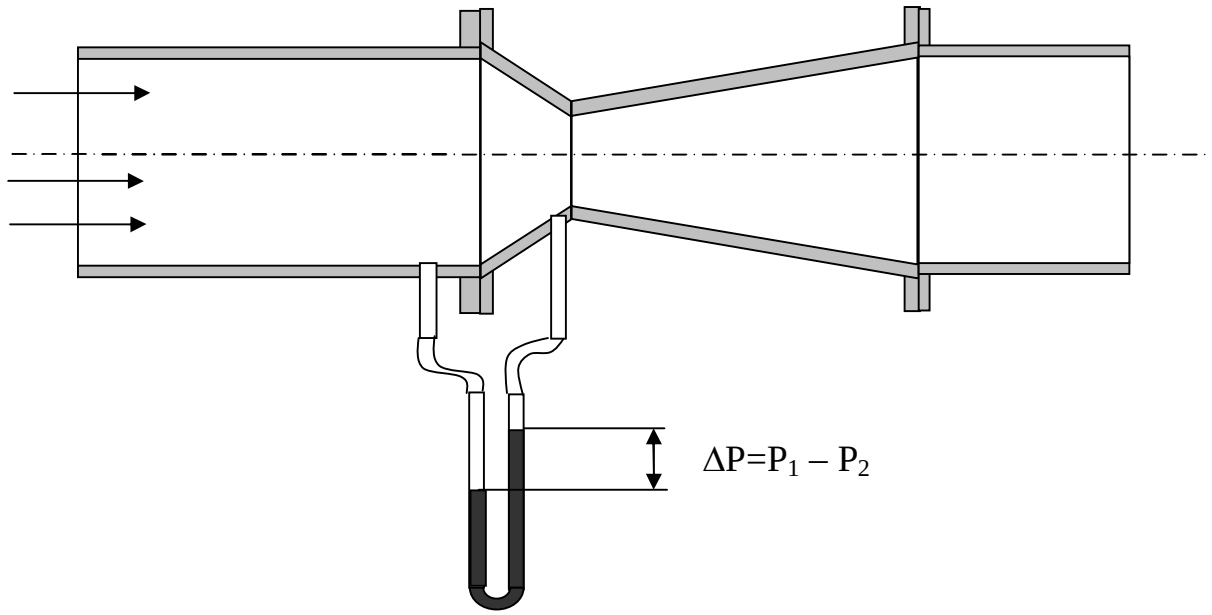


Рис. 3.10. Конструкция трубы Вентури

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛИ

В зависимости от изучаемого свойства частиц и выбранного метода определения дисперсного состава пыли, соответствующий анализ может быть выполнен либо с непосредственным отбором твердой фазы в соответствующий прибор, либо с использованием заранее отобранной и доставленной в лабораторию пыли.

В последнем случае ее необходимо правильно подготовить к анализу.

Если масса первичной пробы больше, чем необходимо для анализа, проба подвергается перемешиванию и сокращению.

Для достаточно больших проб предварительно производиться перемешивание по способу «Конус» (рис. 3.11). Для этого применяется воронка, установленная на штативе, через которую на плоскую поверхность насыпается первоначальная проба частиц. После этого воронка переставляется на другую плоскую поверхность и процесс повторяется. Данная операция проводится не менее 3 – 4 раз.

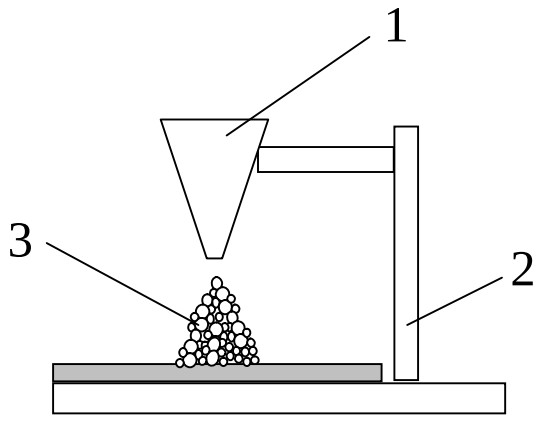


Рис. 3.11. Перемешивание частиц при помощи конуса:
1 – воронка, 2 – штатив, 3 – проба частиц.

Сокращение пробы осуществляется методом квартования при помощи крестовины (рис. 3.12).

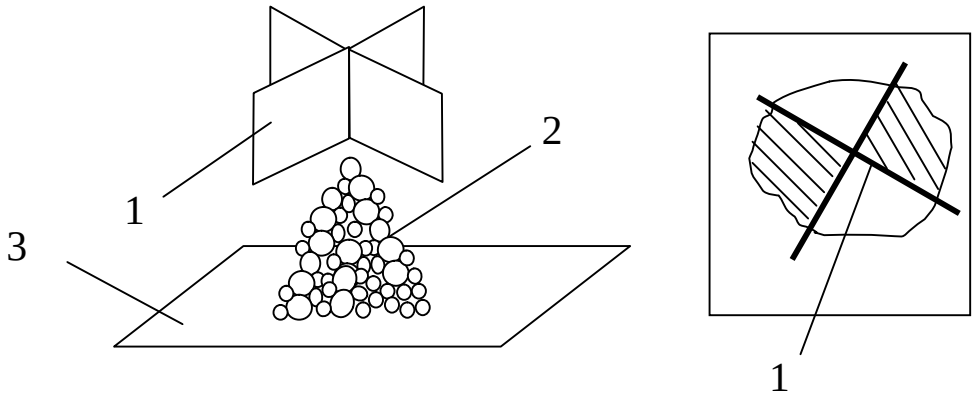


Рис. 3.12. Квартование пробы:

1 – крестовина, 2 – проба частиц, 3 – плоская поверхность.

Часть пробы в одной паре противоположных секторов отбирается, другая снова перемешивается и квартуется до тех пор, пока не будет получена необходимая для анализа масса частиц.

Для малых проб, частицы высыпают на лист гладкой бумаги, приподнимая один край листа, скатывают валик частиц к противоположному краю. Процесс повторяют, пока не образуется один длинный во весь лист валик, лист разворачивают перпендикулярно и перемешивание повторяется 5 – 6 раз. Пробу берут из разных частей валика небольшими дозами.

СЕДИМЕНТАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Оседание частиц в жидкости происходит под действием силы тяжести – веса частицы, который для частиц шарообразной формы с учетом гидростатической поправки равен

$$P = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g,$$

где ρ – плотность вещества частицы,

ρ_0 – плотность жидкости,

g – ускорение силы тяжести.

Оседанию частицы противодействует сила вязкого сопротивления жидкой среды, определяемая по закону Стокса вязкостью среды, радиусом частицы и скоростью ее оседания dh/dt

$$F = 6\pi\mu r \frac{dh}{dt},$$

где h – вертикальная координата,

t – время.

Скорость оседания и сила трения растут, пока не выполнится условие P = F. Это дает связь радиуса r и dh/dt:

$$r = \left[\frac{9\mu}{2} \frac{dh/dt}{(\rho - \rho_0)g} \right]^{1/2} = K\sqrt{dh/dt},$$

где величина K постоянна для данной системы и условий опыта.

Таким образом по скорости оседания можно определить радиус частиц, например. Если частицы имеют несферическую форму, то по скорости седиментации определяется эквивалентный радиус – радиус сферических частиц, оседающих со скоростью dh/dt.

Проведение седиментационного анализа возможно только в условиях, исключающих агрегирование частиц, то есть для агрегативно устойчивых систем.

Во избежание влияния соседних частиц на оседание отдельной частицы

дисперсная система должна быть достаточно разбавленной (с концентрацией дисперсной фазы не выше 0,5 – 1 %).

Для седиментации пригодны порошки с частицами размером от 1 до 100 мкм. Частицы размером более 100 мкм значительную часть пути движутся с такой скоростью, при которой происходит турбулентное движение жидкости, и уравнение Стокса становиться неприменимым. Частицы размером менее 1 мкм оседают крайне медленно (сутки и более) и могут образовывать седиментационно – устойчивые системы, в которых седиментации заметно противодействует диффузия. Пределы значений радиусов частиц, которые можно определить седиментационным анализом, можно расширить, применяя в качестве дисперсионной среды жидкость с большими значениями плотности и вязкости, а также используя центробежное поле (в центрифугах и ультрацентрифугах).

При проведения седиментационного анализа (рис. 3.13) берут навеску вещества для приготовления 0,5 % суспензии. Предварительно сняв с крючка весов чашечку, в цилиндр с водой (не сдвигая его с места) всыпают взятую навеску вещества и тщательно перемешивают суспензию в течение 2–3 мин с помощью металлической дисковой мешалки, добиваясь равномерного распределения частиц суспензии по всему объему.

Вынув мешалку, быстро погружают в суспензию чашечку и подвешивают ее к весам. Приблизительно через 15 с, когда прекратятся колебания и затухнут конвекционные токи в жидкости, вызванные погружением чашечки, делают первый отсчет по шкале весов и одновременно включают секундомер. Этот отсчет соответствует начальному моменту счета времени (t = 0). Секундомер остается включенным в течение всего опыта.

Скорость седиментации полидисперсной суспензии наибольшая в начале опыта, поэтому сначала отсчеты берут через 30 с. Через некоторое время промежутки между отсчетами увеличиваются до 1 мин, затем до 5 мин. В конце опыта отсчеты делают через 10 – 15 мин.

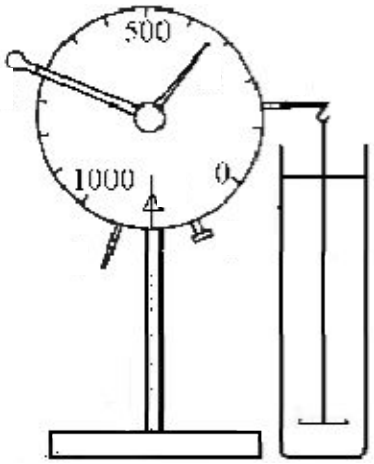


Рис. 3.13. Седиментационный анализ на торсионных весах

Опыт ведут до тех пор, пока не закончится процесс оседания, и два последующих отсчета, сделанные через 10 – 15 мин, не дадут одинаковых или очень близких значений. По миллиметровым делениям на стенке цилиндра определяют и записывают высоту столба суспензии h, равную расстоянию от верхнего уровня жидкости в цилиндре до дна чашечки.

Показания шкалы пропорциональны весу осадка, осевшего на чашечку к данному моменту времени.

Кривая накопления осадка полидисперсной системы имеет начальный прямолинейный участок, который отвечает оседанию частиц всех размеров; он заканчивается при времени t_{min} , когда самые крупные частицы с радиусом $r_{max} = K(h/t_{min})^{1/2}$ пройдут весь путь h от верха цилиндра до чашечки (рис. 3.14). После завершения оседания всех частиц вес осадка перестает изменяться; соответствующее время t_{max} позволяет определить радиус самых малых частиц $r_{min} = K(H/t_{max})^{1/2}$.

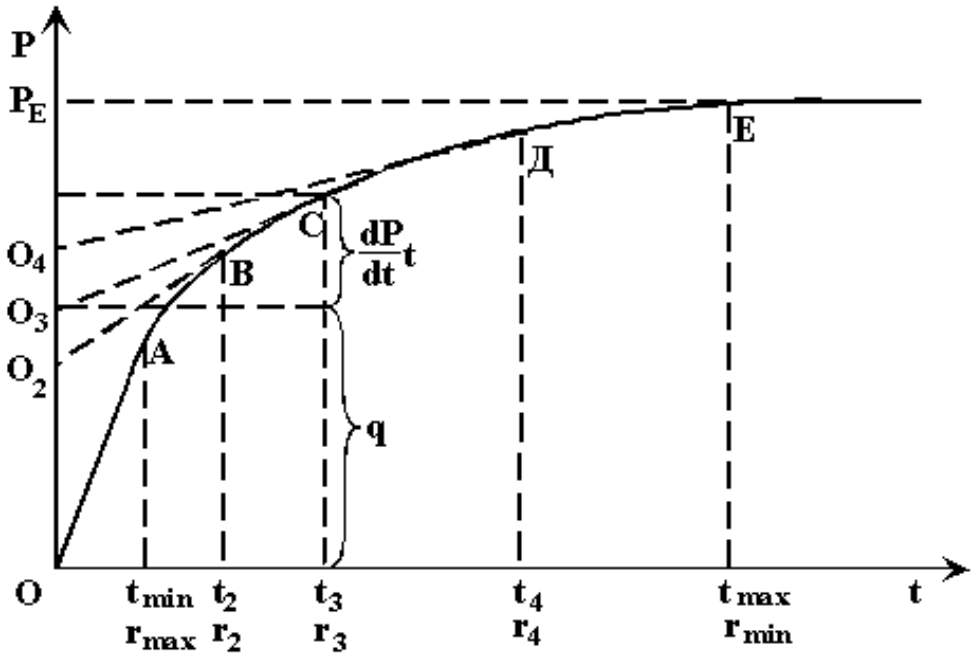


Рис. 3.14. Кривая накопления осадка

Накопление осадка в процессе оседания частиц описывается уравнением Сведберга – Одена

$$P_i = q_i + \left(dP/dt\right)_i t_i,$$

где P_i – общий вес осадка, накопившегося ко времени t_i,

q_i – вес частиц, полностью осевших к данному времени t_i, т.е. имеющих радиус больший $r_i = (h/t_i)^{1/2}$;

$\left(dP/dt\right)_i$ – скорость накопления осадка в момент времени t_i ,которая определяется оседанием частиц с размером, меньшим r_i.

Это уравнение позволяет рассчитать фракционный состав дисперсной фазы, воспользовавшись ЭВМ или при помощи графического метода. Величина q_i численно равна отрезку, отсекаемому на оси ординат касательной, проведенной к седиментационной кривой в точке, соответствующей времени t_i.

Результаты седиментационного анализа представляют в виде зависимостей, отражающих распределение частиц по размерам. Кривая интегральной функции распределения (рис. 3.15а) изображает содержание (в вес.%) частиц с радиусами, большими данного r. Интегральная кривая обычно имеет S – образную форму с характерной точкой перегиба, соответствующей размеру частиц, весовая доля которых в данной дисперсной системе максимальна. С помощью интегральной кривой распределения частиц по размерам легко определить процентное содержание частиц с размерами, находящимися в заданном интервале от r_a до r_b: оно равно разности соответствующих ординат $Q_a - Q_b$.

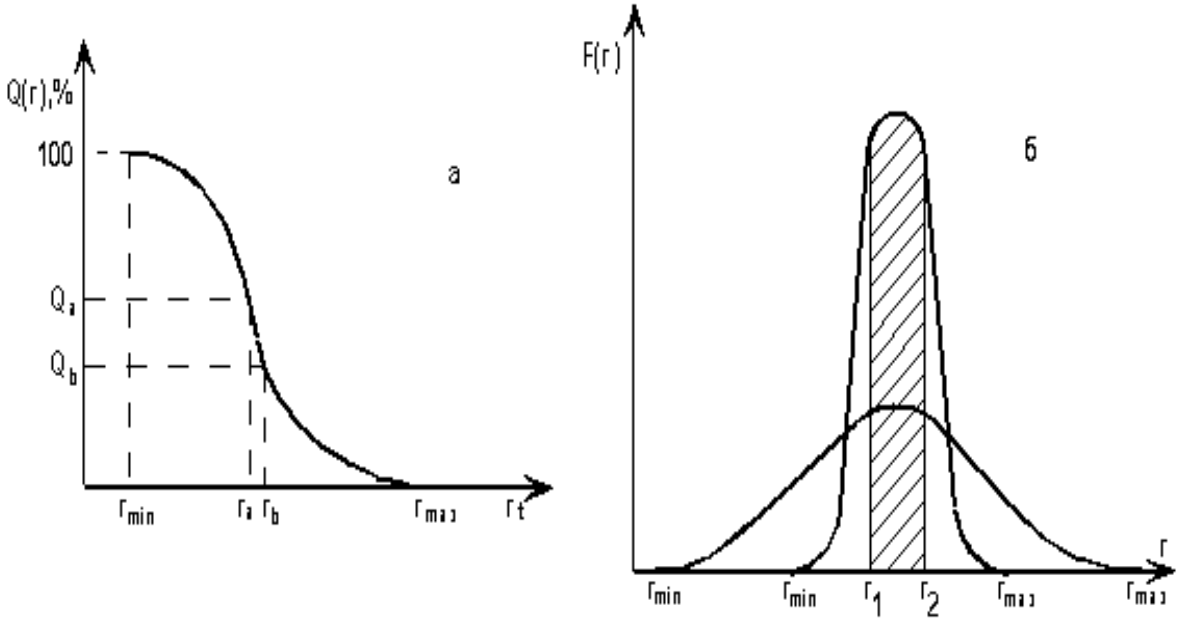


Рис. 3.15 Кривые распределения:
а – интегральная, б – дифференциальная

Для построения интегральной кривой распределения на оси абсцисс откладывают значения радиусов в интервале $r_{min} - r_{max}$, а на оси ординат относительное содержание по весу частиц с радиусом от r_{max} до данного радиуса r_i, то есть частиц с радиусами, большими r_i.

Дифференциальная функция распределения (рис. 3.15б) $F(r) = \frac{dQ}{dr}$ дает более наглядное представление о фракционном составе суспензии.

Электрофотоседиментометрия основана на определении изменения интенсивности пучка света, проходящего на известном уровне от зеркала столба суспензии, по мере осаждения дисперсной фазы, равномерно распределенной в начальный момент проведения опыта.

На кафедре «Оборудования и автоматизации силикатных производств» УГТУ–УПИ разработан сканирующий фотоседиментограф.

Сканирующий фотоседиментограф предназначен для гранулометрического анализа порошков и шликеров в диапазоне крупности частиц от 500 до 1 мкм. Среднее время анализа 5 – 15мин, воспроизводимость анализа не хуже 2%.

При прохождении света через слой суспензии происходит его рассеяние частицами. При этом интенсивность света, прошедшего через слой суспензии, уменьшается в соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера. В качестве излучателя используется светодиод, работающий в инфракрасном диапазоне длин волн. Это обеспечивает помехоустойчивость в видимом спектре и высокую точность измерения.

СИТОВОЙ И МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Ситовой анализ основан на механическом разделении частиц по крупности путем просева через сита различными размерами отверстий. Навеска пыли при ситовом анализе разделяется на фракции крупнее и мельче ячейки данного сита.

Навеску пыли равную 100 – 200 г, обычно помещают на сито с самыми большими отверстиями. Прошедшие при просеве частицы поступают на следующее сито с ячейками меньших размеров и т.д. После самого мелкого сита устанавливают сплошное дно, на котором собирается самая мелкая фракция. Взвешивая остатки пыли на каждом сите, получают данные о распределении пробы пыли по фракциям. Просев может быть как ручным, так и механическим. Лабораторные сита выпускаются крупностью от 40 мкм до 2500 мкм. Для час-

тиц меньше 40 мкм ситовой анализ не проводится.

Микроскопический анализ применяется для определения формы и размера частиц от 1 до 50 мкм. При определении дисперсного состава подсчитывают в поле зрения микроскопа число частиц каждой выбранной фракции.

КАСКАДНЫЕ ИМПАКТОРЫ

Работают по принципу инерционной сепарации частиц по размерам при пропускании пробы газа через ряд последовательно установленных сопел или сопловых решеток с расположенными под ними осадительными поверхностями (подложками) (рис. 3.16).

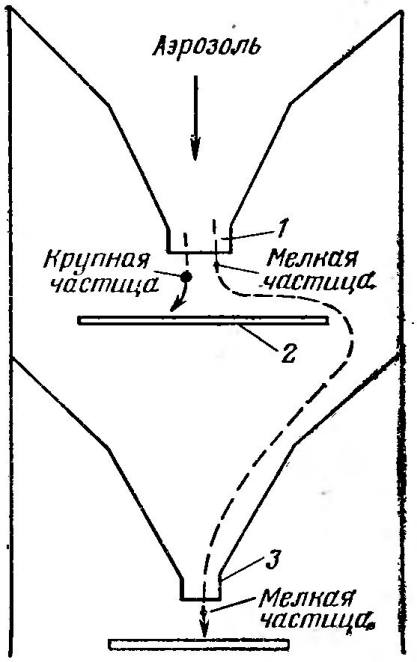


Рис. 3.16. Схема каскадного пылеуловителя

Сопло и подложка образуют каскад прибора. Диаметры сопел или соловых решеток подбираются таким образом, чтобы размеры частиц, которые могут осесть в данном каскаде, были меньше размеров частиц, способных осесть в предыдущем. Таким образом, число фракций частиц равно общему количеству каскадов импактора, включая фильтр (рис. 3.17). Для того, чтобы частицы, столкнувшись с подложкой не отскакивали и не выдувались из нее, на поверх-

ность осаждения наносится специальная липкая смазка или волокнистый материал (фильтровальная ткань, стекловата, …).

С помощью импакторов определяется относительная доля и размеры частиц, осевших в каждом каскаде после отбора через прибор пробы газа.

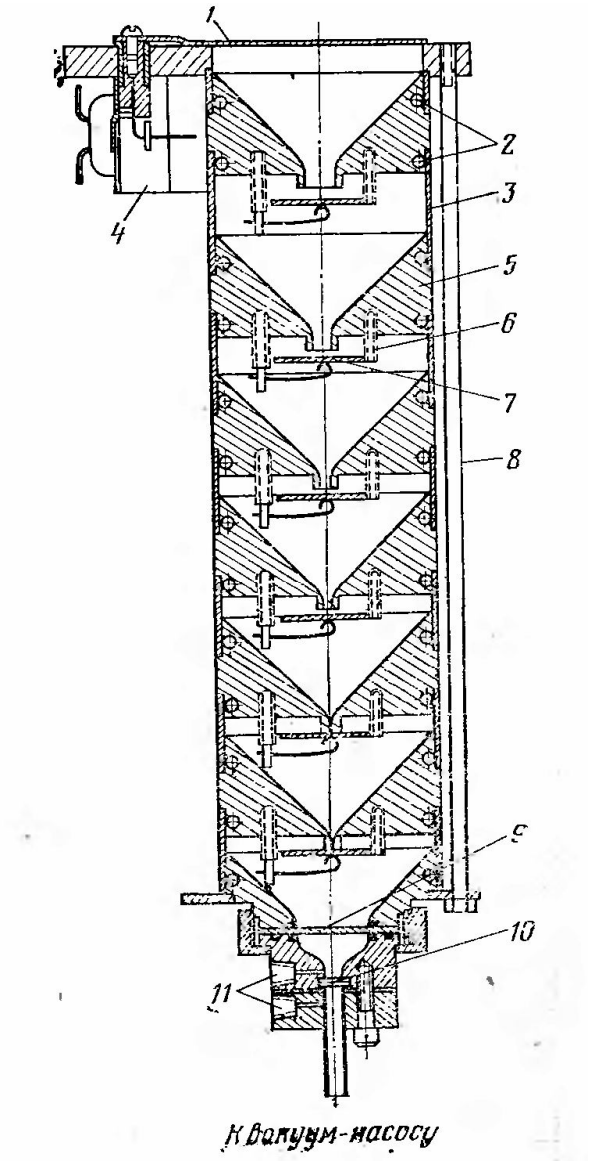


Рис. 3.17. Схема шестиступенчатого каскадного импактора Баттеля [10]:

1 – крышка; 2 – уплотнительные кольца; 3 – стенка стальная; 4 – соленоид; 5 – мундштук из моннель–металла; 6 – опоры отбойника; 7 – стеклянный отбойник (3,8 мм); 8 – крепящие стержни; 9 – фильтр (стекло Гурлбата); 10 – измерительная диафрагма; 11 – отводы для измерения давления.

3.3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ

Запыленность (концентрация частиц) – это масса частиц в одном кубическом метре газа при нормальных условиях.

ПРЯМОЙ МЕТОД

В прямом методе определения запыленности газового потока одновременно снимается поле скоростей и поле запыленности (рис. 3.18).

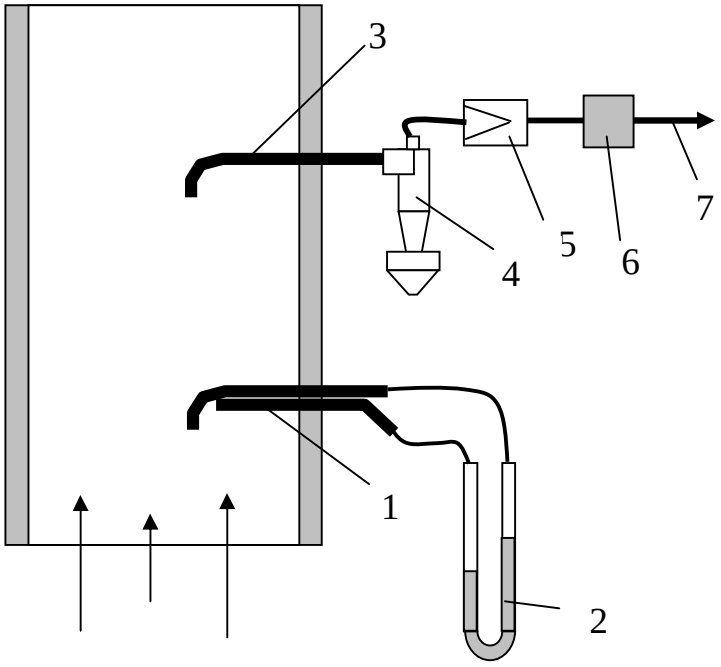


Рис. 3.18. Прямой метод определения запыленности газа:
1 – пневмометрическая трубка, 2 – манометр, 3 – пылезаборная трубка,
4 – циклончик, 5 – фильтр, 6 – расходомер, 7 – отсос газа

Для получения требуемой пробы необходимо применять специальные приемы. При отборе частиц размером 10 мкм и более и при скорости отбора меньше скорости потока, в газоходе (рис. 3.19 б), часть газового потока будет откланяться от заборной трубки, тогда как некоторые частицы по инерции будут залетать в заборную трубку, и таким образом в отобранном образце ока-

жется большее число крупных частиц. И наоборот, если скорость отбора пробы выше скорости потока в газоходе (рис. 3.19 в), некоторые крупные частицы будут проскакивать мимо сопла заборной трубки. Только в том случае, когда скорости отбора пробы и потока в газоходе равны, т. е. скорость изокинетична – в пробоотборнике будет собран полноценный образец крупных частиц (рис. 3.19 а).

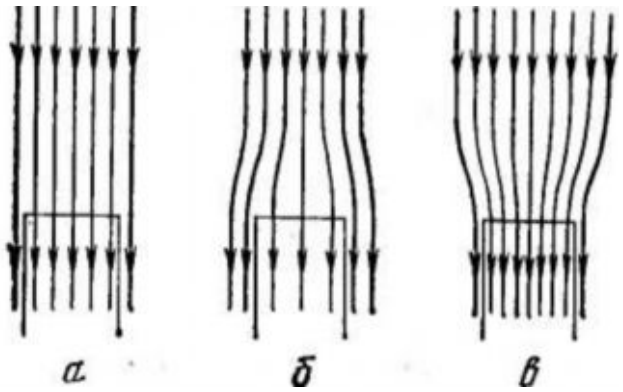


Рис. 3.19. Потоки газа на входе в пробоотборники:
а – изокинетический отбор; б – при малой скорости отбора;
в – при очень большой скорости отбора.

Изокинетический отбор может быть осуществлен одним из двух путей: либо с использованием трубки нулевого типа, либо измеряя скорость газового потока с помощью трубки Пито как можно ближе к заборной трубке (не нарушая режима потока) и регулируя скорость отбора. В трубке нулевого типа поддерживается статическое равновесие между напорами внутри канала трубки и на ее внешней стенке (рис. 3.20).

Отводы для измерения статического напора подсоединены к обоим плечам U–образного манометра, во время анализа регулируют скорость отбора.

Отбор запыленности производят аналогично замеру расхода воздуха пневмометричечкими трубками, разбивая сечение воздуховода на условные кольца.

Средняя запыленность рассчитывается как

$$C_{ср} = \frac{C_1 W_1 + C_2 W_2 + ... + C_n W_n}{W_1 + W_2 + ... + W_n},$$

где $C_1, C_2, \ldots, C_n$ – запыленность в отдельных участках сечения газохода;

$W_1, W_2, ..., W_n$ – скорость потока в отдельных участках сечения газохода.

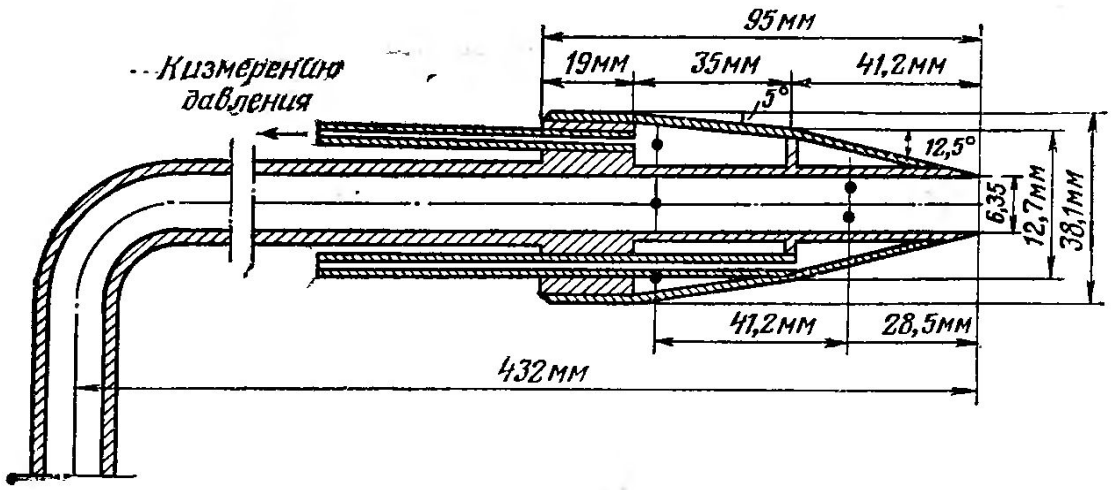


Рис. 3.20. Конструкция пробоотборной трубки нулевого типа

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ

Электрические методы. К этим методам относится контактно–электрический, основанный на способности пылевых частичек электризоваться при контактировании с преградой, выполненной из контактно–активного материала и отдавать приобретенный заряд токопроводящим элементам преграды.

Зависимость массовой концентрации частиц от силы зарядного тока в цепи токосъемного электрода имеет линейный характер при концентрации пыли

до 2 г/м^3. На электризацию частиц существенное влияние оказывает дисперсность, влажность, температура и другие свойства пылегазового потока.

Акустический метод основан на измерении параметров акустического поля при наличии частиц пыли в рабочем зазоре между источником и приемником звука. Метод имеет довольно сложную аппаратуру.

Оптические методы наиболее просты и надежны. В основу их положены явления поглощения света движущимся пылегазовым потоком и рассеяния света движущимися частицами пыли. Точность и достоверность метода во многом определяется стабильностью свойств частиц пыли. Изменение дисперсного состава пыли дает сильную погрешность определения концентрации.

4. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ ДВИЖЕНИЮ ЧАСТИЦ

В процессах пылеулавливания основную роль играют такие процессы, как гравитационное разделение и центрифугирование, перехват и инерционное столкновение или действие электростатических, термических или магнитных сил.

В сущности, установка для улавливания частиц представляет собой систему, через которую проходит газовый поток, и в которой частицы подвергаются воздействию некоторых сил, способствующих удалению этих частиц из потока. Для эффективности работы установки, прилагаемые силы должны быть достаточно велики, чтобы удалить частицу из газового потока за время ее пребывания в улавливающей системе.

Расчет сопротивления среды при наличии поперечного движения частицы является основополагающим для определения эффективности конкретного механизма удаления частицы из газовой потока. Например, в простейшей очистной установке – пылеосадительной камере, представляющей собой замкнутое пространство, через которое проходит газовый поток, действующему на частицы полю тяготения Земли противостоит сопротивление газового потока па-

дающим частицам. Крупные частицы, падающие быстрее, улавливаются, в то время как более мелкие частицы, которые не успевают оседать за время пребывания газового потока в камере, могут проскочить.

Рассмотрим методы расчета сопротивления среднему движению частиц под действием внешних сил.

Наиболее простым примером расчета системы газ – частица является расчет сферической частицы, движущейся с установившейся постоянной скоростью в непрерывном бесконечном потоке. Поэтому вначале будет рассмотрен этот случай, а другие типы частиц и другие факторы будут связываться с этой системой. В дальнейшем рассмотрим следующие варианты:

- частицы, движущиеся вблизи стенки;
- взаимодействие друг с другом нескольких частиц;
- частицы несферические по форме;

СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ В СЛУЧАЕ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ДВИЖУЩИХСЯ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ

Даже для упрощенной модели сферы, движущейся поперек ламинарного потока с установившейся постоянной скоростью, уравнение зависимости между сопротивлением среды и скоростью частицы очень сложно. Однако данные, связывающие эти функции, могут быть представлены одной кривой [18] (рис. 4.1). По оси абсцисс отложен логарифм безразмерной функции относительной скорости в виде числа Рейнольдса для частицы

$$\mathrm{Re} = \frac{u d \rho}{\mu},$$

где u – относительная скорость;

d – диаметр сферы (или линейный размер частицы);

ρ – плотность среды;

μ – вязкость среды.

Ордината представляет собой логарифм функции, называемой коэффициентом лобового сопротивления C_D, определяемой уравнением

$$C_D = \frac{F}{A \frac{1}{2}\rho u^2}, \qquad (4.1)$$

где F – функция сопротивления среды;

A – площадь поверхности, перпендикулярной направлению движения;

$\frac{1}{2}\rho u^2$ – кинетическая энергия единицы поверхности среды, движущейся за частицей.

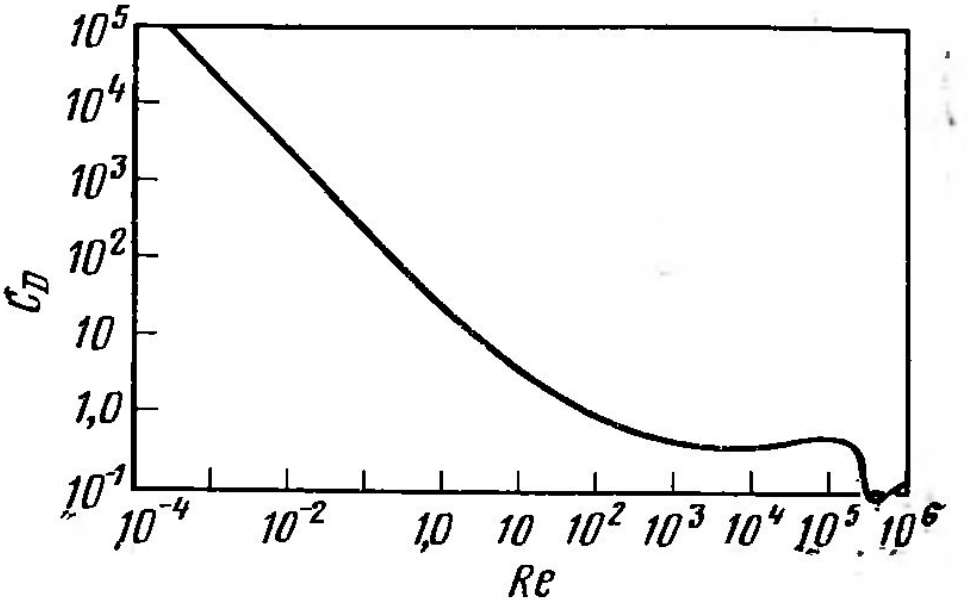


Рис. 4.1. Соотношение между коэффициентом лобового сопротивления и числом Рейнольдса для сферических частиц

Для сферической частицы величина A равна $\pi d^2/4$, при этом уравнение (4.1) переходит в следующее

$$C_D = \frac{8F}{\pi \rho u^2 d^2}. \qquad (4.2)$$

Кривую, представленную на рис. 4.1, можно разбить на четыре участка, каждый из которых характеризует особое явление, зависящее от вида обтекания частицы потоком, поэтому для расчета коэффициента лобового сопротивления на каждом участке можно использовать соответствующие формулы.

При очень низких скоростях, т. е. при числах Рейнольдса порядка 0,1, поток перед и за частицей обладает симметрией (рис. 4.2 а).

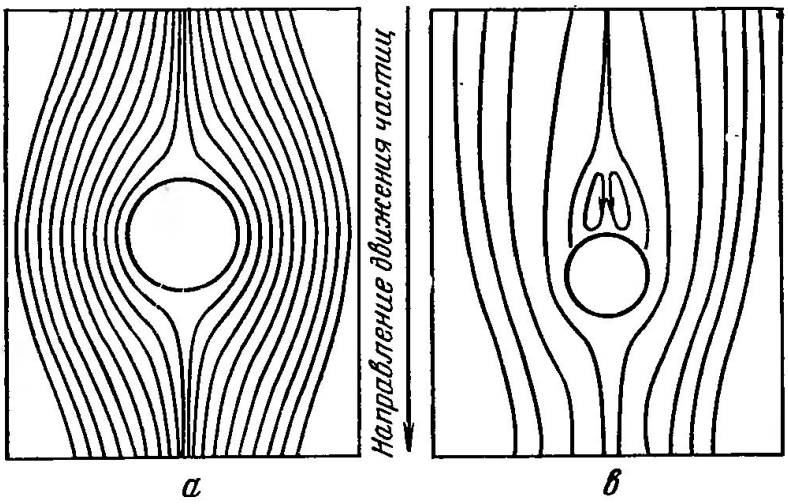


Рис. 4.2. Стационарный поток вблизи сферической частицы при ламинарном течении: а – область вязкого течения; б – переходная область (Re ~ 2).

Элементы среды, набегающие на частицу, приобретают некоторое боковое ускорение, действие сил инерции слишком слабо, чтобы вызвать запаздывание в смыкании потока за частицей. Это область вязкого обтекания, или область Стокса.

Для этих условий Стокс [17] нашел, что сопротивление потока может

быть определено следующим образом

$$F = 3\pi\mu du. \qquad (4.3)$$

Это уравнение было получено при условии, что членами уравнения Навье – Стокса, характеризующими силы инерции для жесткой сферы в безграничном потоке, можно пренебречь. Исходя из уравнения (4.2) коэффициент лобового сопротивления для области вязкого течения может быть представлен в виде

$$C_D = \frac{24}{Re}.$$

При Re = 0,05 сопротивление среды, рассчитанное из уравнения (4.2), совпадает с точностью до 1% с экспериментальными данными, но при Re = l рассчитанное сопротивление среды на 13% меньше экспериментальных значений.

При числах Рейнольдса несколько больше 0,1 возрастает запаздывание при смыкании элементов среды позади частицы, и начинается образование спутной струи. Для учета этого явления Осин [9] предложил уравнение, в котором частично учитываются коэффициенты инерции в уравнении движения:

$$C_D = \frac{24}{Re}\left(1 + \frac{3}{16}Re\right).$$

Коэффициент лобового сопротивления, полученный из этого уравнения, на 3% выше экспериментального значения при Re = l.

Вначале при образовании спутной струи среда закручивается с образованием стационарных вихревых колец (рис. 4.2 б), причем размеры вихревых колец растут при увеличении скорости частицы. Это переходная область, назы-

ваемая областью Аллена по имени Г. С. Аллена, одного из первых ее исследователей.

Аллен экспериментально нашел, что в области $30 < Re < 300$

$$C_D \approx \frac{10}{\sqrt{Re}}.$$

Часто удобно использовать это простое приближенное соотношение в уравнениях, требующих последующего интегрирования, поскольку более точные соотношения могут быть проинтегрированы только числовыми методами.

Более сложное выражение, преимущество которого заключается в возможности его использования для аналитического решения задачи, было предложено Клячко [Страус]

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}}.$$

Результаты с точностью до 2% совпадают с экспериментальными данными в области $3 < Re < 400$.

Эмпирическое уравнение, основанное на обработке методом наименьших квадратов доступных экспериментальных данных, было выведено Сиском [14]. Оно справедливо с точностью до 2 % в очень широком интервале $0{,}1 < Re < 3500$ и оно может быть легко запрограммировано для расчета на ЭВМ

$$C_D = 29{,}6\, Re^{(0{,}554 \ln Re - 0{,}983)}.$$

При числах Рейнольдса несколько более 500, которое является верхним пределом переходной зоны, вихревые кольца отрываются от тела и образуют вытянутую спиральную струю, устойчивую до Re = 1000, поэтому коэффици-

ент лобового сопротивления остается практически постоянным на уровне 0,38 – 0,5. Следовательно, сопротивление среды тоже приблизительно постоянно, и может быть найдено из уравнения

$$F = [C_D]_{const} A \frac{1}{2} \rho u^2,$$

выведенного Ньютоном, который предположил, что коэффициент лобового сопротивления равен единице. Обычно эту область называют областью Ньютона.

При гораздо больших скоростях, в области $Re = 2 \cdot 10^5$, пограничный слой потока перед сферой становится неустойчивым, а при еще более высоких скоростях разделительный круг переходит к задней стороне частицы, что приводит к резкому уменьшению коэффициента лобового сопротивления от 0,4 до 0,1.

Конечная скорость, которой может обладать частица, – это скорость, достигаемая при условии, что сопротивление среды становится равным внешней силе, прилагаемой к частице. Если эта сила G, то конечная скорость u_t равна

$$u_t = \sqrt{\frac{2G}{A \rho C_D}}.$$

Для сферической частицы, движущейся в области вязкого обтекания, уравнение переходит в

$$u_t = \frac{G}{3 \pi d \mu}.$$

Если внешней силой, действующей на частицу, является сила тяготения, то

$$u_t = \frac{d^2(\rho_ч - \rho)g}{18\mu},$$

где $\rho_ч$ – плотность частицы.

В общем случае, за пределами области вязкого течения, при действии на частицу силы тяжести

$$u_t = \sqrt{\frac{4d(\rho_ч - \rho)g}{3\rho C_D}}.$$

В переходной области, где C_D является функцией числа Рейнольдса, это уравнение трудно решить, не прибегая к методу последовательных приближений.

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ ЧАСТИЦ В СРЕДЕ, ОГРАНИЧЕННОЙ СТЕНКАМИ

Для некоторых типов пылеулавливающих аппаратов, таких как пылеосадители, циклоны, электростатические фильтры, размеры частиц пренебрежимо малы по сравнению с размерами оборудования. Однако в других случаях, например для тканевых или насыпных фильтров с мелкими зернами, расстояния между волокнами ткани или между зернами достаточно малы, поэтому поток, проходящий сквозь фильтрующую среду, становится подобным потоку среды, ограниченной одной или несколькими стенками.

Это может привести к увеличению лобового сопротивления потока движущимся через фильтры частицам. Однако следует отметить, что современные теории фильтрации не всегда учитывают этот фактор.

Наличие ограничивающей стенки вызовет два эффекта в потоке, в котором движется частица: движение среды в стороны, вызываемое раздвигающей

ее частицей, останавливается стенкой, и воздействие стенки на частицу, когда линии обтекания вокруг частицы искажены наличием стенки.

Граничные эффекты зависят от типа границы. Теоретические соображения и экспериментальные работы позволили установить коэффициенты для модифицированного уравнения закона Стокса (4.2) для следующих случаев:

- частица вблизи одной стенки;
- частица между двумя параллельными стенками;

Аэродинамическое сопротивление потока вблизи границы F_w может быть рассчитано из следующего соотношения

$$F_W = \frac{F}{k},$$

где F – лобовое сопротивление по закону Стокса;

k – граничный поправочный коэффициент.

Для трех случаев поправочный коэффициент определяется следующими уравнениями.

1. Сферическая частица движется параллельно бесконечной плоской стенке бесконечной протяженности на расстоянии L/2 от стены:

$$k = 1 - \frac{9}{16}\frac{d}{L}.$$

2. Сферическая частица, движущаяся между двумя равноудаленными стенками, расстояние между которыми равно L:

$$k = 1 - 1{,}004\frac{d}{L} + 0{,}418\left(\frac{d}{L}\right)^3 + 0{,}21\left(\frac{d}{L}\right)^4 - 0{,}169\left(\frac{d}{L}\right)^5.$$

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ НАЛИЧИИ НЕСКОЛЬКИХ ЧАСТИЦ

Практически во всех случаях в газовом потоке присутствует значительное количество частиц, поэтому уравнения сопротивления потока движению одной частицы необходимо модифицировать таким образом, чтобы учесть взаимное влияние частиц, которое становится заметным уже при достаточно малых концентрациях. Так, при объемной концентрации частиц (отношение объема частиц к общему объему), равной 0,002 $м^3/(м^2 \cdot ч)$, сопротивление среды движению частиц возрастает на 1%.

Движение системы частиц в безграничной среде приводит к движению среды вокруг этой системы. Когда частицы находятся достаточно близко одна к другой, среда между частицами движется вместе с ними и такая система может рассматриваться как облако (рой). Если система частиц движется между стенками или если частицы достаточно удалены друг от друга, среда будет двигаться также и между частицами. В практическом случае это означает, что существует движение частиц, как в виде облаков (роев), так и другие промежуточные типы движения частиц в виде систем переменного состава и индивидуальных частиц.

Задача настолько сложна, что до настоящего времени были найдены лишь частные решения для предсказания движения роя частиц и тормозящих эффектов. В общем случае рои частиц имеют тенденцию двигаться быстрее, чем индивидуальные частицы, в то время как системы в пристенном слое движутся медленнее отдельных частиц.

Высказано предположение [Страус], что частицы в бесконечной среде ведут себя, как капли одной среды, движущиеся в другой. Для этого случая, в области ламинарного потока, был рассчитан поправочный коэффициент, который учитывал внутренние перемещения, вызванные вязким лобовым сопротивлением, но пренебрегал эффектами, обусловленными поверхностной энергией. Сопротивление движению капли, или пузырька, описывается соотношением

$$F = 3\pi\mu du\left(\frac{2\mu + 3\mu_d}{3\mu + 3\mu_d}\right), \qquad (4.4)$$

где μ_d – вязкость «капельной среды».

В том случае, когда вязкость «капельной среды» равна вязкости окружающей среды, поправочный коэффициент равен 5/6; если вязкость капель намного ниже вязкости окружающей среды (т. е. пузырьки газа в жидкости) поправочный коэффициент равен 2/3; в случае же капель с очень высокой вязкостью (причем экстремальным случаем здесь является твердая сфера) поправочный коэффициент равен 1, и уравнение (4.4) переходит в простое уравнение Стокса.

Следовательно, если предположить, что рой частиц имеет сферическую форму и вязкость внутри роя такова же, какова вязкость окружающей среды, сопротивление среды движению облака запишется в виде

$$F_0 = \frac{5}{2}\pi\mu d_0 u,$$

где d_0 – диаметр облака.

Предположение о равных вязкостях не имеет твердого обоснования, особенно если в облаке присутствуют частицы разных размеров; в этом случае мелкие частицы представляют собой часть среды, окружающей более крупные частицы, и вязкость такой суспензии будет определяться выражением

$$\mu_0 = \mu(1 - c)^{-k},$$

где c – объемная концентрация (отношение объема частиц к полному объему–суспензии);

k – константа, равная 2,5 для сфер.

При малых объемных концентрациях уравнение упрощается до

$$\mu_0 = \mu(1 + kc).$$

5. АСПИРАЦИЯ И ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ВОЗДУХА

Основное количество загрязнителей от предприятий стройиндустрии поступает в атмосферу в виде пыли. В ряде производственных процессов им сопутствуют газообразные загрязнители. Содержание пыли и других загрязнителей в газовых выбросах определяется опытным путем по стандартным методикам. Ориентировочные объемы и параметры загрязнителей приведены в таблицах 5.1...5.4.

Следует иметь в виду, что предприятия по производству цемента, извести, гипса и других пылящих продуктов характеризуются, как правило, развитой сетью дорог (до 25% площади территории) и интенсивным движением автотранспорта, что приводит к значительному повторному запылению осевшей на дорогах пыли и одновременному загрязнению воздуха выхлопными газами. Такие компоненты выхлопных газов автотранспорта, как углеводороды, оксид углерода, оксиды азота, адсорбируясь на пыли, состоящей из солей и оксидов кальция и других металлов, создают основу для фотохимических смогов, которые, как известно, могут за несколько часов с момента зарождения накрывать территории в десятки квадратных километров. Это обстоятельство, к сожалению, на современном уровне проектирования во внимание не принимается.

Выброс пыли цементного, известкового и гипсового производства

Таблица 5.1

Производство, процесс, оборудование	Концентрация пыли, г/м^3
Цементное производство	
Подготовка сырья	
Дробилки	10–20
Узлы перегрузки	20
Мельницы	80–100
Обжиг	
Вращающиеся печи обжига	40–50
Клинкерные холодильники	20–25
Узлы перегрузки	10
Сушка добавок в сушильном барабане	
Шлак	20
Опока	35
Известняк	40
Мергель	10
Глина	5
Помол клинкера и добавок	
Мельницы с центральной разгрузкой	600
– с переферийной	300
– сепараторные	700
Пост погрузки цемента	40
Упаковочные машины	95
Известковое производство	
Подготовка сырья	
Дробилки	15–20
Грохот	15
Узлы перегрузки	15

Получение извести	
Вращающиеся печи мокрый способ	30
Вращающиеся печи сухой способ	35
Шахтные печи	10
Помол извести	
Мельницы	65
Узлы перегрузки	30
Упаковочные машины	15
Гипсовое производство	
Дробилки	10–25
Шаровая мельница	50
Шахтная мельница	450
Сушильный барабан	25
Погрузка	15
Упаковка	20

Выделение пыли в производстве керамзита Таблица 5.2

Оборудование	Характеристика пыли		
	Концентрация, г/м^3	Выброс, г/с	Кол–во кг на 1 м^3 керамзита
Печь обжига	2,2	40	7,5
Пост погрузки	–	10	1

Ориентировочное количество пыли, выделяющейся при производстве минераловатных изделий Таблица 5.3

Изделие	Количество пыли на 1 м^3 продукции
Маты прошивные	9
Плиты на синтетическом связующем	
Полужесткие	6,5–9
Жесткие	8–10
Повышенной жесткости	14

Выброс пыли стекольного производства Таблица 5.4

Производство, процесс, оборудование	Концентрация пыли, г/м^3
Подготовительное производство	
Сушка песка	10
Доломита	35
Известняка	30
Сульфата натрия	50
Мела	35
Полевого шпата	45
Нефелина	15
Просеивание на ситах–буратах	5–30
Элеваторы	15–40
Конвейеры	5–15
Бункеры	1–10
Растаривание мешков	3
Пневмотранспорт	20
Весы	15
Дробилка	30
Плавка шихты, отжиг стекла	0,2
Изготовление	
Плитки облицовочной ковромозаичной	0,2
Шлакоситаллов	0,2
Стекла молочного светотехнического	0,02
Алюмоборосиликатного	0,06
Хрусталя	0,1

Производственная пыль заводов переработки нерудных материалов содержит свободную двуокись кремния [15]. Ее содержание в некоторых горных породах и предельное допустимой содержание в воздухе в соответствии с СНиП приведено в табл. 5.5.

Содержание SiO_2, % в некоторых горных породах Таблица 5.5

Порода	**Содержание *SiO_2*, %**	**ПДК, мг/м^3**
Граниты	25–65	2
Кварциты	57–92	1
Песчаники	30–76	2
Известняки	3–7	4

Для обеспечения допустимого содержания пыли в воздухе необходим комплекс мероприятий:

- максимальная герметизация технологического оборудования,
- увлажнение горной массы (гидрообеспыливание),
- аспирация,
- уборка помещений от осевшей пыли,
- приточная вентиляция.

Вентиляция – естественный или искусственный регулируемый воздухообмен в помещениях, обеспечивающий создание воздушной среды в соответствии с санитарно – гигиеническими и технологическими требованиями.

В зависимости от способов, вызывающих движение воздуха, вентиляцию разделяют на естественную (гравитационную) и искусственную (механическую) [20].

При естественной вентиляции воздухообмен происходит за счет разности плотностей наружного и внутреннего воздуха. Воздухообмен происходит при открывании фрамуг, расположенных вверху и внизу здания.

При искусственной вентиляции воздух перемещается вентиляторами с электрическим приводом.

Вентиляция может быть вытяжной, приточной и приточно – вытяжной. В зависимости от способа организации воздухообмена вентиляция может быть общеобменной и местной.

Общеобменная вентиляция предназначена для удаления вредных ве-

ществ, пыли и газов, если они распространяются по всему помещению, и нет возможности уловить их в местах выделения (литейные, сварочные цеха).

Местную вытяжную вентиляцию устраивают в тех случаях, когда нужно удалить загрязненный воздух непосредственно от агрегатов, его загрязняющих. Для отсасывания пыли, образующейся при некоторых технологических процессах, создают вытяжную систему, называемую аспирацией.

Основные требования к аспирации:

1. Минимальная протяженность воздуховодов.

2. Число местных отсосов на одну аспирационную установку, как правило, не более 5 единиц.

3. Угол наклона воздуховодов, как правило, не менее 45 – 60 градусов к горизонту

4. Скорости воздуха рекомендуется устанавливать:

- 10 – 15 м/с при угле наклона воздуховода более угла естественного откоса пыли,
- 15 – 18 м/с при угле наклона менее угла естественного откоса пыли,
- 18 – 20 м/с на горизонтальных участках.

5. Потери давления в отдельных ветвях следует уравнивать расчетным путем без применения регулировочных клапанов, шиберов (изменением диаметров воздуховодов и их длины).

Скорости в приемных отверстиях воздухоприемников, исходя из крупной пыли, приведены в табл 5.6.

Рекомендуемые скорости воздухоприемников Таблица 5.6

Для укрытий оборудования первичного дробления	не более 3 м/с
Для укрытий оборудования вторичного и третичного дробления	не более 2 м/с
Для укрытий сортировочного оборудования	не более 1,5 м/с

Воздухоприемники на укрытиях должны размещаться с учетом максимального сокращения уносов пыли в воздуховоды (рис. 5.1).

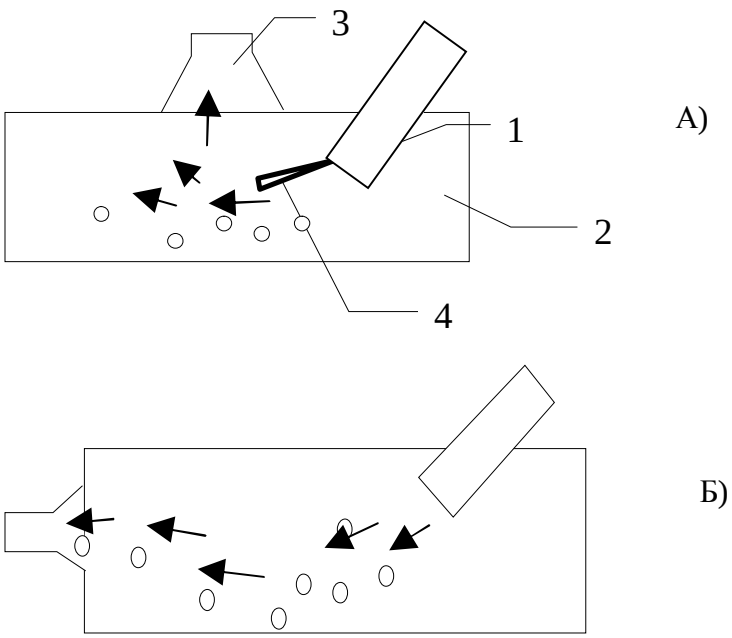


Рис. 5.1. Схемы воздухоприемников:

А) Правильное размещение воздухоприемника: 1 – течка, по которой поступает материал, 2 – кожух, 3 – возддухоприемник, 4 – отбойный щит;

Б) Неправильное размещение вохдухоприемника.

Во избежание уноса материала, необходимо, чтобы воздухоприемники не располагались на пути воздушного потока, поступающего в укрытие.

Воздуховоды должны быть из листовой стали толщиной 1,5 – 3 мм, радиусы закруглений воздуховодов рекомендуется выполнять не менее двух диаметров. Тройники (отводы) должны иметь угол примыкания не более 30 градусов.

ПРИМЕРЫ КОНСТРУКЦИЙ АСПИРАЦИОННЫХ УКРЫТИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Основные требования, предъявляемые к местным укрытиям:

- минимальный унос пыли в аспирационную установку при полном предотвращении ее выделения в производственные помещения (чем меньше пылеунос, тем меньше нагрузка в аспирацию);

- удобное обслуживание технологического оборудования;
- достаточная прочность для восприятия ударов транспортируемого материала.

Укрытие ленточного конвейера

Укрытие в местах перегрузки материала из течек на ленточные конвейеры (рис. 5.2) состоит из уплотняющих фартуков 1, подводящих трубопроводов с вентилями 2, форсунок для разбрызгивания воды 3, аспирационной воронки 4.

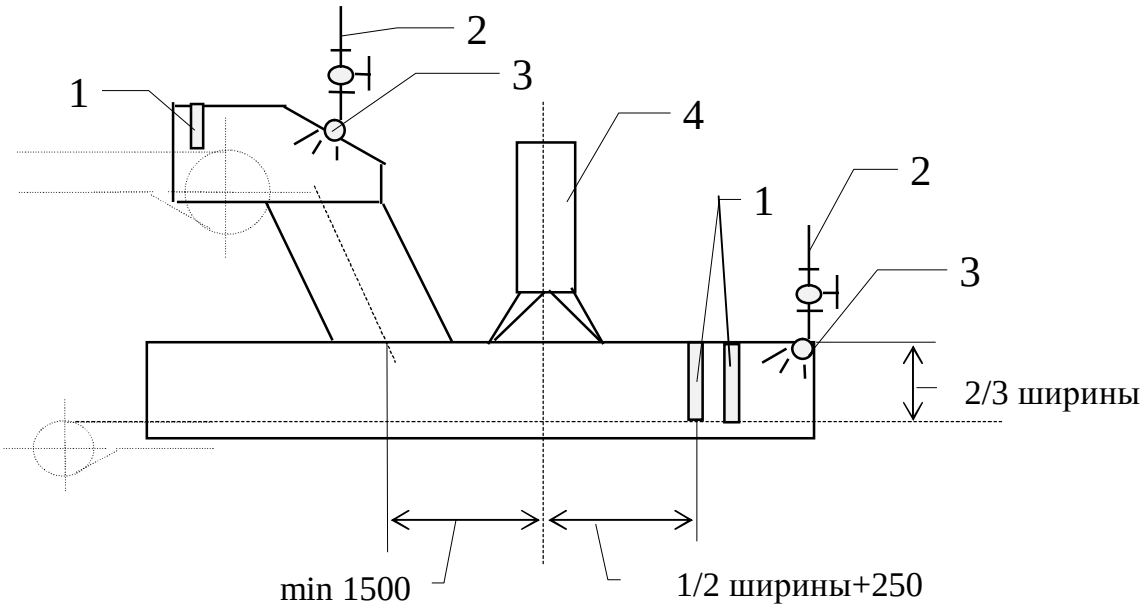


Рис. 5.2. Укрытие в местах перегрузки материала
из течек на ленточные конвейеры

Конструкция фартука представлена на рис. 5.3.

Сухие укрытия пылеуловители нуждаются в разработке как в направлении интенсификации процесса осаждения пыли, так и в направлении простоты и надежности конструкции. Рассмотрим инерционный захват решетки пластин в укрытиях.

Простейший способ осаждения пыли в укрытии можно осуществить с помощью фартука, выполненного из вертикально подвешенных намагниченных пластин и установленного между желобом и аспирационным патрубком (рис. 5.4) [19] .

Запыленность отсасываемого воздуха при такой компоновке уменьшается

в два раза по сравнению с укрытием без намагниченной решетки.

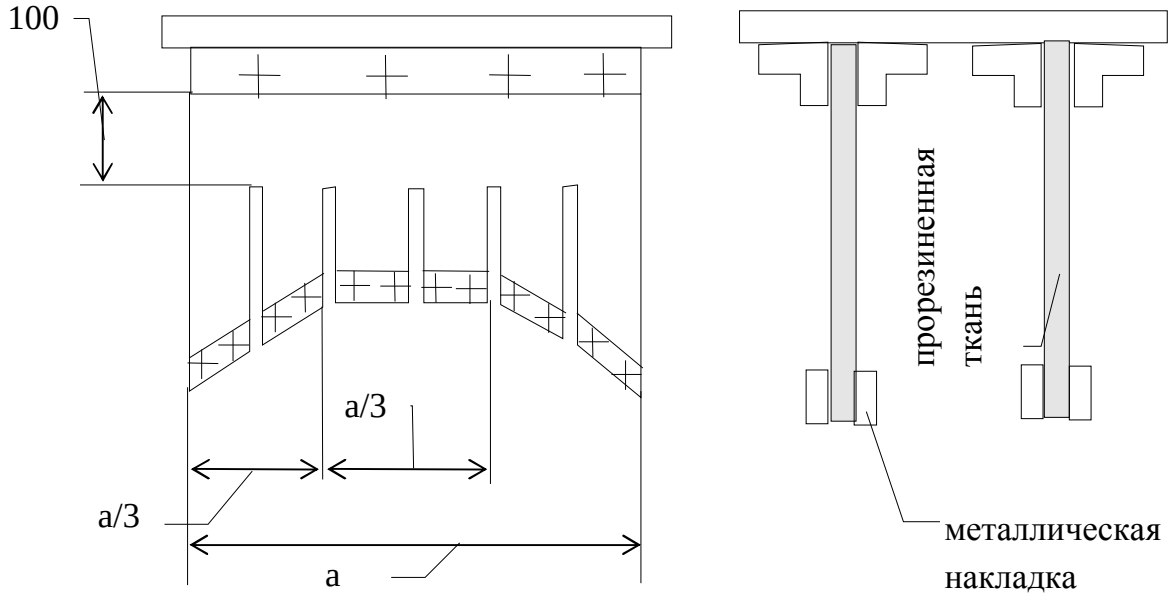


Рис. 5.3. Конструкция уплотняющего фартука

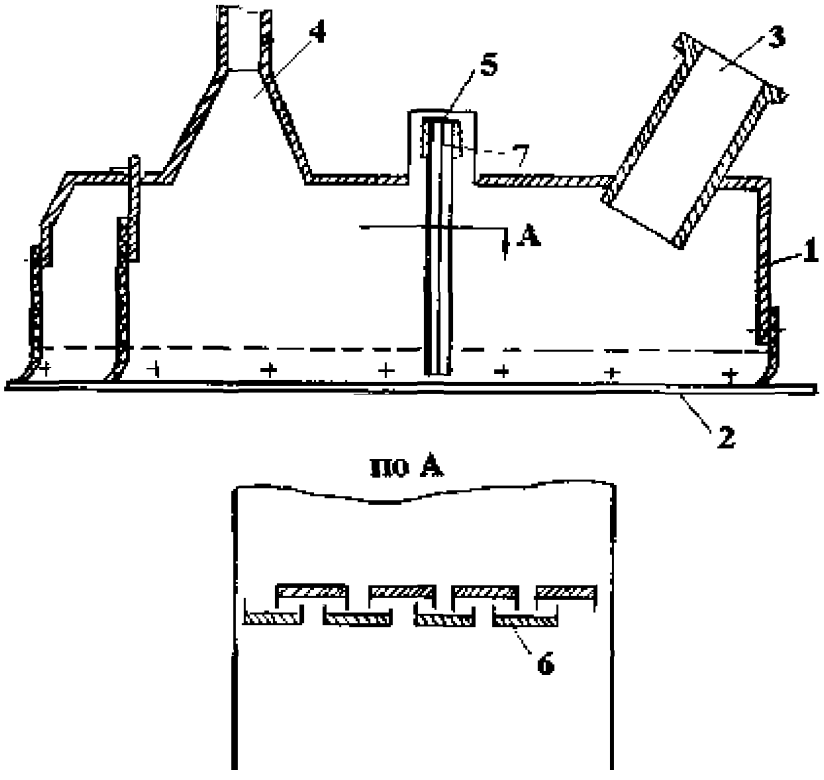


Рис. 5.4. Аспирационное укрытие места загрузки конвейера:

1 - укрытие; 2 - лента конвейера; 3 - желоб; 4 - аспирационный патрубок;

5 - фартук; 6 - пластины фартука с магнитами; 7 - шарнир

Среди различных технических приемов снижения уноса грубодисперсной пыли наиболее распространен способ поддержания минимальных скоростей воздуха в приемных сечениях местных отсосов. Эффект этого приема можно существенно повысить, если местный отсос наделить функциями грубой очистки отсасываемого воздуха.

На рис. 5.5. показан местный отсос циклонного типа [2]. Он состоит из корпуса 1, отсасывающей воронки 2 в виде усеченного конуса, вентиляционного патрубка 3, размещенного внутри пылеприемника 4 конической формы с вытяжными отверстиями 5 и направляющими лопатками 6, пыленакопителем 7.

Местный отсос работает следующим образом. В процессе загрузки сыпучего материала образующийся запыленный воздух в корпусе 1, обтекая пылеприемник 4, направляется внутрь его через вытяжные отверстия 5 с направляющими лопатками 6. При обтекании направляющих лопаток воздушный поток за счет разрежения у кромки лопаток настилается на внутреннюю поверхность пылеприемника. При этом обеспечивается тангенциальное движение воздушных масс внутри пылеприемника, Т.е. происходит их закручивание. Концентрация содержащихся в них пылевых частиц возрастает в результате инерционной сепарации, что приводит к их коагуляции с последующим осаждением на стенки пылеприемника и ссыпанием в пылесборник. Очищенный воздух поступает в вентиляционный патрубок. Степень пылезадержания отсоса достигает 50%.

Наряду с местными укрытиями широко применяется **гидрообеспыливание** узлов пересыпки материала.

Рекомендуемое увлажнение на гравийно–сортировочных заводах составляет 8 – 10% для прочных пород (граниты) и 4 – 6% для осадочных пород (песчаники, известняки).

Форсунки следует располагать над приемными бункерами, в укрытиях при поступлении горной массы в дробилку, в укрытиях при перегрузках на конвейеры, над грохотами с диаметром отверстий сит не менее 20 мм (при меньшем размере ячеек они будут замазываться влажным сырьем).

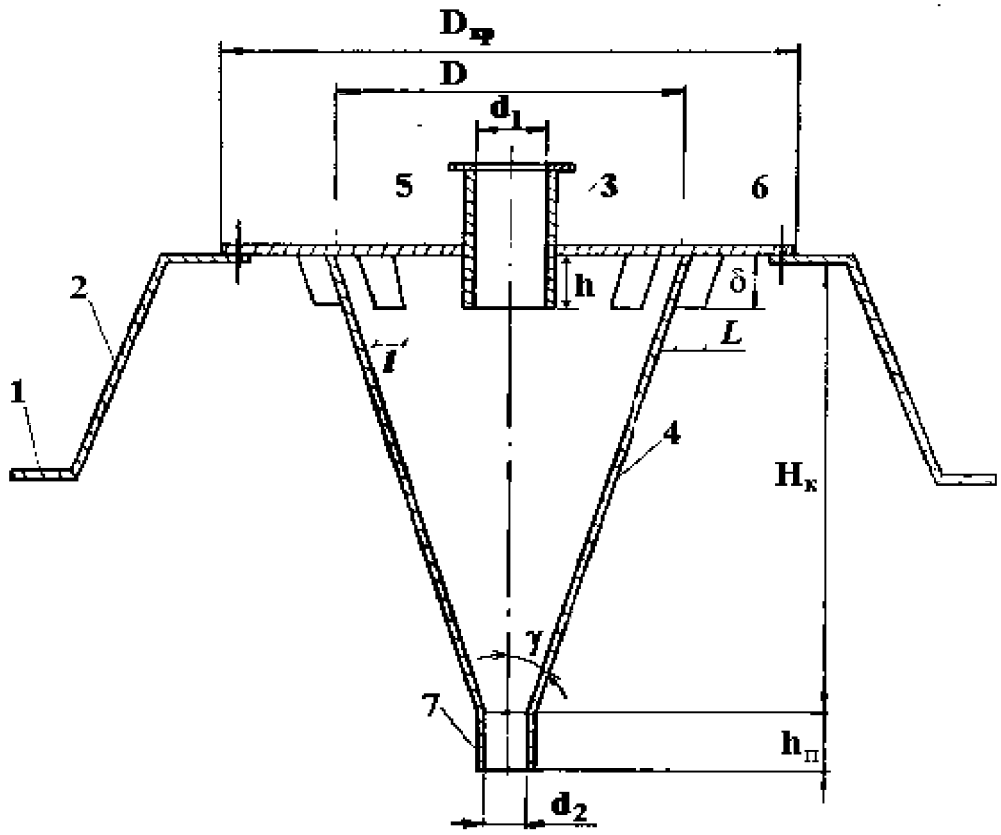


Рис. 5.5. Местный отсос циклонного типа:

1 - корпус; 2 - отсасывающая воронка; 3 - патрубок; 4 - пылеприемник;

5 - вытяжное отверстие; 6 - направляющая лопатка; 7 - пыленакопитель

РАСЧЕТ ВОЗДУХОВОДОВ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С МЕХАНИЧЕСКИМ ПОБУЖДЕНИЕМ

Перемещение воздуха по воздуховодам и другим элементам вентиляционной сети, как и всякое движение, совершается за счет затрат энергии на преодоление сопротивления трению и местных сопротивлений.

Для расчета прямоугольных воздуховодов вводится понятие об эквивалентном диаметре.

Эквивалентный диаметр $d_э$ – это диаметр круглого воздуховода, который при скорости движения воздуха, равной скорости движения в прямоугольном воздуховоде, дает такую же потерю на трение на единицу длины, как и прямо-

угольный воздуховод:

$$d_э = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b},$$

где a и b – стороны прямоугольного воздуховода, мм,

Местные сопротивления – это потери давления в фасонных частях воздуховодов и вентиляционных устройствах (воздухонагреватели, фильтры), возникающие при изменении скорости или направления потока воздуха.

Потери давления определяют с помощью коэффициентов местных сопротивлений, вычисленных опытным путем

$$\Delta P = \sum \xi \cdot \rho_г \cdot W^2 / 2,$$

где $\rho_г$ – плотность воздуха, кг/м^3;

$\Sigma\xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на рассматриваемом участке воздуховода;

W – скорость движения воздуха, м/с.

Как правило можно ограничиться следующим значением:

$$\sum \xi = \xi_{вх} + \xi_{отв} + \xi_р + \xi_{пр} + \xi_{к.вх},$$

где $\xi_{вх}$ – коэффициент местного сопротивления входа в пылеприемник ($\xi_{к.вх}$ = 0,445 – коэффициент местного сопротивления входа в конический коллектор);

$\xi_{отв}$ – коэффициент местного сопротивления отвода и поворотов;

$\xi_{пр} = \lambda \cdot l/d$ – коэффициент местного сопротивления прямых участков;

l – длина прямого участка газохода, м;

λ – безразмерный коэффициент сопротивления трению, зависящий от скорости движения воздуха и от характера внутренних поверхностей воздуховода (гладкие или шероховатые);

d – диаметр воздуховода, м;

Коэффициент сопротивления трения по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0{,}11\left(\Delta_э / d + 68/\mathrm{Re}\right)^{0.25},$$

где $\Delta_э$ – высота микронеровностей газохода, м

РАСЧЕТ АСПИРАЦИОННОЙ СЕТИ

Прежде чем приступить к расчету аспирационной сети, намечают трассу сети на плане помещения и составляют ее схему в аксонометрической проекции в масштабе 1 : 100. Всю сеть воздуховодов разбивают на участки, к которым относят примыкающие к ним местные сопротивления (фасонные части, воздухонагреватели и др.). На схеме проставляют длину l (м) каждого участка, количество перемещаемого по нему воздуха V($м^3$/ч) и его порядковый номер.

При перемещении воздуха вентилятором задаются скоростями его движения на каждом рассчитываемом участке. Зная расход и скорость движения воздуха, по таблицам или номограммам определяют сопротивление (потерю давления) на участке. При подборе скорости следует иметь в виду, что увеличение скорости позволяет уменьшить диаметр воздуховода и, следовательно, металлоемкость. Однако большая скорость вызывает увеличение потерь давления в сети (пропорционально квадрату скорости движения воздуха) и соответственно увеличение расхода электроэнергии (если необходима только вентиляция, скорости в воздуховодах принимают в пределах от 4 до 12 м/с).

Для каждого участка определяют сумму потерь на трение и сумму мест-

ных сопротивлений, и по формуле вычисляют общие потери давления

$$P = \sum_{i}^{n}\left(l \cdot \frac{\lambda}{d} + \sum \xi \right) \frac{\rho_г \cdot W^2}{2}$$

где n – число участков сети; l – длина участка, м.

При расчете сети воздуховодов сначала выбирают наиболее длинную или наиболее нагруженную линию воздуховодов (магистраль) и определяют потери давления в ней (рис. 5.6)

Например, такой участок обозначают цифрами 1–2–3–4–5–6–7–7’.

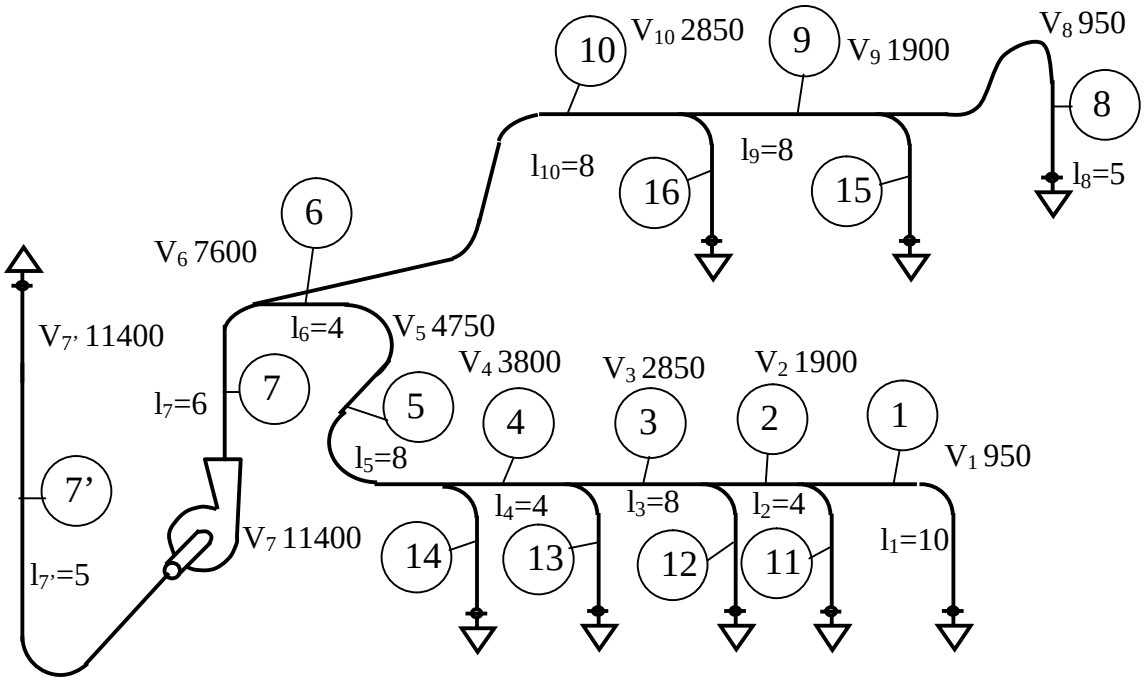


Рис. 5.6. Аксонометрическая схема вентиляционной сети

По полученным на этом участке потерям давления подбирают напор вентилятора. Затем рассчитывают боковые ответвления, для которых начальное давление – это давление в точках присоединения ветвей к основной магистрали. Диаметры воздуховодов ответвлений подбирают по этому уже известному давлению путем повторных расчетов.

В основном, используются два типа вентиляторов:

– пылевые для аспирационных систем;

– общего назначения низкого давления для приточных установок в отапливаемых корпусах.

Вентилятор подбирают по сумме полных давлений всасывающего и напорного воздуховодов с учетом потерь или подсосов воздуха, для чего вводится поправочный коэффициент на расчетное количество воздуха, равный 1,1...1,15. Обычно вентиляторы подбирают по таблицам и номограммам, составленным с учетом всех характеристик. В отдельных случаях вентилятор подбирают по индивидуальной характеристике, которая представляет собой зависимость полного давления P, развиваемого вентилятором, потребляемой мощности N и коэффициента полезного действия η от его подачи V при постоянной частоте вращения n рабочего колеса вентилятора.

При выборе вентилятора следует стремиться, чтобы его КПД был максимально большим.

Мощность, потребляемая вентилятором, находится в прямой зависимости от объема перемещаемого воздуха, давления, создаваемого им, и коэффициента полезного действия вентилятора. Мощность $N_{\text{вент}}$ (кВт) определяют по формуле

$$N_{\text{вент}} = \frac{V \cdot P_{\text{п}}}{(3600 \cdot 102 \cdot \eta)}$$

где $P_{\text{п}}$ – полное давление, создаваемое вентилятором, Па;

η – КПД вентилятора.

Для каждого типа вентилятора существует предельная частота вращения, которая зависит от прочности рабочего колеса. Для уменьшения аэродинамического шума, создаваемого вентилятором, окружная скорость колеса у осевых вентиляторов должна быть не более 20 м/с, у радиальных (центробежных) – не более 13 м/с.

Электродвигатели для вентиляторов подбирают по специальным каталогам в зависимости от потребляемой мощности и частоты вращения рабочего колеса вентилятора, а также от условий, в которых будет работать электродвигатель, При определении мощности электродвигателя учитывают потери, зависящие от способа соединения вентилятора с электродвигателем.

Установленную мощность электродвигателя $N_{эл}$ (кВт) определяют по формуле

$$N_{эл} = N_{вент} \cdot k$$

где k – коэффициент запаса мощности, выбираемый по справочным данным.

Производительность аспирационных установок следует принимать по объему отсасываемого из укрытий воздуха с надбавкой 10% на подсосы через не плотности и 10 – 20% на подсосы в пылеуловителях. Производительность пылеуловителей и вентиляторов необходимо рассчитывать на одновременную работу всех присоединенных к данной установке местных отсосов.

6. МЕТОДЫ ПЫЛЕОЧИСТКИ

6.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Современные технологические процессы переработки рудного и нерудного сырья сопровождаются образованием значительных объемов пылегазовых потоков. Для утилизации тепла и выносимых с потоком дисперсных материалов пылегазовые потоки перед выбросом в атмосферу охлаждают и очищают.

Часть технологической схемы, которая предназначена для этой цели, состоит из газового тракта, системы теплотехнического и газоочистного оборудования и тягодутьевых устройств, включая дымовую трубу.

Пылеочистные аппараты, наиболее часто встречающиеся на предприятиях

строительной индустрии можно представить в виде табл. 6.1.

Классификация пылеулавливающих устройств Таблица 6.1

Пылеулавливающие аппараты														
Сухие устройства					Мокрые устройства					Электро-фильтры		Фильтрующие устройства		
Пылеосадительные камеры	Жалюзийные аппараты	Циклоны	Вихревые аппараты	Ротационные аппараты	Скрубберы	Динамические промыватели	Центробежные аппараты	Ударно–инерционные аппараты	Тарельчатые аппараты	Сухие	Мокрые	Тканевые	Зернистые	Пористые

Сухие пылеуловители – пылеосадительные камеры, жалюзийные аппараты, циклоны, вихревые, ротационные пылеуловители.

В пылеосадительных камерах используются гравитационные и инерционные механизмы осаждения пыли, т.е. обеспечивается медленное движение пылегазового потока изменение направления движения этого потока или установка на его пути препятствий (перегородок или полок).

В жалюзийном пылеуловителе отделение частиц происходит под действием инерционных сил, возникающих при повороте газового потока на входе в решетку, и за счет эффекта отражения частиц от поверхности этой решетки при соударении.

В циклонах различных типов под действием центробежных сил частицы пыли движутся по их стенке и попадают в бункер, а газовый поток поворачивает на 180^0 и через выходную трубу попадает в атмосферу.

В вихревом пылеуловителе под действием центробежных сил, возникаю-

щих при закручивании потока, частицы пыли устремляются к его периферии, а затем спиральными струями вторичного потока перемещаются к низу аппарата и в бункер.

В ротационном пылеуловителе за счет вращения пылевого потока возникают центробежные силы, под действием которых взвешенные в воздухе частицы пыли размером > 5 мкм выделяются из него в радиальном направлении и поступают в бункер.

Мокрое пылеулавливание – скрубберы и барботеры (газопромыватели), в которых запыленный газ промывается жидкостью, или в которых частицы пыли осаждаются на жидкостную пленку. В качестве орошающей жидкости в них чаще всего используется вода.

Улавливание пыли в электрофильтрах сухого и мокрого типов. В них процесс очистки пылегазового потока основан на ударной ионизации газа в зоне ионизующего разряда, передаче зарядов ионов частицам пыли и осаждение последних на осадительных электродах. При этом большое значение на процесс осаждения пыли на электродах играет элементарное сопротивление слоев пыли.

Фильтрование пыли на пористых перегородках при движении через них дисперсных сред. По типу перегородок фильтры бывают:

- с зернистыми слоями (неподвижные свободно насыпанные зернистые материалы, псевдоожиженные слои);
- с гибкими пористыми перегородками (ткани, войлоки, волокнистые маты, губчатая резина, пенополиуретан и др.);
- с пористыми полужесткими перегородками (вязальные и тканевые сетки, прессованные спирали и стружка, и др.);
- с жесткими пористыми перегородками (пористая керамика, пористые металлы и др.).

По конструктивному признаку фильтры делят на рукавные, ячейковые (рамочные и каркасные) и рулонные.

При значительных начальных концентрациях пыли применяют систему

последовательно соединенных пылеуловителей и фильтров, т.е. двух – или трехступенчатую очистку выбросов. Выбор пылеулавливающего аппарата в первую очередь зависит от дисперсного состава частиц пыли (табл. 6.2), а так же от других свойств пыли, требуемой степени очистки выбросов и от стоимости данного аппарата.

Выбор оборудования в зависимости от размера пыли Таблица 6.2

Размер частиц, мкм	Наименование аппарата
40...1000	Пылеосадительные камеры
20...1000	Циклоны диаметром 1...2 м
5...1000	Циклоны диаметром 1 м
20...100	Скрубберы
0,9...1000	Тканевые фильтры
0,05...100	Волокнистые фильтры
0,01...10	Электрофильтры

6.2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

В экономически допустимых пределах совершенство современных пылегазоочистных устройств принято оценивать по степени (коэффициенту) очистки

$$\eta_{tot} = \frac{M_b - M_e}{M_b} 100 = \frac{C_b W_b - C_e W_e}{C_b W_b} 100 = \left(1 - \frac{C_e W_e}{C_b W_b}\right) 100\% \qquad (6.1)$$

где M_b, C_b, W_b – масса, средняя концентрация загрязнителя и расход газовых выбросов до очистки;

M_e, C_e, W_e – то же, после очистки.

В ряде конкретных случаев, т.е. при отсутствии подсоса, можно принять с достаточной для практических расчетов точностью $W_b = W_e$, тогда

$$\eta_{tot} = \left(1 - \frac{C_e}{C_b}\right)100 = (1 - \varepsilon)100\% \qquad (6.2)$$

где ε – коэффициент проскока (пылеунос).

Если запыленные газы последовательно обрабатываются в нескольких аппаратах, то коэффициент очистки определяют из выражения

$$\eta_{tot} = 100 - \prod_{n=1}^{N} \varepsilon_n \,\%, \qquad (6.3)$$

где $\varepsilon_n = 100 - \eta_n$ – коэффициент проскока загрязнителя через n – ый аппарат;

η_n – коэффициент очистки в n – ом аппарате;

N – количество аппаратов.

Соотношения 6.1...6.3 справедливы для выбросов, содержащих монофракционные взвешенные частицы или один гомогенный загрязнитель, при обработке которого не образуется новых токсичных соединений.

Для полидисперсных или многокомпонентных смесей эти формулы можно применять, если способ обезвреживания имеет одинаковые коэффициенты очистки по всем ингредиентам. Однако на практике приходится иметь дело с селективностью очистных устройств по загрязнителям.

Возможность использования того или иного типа устройства для обезвреживания выбросов определенного состава устанавливается по полному коэффициенту очистки, для подсчета которого необходимы данные о селективных коэффициентах очистки рассматриваемого аппарата. Селективную способность пылеосадительных устройств по отношению к полидисперсным примесям газовых выбросов принято характеризовать фракционными и парциальными коэф-

фициентами очистки.

Степени осаждения частиц, усредненные в пределах фракций, т.е. по интервалам размеров, представляющих фракцию, выражаются фракционными коэффициентами очистки:

$$\eta_F = \frac{\Delta M_i}{M_{ib}} 100 = \frac{\Delta F_i \left(M_b - M_e\right)}{F_{ib} M_b} 100 = \frac{\Delta F_i}{F_{ib}} \eta_{tot} \%,$$

где η_F – фракционный коэффициент очистки полидисперсной примеси в аппарате;

F_{ib}, ΔF_i – доля (процентное содержание) частиц i – той фракции в составе исходного и уловленного дисперсного вещества;

M_{ib}, ΔM_i – количество исходного и уловленного вещества i – той фракции;

$(M_b - M_e)$ – количество уловленного вещества всех фракций.

Если для усреднения принимают произвольные интервалы размеров частиц, то коэффициенты очистки называют парциальными:

$$\eta_P = \frac{\Delta P_i}{P_{ib}} \eta_{tot} \ \%,$$

где P_{ib}, ΔP_i – доля (процентное содержание) частиц i – того размера в составе исходного и уловленного дисперсного вещества.

Выведенные формулы могут быть полезны при наличии данных о количестве обезвреженного загрязнителя по ингредиентам. Получить достоверные сведения о фракционных и парциальных долях уловленных ингредиентов расчетным путем невозможно, поскольку процессы, происходящие в очистных установках, как правило не поддаются математическому описанию. Поэтому при проектировании приходится полагаться на эмпирические параметры более или менее сходных процессов, а затем корректировать работу аппарата при пускона-

ладочных испытаниях и в течение всего срока эксплуатации.

После решения вопроса о фракционных или парциальных коэффициентах очистки можно подсчитать полные коэффициенты очистки η_{tot} (состав загрязнителей должен быть задан или определен заранее):

$$\eta_{tot} = \sum_{i=1}^{N} \eta_{iF} \frac{F_{ib}}{100} \%;$$

$$\eta_{tot} = \sum_{i=1}^{N} \eta_{iP} \frac{P_{ib}}{100} \%;$$

$$\eta_{tot} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} C_{ib} \eta_{ie}}{\sum_{i=1}^{N} C_{ib}} \right) \%.$$

Если функции $\eta_F = f(D)$ и $F_{ib} = \varphi(D)$ можно описать законом статистически нормального (гауссового) распределения случайных событий, то, выразив их через соответствующие соотношения параметров $\lg\sigma_ч$, $\lg\sigma$, $\lg D_{50}$, $\lg D_m$, полный коэффициент очистки также можно представить в виде функции нормального распределения

$$\eta_{tot} = \Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{t^2}{2}} dx,$$

параметры t и x которой определяются по соотношениям:

$$t = \frac{\lg\left(D_{50} / D_m\right)}{\lg \sigma},$$

$$x = \frac{\lg\left(D_m / D_{50}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta - \lg^2 \sigma}},$$

где σ_η и D_{50} – соответственно дисперсия и диаметр частиц, осажденных в аппарате на 50%;

σ и D_m – соответственно дисперсия и медианный диаметр частиц исходного дисперсного вещества.

Значения функции нормального распределения $\Phi(x)$, %, по которым могут быть определены коэффициенты очистки η_i для соответствующих значений параметров x приводятся в табл. 6.3.

Значения функции нормального распределения Таблица 6.3

x	Φ(x),%	Φ(-x),%	x	Φ(x),%	Φ(-x),%	x	Φ(x),%	Φ(-x),%
0	50	50	0,72	76,42	23,58	1,44	92,51	7,49
0,02	50,8	49,20	0,74	77,03	22,97	1,46	92,79	7,21
0,04	51,6	48,40	0,76	77,64	22,36	1,48	93,06	6,94
0,06	52,39	47,61	0,78	78,23	21,77	1,50	93,32	6,68
0,08	53,19	46,81	0,80	78,81	21,19	1,52	93,57	6,43
0,10	53,98	46,02	0,82	79,39	20,61	1,54	93,82	6,18
0,12	54,78	45,22	0,84	79,95	20,05	1,56	94,06	5,94
0,14	55,57	44,43	0,86	80,51	19,49	1,58	94,29	5,71
0,16	56,36	43,64	0,88	81,06	18,94	1,60	94,52	5,48
0,18	57,14	42,86	0,90	81,59	18,41	1,62	94,74	5,26
0,20	57,93	42,07	0,92	82,12	17,88	1,64	94,95	5,05
0,22	58,71	41,29	0,94	82,64	17,36	1,66	95,15	4,85
0,24	59,48	40,52	0,96	83,15	16,85	1,68	95,35	4,65
0,26	60,26	39,74	0,98	83,65	16,35	1,70	95,54	4,46
0,28	61,03	38,97	1,00	84,13	15,87	1,72	95,73	4,27
0,30	61,79	38,21	1,02	84,61	15,59	1,74	95,91	4,09
0,32	62,55	37,45	1,04	85,08	14,92	1,76	96,08	3,92
0,34	63,31	36,69	1,06	85,54	14,46	1,78	96,25	3,75
0,36	64,06	35,94	1,08	85,99	14,01	1,80	96,41	3,59
0,38	64,80	35,20	1,10	86,43	13,57	1,82	96,56	3,44
0,40	65,54	34,46	1,12	86,86	13,14	1,84	96,71	3,29
0,42	66,28	33,72	1,14	87,29	12,71	1,86	96,86	3,14
0,44	67,00	33,00	1,16	87,70	12,30	1,88	96,99	3,01
0,46	67,72	32,28	1,18	88,10	11,90	1,90	97,13	2,87
0,48	68,44	31,56	1,20	88,49	11,51	1,92	97,26	2,74
0,50	69,15	30,85	1,22	88,88	11,12	1,94	97,38	2,62
0,52	69,85	30,15	1,24	89,25	10,75	1,96	97,50	2,5
0,54	70,54	29,46	1,26	89,62	10,38	1,98	97,61	2,39
0,56	71,23	28,77	1,28	89,97	10,03	2,00	97,72	2,28
0,58	71,90	28,10	1,30	90,32	9,68	2,10	98,21	1,79
0,60	72,57	27,43	1,32	90,66	9,34	2,20	98,61	1,39
0,62	73,24	26,76	1,34	90,99	9,01	2,30	98,93	1,07
0,64	73,89	26,11	1,36	91,31	8,69	2,40	99,18	0,82
0,66	74,54	25,46	1,38	91,62	8,38	2,50	99,38	0,62
0,68	75,17	25,83	1,40	91,92	8,08	2,60	99,53	0,57
0,70	75,80	25,20	1,42	92,22	7,78	2,70	99,65	0,35

7. СУХИЕ ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩИЕ АППАРАТЫ

7.1. ПЫЛЕОСАДИТЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ

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

В промышленности пылеосадительные камеры используются в качестве устройств предварительной обработки газов, например, для отделения крупных частиц и разгрузки аппаратов последующих ступеней. В зависимости от требуемых размеров камер их ограждающие конструкции могут выполняться стальными, кирпичными или железобетонными. Камеры могут быть полыми или иметь перегородки и рассекатели (рис.7.1). Последние применяют с целью уменьшения габаритов пылеосадителя за счет интенсификации процесса, так как при этом наряду с гравитационным происходит и инерционное осаждение пыли.

Целью расчета пылеосадительных камер является подбор их габаритных размеров и определение коэффициента очистки. В общем случае коэффициенты очистки могут быть найдены опытным путем, так как процесс седиментации сопровождается турбулентной диффузией. Особенно заметно влияет турбулентность на ухудшение оседания частиц в камерах с рассекателями, а также в полых осадительных емкостях большой высоты. Для камер с отношением длины к высоте $L/h > 3$ парциальные коэффициенты очистки с достаточной для практики точностью можно найти из выражения

$$\eta_p = 100\left(1 - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{C_i}{C_b}\right)\%, \qquad (7.1)$$

где N – число расчетных точек;

C_i – расчетная концентрация пыли с размером частиц, для которых определяется парциальный коэффициент очистки η_p, в i – той точке выходного сечения;

C_b – концентрация пыли с таким же размером частиц на входе в камеру.

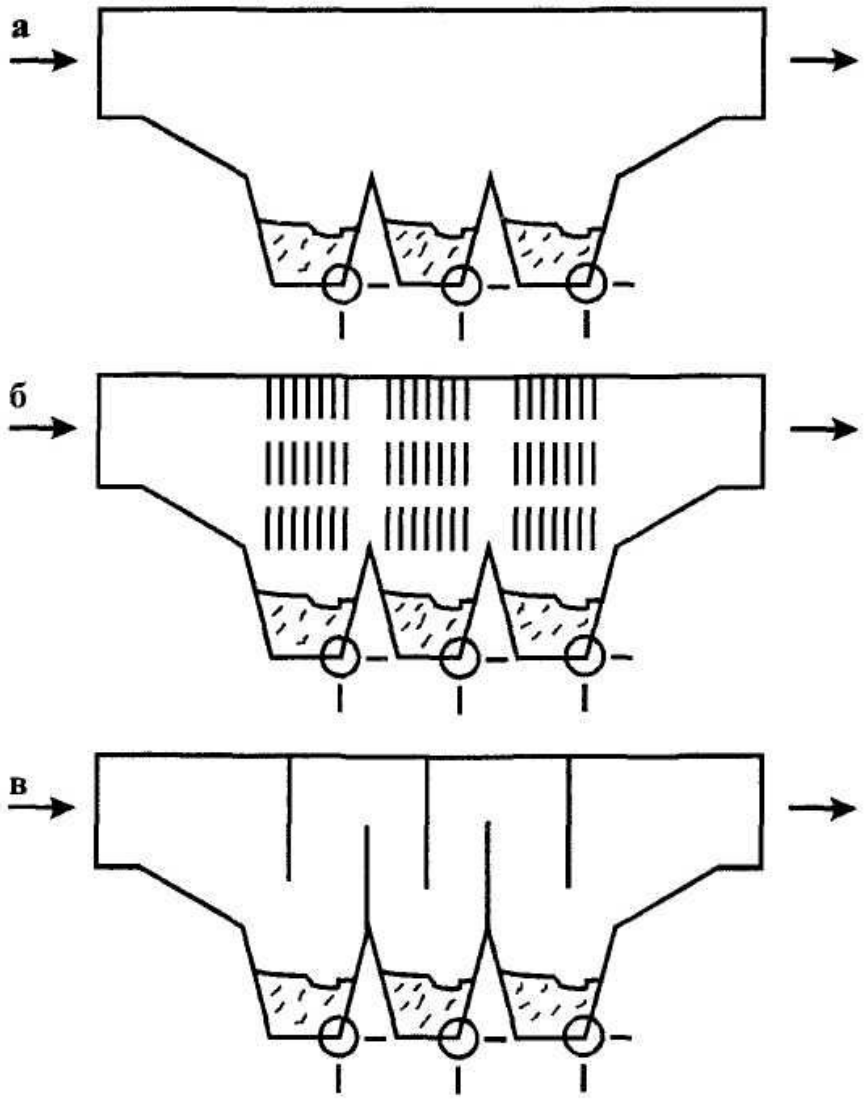


Рис. 7.1 Пылеосадительные камеры: а – полые;

б – с рассекателями (цепными, сеточными, проволочными); в – с перегородками.

Принимается, что на входе в камеру концентрация этих частиц распределена равномерно по всему сечению.

Расчеты пылеосадительных камер, например по Зинганшину М.Г. [6] выполняют в следующем порядке.

1. Определяют скорость газового потока в рабочем сечении камеры (сред-

няя скорость газового потока должна быть такой, чтобы обеспечить ламинарное течение газов через камеру)

$$w = \frac{Q}{hb},$$

где Q – расход газов, $м^3/с$;

h, b – высота и ширина камеры, м.

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

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

3. Принимают, что отношение скорости витания частиц w_p, которые будут уловлены в камере на 50%, к скорости газового потока приблизительно соответствует полутора значениям L/h. Из этого соотношения находят величину w_p Диаметр частиц, оседающих в камере на 50 %, находят в предположении, что оседание происходит в соответствии с законом Стокса, по формуле

$$D_м = \sqrt{\frac{18\mu w_p}{g(\rho_ч - \rho_г)}}\ м.$$

Для нагретых газов может быть использована формула

$$D_м = 1{,}614 \cdot 10^{-3}(273+t)^{0,75}\left(\frac{w_p}{\rho_ч}(384+t)\right)^{0,5}\ м.$$

4. Выбирают несколько соотношений w_p/w, больших и меньших принятого и определяют соответствующие значения D_p.

5. Определяют среднюю концентрацию частиц на выходе из камеры для каждого принятого соотношения w_p/w или, что то же самое, для каждого принятого значения D_p, следующим образом:

а) назначают «к» точек по высоте сечения, задаваясь величиной x/h, где x – расстояние от потолка камеры до рассматриваемой точки;

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

$$x_1 = \frac{1+\left(\frac{x}{h}\right)-\frac{L}{h}\frac{w_p}{w}}{\sqrt{7\cdot 10^{-3}\frac{L}{h}}}; \qquad x_2 = \frac{1-\left(\frac{x}{h}\right)+\frac{L}{h}\frac{w_p}{w}}{\sqrt{7\cdot 10^{-3}\frac{L}{h}}}$$

в) по значениям x_1 и x_2 из табл. 6.3 находят интегралы вероятностей $\Phi(x_1)$ и $\Phi(x_2)$ и подсчитывают значение $N = \Phi(x_1)+\Phi(x_2)-100$;

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

$$N_m = \sum_{i=1}^{k} N_i \Big/ k;$$

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

$$\eta_p = 100 - N_m.$$

7. После подсчета средних парциальных коэффициентов осаждения всех частиц принятого размера строят кривую парциальных коэффициентов очистки: $\eta_p = f(D)$.

8. Определяют фракционные коэффициенты очистки, соответствующие заданному фракционному составу пыли.

9. Находят полный коэффициент очистки η_{tot} как сумму произведений долей частиц соответствующих фракций на их фракционные коэффициенты очистки

$$\eta_{tot} = \sum_{i=1}^{N} \eta_{iF} \frac{F_{ib}}{100} \ \%,$$

где η_F – фракционный коэффициент очистки полидисперсной примеси в аппарате;

F_{ib} – доля (процентное содержание) частиц i – той фракции в составе исходного дисперсного вещества;

Пример 7.1. Рассчитать степень осаждения цементной пыли в пылеосадительной камере. Фракционный состав пыли представлен в табл. 7.1, расход воздуха 10 м^3/с, начальное содержание пыли 20 г/м^3, $\rho_ч$ = 2650 кг/м^3.

Фракционный состав цементной пыли F_{ib} Таблица 7.1

δ, мкм	0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	60 – 100	100 –200
r(d),%	8	8	24	20	20	15	5

1. Примем по конструктивным соображениям габариты камеры: h = 5 м; b = 4 м. Находим скорость газового потока в рабочем сечении камеры

$$w = \frac{10}{5 \cdot 4} = 0{,}5 \text{ м/с}.$$

2. Принимаем соотношение $L/h = 10$.

3. Принимаем отношение $\frac{w_р}{w} = 1{,}5\frac{h}{L} = 0{,}15$, тогда скорость витания частиц, улавливаемых на 50%, будет равна $w_р = 0{,}3w = 0{,}075$ м/с.

4. Соответствующий размер $D_р$ частиц, улавливаемых на 50%, будем вычислять по формуле

$$D_{м(0{,}075)} = \sqrt{\frac{18\mu w_р}{g(\rho_ч - \rho_г)}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}075}{9{,}81(2650 - 1{,}2)}} = 30{,}6 \cdot 10^{-6} \text{м}.$$

5. Для построения графика зависимости $\eta_р = f(D)$ принимаем еще два размера частиц, выражая их через отношения скоростей витания к скорости газового потока: $w_р/w = 0{,}075$ и $w_р/w = 0{,}3$. Тогда скорости витания соответственно составят 0,0375 и 0,15 м/с, а размеры частиц определятся из той же формулы

$$D_{м(0{,}0375)} = \sqrt{\frac{18\mu w_р}{g(\rho_ч - \rho_г)}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}0375}{9{,}81(2650 - 1{,}2)}} = 21{,}6 \cdot 10^{-6} \text{м};$$

$$D_{м(0{,}15)} = \sqrt{\frac{18\mu w_р}{g(\rho_ч - \rho_г)}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}15}{9{,}81(2650 - 1{,}2)}} = 43{,}2 \cdot 10^{-6} \text{м}.$$

6. Определяем средние концентрации и парциальные коэффициенты осаждения частиц размером 21,6 мкм и 43,2 мкм. Для этого:

а) назначаем 5 расчетных точек в выходном сечении пылеосадителя, принимая отношение x/h равным 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1;

б) рассчитываем параметры осаждения x_1 и x_2;

в) по величинам интегралов вероятностей, взятым из табл. 6.3, находим значение N;

г) вычисляем среднеарифметические значения N_m по сечению;

д) определяем парциальные коэффициенты осаждения.

Расчеты сводим в таблицу 7.2.

Расчетные данные Таблица 7.2

$w_p/w = 0{,}075$; $w_p = 0{,}0375$ м/с; $D_p = 21{,}6$ мкм					
x/h	0	0,25	0,5	0,75	1
x_1	0,94	1,89	2,83	3,78	4,72
x_2	6,61	5,67	4,72	3,78	2,83
$\Phi(x_1)$	82,64	96,99	100	100	100
$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
N	82,64	96,99	100	100	100
$N_m = \frac{82{,}64 + 96{,}99 + 100 + 100 + 100}{5} = 95{,}93\%$; $\eta_p = 100 - 95{,}93 = 4{,}07\%$					
$w_p/w = 0{,}3$; $w_p = 0{,}15$ м/с; $D_p = 43{,}2$ мкм					
x/h	0	0,25	0,5	0,75	1
x_1	–4,72	–3,78	–2,83	–1,88	–0,94
x_2	12,28	11,34	10,39	9,45	8,47
$\Phi(x_1)$	0	0	0	3,01	17,36
$\Phi(x_2)$	100	100	100	100	100
N	0	0	0	3,01	17,36
$N_m = \frac{0 + 0 + 0 + 3{,}01 + 17{,}36}{5} = 4{,}07\%$; $\eta_p = 100 - 4{,}07 = 95{,}93\%$					

В электронной таблице строим график парциальных коэффициентов (рис. 7.2) и определяем уравнение линии тренда $\eta_p = f(D)$. Результаты вычислений для данного состава сводим в табл. 7.3.

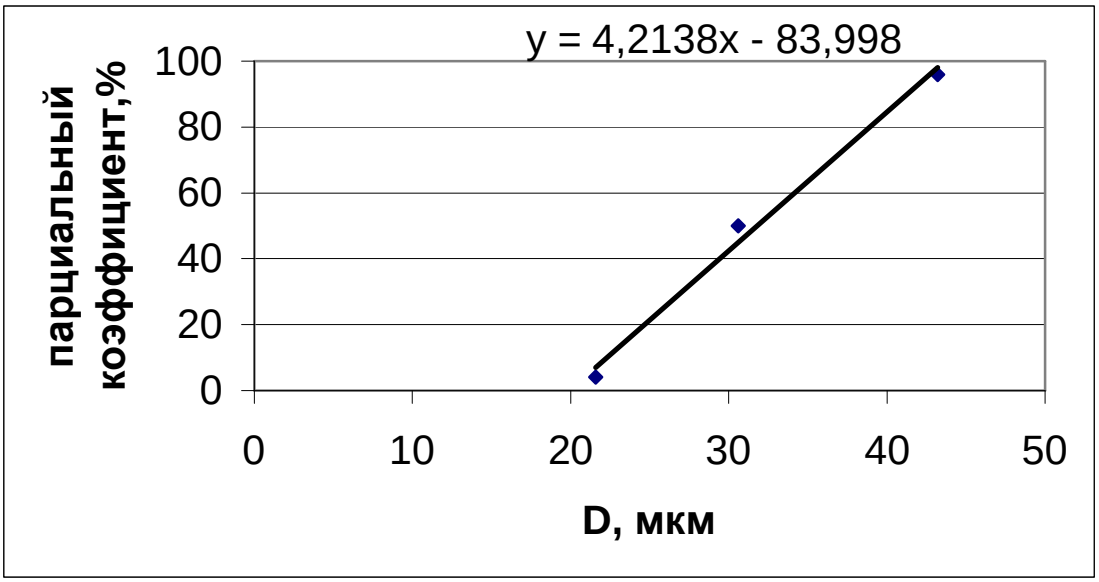


Рис. 7.2 График парциальных коэффициентов

Парциальные коэффициенты Таблица 7.3

δ, мкм	0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	60 – 100	100 –200
$\Delta\delta$, мкм	2,5	7,5	15	30	50	80	150
η_p,%	0	0	0	42,4	100	100	100

Общий КПД камеры определяем как

$$\eta_{tot} = 0{,}2 \cdot 42{,}4 + 0{,}2 \cdot 100 + 0{,}2 \cdot 100 + 0{,}05 \cdot 100 = 53{,}48\%$$

Приведенный метод расчета дает удовлетворительные результаты для расчета гранулометрического состава с размером частиц менее 76 мкм. Для более крупных частиц необходимо применять общее уравнение скорости осаждения частиц с соответствующим коэффициентом лобового сопротивления C_D, решаемое, как правило, численными методами.

Поэтому эти простые вычисления должны применяться только для оценки эффективности пылеулавливающей камеры, поскольку почти всегда важную роль играют усложняющие факторы, связанные со скоростями осаж-

дения, которые выходят за пределы области, описываемой законом Стокса. Другими факторами, которые необходимо учитывать, являются эффекты захвата частиц при их высокой концентрации в газовом потоке. Все эти факторы приводят к уменьшению эффективности пылеулавливания.

Основным фактором, который нужно учитывать при расчете и выборе размеров пылеосадительной камеры, является скорость газового потока. Она должна быть ниже скорости увеличения или «подхвата» осевшей пыли. Как правило, считают, что для большинства материалов следует сохранять скорость потока менее 3 м/с.

Для улучшения эффективности пылеосадительной камеры при горизонтальном газовом потоке можно уменьшить высоту, с которой частица опускается до дна. Этот метод применен в осадительной камере Говарда [18] (рис. 5.3), в которой были смонтированы ряды горизонтальных плоскостей (полок).

Если камера высотой H содержит N полок, то высота каждой секции равна примерно H/(N+l), и классификационная эффективность равна h(N+1)/H.

Основным возражением против широкого использования камер Говарда является трудность очистки межполочного пространства, хотя это препятствие может быть устранено путем установления системы самоочистки, например, форсуночных воздухопромывателей.

В настоящее время пылеосадительные камеры упрощенных конструкций применяют в качестве разгрузочных камер систем пылеулавливания, например в качестве разгрузочных камер барабанных сушилок (рис. 7.4), в которых осуществляется первая стадия очистки дымовых газов.

Применение простых пылеосадительных камер для улавливания крупных частиц пыли имеет ряд преимуществ и недостатков.

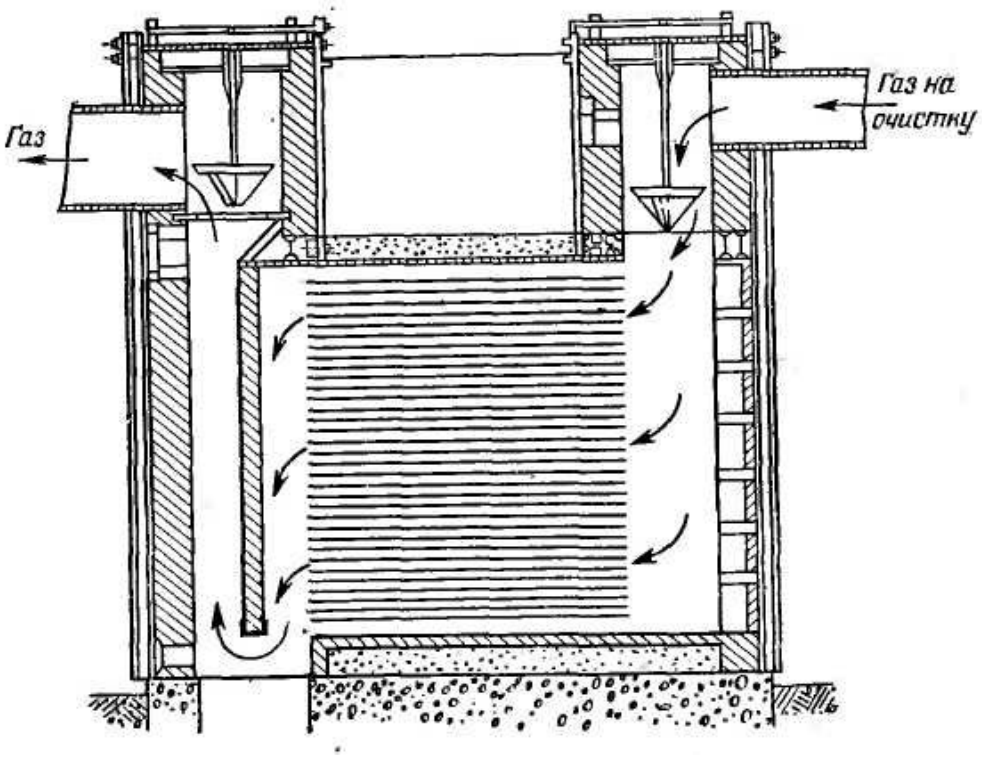


Рис. 7.3 Многополочная пылевая камера Говарда

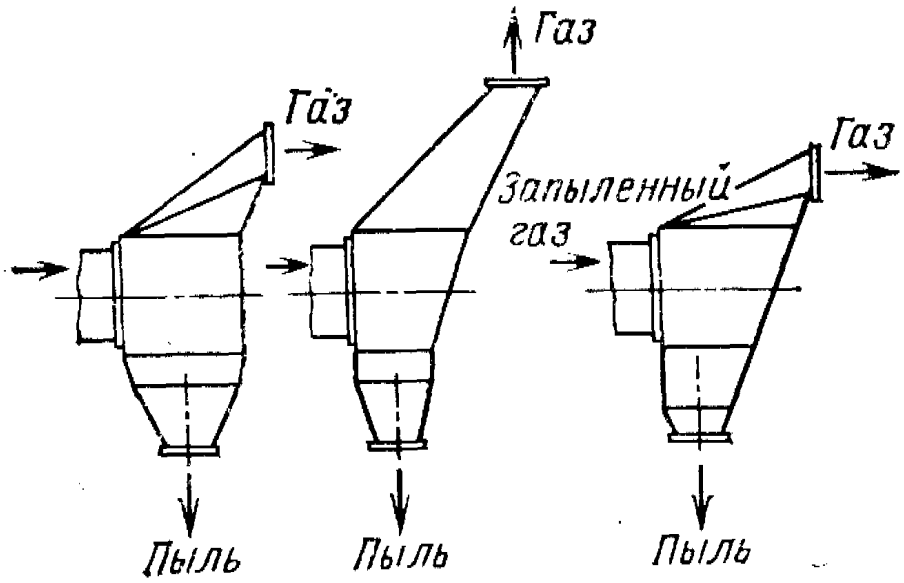


Рис. 7.4 Разгрузочные камеры барабанных сушилок

К преимуществам относятся:

- простота конструкции;
- низкая стоимость установки и незначительные эксплуатационные расходы;

• минимальный перепад давления и широкий интервал рабочих температур и давлений, ограниченный только видом конструкционного материала;

• складирование уловленного материала в сухом виде и возможность улавливания абразивных материалов.

Основным недостатком осадительных камер с горизонтальным потоком являются слишком крупные габариты.

7.2. ИНЕРЦИОННЫЕ ПЫЛЕВЫЕ КАМЕРЫ

Эффективность обеспыливания в простой пылеосадительной камере может быть увеличена, а габариты ее уменьшены, если частицам будет придан дополнительный момент движения вниз в добавление к эффекту гравитационного осаждения. Существует большое число конструкционных разработок, основанных на этом принципе, начиная с установки в камере простых отражательных щитов до специальных форсунок, ускоряющих процесс осаждения.

Простые инерционные пылеуловители (рис. 7.5 а) иногда размещаются последовательно. Хотя их эффективность такова же, что и простых пылеосадительных камер, перепад давления больше, однако он может быть снижен при использовании закругленных отражателей [1] (рис. 7.5 б).

В других инерционных пылеосадителях применяется направленная вниз труба, придающая частицам добавочный момент, равный примерно $mg/3$, в дополнение к гравитационной силе mg. Один из исследователей (рис. 7.5 в) предположил [7], что при использовании конуса с постепенно увеличивающимся диаметром скорость газа у дна пылеуловителя уменьшается, снижается и увлечение частиц. Подобные соображения, вероятно, лежат в основе усовершенствованной пылеотделительной камеры Проккэта [7], напоминающей воронку с высокой цилиндрической частью (рис. 7.5 е).

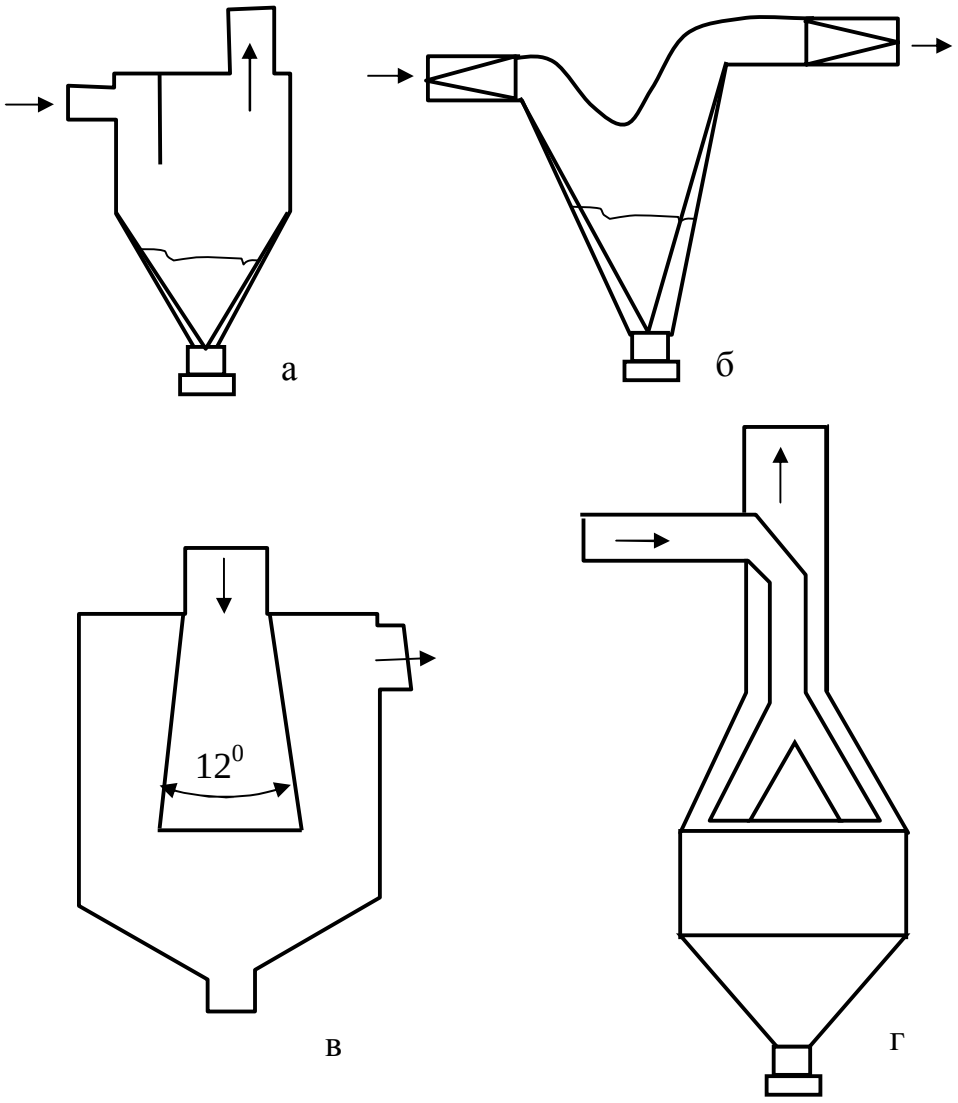


Рис. 7.5 Инерционные пылеуловители с ускорением частиц при направлении к пылесборнику: а — простой инерционный пылеуловитель; б — пылеуловитель с круглой ловушкой; в — пылеуловитель с подачей газа сверху; г — инерционный уловитель с заглубленным бункером

Более совершенным устройством, характеризующимся к тому же очень низким перепадом давления, является экранный пылеуловитель D.E.F [11] (рис. 7.6). Основным его элементом является V–образный профиль, где струи запыленного газа, образованные в промежутках между этими профилями, сталкиваются с основой V–образного элемента. Газовый поток либо отталкивается от основы, либо движется по кругу вдоль кривой составляющей элемента. При столкновениях и круговом движении пыль отделяется от газово-

го потока и попадает в пылесборник, расположенный внизу. В ряде случаев для облегчения удаления пыли из V–образных каналов прибегают к отстукиванию или вибрации. С этой же целью может применяться впрыскивание жидкости, что к тому же предотвращает повторный унос пыли газовым потоком.

Система очень надежна и может быть использована при работе в условиях высоких температур и наличия коррозионных сред.

Например, в кислых средах ячейки пылеуловителя могут быть изготовлены из кислотоупорных нержавеющих сталей, а стены камеры футерованы кислотоупорной плиткой. Перепад давления в установке составляет 25–100 Па, а иногда и меньше. На установках по обеспыливанию цементной пыли достигнута эффективность 80 – 91 % при расходе газовой смеси до 800 $м^3/с$ и содержании пыли на входе 20 – 70 $г/м^3$. Перепад давления в камере около 20 Па.

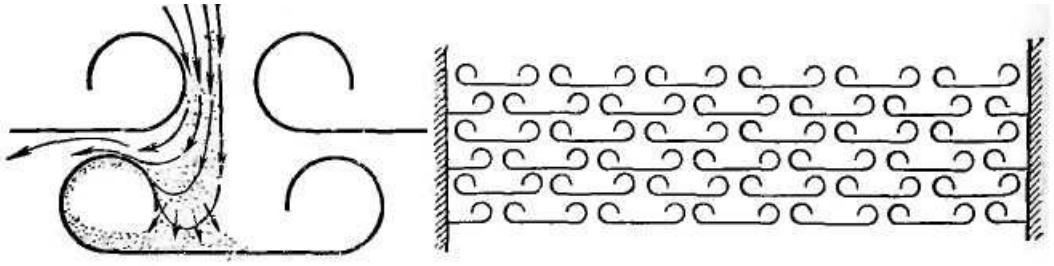


Рис. 7.6 Экранный пылеуловитель D.E.F

7.3. ЖАЛЮЗИЙНЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

Жалюзийные пылеуловители относятся к простейшим типам инерционных сепараторов. В отличие от гравитационных, они работают при более высоких скоростях потоков и имеют меньшие габариты. К тому же жалюзийные пылеуловители просты по конструкции, дешевы и имеют небольшое гидравлическое сопротивление, что обусловило их широкое распространение в качестве основного очистного оборудования в 50–е годы прошлого столетия. Однако они улавливают только крупные частицы (D > 60...70 мкм) и поэтому в настоящее время используются в основном для предварительного осаждения крупных час-

тиц с целью уменьшения абразивного износа технологического оборудования или облегчения работы очистных устройств последующих ступеней. Для предварительного улавливания крупных частиц золы из дымовых газов разработаны жалюзийные золоуловители ВТИ, имеющие 6 вариантов исполнения для установки в горизонтальных и вертикальных (при движении газов снизу вверх) газоходах. Часто жалюзийные пылеуловители используются совместно с циклонами и служат концентраторами пыли для них. Принцип работы пылеуловителя в таком случае заключается в следующем. Жалюзийная решетка, установленная в газоходе, разделяет поток аэрозоля на части (рис. 7.7). Основная часть потока, проходя через лопасти решетки, в некоторой степени освобождается от крупных фракций пыли и уходит по газоходу, а меньшая часть, отбираемая циклоном (до 20%), насыщается пылью, что облегчает ее очистку. После циклона поток вновь возвращается в газоход.

Относительный отбор φ, то есть отношение расхода газов через циклон к общему расходу, принимается обычно равным 10 или 20 %. Движение концентрированного потока через отсосный циклон может происходить за счет разрежения, образующегося при прохождении основного потока через инжектор или дополнительным вентилятором, если величина разрежения недостаточна для преодоления сопротивления циклона, подводящих и отводящих воздуховодов.

При очистке продуктов сгорания твердого топлива срок службы решеток вследствие абразивного износа невелик и составляет менее года. Износ лопастей решеток, набираемых из угловой стали $40^{x}40$ мм, становится ощутимым уже в первые месяцы эксплуатации, что выражается в значительном ухудшении степени осаждения частиц.

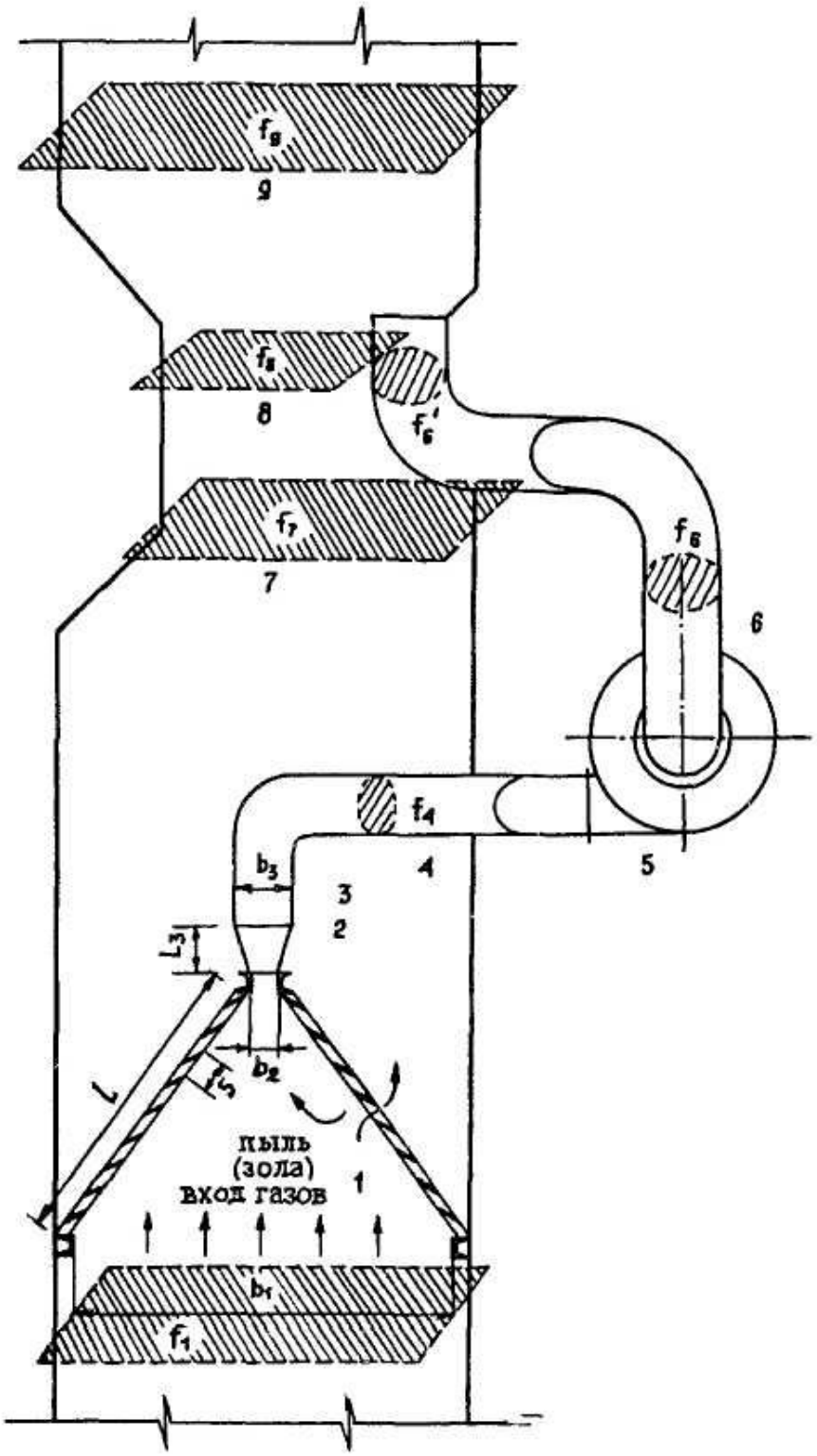


Рис. 7.7. Жалюзийный пылеуловитель в горизонтальном газоходе:
1 – входная камера; 2 – отсосная щель; 3 – диффузор, 4 – поводящий воздуховод, 5 – отсосный циклон; 6 – отводящий воздуховод; 7 – основной газоход по месту подсоединения отводящего воздуховода; 8 – инжектор;
9 – основной газоход после инжектора

Для больших потоков газа можно установить несколько параллельных пылеуловителей (рис. 7.8). Здесь за жалюзийным пылеотборником последовательно размещают отбойную камеру и циклон.

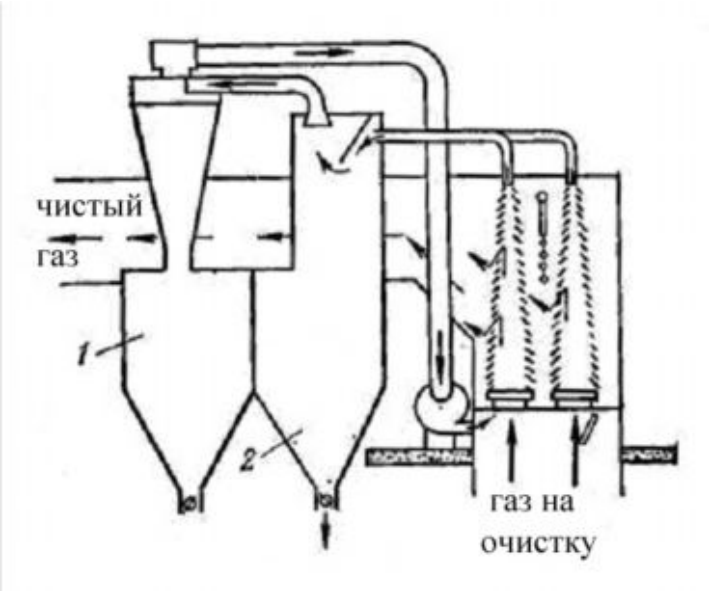


Рис. 7.8 Конический пылеуловитель для электростанций:
1 – сборник мелкой пыли; 2 – сборник грубой пыли

Пример другого пылеуловителя с жалюзийными вытяжными щелями представлен на рис. 7.9.

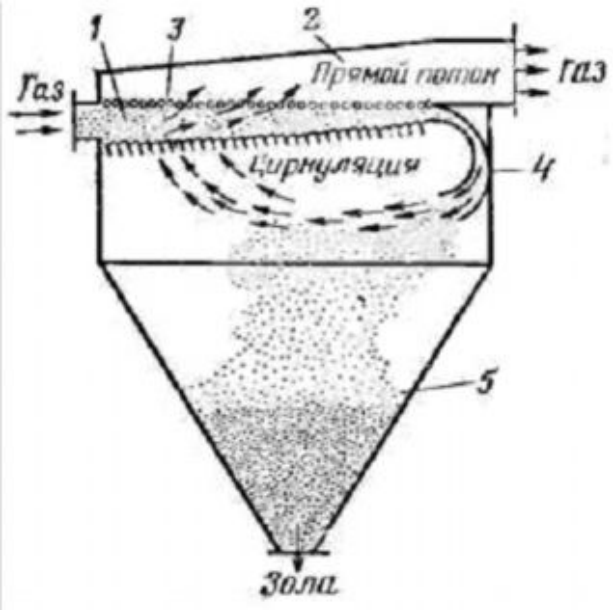


Рис. 7.9 Пылеуловитель с низким сопротивлением:
1 – конвергирующий канал; 2 – выходная камера;
3 – очищающая стенка; 4 – пылеотбойник; 5 – бункер

Расчет парциальных коэффициентов осаждения частиц жалюзийными пылеуловителями возможен только по опытным данным. Для жалюзийных золоуловителей ВТИ при их гидравлическом сопротивлении 400...500 Па и относительном отборе φ = 10 %. такие данные приведены в табл. 7.4.

Парциальные коэффициенты очистки Таблица 7.4.

D_p, мкм	5	10	15	20	25	30	40	50	60	100
η_p,%	25	47	63	76	86,5	91,3	94,8	96,5	97,7	100

Расчет жалюзийных пылеуловителей сводится в основном к определению площадей сечений для прохода газов, обеспечивающих приемлемые сопротивления, и необходимости дополнительного вентилятора для отсосного циклона.

Расчеты ведутся в следующем порядке:

1. Определяют скорость газов во входном сечении

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta p_1}{\zeta\rho}},$$

где Δp_1 – гидравлическое сопротивление решетки, которое при отсутствии данных принимают в пределах 100...500 Па;

ζ – коэффициент гидравлического сопротивления решетки, который при отсутствии данных можно принимать ζ = 5,

ρ – плотность газов в расчетных условиях, кг/м^3.

2. Определяют площадь сечения входной камеры

$$f_1 = W/w, \text{ м}^2,$$

где W– расход газовых выбросов, м^3/с.

По величине f_1 подбирают размеры решетки (для решеток типа ВТИ конструктивные размеры приведены в табл. 7.5) и уточняют скорость газов во входном сечении.

3. Определяют площадь сечения подводящего воздуховода от диффузора до отсосного циклона

$$f_4 = \frac{C_4\sqrt{\Delta p_1} f_1}{N_4}, \text{ м}^2,$$

где N_4 – общее число подводящих воздуховодов, подсоединенных к отсосным щелям;

C_4 – коэффициент, зависящий от величины относительного отбора газов φ в отсосный циклон.

К каждой отсосной щели может быть подсоединено до двух циклонов.

Долю газов φ, направляемых в отсосный циклон, принимают 10 или 20 %. Соответственно этому значение коэффициента C_4 составит 0,0048 или 0,0096.

4. Диаметр отсосного циклона D_5, рассчитывают по формуле

$$D_5 = C_5 \sqrt[4]{\frac{\Delta p_1}{\Delta p_5}} \sqrt{\frac{f_1}{N_5}}, \text{ м},$$

где Δp_5 – гидравлическое сопротивление циклона, принимаемое при отсутствии данных в пределах 100...250 Па;

N_5 – число циклонов, присоединенных к одной отсосной щели;

C_5 – коэффициент, зависящий от φ; при φ = 10 или 20 % величину C_5 принимают соответственно 0,775 или 1,068.

5. Сечение отводящего воздуховода от циклона до основного газохода подбирают по выходному патрубку циклона, но не менее $2f_4$.

6. Находят площадь сечения инжектора f_8 по формуле

$$f_8 = \frac{0{,}87 f_1}{\sqrt{\frac{107{,}5(z_4 + z_6)}{\Delta p_1} + \frac{5\Delta p_5}{\Delta p_1} - 0{,}95}}, \text{ м}^2,$$

где z_4, z_6 – приведенные коэффициенты, зависящие от гидравлического сопротивления подводящих и отводящих воздуховодов, величины которых принимают по табл. 7.6.

7. Вычисляют сопротивление инжектора

$$\Delta p_8 = \frac{\Delta p_1 (f_8 + f_6')}{5 f_1^2} \left[\frac{\varphi}{100} \left(1 - \frac{\varphi}{100\psi} \right)^2 + \left(1 - \frac{\varphi}{100} \right) \left(\frac{1 - \varphi/100}{1 - \psi} - 1 \right)^2 + \right.$$

$$\left. + 0{,}275 \left(1 - \frac{f_8 + f_6'}{f_9} \right)^2 \right],$$

где $\psi = \frac{f_6'}{(f_8 + f_6')}$;

f'_6 – площадь сечения отводящего воздуховода по месту установки инжектора, которую принимают не меньше площади сечения отводящего воздуховода после циклона f_6.

8. Подсчитывают суммарное сопротивление жалюзийной решетки и инжектора $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_8$, Па.

Конструктивные размеры решеток типа ВТИ Таблица 7.5

Относительный отбор =10%					Относительный отбор =20%					Число
Ширина входной камеры b_1, мм	Рабочая длина решетки l, мм	Ширина отсосной щели b_2, мм, при отборе		Высота решетки h, мм	Ширина входной камеры, b_1, мм	Рабочая длина решетки l, мм	Ширина отсосной щели b_2, мм, при отборе		Высота решетки h, мм	лопастей в решетке, шт
		одиночном	двухсторонем				одиночном	двухсторонем		
-	-	-	-	-	209	583	21,0	-	595	11
-	-	-	-	-	228	636	23,0	-	648	12
-	-	-	-	-	247	689	24,5	-	700	13
-	-	-	-	-	266	742	26,5	-	752	14
-	-	-	-	-	285	795	28,5	-	805	15
-	-	-	-	-	304	848	30,5	-	857	16
-	-	-	-	-	323	901	32,5	-	909	17
-	-	-	-	-	342	954	34,0	-	962	18
-	-	-	-	-	361	1007	36,0	-	1014	19
-	-	-	-	-	380	1060	38,0	-	1066	20
-	-	-	-	-	393	1113	40,0	20,0	1118	21
396	1166	20,0	-	1171	418	1166	42,0	21,0	1171	22
414	1219	20,5	-	1223	437	1219	43,5	22,0	1223	23
432	1272	21,5	-	1275	456	1272	45,5	23,0	1275	24
450	1325	22,5	-	1328	475	1325	47,5	24,0	1328	25
468	1378	23,5	-	1380	494	1378	49,5	24,5	1380	26
486	1431	24,5	-	1432	513	1431	51,5	25,5	1432	27
504	1484	25,0	-	1485	532	1484	53,0	26,5	1485	28
522	1537	26,0	-	1537	551	1537	55,0	27,5	1537	29
540	1590	27,0	-	1589	570	1590	57,0	28,5	1589	30
558	1643	28,0	-	1641	589	1643	59,0	29,5	1641	31
576	1696	29,0	-	1694	608	1696	61,0	30,5	1694	32
594	1749	29,5	-	1746	627	1749	62,5	31,5	1746	33
612	1802	30,0	-	1798	646	1802	64,5	32,5	1799	34
630	1855	31,5	-	1851	665	1855	66,5	33,5	1851	35
648	1908	32,5	-	1903	684	1908	68,5	34 0	1903	36
665	1961	33,5	-	1955	703	1961	70,5	35,5	1955	37
684	2014	34,0	-	2008	722	2014	72,0	36,0	2008	38
702	2067	35,0	-	2060	741	2067	74,0	37,0	2060	39
720	2120	36.0	-	2112	760	2120	76,0	38,0	2112	40
738	2173	37,0	-	2165	779	2173	78,0	39,0	2165	41
756	2226	38,0	-	2217	798	2226	80,0	40,0	2217	42
774	2279	38,5	-	2269	817	2279	81,5	41,0	2269	43
792	2332	39,5	20,0	2321	836	2332	83,5	42,0	2321	44
810	2385	40,5	20,0	2374	855	2385	85,5	43,0	2374	45
828	2438	41,5	20,5	2426	874	2438	87,5	43 5	2426	46
846	2491	42,5	21,0	2478	893	2491	89,5	44,5	2478	47
864	2544	43 0	21,5	2531	912	2544	91,0	45,5	2531	48
882	2597	44,0	22,0	2583	931	2597	93,0	46 5	2583	49
900	2650	45.0	22,5	2635	950	2650	95,0	47,5	2635	50
936	2756	47,0	23,5	2740	988	2756	99,0	49,5	2740	52
972	2862	48,5	24,5	2845	1026	2862	102,5	51,5	2845	54
1008	2968	50,5	25,0	2949	1064	2968	106,5	53,0	2949	56
1044	3074	52,0	26,0	3054	1102	3074	110,0	55,0	3054	58
1080	3180	54,0	27,0	3158	1140	3180	114,0	57,0	3158	60
1116	3286	56,0	28,0	3263	1178	3286	118,0	59,0	3263	62
1152	3392	57,5	29,0	3368	1218	3392	121,5	71,0	3368	64
1198	3498	59,5	29,5	3472	1254	3498	125,5	62,5	3472	66
1224	3604	61,0	30,5	3577	1292	3604	129,0	64,5	3577	68
1260	3710	63,0	31,5	3681	1330	3710	133,0	66,5	3681	70
1296	3816	65,0	32,5	3786	1368	3816	137,0	68,5	3786	72
1332	3922	66,5	33,5	3891	1406	3922	140,5	70,5	3891	74
1350	3975	67,5	33,5	3943	1425	3975	142,5	71,5	3943	75

Значения z_4 и z_6 для подводящих и отводящих воздуховодов Таблица 7.6

Отношение длины воздуховода к эквивалентному диаметру	z_4						z_6					
	Количество отводов						Количество отводов					
	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
0	0	1,2	2,4	3,6	4,8	6	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5
5	0,5	1,7	2,9	4,1	5,3	6,5	1,175	1,475	1,775	2,075	2,375	2,675
10	1	2,2	3,4	4,6	5,8	7	1,35	1,65	1,95	2,25	2,55	2,85
15	1,5	2,7	3,9	5,1	6,3	7,5	1,525	1,825	2,125	2,425	2,725	3,025
20	2	3,2	4,4	5,6	6,8	8	1,7	2	2,3	2,6	2,9	3,2
25	2,5	3,7	4,9	6,1	7,3	8,5	1,875	2,175	2,475	2,775	3,075	3,375
30	3	4,2	5,4	6,6	7,8	9	2,05	2,35	2,65	2,95	3,25	3,55
35	3,5	4,7	5,9	7,1	8,3	9,5	2,225	2,525	2,825	3,15	3,45	3,75
40	4	5,2	6,4	7,6	8,8	10	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9
45	4,5	5,7	6,9	8,1	9,3	10,5	2,575	2,875	3,175	3,475	3,775	4,075
50	5	6,2	7,4	8,6	9,8	11	2,75	3,05	3,35	3,65	3,95	4,2
60	6	7,2	8,4	9,6	10,8	12	3,1	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6
70	7	8,2	9,4	10,6	11,8	13	3,45	3,75	4,05	4,35	4,65	4,95
80	8	9,2	10,4	11,6	12,8	14	3,8	4,1	4,4	4,7	5,0	5,3
90	9	10,2	11,4	12,6	13,8	15	4,16	4,46	4,76	5,06	5,36	5,66
100	10	11,2	12,4	13,6	14,8	16	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	6,0
120	12	13,2	14,4	15,6	16,8	18	5,2	5,5	5,8	6,1	6,4	6,7
140	14	15,2	16,4	17,6	18,8	20	5,9	6,2	6,5	6,8	7,1	7,4
160	16	17,2	18,4	19,6	20,8	22	6,6	6,9	7,2	7,5	7,8	8,1
180	18	19,2	20,4	21,6	22,8	24	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8
200	20	21,2	22,4	23,6	24,8	26	8	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5
250	25	26,2	27,4	28,6	29,8	31	9,75	10,75	11,05	11,35	11,65	11,95
300	30	31,2	32,4	33,6	34,8	36	11,50	11,8	12,1	12,4	12,7	13
350	35	36,2	37,4	38,6	39,8	41	13,25	13,55	13,85	14,15	14,45	14,75
400	40	41,2	42,4	43,6	44,8	46	15	15,3	15,6	15,9	16,2	16,5
450	45	46,2	47,4	48,6	49,8	51	16,75	17,05	17,35	17,65	17,95	18,25
500	50	51,2	52,4	53,6	54,8	56	18,5	18,8	19,1	19,4	19,7	20

Если перепад давления в решетке и инжекторе получился меньше сопротивления циклона или неприемлемо велик (сравним с перепадом давления, создаваемым общим вентилятором или дымососом и не оставляет запаса для преодоления других сопротивлений газового тракта), то принимают решение о не-

обходимости отдельного вентилятора для отсосного циклона. Тогда подачу специального вентилятора принимают равной не менее $0{,}1W$, если $\varphi = 10$ % или $0{,}2W$, если $\varphi = 20$ %, а давление подсчитывают по формуле

$$p = \Delta p_5 + 21{,}5(z_4 + z_6) - \left[0{,}19 + \frac{C \cdot f_1^2}{f_7^2}\right]\Delta p_1, \text{ Па},$$

где f_7 – площадь сечения основного газохода по месту подсоединения отводящего газохода, м^2;

C – коэффициент, значение которого принимают в зависимости от величины относительного отбора 10 или 20 % соответственно 0,17 или 0,13.

9. В соответствии с табл. 7.4 выбирают значения парциальных коэффициентов очистки. Если принятые в расчете значения Δp_1 и φ отличаются от табличных, то выполняют пересчет коэффициентов очистки, пользуясь данными табл. 7.7.

Ориентировочные величины парциальных коэффициентов Таблица 7.7.

φ, %	Δp_1, Па	Коэффициенты очистки η_p, %										
10	от 400 до 500	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	от 200 до 200	47	52	57	61	66	71	75	80	85	90	94
	от 100 до 200	44	49	53	58	62	67	71	76	80	84	88
20	от 400 до 500	61	65	70	74	77	81	85	89	92	95,5	100
	от 200 до 400	56	61	66	69	72	76	79	83	86	90	94
	от 100 до 200	54	58	62	66	68	72	75	78	81	84	88

По фракционным коэффициентам очистки и дисперсному составу загрязнителя подсчитывают полный коэффициент очистки аналогично предыдущей зада-

че, используя формулу

$$\eta_{tot} = \sum_{i=1}^{N} \eta_{iF} \frac{F_{ib}}{100} \%.$$

10. По данным табл. 7.5. подбирают необходимый тип и конструктивные размеры жалюзийной решетки. Размеры диффузора за решеткой определяют из следующих соотношений:

$$b_3 = 0{,}095\sqrt{\Delta p_1 b_2}\ , \text{м},$$

$$l_3 = b_2 \frac{0{,}095\sqrt{\Delta p_1} - 1}{0{,}1748}, \text{м},$$

где b_2 – ширина отсосной щели, м.

Если $\Delta p_1 < 200$ Па, то диффузор не устанавливается.

Пример 7.2. Рассчитать степень очистки цементной пыли (см. пример 7.1) в жалюзийном пылеуловителе. Расход газа – носителя (воздуха с температурой t = 112° С) W = 25000 м^3/ч (6,9 м^3/с). Принимаем схему пылеуловителя, состоящего из решетки ВТИ в горизонтальном газоходе и одного отсосного циклона ЦН 15. Относительный отбор φ = 10 %, начальное сопротивление решетки 400 Па, коэффициент местного сопротивления ζ = 5,65.

1. Подсчитываем плотность газа–носителя в рабочих условиях и определяем скорость газов во входном сечении:

$$\rho = \frac{\rho_0 273}{(273 + t)} = \frac{1{,}23 \cdot 273}{273 + 112} = 0{,}917, \text{ кг/м}^3,$$

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta p_1}{\zeta\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 400}{5{,}65 \cdot 0{,}917}} = 12{,}43, \text{ м/с.}$$

2. Сечение входной камеры

$$f_1 = W/w = 6{,}9/12{,}43 = 0{,}56, \text{ м}^2$$

Близка к требуемой площадь решетки с 24 лопастями, имеющей ширину входной камеры b_1 = 0,432 м, высоту h = l,275 м, рабочую длину l = 1,272 м и ширину отсосной щели b_2 = 0,0215 м. По фактической площади входного сечения корректируем входную скорость потока:

f_1 = l,275·0,432 = 0,5508 м^2;

w = 6,9/0,5508 = 12,63 м/с.

3. Определяем площадь сечения подводящего воздуховода, приняв C_4 = 0,0048 и N_4 = l:

$$f_4 = \frac{C_4\sqrt{\Delta p_1} f_1}{N_4} = \frac{0{,}0048\sqrt{400} \cdot 0{,}5508}{1} = 0{,}0529 \text{ м}^2.$$

4. Рассчитываем диаметр отсосного циклона, приняв N_5 = l, C_5 = 0,775 и сопротивление циклона Δp_5 = 640 Па:

$$D_5 = C_5 \sqrt[4]{\frac{\Delta p_1}{\Delta p_5}} \sqrt{\frac{f_1}{N_5}} = 0{,}775 \sqrt[4]{\frac{400}{640}} \sqrt{\frac{0{,}5508}{1}} = 0{,}515 \text{ м.}$$

Принимаем для установки циклон диаметром 600 мм, (с диаметром выхлопной трубы 0,36 м).

5. Принимаем площадь сечения отводящего воздуховода f_6 вдвое больше площади сечения подводящего f_4

$f_6 = 2\ 0{,}0529 = 0{,}1058$ м^2.

6. Из конструктивных соображений назначаем отношение $l/D_{экв}$ и количество отводов для подводящего газохода соответственно 10 и 3, для отводящего – соответственно 15 и 5. Находим по табл. 7.6 значения $z_4 = 4{,}6$ и $z_6 = 3{,}025$. Определяем площадь сечения инжектора f_8

$$f_8 = \frac{0{,}87 f_1}{\sqrt{\frac{107{,}5(z_4 + z_6)}{\Delta p_1} + \frac{5\Delta p_5}{\Delta p_1} - 0{,}95}} =$$

$$= \frac{0{,}87 \cdot 0{,}5508}{\sqrt{\frac{107{,}5(4{,}6 + 3{,}025)}{400} + \frac{5 \cdot 640}{400} - 0{,}95}} = 0{,}1589 \quad \text{м}^2$$

7. Вычисляем сопротивление инжектора, приняв $f_9 = f_1$ и $f'_6 = f_6$. Тогда $\psi = \frac{f'_6}{(f_8 + f'_6)} = \frac{0{,}1058}{0{,}1589 + 0{,}1058} = 0{,}4$ и

$$\Delta p_8 = \frac{400(0{,}1589 + 0{,}1058)}{5 \cdot 0{,}5508^2}\left[\frac{10}{100}\left(1 - \frac{10}{100 \cdot 0{,}4}\right)^2 + \left(1 - \frac{10}{100}\right)\left(\frac{1 - 10/100}{1 - 0{,}4} - 1\right)^2 + \right.$$

$$\left. + 0{,}275\left(1 - \frac{0{,}1589 + 0{,}1058}{0{,}5506}\right)^2\right] = 25 \quad \text{Па}$$

8. Таким образом, суммарное сопротивление решетки и инжектора составит 425 Па, что почти в 1,5 раза меньше сопротивления циклона. По этой причине газовый поток через циклон будет меньше расчетного. Для

повышения перепада давления газохода потребовалось бы в 3,5 раза уменьшить входное сечение, что привело бы к высоким скоростям, недопустимым по условию абразивного износа решетки. Целесообразнее обеспечить расчетный расход через циклон при помощи вентилятора, подача W и давление p которого определятся следующим образом

$W = 0{,}l\ 25000 = 2500$ м^3/ч

и

$$p = 640 + 21{,}5(4{,}6 + 3{,}025) - \left[0{,}19 + \frac{0{,}17 \cdot 0{,}5508^2}{0{,}295^2}\right]400 \approx 1120 \quad \text{Па}$$

При расчете необходимого давления вентилятора площадь сечения газохода f_7 по месту подсоединения отводящего воздуховода принята из конструктивных соображений равной 0,295 м^2 (несколько большей, чем сумма площадей f_8 и f_6'). Требуемой подаче и давлению удовлетворяет вентилятор Ц4–76 N 2,5.

Наиболее целесообразным вариантом для рассматриваемой задачи представляется замена циклона типа ЦН–15 на ЦН–24 с вдвое меньшим сопротивлением при одинаковой скорости обрабатываемого газа.

9. Для удобства внесем в табл. 7.8 фракционный состав и парциальные коэффициенты.

Фракционный состав и парциальные коэффициенты очистки Таблица 7.8

δ, мкм	0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 40	40 – 60	60 – 100	100 –200
$\Delta\delta$	2,5	7,5	15	30	50	80	150
r(d),%	8	8	24	20	20	15	5
η_p, %	10	36	63	91,3	96,5	99	100

Общий КПД пылеуловителя определяем как

$$\eta_{tot} = 0{,}08 \cdot 10 + 0{,}08 \cdot 36 + 0{,}24 \cdot 63 + 0{,}2 \cdot 91{,}3 + 0{,}2 \cdot 96{,}5 + \\ + 0{,}15 \cdot 99 + 0{,}05 \cdot 100 = 76{,}21\%$$

7.4. ЦИКЛОНЫ

Пылеуловительные системы, в которых твердые частицы удаляются из закрученного газового потока под действием центробежных сил, называются циклонами.

Вероятно, это наиболее распространенный в промышленности тип обеспыливающего оборудования. Они просты по конструкции и обычно не имеют движущихся частей. Поскольку они могут изготовляться из разнообразных материалов, в частности из огнеупорных и коррозионностойких, то не существует температурных ограничений для их применения, и эксплуатационные расходы могут быть сведены к минимуму.

Центробежная сила, действующая на частицы во вращающемся газовом потоке, намного больше, чем гравитационная, поэтому циклоны являются эффективными для удаления частиц гораздо меньших размеров, чем в случае пылеосадительных камер, и при одинаковых объемах газов размеры циклонов значительно меньше. С другой стороны, перепад давления в циклонах больше, а расход энергии гораздо выше.

Циклоны отличаются от инерционных уловителей тем, что в циклоне осуществляется многовитковое вращение потока. Пылеосадительные камеры и инерционные пылеуловители используются (за исключением редких случаев) для удаления крупной пыли – размером более 76 мкм, в то время как промышленные циклоны эффективны для улавливания частиц до 10 мкм и могут применяться для улавливания еще более мелких частиц при внесении некоторый конструкционных изменений.

Если газовый поток содержит значительное количество крупнозернистых

частиц, особенно очень твердых, стенки циклона могут пострадать от эрозии, поэтому перед циклоном желательно установить пылеосадительную камеру или инерционный пылеуловитель.

Запыленные газы подаются в циклоны через тангенциальные или аксиальные завихрители и совершают внутри аппаратов сложное вращательно–поступательное движение. На частицы, взвешенные в потоке внутри циклона, действует сила инерции, которая стремится сместить их с криволинейных линий тока по касательным, направленным под некоторым углом вниз и к стенке корпуса.

Частицы, соприкасающиеся с внутренней поверхностью стенки, под действием сил тяжести, инерции и опускающегося газового потока скользят вниз и попадают в пылеприемник (бункер). Частицы, не достигшие стенки, продолжают движение по криволинейным линиям тока и могут быть вынесены из циклона газовым потоком, который может захватить и некоторое количество осевших в бункер частиц.

Упрощенно считая, что траектории движения взвешенных частиц близки к окружностям, можно величину возникающей силы инерции принять пропорциональной квадрату тангенциальной скорости, массе частиц и обратно пропорциональной радиусу вращения

$$F = m\frac{u_T^2}{R},$$

где m – масса частицы;

u_T – тангенциальная составляющая скорости газового потока;

R – радиус окружности.

Так, при радиусе вращения менее метра и тангенциальной скорости в пределах 10...15 м/с сила инерции на порядок превосходит силу тяжести. По этой причине сепарация частиц в циклонах происходит намного интенсивнее, чем в гравитационных осадителях.

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

Область применения циклонов как самостоятельного средства санитарной очистки дисперсных выбросов в связи с усилением экологических требований постоянно сужается. В настоящее время их рекомендуется использовать для предварительной очистки и устанавливать перед устройствами с высокой степенью очистки – тканевыми или электрофильтрами. Весьма удачно использование циклонов и в качестве брызгоуловителей для некоторых способов мокрой очистки газовых выбросов.

Самостоятельно циклоны следует применять лишь в условиях, не допускающих использования устройств с высокой степенью очистки – для высокотемпературных сред, при возможности реакций в электрическом поле с образованием вторичных загрязнителей, в некоторых других случаях.

В целях промышленного улавливания аэрозолей циклоны используются уже более 100 лет. Первый запатентованный циклон представлял собой конус с тангенциальным подводом воздуха и центральным выхлопом в верхней части (рис. 7.10, а). С тех пор разработаны сотни конструкций, иногда незначительно различающихся между собой. По принципу организации движения потока различают возвратно – поточные (рис. 7.10, в) и прямоточные (рис. 7.10, б) конструкции.

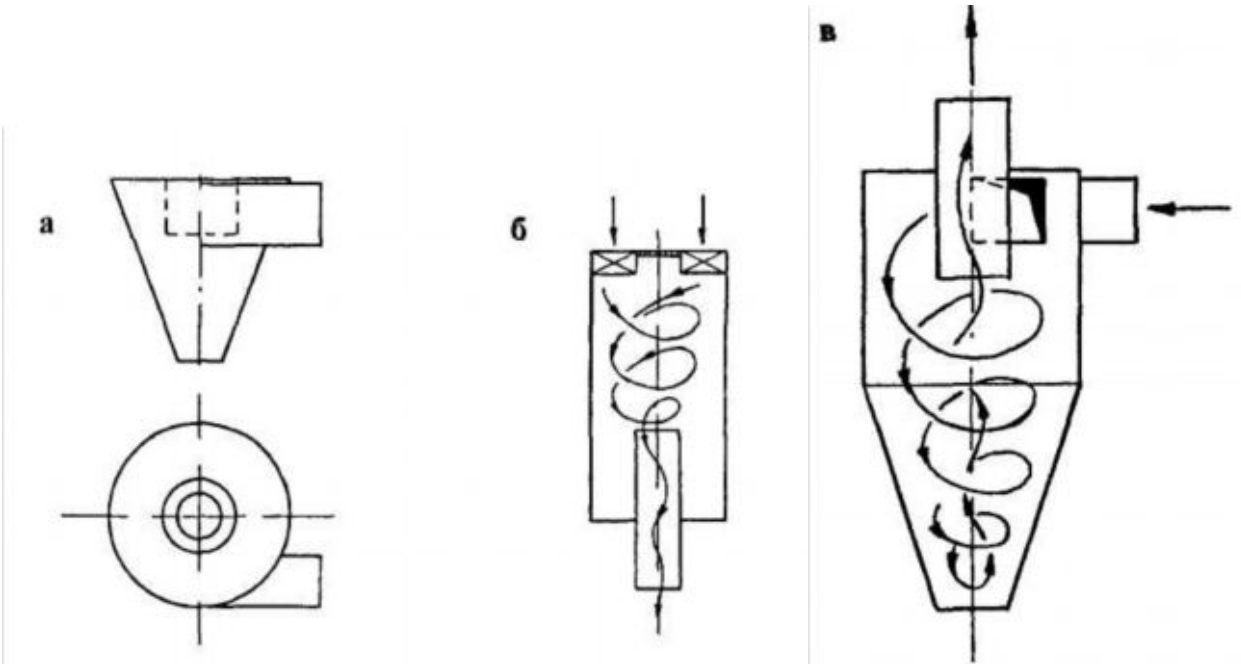


Рис. 7.10 Конструкции циклонов:
а – конический; б – прямоточный; в – возвратно – поточный

Прямоточные циклоны, или вихревые газоочистители, несмотря на небольшие размеры, позволяют обрабатывать очень большие объемы газов. В прямоточном циклоне с неподвижным импеллером (рис. 7.11) вытяжной вентилятор обычно устанавливают на выходе очищенного воздуха; это делается для уменьшения эрозии лопастей вентилятора. Поэтому в пылеотделительной камере, расположенной за неподвижными лопастями, где в основном и отмечается перепад давления, создается пониженное давление по сравнению с газом, подходящим к импеллеру. Следовательно, необходимо предусмотреть дополнительный отсос в линии загрязненного газа (концентрированной пыли) для предотвращения обратного подсоса удаляемых частиц.

Прямоточные циклоны действуют как концентраторы пыли; в них сконцентрированная пыль вместе с некоторым количеством газа отводится в периферийную область и направляется во вторичный сборник, тогда как чистый газ проходит в осевом направлении. Вторичным сборником может служить другой циклон обычного типа или пылеосадительная камера.

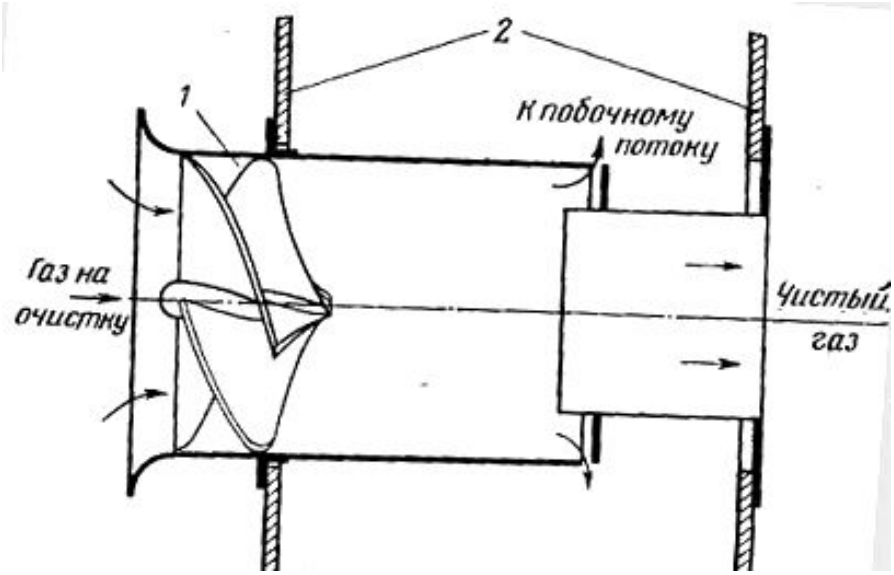


Рис. 7.11 Прямоточный циклон с неподвижным импеллером:
1 – неподвижные лопасти; 2 – пылесборник.

Многокамерные прямоточные циклоны часто применяются для предварительной очистки топочных газов, характеризующихся высоким содержанием летучей золы, перед тем как частично очищенный газ поступит на электрофильтры. Типичная конструкция многокамерной установки показана на рис. 7.12.

Важной модификацией прямоточного циклона с неподвижным импеллером является циклон, в котором используется принцип обратного потока (рис. 7.13). Он был запатентован Зеннеком и Шауфером [18] в 1953 г; эффективность циклона была значительно улучшена благодаря уменьшению увлечения маленьких частиц за счет их отскока от стенок циклона.

Запыленный газ поступает в основной циклон через тщательно рассчитанное спиральное отверстие, и выходит из циклона через его дальний конец, причем частицы пыли удаляются из газа, движущегося по спирали. Противоточный газовый поток подается через тангенциальные сопла, размещенные в боковых стенках циклона; он вращается в том же тангенциальном направлении, что и запыленный газ, но в противоположном осевом направлении. При этом частицы пыли выхватываются из центральной спирали. Внешняя газовая спираль движется к бункеру, расположенному за входом запыленного газа, изменяет свое

направление, и частицы оседают в бункере. Затем этот поток соединяется с основным газовым потоком.

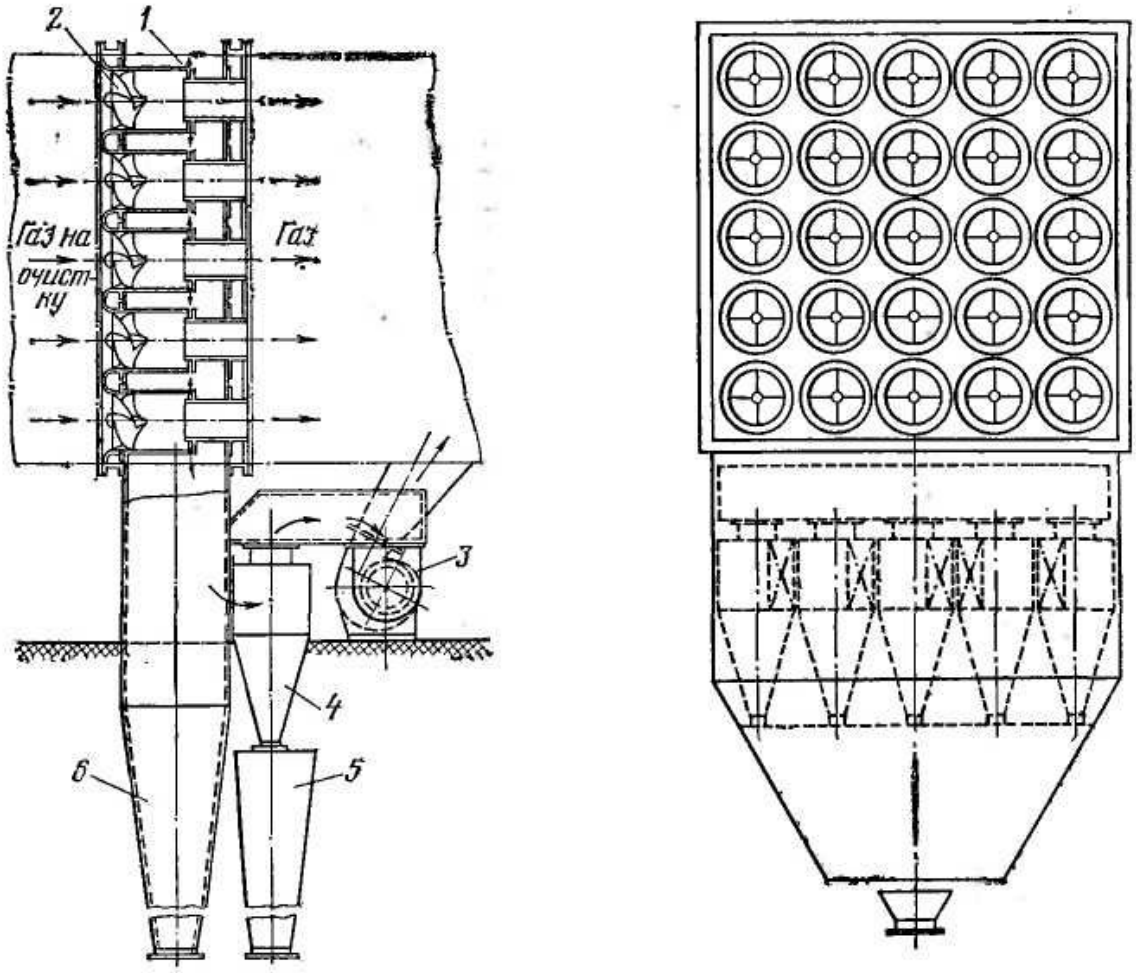


Рис. 7.12 Многокамерные прямоточные циклоны с пропусканием пыли в пылеосадительные камеры и последующие циклоны: 1 – пылесборник, 2 – неподвижные лопасти, 3 – дополнительный вентилятор, 4 – циклон, 5 – бункер циклона, 6 – осадительная камера

Действие такой двойной спирали подобно действию окружающей вихревой области смерча (торнадо); поэтому в некоторых странах такие циклоны известны под торговой маркой «Торнадо».

На практике вторичный газ поступает во внутреннюю камеру из внешней кольцевой камеры через зазор 75 – 125 мм (в зависимости от размеров циклона).

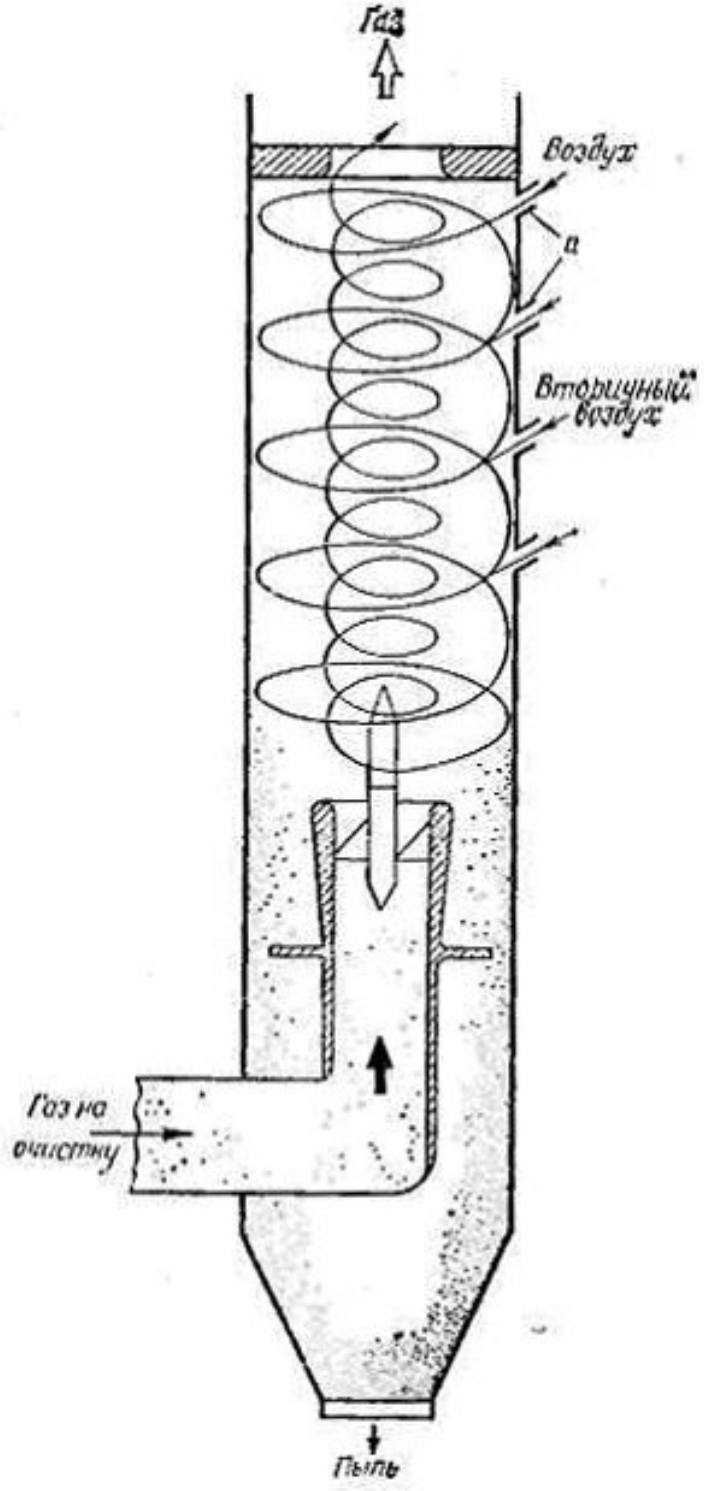


Рис. 7.13 Прямоточный циклон с обратным потоком воздуха

Общее устройство показано на рис. 7.14. Для промышленных установок расход газа составляет от 34 до 6800 м^3/ч, содержание пыли в нем до 230 г/м^3. Преимуществами таких циклонов являются незначительность истирания стенок

и возможность очистки горячих газов, которые могут быть охлаждены потоком вторичного воздуха, поэтому для изготовления корпуса циклона не требуются огнеупорные материалы.

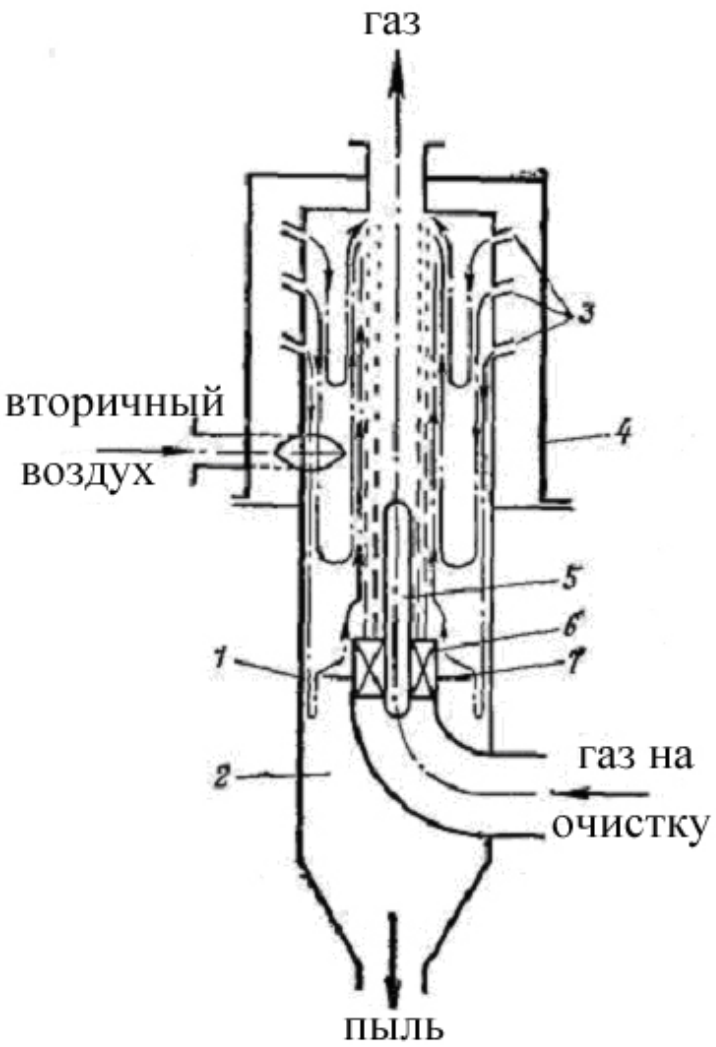


Рис. 7.14 Принципиальная схема прямоточного циклона с обратным потоком: 1 – сопло (кольцевой зазор); 2 – пылесборник; 3 – стояк; 4 – камера вторичного воздуха; 5 – стабилизатор потока; 6 – вихревая форсунка; 7 – диафрагма пылесборника.

Для высокоабразивных крупнозернистых пылей нашел применение прямоточный циклон ЦКТИ (рис. 7.15). Цмклон может футероваться термокислотной керамической плиткой. Коэффициент сопротивления на полное сечение аппарата составляет около $\zeta = 50$ при оптимальной скорости газа в циклоне 8 м/с.

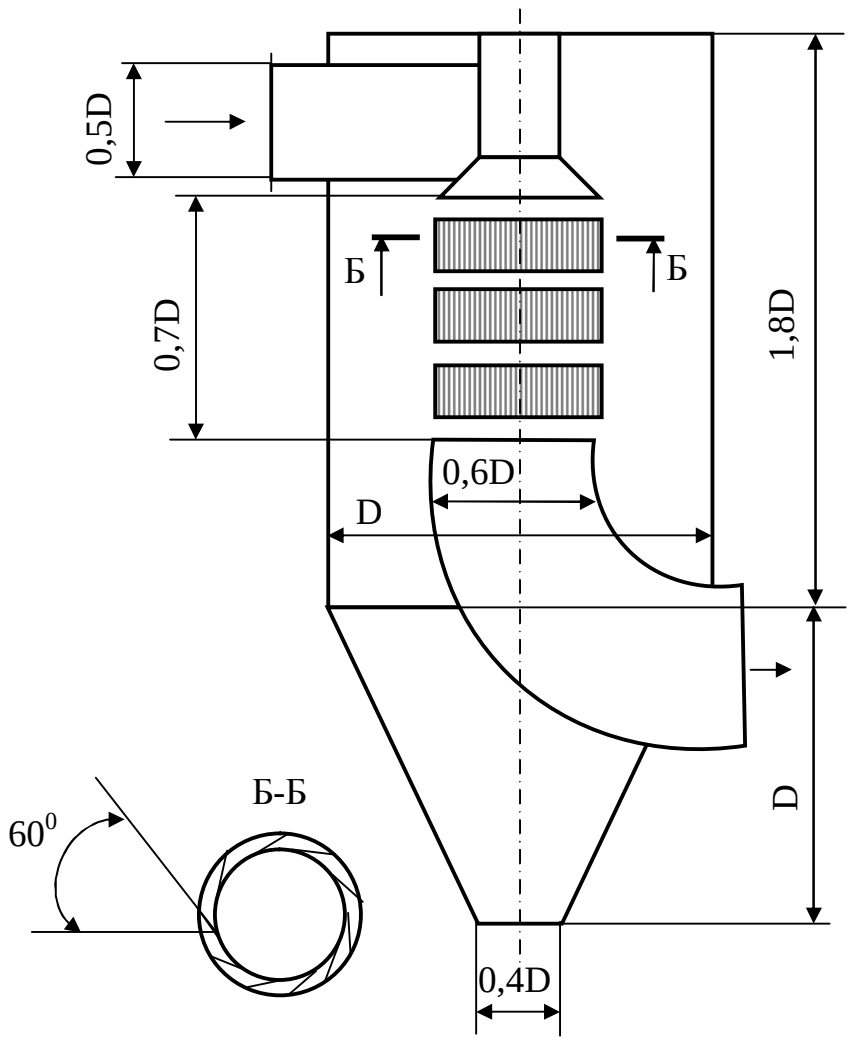


Рис. 7.15. Схема циклона ЦКТИ

Среди возвратно – поточных конструкций широкую известность за рубежом приобрели циклоны типа «Дуклон», «Сирокко», а у нас – аналогичные аппараты серии ЦН (циклоны НИИОГаза): ЦН–11, ЦН–15, ЦН–15У, ЦН–24 (рис.7.16).

Отличием циклонов серии ЦН является удлиненная цилиндрическая часть и наклон входного патрубка под углом 11°, 15° или 24°. Их конструктивные основные характеристики приведены в табл. 7.9. Циклоны ЦН – 15У (укороченные) имеют ухудшенные показатели и применяются в стесненных по высоте условиях.

Не допускается применение циклонов типа ЦН в обычном исполнении для очистки взрывоопасных сред. Они не рекомендуются также для улавлива-

ния сильнослипающихся пылей. Циклоны во взрывобезопасном исполнении имеют предохранительные клапаны на входном патрубке и крышке.

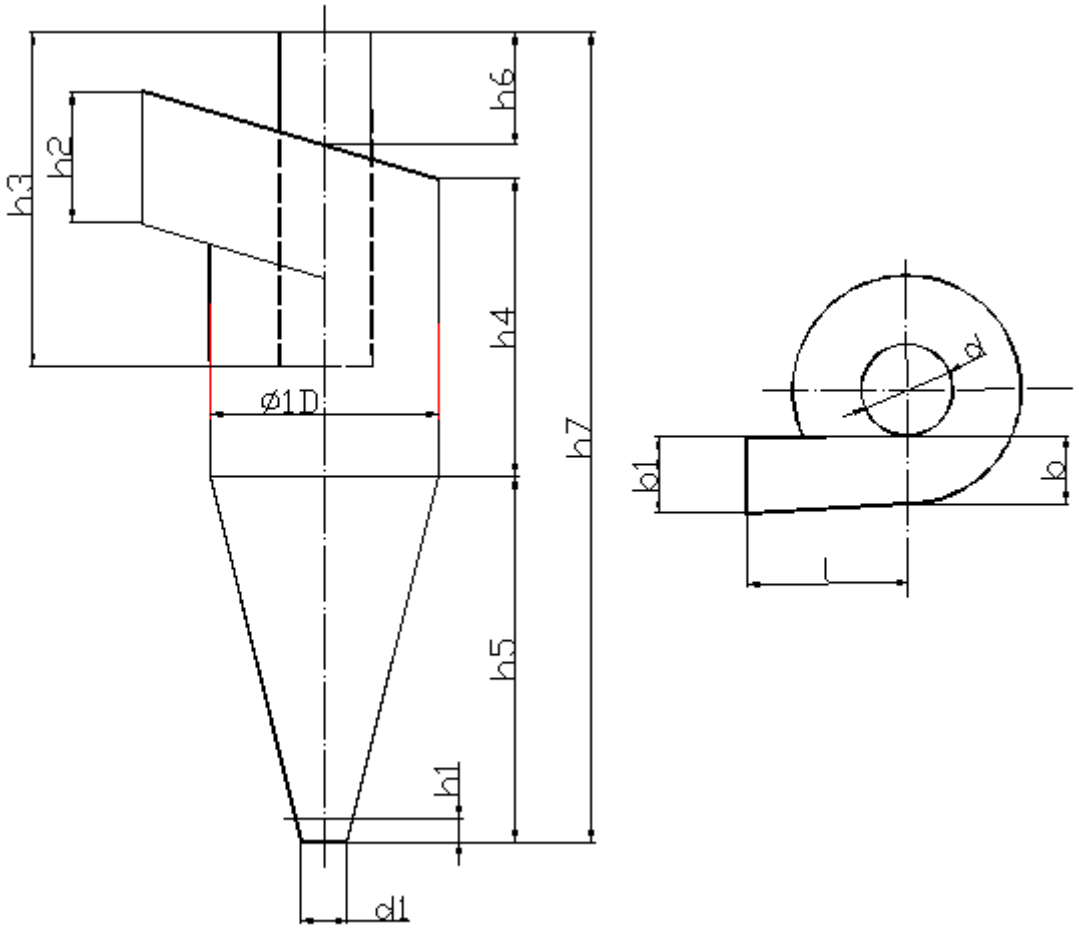


Рис. 7.16 Циклоны серии ЦН

В России и СНГ для циклонов принят стандартизированный ряд внутренних диаметров D: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000 мм. Для всех одиночных циклонов бункеры выполняются цилиндрическими с коническим днищем. Диаметр бункера принимают 1,5D для цилиндрических и 1,1 ... 1,2D для конических циклонов. Высота цилиндрической части бункера принимается 0,8D, угол конусности стенок днища – 60°. Для данных циклонов рекомендуется режим работы при оптимальной скорости в плане равной W = 3,5 м/с.

Размеры (в долях внутреннего диаметра) циклонов НИИОГаз Таблица 7.9

Наименование	ЦН–15	ЦН–15У	ЦН–24	ЦН–11
Внутр. диаметр выхлопной трубы D_1	0,59	0,59	0,59	0,59
Внутр. диаметр пылевыпускн. отв. D_2	0,3 – 0,4			
Ширина патрубка b в циклоне	0,2	0,2	0,2	0,2
Ширина патрубка b_1 на входе	0,26	0,26	0,26	0,26
Длина входного патрубка l	0,6	0,6	0,6	0,6
Высота установки фланца h_1	0,1	0,1	0,1	0,1
Высота входного патрубка h_2	0,66	0,66	0,66	0,66
Высота выхлопной трубы h_3	1,74	1,5	2,11	1,56
Высота цилиндрической части h_4	2,26	1,51	2,11	2,06
Высота конической части h_5	2	1,5	1,75	2
Высота внешн. части выхлопн. трубы h_6	0,3	0,3	0,4	0,3
Общая высота циклона h_7	4,56	3,31	4,26	4,38

К коническим циклонам относится циклон СИОТ, а также циклоны СДК–ЦН–33, СК–ЦН–34 и СК–ЦН–34М разработки НИИОГАЗ. Они отличаются от циклонов типа ЦН длиной конической части, наличием спирального входного патрубка и малым отношением диаметров выхлопной трубы и корпуса циклона (соответственно 0,334, 0,340 и 0,22). Циклон СК–ЦН–34М применяют для улавливания пылей с высокими абразивными свойствами или слипаемостью. Потери давления в этом циклоне значительно выше, чем в других конических циклонах. Для циклонов СДК–ЦН–33 (34) рекомендуется режим работы при оптимальной скорости в плане равной W = 2,0 м/с.

Циклоны типа СЦН–40 (рис. 7.17) предназначаются для высокоэффективной очистки технологических газов и аспирационного воздуха от мелкой и среднедисперсной пыли. Могут использоваться как самостоятельный агрегат обеспыливания, так и в качестве первой ступени в установках технологической очистки газов от пыли.

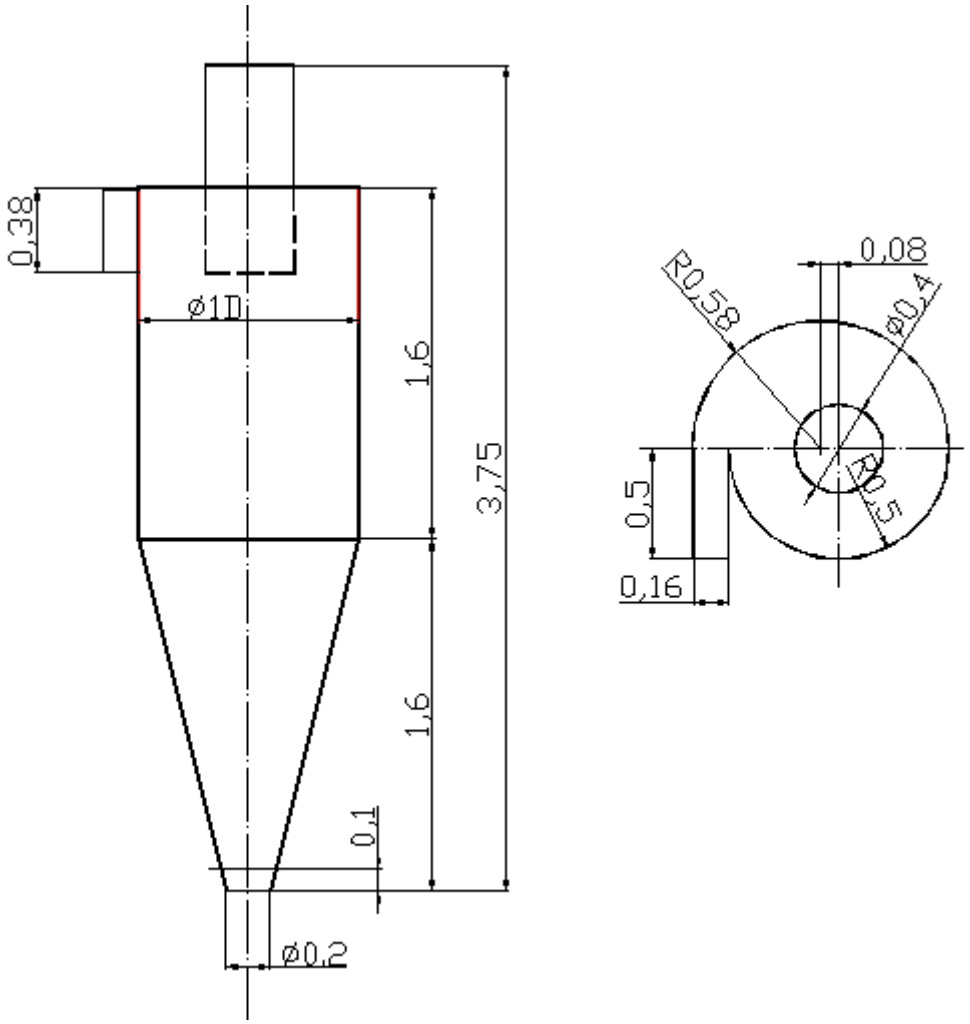


Рис. 7.17 Циклон СЦН–40 с размерами в долях внутреннего диаметра

Скорость газового потока в плане аппарата составляет 1,3 – 1,9 м/с, на входе в аппарат 16 – 24 м/с, коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к сечению корпуса циклона – 1100.

Циклоны могут располагаться как на всасывающей стороне вентилятора, так и на нагнетательной.

Циклоны СЦН–40 обладают более высокой степенью очистки по сравнению с известными циклонами типа ЦН–15, ЦН–11, СК–ЦН–34, УЦ–38. Вынос пыли из циклона СЦН–40 в 2,5 раза меньше, чем из циклона ЦН–15 и в 1,5 раза меньше по сравнению с циклонами СК–ЦН–34 и УЦ–38 при равных энергозатратах. Циклоны СЦН–40 имеют относительно высокую скорость газа в пристенной зоне (до 24 м/с), поэтому при улавливании липкой пыли менее подвержены забиванию конуса циклона. Абразивный износ циклона СЦН–40 при

одинаковых производительности и сопротивлении в 1,25 раза ниже, чем у циклона ЦН–15.

Циклоны СЦН–40 целесообразно устанавливать в тех случаях, когда требуется повышенная степень очистки газов и гидравлическое сопротивление не лимитируется.

Цилиндрические циклоны относятся к высокопроизводительным, а конические – к высокоэффективным аппаратам. Диаметр цилиндрических циклонов обычно не превышает 2000 мм, а диаметр цилиндрической части конических – 3000 мм.

Циклоны больших размеров имеют худшие показатели по очистке, и поэтому часто для достижения необходимой пропускной способности компонуют группы циклонов меньшего диаметра. Компоновка может выполняться прямоугольной или круговой (рис. 7.18).

Группы циклонов обычно имеют общие подводящие и отводящие коллекторы, объединенный пылесборник. Бункеры групп могут выполняться круглой и прямоугольной формы.

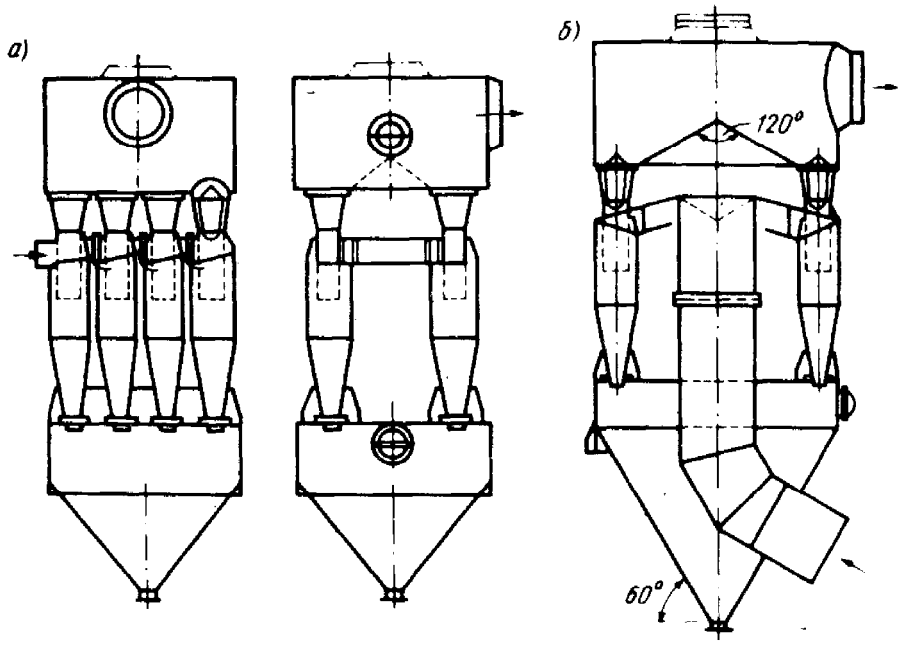


Рис. 7.18 Групповые циклоны ЦН–15:

а) с прямоугольной компоновкой (8 циклонов);

б) с круговой компоновкой (14 циклонов)

Группы рекомендуется компоновать из четного числа циклонов. Более восьми циклонов в группе компоновать вместе нежелательно. При большом числе циклонов практически невозможно организовать равномерное распределение газов ко всем аппаратам, что приводит к нерасчетным режимам их работы и существенному снижению степени очистки газа. Ухудшают очистку и переточки пыли в общем бункере, из–за которых интенсивнее, чем в одиночных циклонах, происходит захватывание ее очищенным газом.

При необходимости обеспечения большой пропускной способности используют *батарейные циклоны* (мультициклоны). Они состоят из циклонных элементов, объединенных в одном корпусе и имеющих общий бункер. Подключение циклонов параллельное от общего коллектора загрязненных газов, отвод очищенного газа также объединен. Циклонные элементы могут быть с возвратным потоком или прямоточные. Прямоточные элементы обладают всеми недостатками аналогичных одиночных циклонов и используются реже возвратно – поточных. В отечественных циклонных элементах подвод загрязненных газов производится коаксиально через завихрители типа «винт» и «розетка» (батарейные циклоны БЦ–2, ЦБ–245Р и др., рис. 7.19, а, б) или тангенциально через укороченные улитки (полуулиточный подвод – батарейные циклоны «Энергоуголь», ПБЦ, рис. 7.19, в; четырехзаходный улиточный завихритель – батарейные циклоны СЭЦ–24). Схема компоновки циклонных элементов показана на рис. 7.19, г.

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

Элементы с полуулиточным подводом имеют лучшие показатели очистки за счет герметичности узла ввода газов. В то же время степень очистки газов в батарейных циклонах любых типов ниже, чем в одиночных циклонах. Недостатки, присущие групповой установке циклонов, в батарейных циклонах усугубляются большим числом объединяемых элементов. Технические характери-

стики некоторых типов батарейных циклонов с возвратно – поточными элементами приведены в табл. 7.10, а с прямоточными – в табл. 7.11.

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

Технические характеристики батарейных циклонов с возвратно–поточными элементами Таблица 7.10.

Тип циклона	Число элементов, шт	Оптимальная скорость газа в элементе, м/с	Пропускная способность, $м^3/с$	Коэффициент сопротивления	Тип направляющего аппарата	Область применения
ЦБ–254Р	25, 30, 40, 50, 60, 80	4,5	5,5 – 16	90	Розетка	Очистка высокотемпера–турных газов t = до 400 ^{0}С от пыли и
БЦ–2	20, 25, 30, 36, 42, 46,	4,5	4,2 – 11,7	65	Розетка	
ПБЦ	24, 36, 48, 92, 116, 140,	3,5	3,3 – 27,8	120	Полу–улитка	

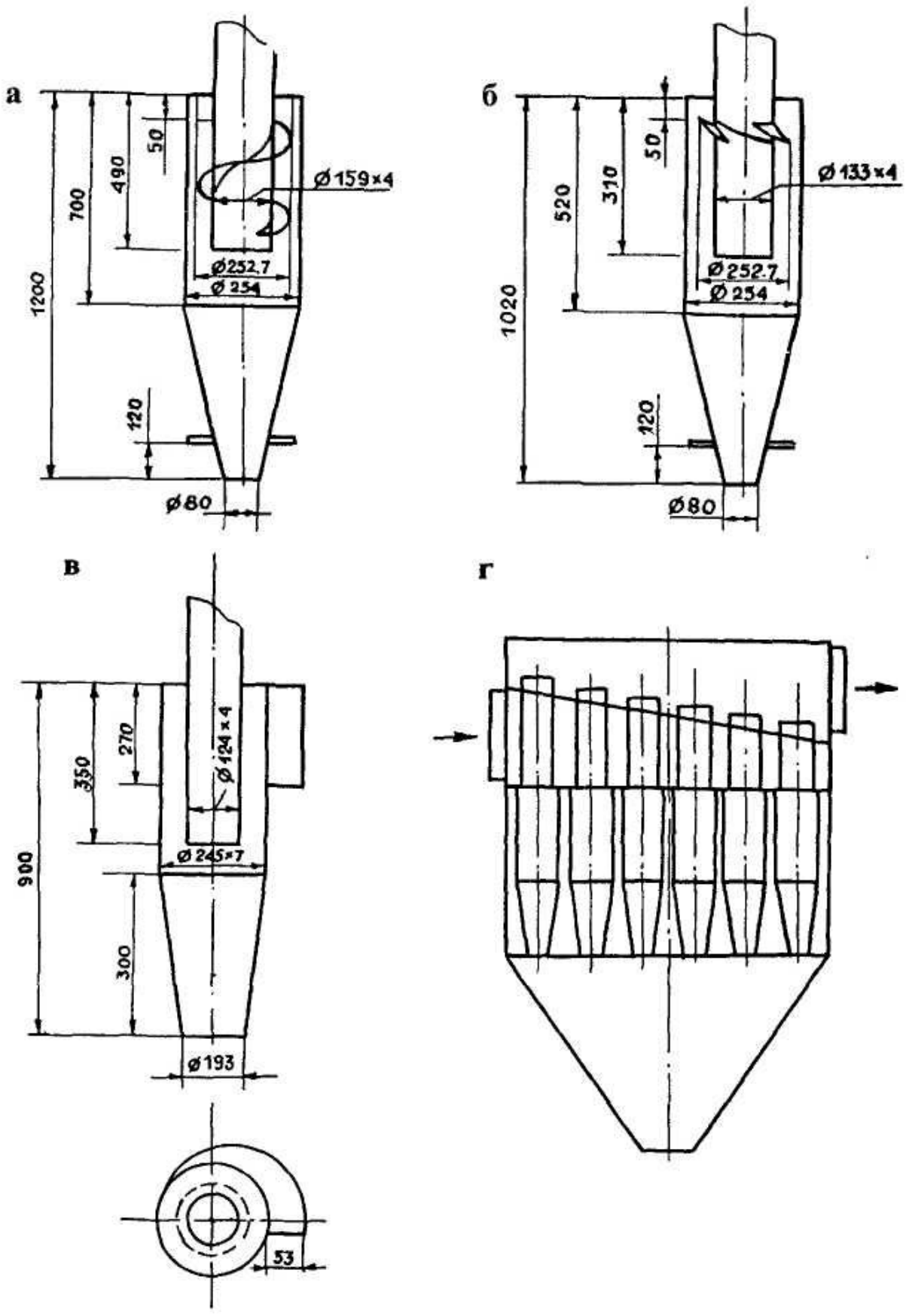


Рис. 7.19 Батарейные циклоны

Технические характеристики батарейных циклонов с прямоточными элементами Таблица 7.11.

Тип циклона	Кол–во секций	Кол–во элементов в одной секции		Пропускная способность	Область применения
		По длине	По ширине		
БЦ 1×8×8… БЦ 1×11×16	1	8…11	8…16	8,5 … 27,3	Очистка от крупной золы с производительностью 25 … 320 т/час
БЦ 2×5×6… БЦ 2×11×16	2	5…11	6…16	8 … 54,7	
БЦ 3×8×9	3	8	9	33,5	
БЦ 4×8×9… БЦ 4×11×18	4	8…11	9…18	38,7 … 121	
БЦУ – М	1–2	10…14	7…24	130 … 240	

Циклоны как аппараты, предназначенные для улавливания крупных частиц, обычно подвергаются абразивному износу. Этому способствует многовитковое вращение газового потока, несущего дисперсную фазу. В результате вращения и возникновения центробежных сил происходит концентрирование твердых абразивных частиц у стенок аппарата, следствием чего является эрозия, то есть истирание стенок циклона вплоть до образования сквозных отверстий. Скорость такого истирания в отдельных случаях достигает 12 мм в год.

Основными мерами повышения износостойкости циклонов в настоящее время являются нанесение на изнашиваемую поверхность какого–либо износостойкого покрытия, применение материалов, более стойких к износу в заданных условиях; изменение инструкции циклонов, приводящее к ослаблению износа.

Нанесение на изнашиваемую поверхность стойких к износу покрытий – наиболее известный метод, прошедший широкую апробацию в производственных условиях. Он предусматривает в первую очередь футеровку внутренней поверхности циклона плитками из плавленого диабаза и базальта. Срок службы циклонов с такими покрытиями увеличивается в 5 – 10 раз. Известно использо-

вание для этих же целей футеровки кислотоупорной, ситалловой плиткой на силикатной замазке или на шлакосиликатбетоне.

Эффективность улавливания пыли в циклонах зависит от крупности и плотности улавливаемых частиц, скорости газов на входе в циклон, вязкости газа, соотношения радиусов циклона и выходного патрубка.

Крупные и более плотные частицы улавливаются в циклонах значительно эффективнее, чем мелкие, так как на них действуют большие по абсолютной величине центробежные силы.

С увеличением скорости газового потока на входе в циклон повышается его КПД. Скорость движения газового потока можно увеличивать до определенного предела, при превышении которого степень очистки газов снижается. Максимальная скорость подачи газов зависит от диаметра циклона и дисперсного состава пыли. При подаче газов со скоростью выше допустимой в циклонах возникают локальные вихри, под действием которых осевшие частицы срываются потоком газов. Оптимальная скорость движения потока газа на входе в циклон 20 – 25 м/с.

При увеличении радиуса выхлопного патрубка сокращается путь, который необходимо пройти частице до внутренней поверхности циклона, т. е. степень очистки газов может возрастать. Следует иметь в виду, что при малых значениях разности между диаметрами циклона и выхлопного патрубка возможно забивание пылью входного патрубка, особенно если пыль склонна к слипанию и прилипанию к стенкам циклона.

При увеличении диаметра циклона КПД снижается, так как увеличивается длина пути движущихся частиц. Диаметры одиночных циклонов не должны превышать 1000 мм.

Вязкость газов зависит от их температуры. С увеличением температуры вязкость газов возрастает, а к. п. д. снижается.

При усложнении конструкций циклонов эффективность пылеулавливания возрастает незначительно. В циклонах сложных конструкций повышается гидравлическое сопротивление, в результате этого возрастает расход электроэнер-

гии, затраты на которую обычно составляют 80 – 90 % от общих затрат на очистку газов в циклонах.

Температура газов на входе в циклон для предупреждения конденсации водяных паров должна быть на 30 – 50°С выше точки росы и не превышать 400°С. Давление (разрежение) газов не должно быть больше 2500 Па.

Как показывает опыт, величины парциальных коэффициентов осаждения для многих типов циклонов вполне удовлетворительно аппроксимируются прямой линией в вероятностно – логарифмической системе координат. Это позволяет использовать функции нормального распределения при подсчете полного коэффициента осаждения.

Один из широко практикуемых в России и СНГ методов расчета, выполняемый по схеме последовательных приближений, заключается в следующем (по [16]).

1. Задаются типом циклона и вычисляют его диаметр

$$D_р = \sqrt{\frac{W}{0{,}785 w_{опт} N}}, \text{ м},$$

где $w_{опт}$ – оптимальная усредненная скорость потока в циклоне, м/с,

N – число устанавливаемых циклонов.

Величину $w_{опт}$ принимают по опытным данным (табл. 7.12). Полученное расчетное значение $D_р$ округляют до стандартного диаметра D.

Характеристики циклонов Таблица 7.12

Характеристики	Марки циклонов										
	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М	СИОТ	ВЦНИИОТ	Ц	Клайпеда
w_{opt}, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2	1,7	2	1	4	3,3	1,1
D_{50}, мкм	8,5	6	4,5	3,65	2,31	1,95	1,13	2,6	8,6	4,12	3,1
$\lg \sigma_\eta$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,34	0,28	0,32	0,34	0,25
Примечание значения D_{50} получены при скорости потока, равной w_{opt}, диаметре циклона 600 мм, плотности частиц 1930 кг/м³, динамической вязкости газа 22,2 10^{-6} Па с											

2. Подсчитывают скорость потока в циклоне со стандартным диаметром D

$$w = \frac{W}{0{,}785 D^2 N}.$$

Если полученное значение скорости более чем на 15 % отличается от оптимальной, необходимо выбрать другой типоразмер циклона.

3. Определяют коэффициент гидравлического сопротивления циклона по формуле:

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{500} + K_3,$$

где ζ_{500} – коэффициент гидравлического сопротивления циклона диаметром 500 мм;

K_1, K_2, K_3 – поправочные коэффициенты на диаметр, запыленность и компоновку (для групповых установок), принимаемые по справочным данным (табл. 7.13 – 7.16).

Коэффициенты сопротивления зависят от типа циклонов, наличия дополнительных устройств на входе и выходе, характера их подключения (в сети или на выхлоп в атмосферу), что необходимо учитывать, принимая значения ζ_{500}.

4. Подсчитывают потери давления в циклоне по формуле

$$\Delta p = \frac{\zeta \rho w^2}{2}, \text{ Па},$$

где ρ – плотность газа–носителя, кг/м^3.

Убедившись, что величина Δp оказалась приемлемой, то есть обеспечива-

ется напором вентилятора (дымососа), принятого к установке в данной системе, переходят к расчету степени очистки.

Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов Таблица 7.13

Марка циклона	D_1/D	Циклоны с выходом в сеть				Циклоны с выхлопом в атмосферу
		через улитку	через отвод 90°		без дополнительных устройств	
			при $l/d \leq 12$	при $l/d > 12$		
ЦН-11	0,59	235	245	250	245	250
ЦН-15	0,59	150	155	160	155	163
ЦН-15У	0,59	158	165	170	165	170
ЦН-24	0,59	73	75	80	75	80
СДК-ЦН-33	0,33	500	-	560	520	600
СК-ЦН-34	0,34	-	-	-	1050	1150
СК-ЦН-34М	0,22	-	-	-	-	2800
СИОТ	0,392	1400	-	-	-	-
ВЦНИИОТ	0,5	-	-	-	-	75
Ц	0,6	-	-	-	-	210
"Клайпеда"	0,59	-	-	-	-	1300

Примечание значения z отнесены к средней скорости газового потока в аппарате и определены для циклонов ЦН, СДК-ЦН, СК-ЦН при D=500 мм , w=3 м/с, для циклонов "Клайпеда" – при w_{opt} и нижнем положении подвижного корпуса под выхлопной трубой, для остальных – при w_{opt}

Поправочный коэффициент K_1 на диаметр циклона Таблица 7.14

D, мм	Марка циклона	
	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24
200	0,95	0,9
300	0,96	0,93
400	0,99	1,0
500	1	1

Поправочный коэффициент K_2 на начальную запыленность газов Таблица 7.15

Марка циклона	Запыленность, г/м³						
	<0,1	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
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	0,96	-	-	-

Поправочный коэффициент K_3 на способ компоновки Таблица 7.15

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

5. Определяют параметр осаждения x

$$x = \frac{\lg\left(D_m / D_{50}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg \sigma_p}}, \qquad (7.2)$$

где D_{50}, σ_n – средний диаметр и дисперсия осаждаемых в циклоне частиц, которые принимают по справочным (опытным) данным. При необходимости их пересчитывают на проектируемые условия по формуле

$$D_{50} = D_{50r}\sqrt{\frac{D}{D_r}\frac{\rho_{pr}}{\rho_p}\frac{\mu}{\mu_r}\frac{w_r}{w}},$$

где D_{50r}, D_r, ρ_{pr}, μ_r, w_r – соответственно средний диаметр осаждаемых в циклоне частиц, диаметр циклона, плотность частиц, динамическая вязкость и

скорость газового потока, принятые по справочным данным.

6. По параметру x из табл. 6.1 определяют величину интеграла вероятностей $\Phi(x)$ и считают ее в данном случае численно равной полному коэффициенту очистки.

Если степень очистки оказалась недостаточной, может быть применен другой тип циклона с более высоким гидравлическим сопротивлением, который следует рассчитать заново. Ориентировочно требуемое сопротивление можно найти из соотношения

$$\zeta_2 = \zeta_1 \left(\frac{100 - \eta_1}{100 - \eta_2} \right)^2 \frac{w_1}{w_2} \frac{D_2}{D_1},$$

где индексами 1 и 2 обозначены вычисленные и требуемые значения величин.

Физический смысл улучшения степени очистки газа в циклоне с более высокими потерями давления (при неизменных диаметре аппарата и скорости потока в нем) заключается в увеличении работы, затрачиваемой на очистку газов.

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

Можно принять следующий порядок расчета:

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

2. Для каждого из циклонов находят диаметры частиц, улавливаемых на 15,9 %, по формуле $\lg D_{15,9} = \lg \sigma_\eta + \lg D_{50}$.

3. В вероятностно – логарифмической системе координат наносят точки $D_{15,9}$ и D_{50} и проводят через них прямые, получая тем самым линии парциальных про-

скоков через каждый циклон.

4. Определяют величины парциальных проскоков ε_j через все циклоны перемножением парциальных проскоков ε_i через каждый циклон $\varepsilon_j = \prod_{i=1}^{N} \varepsilon_i$, где N – количество последовательных циклонов.

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

6. По уравнению (7.2) находят значение x, а из табл. 6.1 – $\Phi(x)$, которое считают равным полному коэффициенту очистки газов, последовательно прошедших через все циклоны.

Последовательная установка однотипных циклонов не практикуется, хотя имеются сведения об успешном опыте применения и такого способа сепарации [3].

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

Ориентировочные размеры частиц очищаемой пыли приведены в табл. 7.16.

Характеристика пылей Таблица 7.16

Наименование оборудования	Материал	Запыл. $г/м^3$	d_{50}, мкм	$\sigma = \frac{d_{50}}{d_{16}}$	$\rho_{пыли}$, $кг/м^3$
Вращающаяся цементн. печь	Клинкер	25 – 30	19	3,6	2740
Шахтная мельница	Гипс	1049	56	9,35	2840
Шаровая мельница	Цемент	-	20	2,94	2900
Сушильный барабан	Кам. уголь	-	15	2,16	1600
Вращающаяся печь обжига	Магнезит	100 – 120	43	0,615	2700
Вращающаяся печь обжига	Доломит	35 – 45	28	0,506	2000

Расчеты батарейных циклонов выполняют в следующем порядке.

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

2. Рассчитывают расход газа через один элемент W_1

$$W_1 = 0{,}785 w_{опт} D^2, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Диаметр циклонного элемента D обычно принимают в пределах 250 мм, так как дальнейшее уменьшение диаметра не приводит к увеличению степени очистки.

3. Определяют количество элементов $N = \frac{W}{W_1}$.

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

5. По уточненной скорости потока в элементе определяют аэродинамическое сопротивление циклона Δp

$$\Delta p = \frac{\zeta \rho w^2}{2}, \text{ Па}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления ζ принимают по опытным данным.

6. Коэффициент очистки газа в элементе циклона η_1 определяют по методике расчета индивидуального циклона, используя опытные значения d_{50} и $\lg \sigma_\eta$ принятого типа элемента (табл. 7.17). Коэффициент очистки газа в батарейном циклоне при большом количестве элементов может быть ниже на 20 ... 25 %, чем в одиночном элементе, что обязательно следует учитывать при выборе средств очистки.

Характеристики циклонных элементов Таблица 7.17

Характеристики	Тип элемента				
	"розетка" α =25°, D=250 мм	"розетка" α =30°, D=250 мм	"Энергоуголь" D=250 мм	"Энергоуголь" D=230 мм	Прямоточный ЦКТИ D=250 мм
D_{50}, мкм	3,85	5	3	2,85	4
lg σ_η	0,46	0,46	0,325	0,325	0,325

Примечание: значения D_{50} получены для элементов типа "розетка" и "Энергоуголь" при скорости потока 4,5 м/с, динамической вязкости газов $23{,}7\,10^{-6}$ Па с, плотности частиц 2200 кг/м³, а для прямоточных элементов – при скорости потока 12 м/с, динамической вязкости газа $18{,}8\,10^{-6}$ Па с, плотности частиц 2200 кг/м³ и рециркуляции из бункера до 10% от расхода подаваемого газа.

Пример 7.3. Рассчитать степень очистки цементной пыли (см. пример 7.1) в циклонном пылеуловителе. D_m = 20 мкм, σ = 3, начальная запыленность 20 г/м^3. Расход газа – носителя (воздуха с температурой t = 140°C) W = 10000 м^3/ч.

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

1. Задаемся типом циклона. Принимаем к расчету возвратно – поточный циклон типа ЦН–11. Оптимальная скорость потока в циклоне w = 3,5 м/с.

1. Вычисляем диаметр циклона

$$D_{cl} = \sqrt{\frac{10000}{3600 \cdot 0{,}785 \cdot 3{,}5 \cdot 1}} = 1{,}005 \text{ м.}$$

Принимаем стандартный диаметр циклона D = 1000 мм.

2. Подсчитываем скорость потока в циклоне с диаметром 1000 мм:

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

3. Подбираем значения ζ_{500}, K_1, K_2, K_3 для циклона ЦН – 11, работающего на выхлоп в атмосферу, по таблицам 7.13...7.15 и определяем коэффициент гидравлического сопротивления циклона $\zeta = 1 \cdot 0{,}92 \cdot 250 + 0 = 230$.

4. Вычисляем плотность дымовых газов в рабочих условиях и потери давления в циклоне

$$\rho = \frac{1{,}23 \cdot 273}{273 + 140} = 0{,}813, \text{ кг/м}^3,$$

$$\Delta p = \frac{230 \cdot 0{,}813 \cdot 3{,}54^2}{2} = 1172, \text{ Па}.$$

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

5. Из таблицы 7.12 находим значение D_{50} = 3,65 мкм для циклона ЦН – 11 диаметром D_T = 600 мкм при табличной плотности частиц 1930 кг/м^3 и вязкости газа – носителя $22{,}2 \cdot 10^{-6}$ Па·с, а также величину $\lg \sigma_\eta$ = 0,352.

Для пересчета значения D_{50} на проектируемые условия необходимо определить динамическую вязкость газа – носителя в рабочих условиях.

Пересчет динамической вязкости на рабочую температуру произведем по формуле

$$\mu_T = \mu_0 \frac{273{,}15 + k}{T + k}\left(\frac{T}{273{,}15}\right)^{2/3} =$$

$$= 22{,}2 \cdot 10^{-6} \frac{273{,}15 + 122}{273 + 140 + 122}\left(\frac{273 + 140}{273{,}15}\right)^{2/3} = 12{,}49 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}/(\text{мК}),$$

где k – эмпирическая константа, равная для азота 107, для кислорода 138, воздуха 122, водяного пара 673, водорода 138, диоксида углерода 255, оксида уг-

лерода 102, метана 200, этана 300, пропана 320, бутана 340.

Теперь можно пересчитать значение D_{50} :

$$D_5 = D_{50r}\sqrt{\frac{D}{D_r}\frac{\rho_{pr}}{\rho_p}\frac{\mu}{\mu_r}\frac{w_r}{w}} =$$

$$= 3{,}65\sqrt{\frac{1000}{600}\frac{1930}{2650}\frac{12{,}49\cdot10^{-6}}{22{,}2\cdot10^{-6}}\frac{3{,}5}{3{,}54}} = 3{,}0 \quad \text{мкм.}$$

Определяем параметр осаждения

$$x = \frac{\lg\left(20/3\right)}{\sqrt{0{,}352^2 + \lg^2 3}} = 1{,}39.$$

6. Находим по таблице 6.3 значение интеграла вероятности Ф(x) = 0,9162 и приравниваем к нему величину коэффициента очистки η = 91,62 %.

Такой результат позволяет использовать циклон только для предварительной очистки цементной пыли заданного состава. Несложно убедиться в низком качестве очистки, подсчитав валовой выброс загрязнителя в атмосферу после циклона. При заданных условиях (запыленность 20 г/м^3, количество дымовых газов 10000 м^3/ч) суточный выброс золы после циклона составит $M = 0{,}02\cdot10000(1-0{,}9162)24 = 402$ кг.

7.Попытаемся увеличить коэффициент очистки, выбрав циклон с более высоким сопротивлением. Чтобы суточный выброс цементной пыли не превосходил хотя бы 50 кг, коэффициент очистки должен быть не ниже 99 %. Вычислим требуемую для этого величину коэффициента сопротивления

$$\zeta = 230\left(\frac{100-91{,}62}{100-99}\right)^2\frac{3{,}54}{3{,}5}\frac{1000}{1000} = 16336.$$

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

7.5. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ЦИКЛОНОВ

Выбор типа и размера циклона производится на основании заданного расхода газов, физико–механических свойств пыли, требуемого коэффициента очистки, габаритов установки, эксплуатационной надежности и стоимости очистки. Диаметр циклонов типа ЦН–11, ЦН–15, ЦН–15У, объединенных в группы с прямоугольной компоновкой, не должен превышать 1800 мм, а при круговой компоновке 1000 мм.

При обеспыливании газа объемом более 80000 – 100000 $м^3$/ч и при высоких требованиях к очистке следует применять батарейные циклоны. Батарейные циклоны имеют меньшие габариты, чем групповые, но требуют для своего изготовления большего расхода металла и стоимость их выше стоимости групповых циклонов.

Наиболее характерными нарушениями нормальной работы циклонов являются истирание стенок циклонов абразивной пылью и залипание. С увеличением диаметров циклонов и понижением скорости газового потока на входе истирание стенок и залипание уменьшаются. Вследствие этого для улавливания абразивной пыли рекомендуется применять циклоны типа СК–ЦН–34, способные обеспечивать высокую степень очистки при сравнительно небольшой скорости пылегазового потока на входе.

При невысоких требованиях к степени очистки, а также для очистки газов от пылей со средним медианным диаметром > 20 мкм предпочтительнее использование циклонов типа ЦН–24.

Циклоны типа ЦН–15У характеризуются низкими технико–экономическими показателями, и их использование может быть оправдано только в тех случаях, когда имеются строгие ограничения габаритов по высоте.

Рекомендации по подводу и отводу газов:

1. Одиночные и групповые циклоны устанавливают как на всасывающих, так и на нагнетательных трактах системы газоходов.

2. Для очистки газов от абразивной пыли, вызывающей износ крыльчаток вентиляторов, циклоны следует устанавливать перед вентиляторами.

3. Давление газов, поступающих на очистку, и их температура могут быть любыми при условии обеспечения необходимой прочности и герметичности аппарата. Нормализованные циклоны рассчитаны на давление (или разряжение) 2500 Па и температуру до 400° С.

4. Наличие запорных или дроссельных устройств внутри группового циклона, на коллекторах или выхлопных трубах не допускается во избежание нарушения равенства гидравлических сопротивлений между циклонными элементами. Исследования показали, что при отсутствии равенства гидравлических сопротивлений могут иметь место перетоки газов из бункера в циклон с малым сопротивлением, что приводит к значительному снижению эффективности очистки.

5. Присоединение подводящих и отводящих газоходов к циклонам следует выполнять преимущественно сварным, на бандажах, что обеспечивает надежность и герметичность соединения.

6. Установка одиночных н групповых циклонов производится вертикально, так, чтобы пылевыпускное отверстие было обращено книзу. В некоторых случаях допускается горизонтальное расположение одиночных циклонов. В этом случае бункер должен иметь специальную конструкцию.

В процессе эксплуатации циклонные установки следует подвергать систематическим осмотрам.

Внутренние осмотры пылеулавливающей установки выполняют во вре-

мя остановки основного технологического агрегата. В батарейных циклонах при осмотре обращают внимание на степень изношенности элементов, наросты пыли на направляющих лопатках, герметичность затворов и питателей. Не менее двух раз в год, приурочивая к остановке основного агрегата, детально осматривают аппараты (внутри н снаружи). При необходимости их очищают от пыли, заменяют изношенные детали или устраняют сваркой обнаруженные неплотности.

При осмотре проверяют:

- наличие посторонних предметов в коллекторах, циклонах и бункере (тряпок, кусков теплоизоляции, сварочных электродов и т. д.), которые при обнаружении удаляют;
- чистоту внутренних поверхностей коллекторов и аппаратов, наличие отложений пыли в конусах циклонов, на циклонных элементах и в пылевыводящем отверстии бункера, которые подлежат обязательному устранению;
- надежность работы пылевого затвора (отсутствие заеданий, плотность прилегания трущихся и соприкасающихся поверхностей и т. п.) и средств для транспортировки пыли; герметичность сварных швов, люков и фланцевых соединений;
- состояние теплоизоляции.

Негерметичность пылевыгрузного устройства при наличии в бункере давления выше атмосферного ведет к выбросу пыли в окружающую среду, а при наличии в бункере разрежения вызывает резкое снижение коэффициента очистки газов от пыли. Так, подсос воздуха в бункер, равный примерно 15 % от общего расхода газа через циклон, снижает коэффициент очистки практически до нуля.

Важное значение для эффективной работы газоочистных установок имеют правильное устройство пылесбросных бункеров и своевременное освобождение их от уловленной пыли. При нерегулярной выгрузке пыли происходит переполнение бункера, что недопустимо, так как при этом уменьшается

степень очистки в результате выноса уловленной пыли из бункера.

Для циклонов ЦН слой пыли в бункере при наибольшем его заполнении должен быть ниже пылевыпускных отверстий циклонов не менее чем на величину двух диаметров этих отверстий.

Тепловая изоляция наружных поверхностей препятствует конденсации водяных паров из пылегазового потока, а поэтому должна поддерживаться в надлежащем состоянии. Конденсация водяных паров может вызвать замазывание циклонов или циклонных элементов батарейного циклона, пылевых затворов мокрой пылью и вывести аппарат из строя. Во избежание этого температуру газов, поступающих в аппараты, поддерживают выше температуры точки росы не менее чем на 20 – 25° С.

Кроме того, наружная поверхность аппаратов покрывается тепловой изоляцией также с целью предохранения обслуживающего персонала от ожогов при случайных прикосновениях. Температура наружной поверхности по правилам техники безопасности допускается обычно не выше 55° С.

Особо тщательно следует контролировать величину газодинамического сопротивления. Увеличение сопротивления с одновременным ухудшением очистки указывает на вероятность замазывания мокрой пылью аппаратов либо является результатом повышения расхода газов. Уменьшение газодинамического сопротивления с одновременным ухудшением очистки газа является результатом того, что газопылевой поток проходит через неплотности, минуя циклоны.

Для предупреждения забивания аппаратов улавливаемым продуктом при очистке газов от сильнослипающихся пылей устанавливают вибраторы на бункерах, а иногда и на конической части циклонов. Вибраторы в работу включаются периодически.

При установке вибраторов желательно предусмотреть компенсаторы между циклонами и примыкающими участками газоходов.

Если вибраторы не дают ожидаемого эффекта, возможна установка специального ворошителя внутри циклона. Следует отметить, что ворошители

значительно ухудшают аэродинамику циклонного процесса и, как следствие, приводят к снижению степени очистки. Цепи ворошителя вращаются от специального привода со скоростью 4 – 6 об/мин. Иногда для достижения необходимого эффекта достаточно разместить внутри одну подвешенную по оси циклона цепь, конец которой свисает в бункер. Находясь в непрерывном движении под воздействием потока газов, такая цепь препятствует возникновению сводов пыли над пылевыпускным отверстием аппарата. При этом эффективность аппарата уменьшается в значительно меньшей степени, чем при установке ворошителя.

В случае быстрого износа стенок циклонов при очистке дымовых газов от высокоабразивной пыли рекомендуется снижать скорость газов через аппарат до минимальных рекомендуемых значений.

К резкому снижению скорости износа приводит и предварительное отделение наиболее крупных частиц в пылеотстойниках. Если позволяют размеры аппарата, то желательна футеровка его изнутри керамической плиткой.

Циклонные установки должны снабжаться сигнализаторами уровня пыли. При отсутствии проверяют уровень пыли путем легкого обстукивания, по звуку.

7.6. СПИРАЛЬНЫЕ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛИ

Изготовляется несколько типов стационарных спиральных (тангенциальных) пылеуловителей. В этих установках в спиральной камере газ приобретает центробежный импульс, причем пыль собирается в периферийном слое, который поступает во вторичный пылесборник.

Чистый газ выбрасывается наружу. Чаще всего в качестве вторичного пылеуловителя используют обычный циклон. На рис. 7.20, а) показана одна из таких установок.

Другой пылеуловитель, подобный по принципу действия, но с тангенциальным входом и спиральным выходом, представлен на рис. 7.20, б).

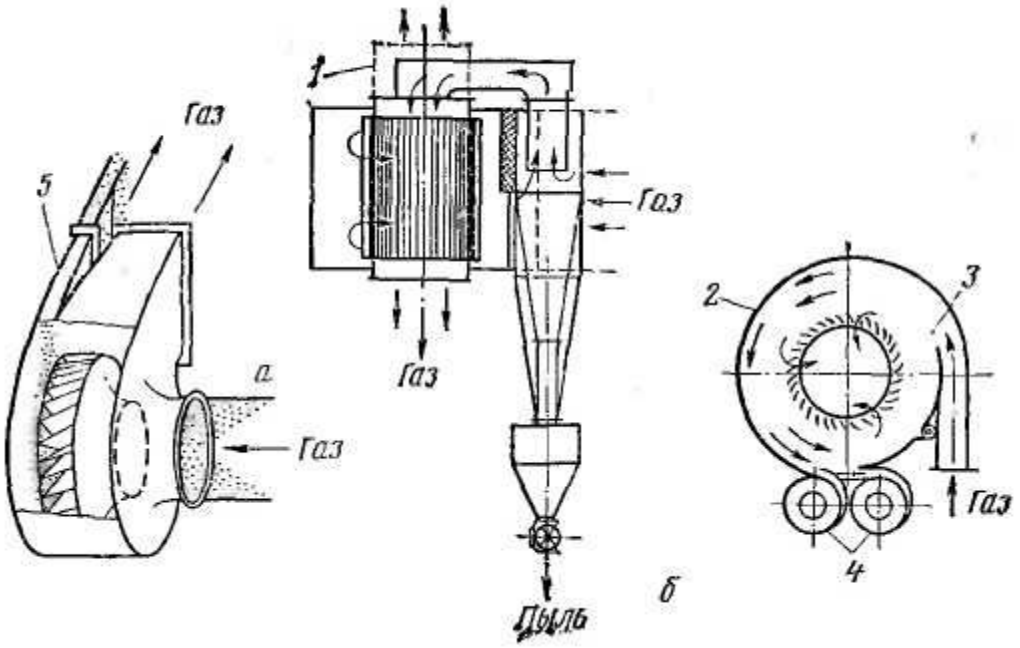


Рис. 7.20. Спиральные пылеуловители: а – простой спиральный пылеуловитель; б – циклон Буелла–ван–Тонгерена: 1 – альтернативный выход очищенного газа; 2 – первичный пылеотделитель; 3 – регулируемый дефлектор; 4 – вторичный пылеуловитель; 5 – короб с запыленным газом, направляемым к вторичному коллектору

Вращательное движение газовому потоку может быть сообщено не только с помощью неподвижной спирали; иногда для этой цели используют вытяжные вентиляторы. На рис. 7.21 представлена типичная модель такой установки.

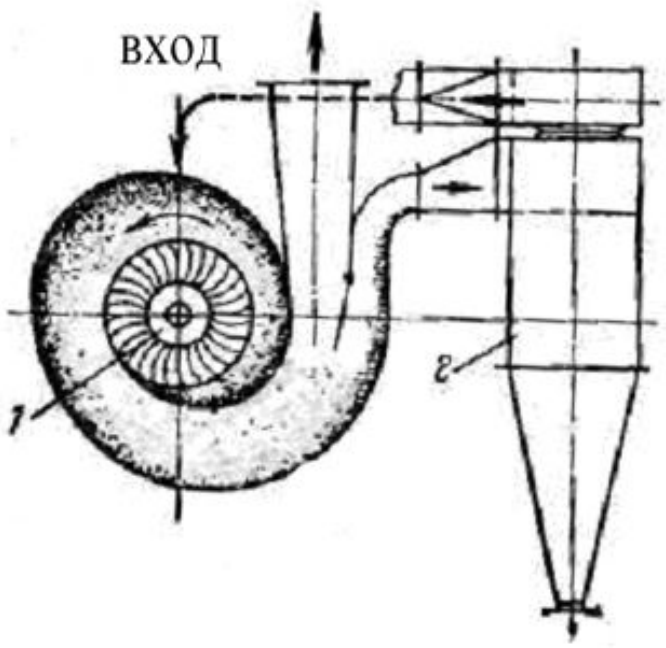


Рис. 7.21 Пылеуловители с вытяжным вентилятором:
1 – вытяжной вентилятор; 2 – циклон

7.7. ПОРИСТЫЕ ФИЛЬТРЫ

Фильтрация запыленных потоков в пористой среде обеспечивает высокую степень осаждения взвешенных частиц с любыми размерами, вплоть до близких к молекулярным. Частицы пыли улавливаются при огибании двухфазным потоком препятствий, образованных на его пути структурными элементами пористого слоя.

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

Тонковолокнистые фильтры имеют диаметры волокон менее 5 мкм и

используются для улавливания тонкодисперсных аэрозолей. Они обеспечивают степень очистки по субмикронным частицам не менее 99 %.

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

Глубокие волокнистые фильтры (фильтры долговременного пользования) составляют из глубокого лобового слоя грубых волокон и замыкающего неглубокого слоя тонких волокон. Диаметр грубых волокон может составлять от 8 до 19 мкм. Обычно они используются в системах стерилизации воздуха, но могут применяться и для тонкой очистки некоторых видов технологических газовых выбросов. Фильтры имеют высоту фильтрующего слоя от 0,3 до 2 м и рассчитаны на работу при давлении до 0,3 МПа.

Глубоволокнистые фильтры отличаются низким начальным сопротивлением (порядка 100 Па) и высокой пылеемкостью. Они используются для предварительной очистки газов и составляются из волокон диаметром 1...20 мкм. При удельной нагрузке 0,05...1 $м^3/(м^2с)$ фильтры должны полностью улавливать частицы крупнее 1 мкм.

В тканевых фильтрах применяются тканые или валяные материалы, исполняющие роль подложки для фильтрующей среды, которой является первичный слой уловленной пыли. Фильтровальные тканевые материалы представляют собой определенного вида переплетения нитей из естественных, стеклянных и синтетических волокон диаметром 10...30 мкм, скручиваемых в нити диаметром около 0,5 мм. Размеры пор между нитями обычно составляют 100 ... 200 мкм. Иногда можно применять ткань из переплетенных огнестойких диэлектрических (асбест) и высокоомных металлических нитей (нихром), к которым попеременно подключается повышенный электрический ток для сжигания пылевого остатка. Такие фильтры используют для улавливания органиче-

ской пыли (древесины), что обеспечивает минимальные отходы.

При очистке газов с температурой до 120° С чаще используют ткани из полиэфирных волокон – лавсановые ткани. Их можно длительно использовать в средах с повышенной кислотностью.

При температурах газов до 200° С применяют ткани из полиамидных волокон – оксолоновые, фенилоновые. При фильтровании агрессивных газов с повышенной кислотностью можно использовать фторсодержащие волокна – тефлон, полифен.

Нагретые до 300° С газы очищают с применением стеклянных волокон. Для придания им эластичности такие волокна подвергают термохимической обработке кремнийорганическими или фтористыми соединениями.

При фильтровании горячих газов применяют асбестовые ткани. Основной недостаток асбестовых тканей – низкая механическая прочность, особенно при знакопеременных нагрузках.

Наиболее эффективными фильтрующими материалами являются плотные фетры и нетканые материалы с аналогичной им структурой. Эффективность улавливания пыли в них обусловлена равномерным распределением волокон по всей толщине фетра, благодаря которому частицы осаждаются внутри материала. При регенерации фетров в них всегда остается часть пыли, что повышает эффективность улавливания тончайших (субмикронных) частиц, Использование фильтрующих материалов типа фетра или войлока позволяет в 3…10 раз увеличить подачу по газу и довести ее до 10 $м^3/(м^2 \cdot мин)$, а также осуществлять регенерацию материала без прекращения подачи запыленного воздуха.

Фильтровальные ткани характеризуют следующими основными показателями: массой 1 $м^2$ ткани, которая колеблется от 0,37 до 0,5 кг, воздухопроницаемостью, толщиной нити и пределом прочности на разрыв.

На степень очистки газов, гидравлическое сопротивление ткани и интенсивность ее регенерации оказывают влияние силы электростатического взаимодействия. Применение фильтровальных материалов с антистатическими свойствами повышает эффективность их регенерации. Для придания материалам

антистатических свойств их изготовляют с добавкой (1…2 %) металлических волокон.

В последние годы в естественные волокна (хлопок, шерсть), которые в течение многих десятилетий служили материалом для тканей в рукавных фильтрах, вытесняются синтетическими волокнами. Освоение промышленного выпуска искусственных и синтетических тканей позволило применять рукавные фильтры в различных производствах, так как эти ткани допускают фильтрацию газов при высоких температурах, устойчивы к агрессивным средам и более прочны. На некоторых промышленных установках рукава из терилена служат без замены от 2,5 до 5 лет.

Расширяется применение металлических тканей, позволяющих значительно повысить температуру очищаемых газов.

Фирмой «Джи Си Джи» (Великобритания) разработаны электропроводные волокна с антистатическими свойствами, которые получаются путем покрытия поверхности синтетического волокна небольшим количеством высокодисперсных частиц графита (2 %). Небольшой добавки этих волокон достаточно для придания тканям антистатических свойств, что очень важно при фильтрации взрывоопасной пыли.

Сведения, необходимые для выбора материала фильтровальной ткани, приведены в табл. 7.18.

По мере запыления сопротивление ткани начинает расти. Если не принимать никаких мер, оно может увеличиваться до величины напора, развиваемого вентилятором. Дальнейшее накопление пыли приведет к уменьшению подачи вентилятора. Часть пыли при повышенных перепадах давления может проникнуть в поры между нитями и «забить» ткань, сделав ее непригодной для фильтрования. Во избежание этого явления фильтры через определенное время эксплуатации подвергают регенерации.

Фильтры можно регенерировать встряхиванием или выдуванием осевшей пыли. При выборе способа регенерации имеют значение вид ткани, конструкция аппарата, характеристики пыли и технологического процесса, другие фак-

торы.

Механическое встряхивание может выполняться несколькими способами. Нестойкие на изгиб ткани (например, из стекловолокна) регенерируют быстрым покачиванием из стороны в сторону без изменения натяжения. Фильтры из более эластичных и нетолстых тканей можно отряхивать, придавая материалу волнообразные колебания. Большинство встряхивающих устройств снабжается электроприводом. Иногда встряхивание комбинируют с продувкой тканей.

Характеристика фильтрующих тканей Таблица 7.18

Материал волокна	Наименование (торговая марка) ткани	Температура, К		Стойкость*					Возгораемость
		рабочая	кратковременная	к истиранию (износу)	к кислотам	к щелочам	к газообразн окислителям	к органич растворит	
Целлюлоза	Хлопок	340	365	6	3	9	6	10	да
Белок натуральный	Шерсть	350	380	5	6	3	6	8	да
Полипропилен	Полипропилен	350	350	8	10	10	7	4	да
Стекло	Стеклоткань	515	550	3	10**	4	10**	10	нет
Полиамиды	Капрон,иейлон	350	380	10	3	10	6	6	да
Полиэфиры	Лавсан	390	420	9	7	6	8	8	да
Полиакрилаты	Нитрон	373	385	6	6	6	7	6	да
Полифторолефины	Тефлон,фторопласт,полифен	490	520	5	10	10	10	10	нет
Полифторолефины	Горетекс(пленка на ткани, войлоке)	~500	~600	5	9	9	9	10	нет
Полиоксидиазол	Оксалон	500	540	8	8	10	8	-	нет
Полибензимиазол	PBJ	-	-	9	8	10	8	-	нет
Поливинилхлорид	Хлорин,ПВХ	340	355	3	9	10	7	7	да
Полифениленсульфид	Ритон	430	-	8	8	8	7	-	да
Коррозионностойкая сталь	Бекипор	715	800	10	8	8	8	10	нет

Примечания: 1) прочерки означают отсутствие сведений, 2) * оценка стойкости по десятибалльной шкале: 2 – очень плохая, 4 – плохая, 6 – средняя, 8 – хорошая 10 – очень хорошая, ** в присутствии *HF* применение недопустимо.

Обратной продувкой регенерируют ткани при улавливании легкосбрасываемых пылей. Для этого изменяют направление дутья, подавая на регенера-

цию свежий или очищенный воздух. Для выполнения обратной продувки фильтр может отключаться посекционно или полностью. Расход воздуха на обратную продувку принимают до 10 % от количества очищаемого газа. 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. 7.22). Для очистки рукавов внутрь каждого из них подаются струи сжатого воздуха. Чтобы не происходило слишком интенсивной регенерации с удалением остаточного равновесного количества пыли (что приведет к большой величине проскока в начальный период работы фильтра после регенерации), варьируют давление сжатого воздуха, продолжительность и частоту импульсов.

Ориентировочные параметры пульсирующего потока: давление около 0,5 МПа, продолжительность импульса около 0,1 с, частота – 10 импульсов в минуту. Кроме эффекта продувки пульсирующий поток оказывает и механическое встряхивающее действие. Импульсную регенерацию выполняют без отключения секций. Расход продувочного воздуха можно принимать в пределах нескольких десятых долей процента от расхода очищаемых газов.

В настоящее время выпускается и эксплуатируется множество разнообразных конструкций тканевых фильтров. Их можно условно классифицировать:

- по форме фильтровальных элементов и тканей – рукавные и плоские (полотняные),
- по виду опорных устройств – каркасные и рамные,
- по наличию корпуса и его форме – цилиндрические, прямоугольные, открытые (бескамерные),
- по числу секций – одно– и многосекционные.

Фильтры могут также различаться по способу регенерации и ряду других признаков.

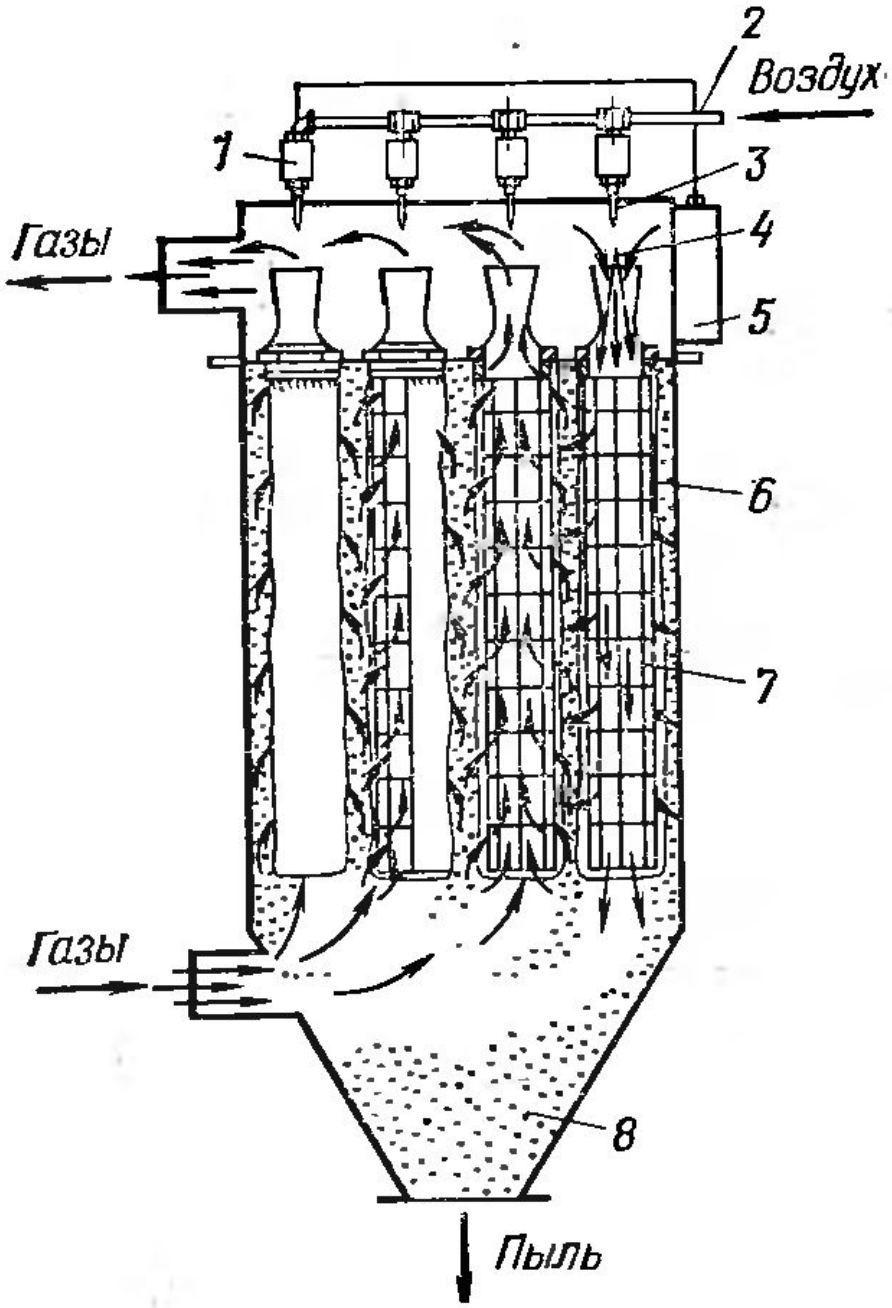


Рис. 7.22. Каркасный рукавный фильтр с импульсной продувкой [4]:
1 – электромагнитный клапан; 2 – труба для ввода сжатого воздуха: 3 – сопло; 4 – струи сжатого воздуха; 5 – прибор автоматического управления регенерацией (таймер); 6 – рукав: 7 – каркас; 8 – бункер

Краткие сведения о характеристиках отечественных конструкций рукавных фильтров, приведены в таблицах 7.19, 7.20.

Фильтры ФР–6П, ФТ–2М, ФТНС–М предназначены для очистки аспирационного воздуха от волокнистой пыли текстильных и других предприятий

легкой промышленности. Регенерация рукавов производится посредством встряхивания ручным или механизированным способами. Удельные газовые нагрузки для фильтров ФР–6П, ФТ–2М и ФТНС–М составляют 0,056, 0,1 и 0,057 $м^3/(м^2с)$ соответственно.

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

Фильтры ФРУ разработаны для систем аспирации взрывоопасных химических производств, ФРВ–20 и ФРН–30 – для различных технологических процессов химических производств, ФР–250 –для аспирационных систем сажевых производств и предприятий по производству минеральных удобрений; СМЦ – для технологических процессов предприятий стройматериалов; РФГ и УРФМ – для предприятий цветной металлургии; Г4–БФМ (ранее – ФВ) – для предприятий пищевой промышленности. Регенерация производится механическим встряхиванием и одновременной обратной посекционной продувкой.

Удельные газовые нагрузки для фильтров ФРУ составляют: 0,02 $м^3/(м^2с)$, УРФМ–0,012...0,02 м3$(м^2с)$, Г4–БФМ– 0,025...0,033 $м^3/(м^2с)$.

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

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

Технические характеристики рукавных фильтров Таблица 7.19

Марка фильтра	Площадь фильтрующей поверхности, $м^2$	Количество секций, шт	Количество рукавов в секции,шт.	Диаметр рукава, мм	Высота рукава, м	Пропускная способность, $м^3/с$ /сопротивление,Па
ФР-6П	18	1	6	390	2.5	1/(500...1000)
ФТ-2М	20	1	12	300	1.8	2.5/600
ФТНС-4М	12.4	1	4	386	2.6	-/490
ФТНС-8М	24.8	2	4	386	2.0	-/490
ФТНС-12М	37.2	3	4	386	2.6	/490
ЦА-3804	4140	3	-	-	-	5.6/-
ФРУ	2.5...50	1...4	14;28; 42;56	125	0.9;1;15; 2;2.5	-/1500
ФРВ-20	20	2	32	130	1.63	-
ФРН-30	30	2	48	130	1.63	-
ФР-250	281	4	288	135	2.3	-/(1000...2000)
СМЦ-101А	50;55;110; 115;205	2	36	200	2,2,4,5,4,9, 5.1;9.1	/1900
РФГ	112;168; 224;280	4;6;8;10	56;84; 112;140	220.	3.1	-
УРФМ	1610;2300	14;20	588;840	220	4.063	-/(700...1500)
Г4-1БФМ	30;45;60;90;	2;3;4;6	36;54;72;108	135	2.09	-/1300
Г4-2БФМ	60;90	4;6	72;108	135	2.09	-/1300
ФР-518(650)	518(650)	6	72(90)	127	3	(2.5...3.33)/1600
ФР-5000	5000	8	504	127	3.09	-/(1500...2000)
ФРДО-6500	6500	10	212	130	7.85	
ФРО-2400-1	2400	8	42	200	8	≥ 14 /2000
ФРО-6000-2	6000	10	54	300	10	-"-
ФРО-20300-3	20300	10	216	300	10	-"-
РФОСП	1.9...136	-	2...24	-	1...6	(0.17...11.4)/2000
РФСП-II	370	4	22	300	4.8	-
РФСП-1580	1580	20	24	-	-	до 130/-
ФРКИ-30	30	1	36	135	2	-/2000
ФРКН-В-30	30	1	36	135	2	-"-
ФРКИ-60	60	2	36	135	2	-"-
ФРКН-В-60	60	2	36	135	2	-"-
ФРКИ-90	90	3	36	135	2	-"-
ФРКН-В-90	90	3	36	135	2	-"-
ФРКИ-180	180	4	36	135	3	-"-
ФРКИ-360	360	8	36	135	3	-"-
ФРКДИ-550	550	6	36	135	6	-/2800
ФРКДИ	720	8	36	135	6	-"-
ФРКДИ-1100	1100	12	36	135	6	

Габаритные размеры рукавных фильтров Таблица 7.20

Марка фильтра	Габаритные размеры, мм		
	длина	ширина	высота
ФР-6П	1595	1050	3000
ФТ-2М	2300	2100	3230
ФТНС-4М	1450	1470	4270
ФТНС-8М	1450	2967	4270
ФТНС-12М	1450	3620	4270
ФРУ	1226	864; 1249; 1652; 2056	1025...3180
ФР-250	7400	3900	7860
СМЦ-101А	3170	1710	5700; 8940; 13760
УРФМ	23000; 16100	4800	13078
Г4-БФМ	1435...3800	1580	4325; 4370
ФР-518(650)	14500	3700	9500
ФР-5000	29000	7000	14500
ФРДО-6500	22300	7600	16000
ФРО-2400-1	9600	6800	16750
ФРО-6000-2	18600	9800	18400
ФРО-20000-3	30200	18800	23500
РФОСП	1600...4500	900...2700	3000. .9000
РФСП-2,РФСП-1580	25750	7750	11700
ФРКИ	1500. 5850	2000...4400	3600...4900
ФРКДИ-550	5000	4400	9200
ФРКДИ-720	6300	4400	9200
ФРКДИ-110	9000	4400	9200

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

Фильтры общего назначения типа ФРКИ разработаны НИИОГаз. Регенерация фильтровальной ткани производится без отключения секций фильтра импульсной верхней подачей внутрь рукавов сжатого воздуха с давлением 0,3 или 0,6 МПа. Фильтрующий материал – лавсан или войлоки из синтетических волокон. Удельная газовая нагрузка для фильтров ФРКИ составляет

0,03 $м^3/(м^2с)$. Фильтры ФРКН–В и ФРКН–Н–В, предназначенные для улавливания электризующихся пылей, имеют такие же характеристики, что и ФРКИ соответствующих типоразмеров. Фильтры ФРКДИ отличаются от фильтров ФРКИ большей длиной рукавов. Поэтому в них предусмотрена двухсторонняя импульсная продувка с установкой дополнительных сопл для подачи сжатого воздуха в нижней части каждого рукава. Удельная газовая нагрузка для фильтров ФРДКИ составляет 0,027 $м^3/(м^2с)$.

Рукавные фильтры нового поколения типа ФРМИ представляют собой набор модулей и составляют типоразмерный ряд фильтров с площадью фильтрования от 800 до 16000 $м^2$ с расчетной производительностью от 70000 до 1380000 $м^3/ч$. Способ регенерации рукавов – импульсная односторонняя продувка при отключенной на время регенерации секции сжатым воздухом P = 0,3...0,6 МПа. Каждый модуль в процессе эксплуатации фильтра может быть отключен от газового потока по входу и выходу газа, что позволяет производить обслуживание и ремонт, не останавливая работу всего фильтра. Данное обстоятельство крайне важно при использовании фильтров в непрерывных технологических процессах. Новые решения позволяют исключить влияние скоростных напоров на износ рукавов и снизить гидравлические потери на 20 %. Конструкция аппаратов рассчитана на установку вне зданий с использованием шатровых укрытий верхней части фильтров и наличия теплоизоляции корпуса.

Расчет площади фильтрующей поверхности проводится в следующем порядке.

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

2. По общему расходу запыленных газов W, $м^3/с$, расходу газов на продувку W_1, $м^3/с$ и удельной нагрузке W_S, $м^3/(м^2с)$, допустимой для выбранного типа фильтра, определяют рабочую площадь фильтрации

$$f = \frac{W + W_1}{W_S}, \text{ м}^2.$$

Количество газов на регенерацию W_1, принимают по техническим характеристикам выбранных фильтров.

Значение допустимой удельной нагрузки W_S («скорости фильтрации») при отсутствии опытных данных подбирают по рекомендациям предприятий – изготовителей, приведенным в каталогах или по другим официальным источникам. Ориентировочные значения W_S для рукавных фильтров, составленные на основании обобщения опыта эксплуатации в различных отраслях промышленности [16], приведены в табл. 7.21.

3. Если регенерацию производят с отключением секций, то к рабочей площади фильтрации f добавляют величину площади фильтрации в них и находят общую площадь фильтра $f_{tot} = f + f_1, \text{ м}^2.$

Площадь фильтрации секций, отключенных на регенерацию f_1, $м^2$, можно найти из соотношения $$f_1 = \frac{N f_N \tau n}{3600}, \text{ м}^2,$$

где N – число секций в фильтре;

f_N – площадь фильтрации одной секции, м;

τ – время отключения секций на регенерацию, с;

n – количество регенераций за 1 час.

При отсутствии технических данных по фильтру для регенерации обратной продувкой или встряхиванием можно оценочно принимать n = 1...10, τ = 2...20 с.

Для фильтров с импульсной и струйной продувкой, в которых отключение секций на регенерацию не требуется, общая площадь поверхности фильт-

рации f_{tot} принимается равной рабочей f.

Допустимые удельные нагрузки для рукавных фильтров Таблица 7.21

Вид загрязнителя	"Скорость фильтрации" W_{sf}, м³/(м² с), при способе регенерации*:		
	В,О	И	О
Сажа, белая сажа (кремнезем), возгоны свинца и цинка, конденсационные аэрозоли, пыль косметических и моющих порошков, молочный порошок, активированный уголь, цементная пыль от печей (в дымовых газах)	0,0075... ...0,01	0,0133... ...0.033	0,0055... ...0,0075
Возгоны железа и ферросплавов, карбидных печей, пыль цемента от мельниц, глинозема, извести, корунда, крахмала, производства удобрений, пластмасс, литейного производства	0,01... ...0,0125	0,025... ...0,042	0,0075... ...0,0092
Летучая зола, пыль каменноугольная, тальковая, пигментов, переработки руд, известняка, каолина, цемента от холодильников, керамических производств, от песко- и дробеструйной очистки, фрита эмалей	0,0117... ...0.0133	0,033... ...0,058	0,01... ...0,015
Пыли асбеста и мелковолокнистых материалов, гипса, перлита, производства резины, шлифовальных процессов, поваренной соли, муки	0,0133... 0,0258	0,042... ...0,075	-
Пыли производства комбикормов, табачных изделий, обработки кожи и дерева, грубые растительные волокна	0,015... ...0.033	0,042... ...0,1	-

*Примечание: В – встряхивание, И – импульсная продувка, О – обратная продувка.

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

Пример 7.4. Подобрать фильтр для очистки выбросов целлюлозно–бумажного комбината (D_{50}=1,1 мкм, Т = 413 К, расход газа 5 м^3/с). Подбор и расчеты фильтра выполняем в следующем порядке.

1. Основываясь на заданном дисперсном составе пыли, можно уверенно

предполагать, что из всех рассмотренных ранее способов фильтрация в пористой среде должна обеспечить наиболее высокую степень очистки. Большая начальная запыленность не способствует использованию тонковолокнистых фильтров. В то же время не слишком высокая температура обрабатываемых газов, отсутствие в них острых и раскаленных частиц, химически агрессивных веществ позволяет остановиться на тканевых фильтрах. По заданной температуре газов Т = 413 К из таблицы 7.18 подбираем материал фильтра – стеклоткань, которому соответствуют фильтры типа ФР–518, имевшие посекционную регенерацию обратной продувкой. Выписываем из таблиц 7.19, 7.20 характеристики фильтра: площадь фильтровальной поверхности 518 $м^2$, количество секций – 6, количество рукавов в секции – 72, диаметр рукава 127 мм, высота рукава 3 м, габариты фильтра (длина ^{x} ширина ^{x} высота, м) 14,5 ^{x} 3,7 ^{x} 9,5. Гидравлическое сопротивление в рабочем состоянии 1600 Па, производительность до 3,33 $м^3/с$, удельная газовая нагрузка до 0,005 $м^3/(м^2с)$.

2. Общий расход запыленных газов W = 5 $м^3/с$. Расход газов на регенерацию обратной продувкой примем в количестве 10 % от общего расхода обрабатываемых газов. При отсутствии опытных данных по удельной нагрузке пришлось бы принимать ориентировочные значения W_{sf} по таблице 7.21.

По этой таблице для конденсационных аэрозолей и регенерации обратной продувкой значение W_{sf} = 0,0055 $м^3/(м^2с)$, что достаточно близко к справочной удельной нагрузке для фильтра ФР–518. Необходимую величину рабочей площади определим из формулы

$$f = \frac{W + W_1}{W_S} = \frac{5 + 0{,}5}{0{,}005} = 1100 \text{ м}^2.$$

Принимаем к установке 2 фильтра ФР–650 с общей площадью фильтрации 1300 $м^2$.

3. Определим дополнительную площадь f_1 отключаемых при регенерации секций, приняв $\tau = 5$ с; $n = 10$

$$f_1 = \frac{N f_N \tau n}{3600} = \frac{2 \cdot 518 \cdot 5 \cdot 10}{3600} = 14{,}4 \text{ м}^2.$$

Общая площадь поверхности фильтрации $f_{tot}=1100+14{,}4=1115$ м^2 обеспечивается двумя фильтрами ФР–650.

4. Для определения площади фильтрации одной секции f_N воспользуемся следующими конструктивными данными: количество рукавов – 90, диаметр рукава 0,127 м, высота 3 м. Определяя площадь фильтрации одного рукава как площадь боковой поверхности цилиндра с одинаковыми диаметром и высотой, получим $f_N = 3{,}14 \cdot 0{,}127 \cdot 3 \cdot 90 = 107{,}67$ м^2.

Требуемое число секций находим как $N = {1115}/{107{,}67} = 10{,}4$.

Число секций в двух фильтрах ФР–650 составляет 12, что превосходит требуемую величину.

5. Принимаем максимально допустимое сопротивление аппарата 1800 Па. При потере давления в газоходах до 500 Па дутьевым устройством для установки может служить вентилятор типа ВДН N 12,5 с подачей 7 м^3/с, давлением 2580 Па и потребляемой мощностью 22 кВт.

Зернистые фильтры используют в газоочистке при невозможности применения тканевых из–за высокой температуры среды. Зернистые фильтры находят все более широкое применение при обработке запыленных выбросов производства строительных материалов, предприятий химической промышленности, при получении редких металов и в других технологических процессах.

Как и тканевые, зернистые фильтры нуждаются в регенерации. Наибольшее распространение получили следующие способы очистки фильтрующего слоя:

- импульсной продувкой с периодическим движением слоя;
- обратной продувкой и ворошением (рыхлением);
- обратной продувкой и вибровстряхиванием;
- удалением лобового слоя зерен.

Характеристики некоторых типов фильтров с зернистым слоем, нашедших применение в промышленности, приведены в табл. 7.22.

На рис. 7.23 показан зернистый фильтр ЗФ–6М, предназначенный для обеспыливания аэрозолей мельниц помола с производительностью одной секции 5000 $м^3$/ч.

При фильтрации запыленный газ поступает через газоход 5 в полость бункера 1 и средней секции 6 и одновременно движется снизу вверх через фильтрующие слои кассет. Очищенный от пыли газ собирается в полости верхней секции 9 и через открытую заслонку клапанной коробки 7 выбрасывается из фильтра в атмосферу. Регенерация производится при достижении предельного пыленасыщения фильтрующего наполнителя (12–20 кг/$м^3$).

Цикл регенерации начинается с автоматического включения вибратора 11 и привода клапанной коробки 7. Привод закрывает открытую при фильтрации заслонку, прекращая доступ запыленного газа в фильтр, и одновременно открывает вторую заслонку, впуская продувочный воздух, который движется сверху вниз через фильтрующие слои. Таким образом происходит комбинированная регенерация – вибрационное встряхивание с одновременной продувкой фильтрующих слоев.

Производительность фильтра по очищенному воздуху 8400 $м^3$/ч, концентрация пыли на входе 14,5 г/$м^3$, на выходе 0,08 г/$м^3$, степень очистки 99,4 %, гидравлическое сопротивление 1300 Па. Фильтр состоит из трех фильтрующих слоев толщиной 100 мм, гранулометрический состав фильтрующего материала (гравия) по ходу запыленного воздуха соответственно 6…10, 4…6 и 3…4 мм.

Технические характеристики зернистых фильтров типа ЗФ Таблица 7.22.

Показатели	ЗФ-4М	ЗФ-5М	ЗФ-6М	ЗФ-8	ЗФ-10
Пропускная способность, м/с	2,5...5	5...10	10...40	10...150	10...30
Площадь фильтрации,м²	2...4	4...8	8...31	8..120	16...37
Число секций	2...4	2...6	2..8	2...30	6...14
Число фильтрующих слоев	3	3	3	3	2
Продолжительность фильтрации / регенерации, мин.	40..60 2...4	40...60 2...4	40..60 2...4	40...60 2...4	10...15 0,5...1
Максимальная начальная запыленность, г/м	20	20	20	20	5
Наполнитель	Гравий крупностью 3...10 мм				
Максимальная температура, К	673				
Гидравлическое сопротивление, Па	600...1500				
Степень очистки, %	95...99				
Масса, т:					
с наполнителем	2,5...5	4,5...9	9...14	14...180	15...34
без наполнителя	1,5...3	2,5...5	5...10	10...130	10...20
Способ регенерации	Обратная продувка				

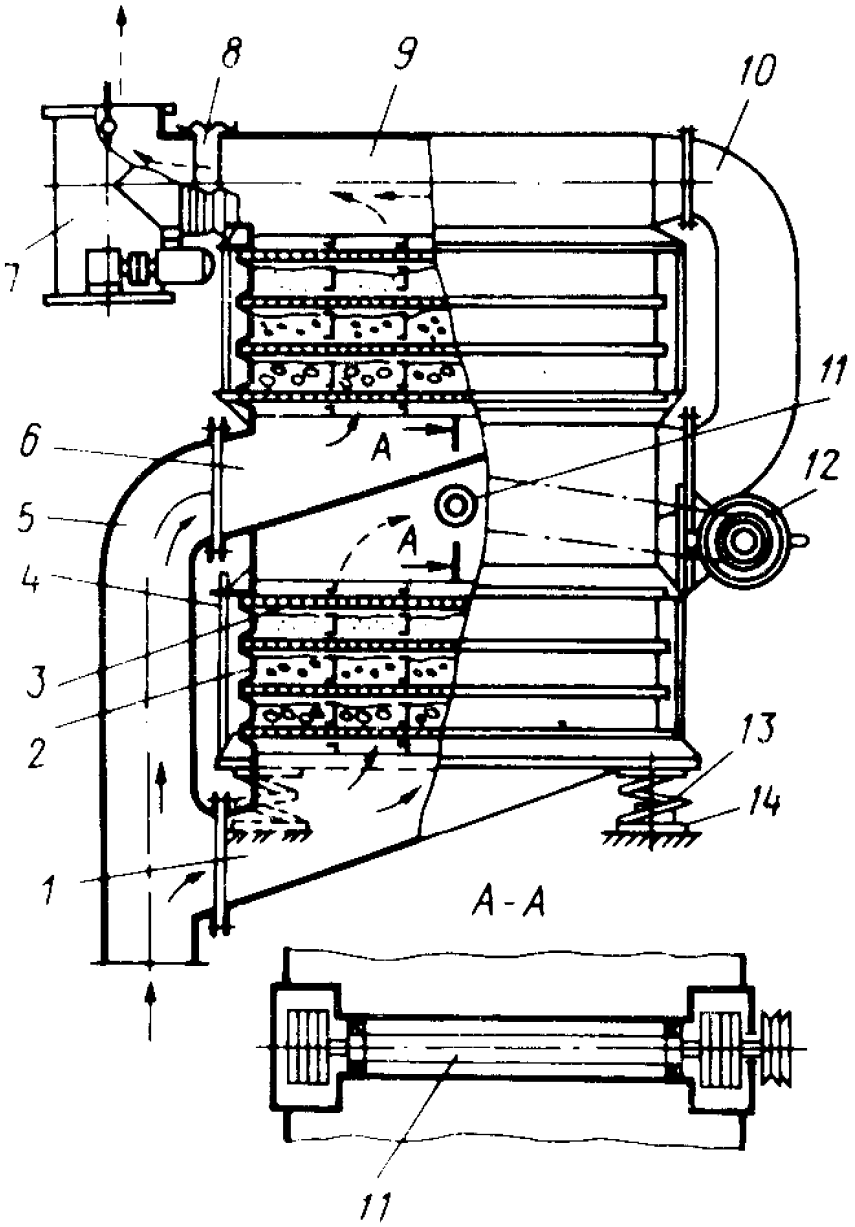


Рис. 7.23 – Зернистый фильтр ЗФ–6М: 1 – бункер с опорным поясом; 2 – кассета с зернистым слоем; 3 – сетки нижние и верхние; 4 – шпильки, стягивающие кассеты; 5 – газоход запыленного газа; 6 – средняя секция; 7 – клапанная коробка; 8 – эластичная вставка; 9 – верхняя секция; 10 – газоход очищенного газа; 11 – виброустройство; 12 – привод; 13 – опорные пружины; 14 – опора

7.8. ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ

Метод электроосаждения заключается в следующем. Маленькие капельки и частицы сначала получают заряд от ионов газа, которые образуются в электрическом поле высокого напряжения, а затем движутся к заземленному осадительному электроду. Попав на заземленный уловитель, частицы прилипают и разряжаются. Когда осадительный электрод обрастает слоем частиц, они стряхиваются «постукиванием» и собираются в бункере.

Энергия, подводимая к обрабатываемым газам при электроосаждении, расходуется преимущественно на оказание непосредственного воздействия на осаждаемые частицы. Этим обусловлены многие преимущества процесса электрофильтрации. Электрофильтры обеспечивают степень очистки более 99 % в широких пределах концентраций и дисперсности частиц при низких гидравлических сопротивлениях (порядка нескольких сот Па) и невысокой затрате электроэнергии (около 0,5 кВт–ч на 1000 $м^3$ газов). Их можно использовать в высокотемпературной (до 500°С), влажной и коррозионноактивной среде.

К основным недостаткам электрофильтров следует отнести высокую металлоемкость и большие габариты.

Применение электрофильтрации имеет ряд ограничений. 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.

Основными элементами электрофильтров являются: газоплотный корпус с размещенными в нем коронирующими электродами, к которым подводится выпрямленный ток высокого напряжения, и осадительными заземленными электродами, изоляторы электродов, устройства для равномерного распределения потока по сечению электрофильтра, бункера для сбора уловленных частиц, системы регенерации электродов и электропитание. После распределительных устройств обрабатываемые газы попадают в проходы, образованные корони-

рующими и осадительными электродами, называемые межэлектродными промежутками.

При установлении электрического потенциала между двумя параллельными пластинами создается однородное электрическое поле, величина которого может быть выражена через градиент электрического потенциала (В/м). Когда этот градиент потенциала электрического поля возрастает до критического значения, т. е. примерно до 3000 кВ/м, в окружающем воздухе происходит электрический пробой и искра проскакивает между пластинами. Однако, если создается неоднородное электрическое поле, например, между резко изогнутой поверхностью, такой как острие или тонкая проволока, и трубкой, внутри которой помещается изогнутая поверхность, или пластиной, тогда электрический пробой может произойти рядом с изогнутой поверхностью и создать тлеющий разряд или «корону» без искрового перекрытия.

Таким образом, коронный разряд характерен для неоднородных электрических полей. Для их создания в электрофильтрах применяют системы электродов типа точка (острие) – плоскость, линия (острая кромка, тонкая проволока) – плоскость или цилиндр.

На рис. 7.24 представлен механизм процесса электрической фильтрации газов, заключающийся в следующем. Газ, содержащий взвешенные частицы, проходит через систему, состоящую из заземленных осадительных электродов и размещенных на некотором расстоянии (называемом межэлектродным промежутком) коронирующих электродов, к которым подводится выпрямленный электрический ток высокого напряжения. При достаточно большом напряжении, приложенном к межэлектродному промежутку, у поверхности коронирующего электрода происходит интенсивная ударная ионизация газа, сопровождающаяся возникновением коронного разряда (короны), который на весь межэлектродный промежуток не распространяется и затухает по мере уменьшения напряженности электрического поля в направлении осадительного электрода.

Газовые ионы различной полярности, образующиеся в зоне короны, 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 в межэлектродном промежутке электрический заряд и под влиянием сил электрического поля движутся к электродам, осаждаясь на них. Основное количество частиц осаждается на развитой поверхности осадительных электродов, меньшая их часть попадает на коронирующие электроды. По накопления на электродах осажденные частицы удаляются встряхиванием или промывкой электродов.

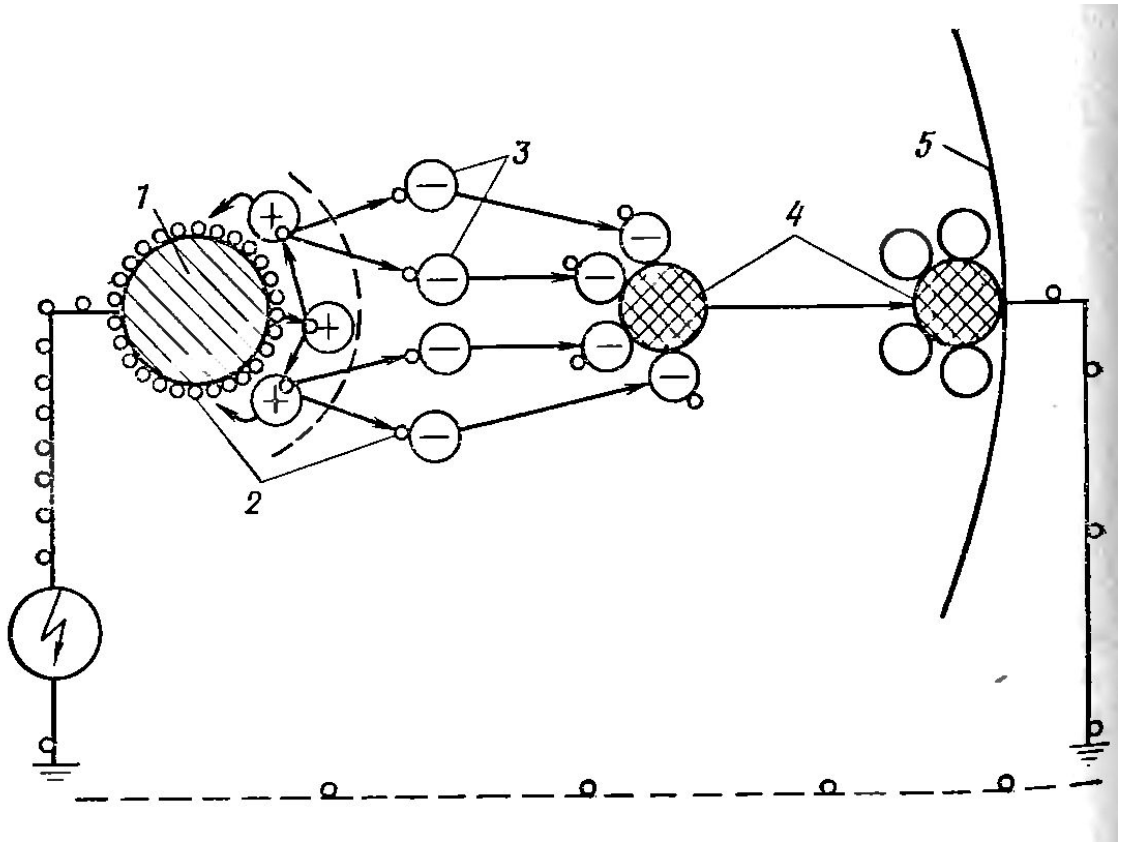


Рис. 7.24 Механизм зарядки и осаждения частиц в электрофильтре:
1 – коронирующий электрод, 2 – электроны, 3 – ионы, 4 – частицы пыли,
5 – осадительный электрод

Конструктивная схема электрофильтра представлена на рис. 7.25. Между двумя осадительными плоскостями натянут ряд проводов. В пространство между каждой из плоскостей и проводами подается газопылевой поток. В поле коронного разряда, возникающего при подаче высокого напряжения на прово-

де, частицы заряжаются и под действием поля движутся к осадительным плоскостям, с которых они периодически удаляются. Таким образом, концентрация пыли в газе при прохождении его через активную зону электрофильтра значительно уменьшается. В трубчатых электрофильтрах удается получить более высокого значения рабочего напряжения, чем в пластинчатых. Вместе с тем в пластических электрофильтрах проще решаются вопросы обеспыливания больших объемов газа в едином аппарате.

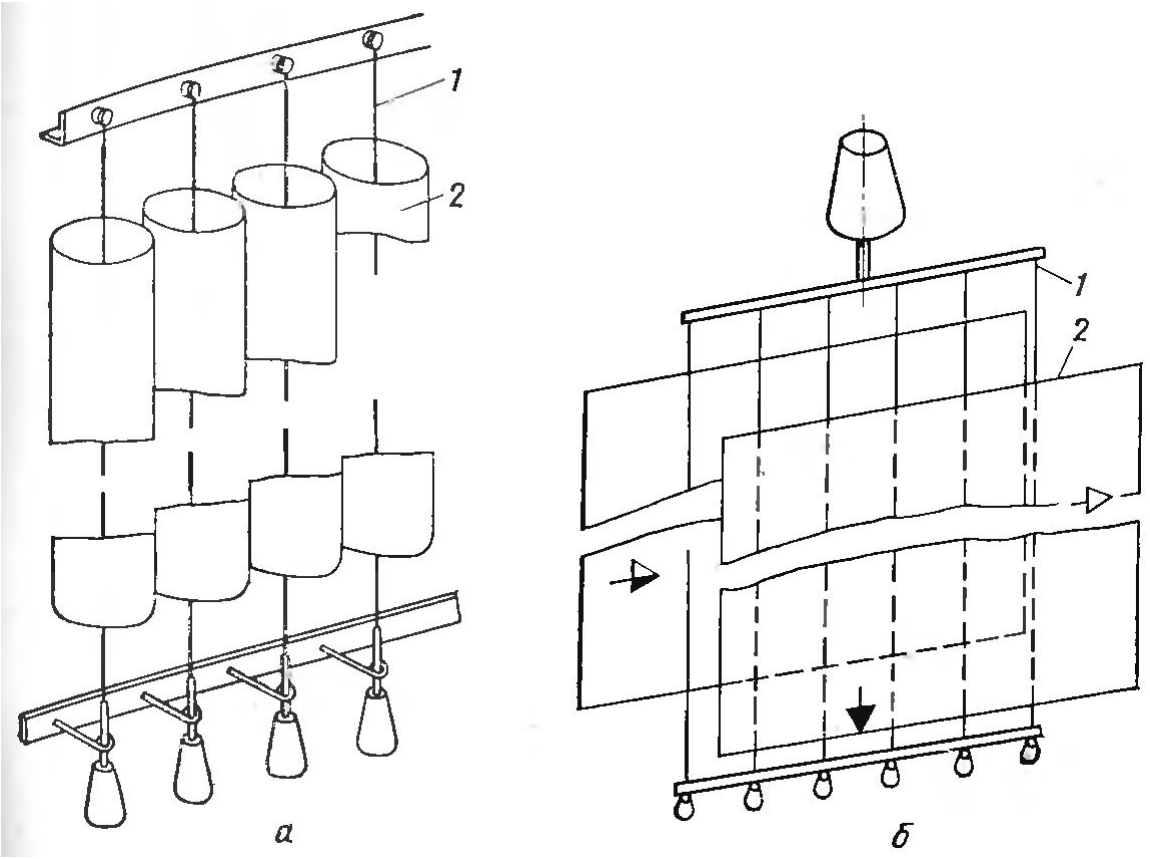


Рис. 7.25 Конструктивная схема электрофильтра:
а – электрофильтр с трубчатыми электродами; б – электрофильтр с пластинчатыми электродами; 1 – коронирующие электроды;
2 – осадительные электроды

Напряженность поля, в котором возникает корона, называют начальной или критической. Ее величина во многом зависит от параметров обрабатываемых газов и может составлять для стандартных условий порядка 1500...2000 кВ/м. Критическое напряжение на электродах U_{cr}, при котором по-

является коронный разряд, зависит от их геометрии. При известной критической напряженности поля E_{cr}, [В/м], величину U_{cr}, [В], для системы из цилиндрического осадительного и размещенного центрально проволочного коронирующего электродов можно подсчитать по формуле

$$U_{cr} = E_{cr} R_1 \ln\left(R_2 / R_1\right),$$

а для системы пластинчатых осадительных и проволочных коронирующих электродов – по формуле

$$U_{cr} = E_{cr} R_1 \left(\frac{\pi l_1}{l_2} - \ln\frac{2\pi R_1}{l_2}\right),$$

где R_1, R_2 – радиусы коронирующего и цилиндрического осадительного электродов, м;

l_1 – расстояние между коронирующим и пластинчатым осадительным электродом, м;

l_2 – расстояние между соседними коронирующими электродами, м.

Обычно для промышленных электрофильтров значения R_1 составляют порядка 0,001...0,002 м, R_2 и l_1 – 0,1...0,15м, U_{cr} – 20...30 кВ.

Скорость дрейфа (перемещения) взвешенных частиц возрастает с напряженностью поля, однако при определенном значении напряжения на электродах наступает пробой газового промежутка и возникает дуга. Поэтому оптимальным значением напряжения на электродах считается максимально близкое к пробойному.

Для промышленной газоочистки из аппаратов отечественного производства могут быть рекомендованы электрофильтры общего назначения типов ЭГА, ЭГТ (горизонтальные сухие), УВ, ЭВВ (вертикальные сухие), а также ряд специализированных типов электрофильтров.

Электрофильтры серии ЭГА предназначены для обеспыливания неагрес-

сивных невзрывоопасных газовых выбросов с температурой до 330° С. Корпуса аппаратов стальные, имеют прямоугольную форму и покрыты теплоизоляцией. Максимальное допустимое разрежение в аппарате 15 кПа, рабочее 5 кПа. Электрофильтры одно– или двухсекционные, состоят из двух, трех или четырех полей по ходу газового потока. Число осадительных электродов в одном активном поле может быть от 4 до 8, и в зависимости от этого его длина может составлять 2,56; 3,2; 3,84; 4,48 и 5,12 м соответственно. Осадительные электроды представляют собой плоские полотна, набранные из пластинчатых элементов – полос шириной 640 мм, а коронирующие электроды – трубчатые рамы, в которых натянуты ленточно–игольчатые элементы.

Уловленная пыль удаляется периодическим встряхиванием электродов посредством ударов молотков. Шаг между осадительными электродами 300 мм, что определяет ширину одного газового прохода. Всего в электрофильтрах серии ЭГА может быть от 10 до 76 газовых проходов. Высота электродов у разных типоразмеров 4...12 м.

Основные конструктивные характеристики электрофильтра указываются в маркировке. К примеру, маркировка ЭГА–1–40–12–6–3 означает: электрофильтр горизонтальный, модификации А, односекционный, 40–ходовой, с активной высотой электродов 12 м, с 6–ю осадительными элементами в каждом поле (и, следовательно, с длиной активного поля 3,84 м), трехпольный. В маркировке могут быть дополнительно отмечены допустимые температура обрабатываемых газов (в °С) и разрежение в электрофильтре (в кПа), тип бункера и некоторые другие данные.

Степень очистки газов и другие эксплуатационное характеристики электрофильтра могут быть достоверно определены только при наличии точной информации об опыте эксплуатации подобных конструкций в аналогичных условиях. Однозначных расчетных методик, дающих надежные результаты, нет. Поэтому информация, полученная расчетным путем, может использоваться как предварительная и оценочная.

Все отечественные и зарубежные методы расчета полного коэффициента

очистки η_{tot} в электрофильтре так или иначе базируются на экспоненциальной зависимости, предложенной в 1922 г. В.Дейчем:

$$\eta_{tot} = 1 - \exp\left(-f_p w_{df} / w\right),$$

где f_p – поверхность осаждения, м^2;

w_{df}– скорость дрейфа частиц, м/с.

Под скоростью дрейфа понимают результирующую скорость движения взвешенных частиц в активной зоне электрофильтра. Степень очистки может быть подсчитана достаточно достоверно, если известна скорость дрейфа, найденная опытным путем, например, из опыта эксплуатации подобных электрофильтров при идентичных параметрах выбросов, в аналогичных условиях и т.д. Тогда для аппаратов отечественных конструкций с пластинчатыми осадительными электродами обычно используют формулу

$$\eta_{tot} = 1 - \exp\left(-w_{df} l / w\delta\right),$$

а с трубчатыми электродами – формулу

$$\eta_{tot} = 1 - \exp\left(-4w_{df} l / wD\right),$$

где l – длина активного поля, м,

δ – расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м.

Модификация формулы Дейча, используемая в отечественной практике для упрощенных расчетов, имеет вид

$$\eta_{tot} = 1 - \exp\left(-K_{fl} A \beta^{0,42}\right),$$

где K_{fl} – параметр вторичного уноса;

A – безразмерный параметр, величина которого зависит от соотношения площадей активной и неактивной зон электрофильтра;

β – безразмерный параметр, зависящий от соотношения электрических и аэродинамических сил.

Вычисление ориентировочной степени очистки выбросов в сухих электрофильтрах от пыли, имеющей средние значения УЭС, можно выполнять в следующем порядке.

1. Величину K_{fl} при встряхивании осадительных электродов находят из выражения

$$K_{fl} = 1 - 0{,}275 w_{rl}^{0{,}35} h_{rl}^{0{,}51} \exp(-1{,}72 m_{rl}),$$

где w_{rl}, h_{rl}, m_{rl} – относительные скорость газа, высота и пылеемкость осадительных электродов, вычисляемые как отношения действительных значений указанных характеристик к базовым, принимаемым соответственно 1 м/с, 8 м и 1 кг/м^2.

Рекомендуемые скорости движения газов для отечественных марок электрофильтров находятся в пределах 1…1,3 м/с и указаны в каталогах, также, как и размеры осадительных электродов. Если известен интервал времени между встряхиваниями, то можно по расходу газов и начальной запыленности оценить пылеемкость электродов. Действительные значения интервалов между регенерациями и пылеемкостью электродов можно установить лишь опытным путем при эксплуатации электрофильтра. Неточность их оценки является одной из основных причин снижения надежности расчетов. Для оценки величины пылеемкости электродов у отдельных видов электрофильтров можно воспользоваться данными таблицы 7.23.

Данные для расчета электрофильтров Таблица 7.23

Типы и типоразмеры электрофильтров	Количество		Скорость газов, м/с	Начальная запыленность, г/м³	Интервалы между встряхиваниями, мин
	полей	элементов в осадительном электроде			
ЭГА1-20, ЭГА	3	4	1	90	8
1-30, ЭГА 1-40	2	6	-"-	-"-	8
ЭГА (все остальные типоразмеры)	2	4	1	90	8
	2	6	-"-	-"-	12
	3	4	-"-	-"-	12
	4	4	-"-	-"-	16
	3	6	-"-	-"-	18
	4	6	-"-	-"-	24
ЭГГ	3	-	1	40	30
	4	-	-"-	-"-	40
УГТ1-40-3	3	-	1	50	24
ЭГ-КЭН	3	-	1	90	18
	4	-	-"-	-"-	16
ЭГ2-2-4-37СРК	2	-	1	7	60 120
УГМ	2	-	1	60	12
УВ	-	-	1	15	30
ЭВВ	-	-	1	20	30

При расчете степени очистки дымовых газов энергетических парогенераторов от золы с УЭС в пределах $\rho = (10^6 ... 10^{10})$ Ом м величины пылеемкости осадительных электродов можно принимать по графику рис. 7.24.

2. Величину конструктивного параметра А можно принимать по данным табл. 7.24 или 7.25, составленных для значений относительных площадей (отношения площади активной зоны к площади поперечного сечения корпуса) f_{rl} 0,9 и 1 соответственно. Для электрофильтров марок ЭГА, ЭГТ и подобных им горизонтальных конструкций f_{rl} можно принять равной 0,9. Значение $f_{rl} = 1$ подходит для трубчатых вертикальных электрофильтров с незначительными зазорами между внешней поверхностью осадительных электродов и корпусом, а также для горизонтальных электрофильтров с клапанами для перекрытия боковых, верхних и нижних промежутков между активной зоной и корпусом.

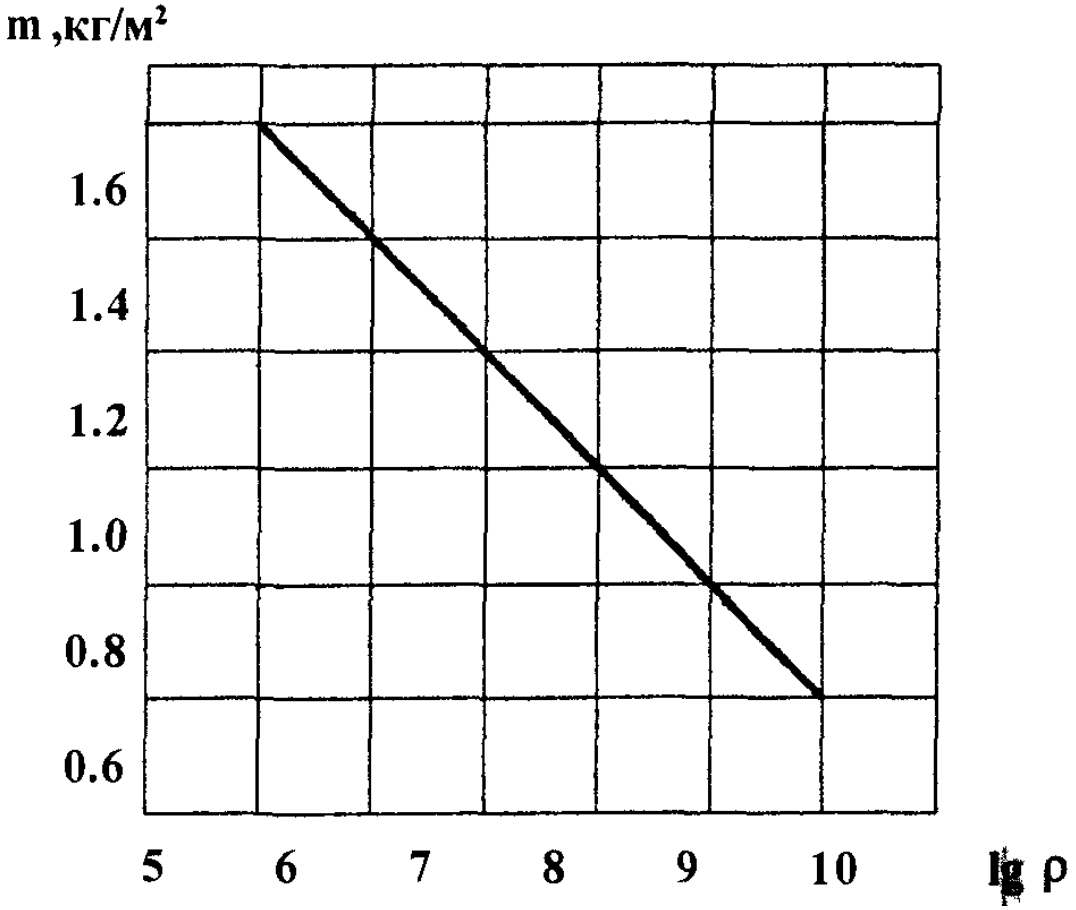


Рис. 7.24

Значение параметра А подбирают по дисперсии σ пыли заданного состава и коэффициенту k, определяемому выражением

$$k = \frac{0{,}55 \cdot 10^{-4} T\left[\left(1/p\right) + \left(10/E\right)\right]}{D_{50}},$$

где Т, р – температура, К, и давление, Па абс, газового потока;

D_{50} – медианный диаметр частиц загрязнителя, м,

Е– напряженность электрического поля у осадительного электрода, В/м.

Значения параметра А для конструкций электрофильтров с f_{rl} =0,9

Таблица 7.24

k/σ	λ=1,0	1,25	1,50	1,75	2,0
0	1,970	1,824	1,710	1,605	1,514
0,05	2,080	1,970	1,850	1,730	1,660
0,10	2,160	2,060	1,970	1,865	1,774
0,15	2,235	2,140	2,055	1,970	1,870
0,20	2,299	2,210	2,129	2,078	1,990
0,25	2,340	2,265	2,185	2,125	2,055
0,30	2,370	2,305	2,230	2,185	2,120
0,35	2,400	2,340	2,275	2,225	2,185
0,40	2,425	2,374	2,315	2,260	2,234
0,50	2,465	2,420	2,370	2,325	2,300
0,60	2,495	2,450	2,415	2,385	2,360
0,70	2,515	2,487	2,450	2,420	2,330
0,80	2,530	2,516	2,480	2,445	2,416

k/σ	2,50	3,0	3,50	4,0	4,50	5,0
0	1,330	1,200	1,078	0,986	0,900	0,843
0,05	1,480	1,366	1,280	1,206	1,150	1,114
0,10	1,620	1,520	1,450	1,394	1,360	1,329
0,15	1,745	1,635	1,585	1,542	1,485	1,475
0,20	1,885	1,800	1,730	1,663	1,625	1,586
0,25	1,950	1,878	1,825	1,750	1,715	1,690
0,30	2,025	1,965	1,910	1,850	1,825	1,800
0,35	2,095	2,045	1,990	1,940	1,905	1,880
0,40	2,170	2,120	2,050	2,020	1,975	1,946
0,50	2,250	2,200	2,160	2,130	2,090	2,060
0,60	2,290	2,260	2,240	2,210	2,190	2,160
0,70	2,330	2,290	2,260	2,230	2,196	2,170
0,80	2,370	2,313	2,270	2,243	2,200	2,177

Значения параметра А для конструкций с $f_{rl} = 1$ Таблица 7.25

k/σ	1,0	1,10	1,25	1,35	1,50	1,75
0	3,625	3,450	3,275	3,100	2,920	2,650
0,05	3,898	3,710	3,556	3,400	3,225	2,950
0,10	4,125	3,985	3,810	3,625	3,475	3,250
0,15	4,340	4,185	4,025	3,835	3,690	3,470
0,20	4,451	4,375	4,210	4,040	3,880	3,690
0,25	4,695	4,435	4,375	4,200	4,040	3,865
0,30	4,820	4,690	4,540	4,380	4,205	4,035
0,35	4,960	4,825	4,670	4,500	4,345	4,195
0,40	5,070	4,945	4,790	4,635	4,480	4,340
0,45	5,140	5,040	4,900	4,750	4,590	4,470
0,50	5,215	5,120	4,975	4,840	4,685	4,595
0,55	5,270	5,190	5,055	4,935	4,805	4,700
0,60	5,315	5,240	5,125	5,005	4,890	4,790
0,65	5,365	5,290	5,180	5,070	4,955	4,865
0,70	5,410	5,330	5,230	5,125	5,020	4,930
0,75	5,450	5,365	5,270	5,180	5,075	4,970
0,80	5,475	5,400	5,300	5,220	5,120	5,000

k\σ	2,0	2,25	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
0	2,400	2,200	1,950	1,690	1,450	1,269	1,165
0,05	2,744	2,620	2,430	2,200	1,995	1,840	1,730
0,10	3,086	2,915	2,800	2,541	2,350	2,200	2,070
0,15	3,300	3,140	3,030	2,900	2,610	2,470	2,330
0,20	3,486	3,350	3,225	3,023	2,840	2,697	2,590
0,25	3,670	3,555	3,430	3,240	3,025	2,897	2,800
0,30	3,870	3,725	3,515	3,435	3,225	3,090	2,980
0,35	4,025	3,895	3,790	3,610	3,410	3,285	3,165
0,40	4,180	4,050	3,933	3,741	3,560	3,460	3,330
0,45	4,325	4,195	4,055	3,880	3,700	3,590	3,485
0,50	4,440	4,320	4,215	4,000	3,830	3,700	3,610
0,55	4,560	4,445	4,325	4,125	3,950	3,830	3,720
0,60	4,665	4,540	4,430	4,225	4,045	3,930	3,825
0,65	4,750	4,630	4,525	4,330	4,142	4,045	3,930
0,70	4,815	4,700	4,610	4,420	4,230	4,130	4,015
0,75	4,880	4,760	4,660	4,500	4,290	4,170	4,070
0,80	4,910	4,780	4,690	4,560	4,330	4,229	4,135

Напряженность E поля у осадительного электрода зависит от напряжения на электродах, их размеров, формы, состояния (запыленности, влажности, наличия дефектов и т.д.), от параметров выбросов и множества других факторов. Для трубчатого электрофильтра с коронирующим проволочным электродом, установленным строго по оси, величину E ориентировочно можно вычислить по формуле

$$E = \frac{U}{\left[\delta \ln\left(D_1 / D_2\right)\right]},$$

где U – разность потенциалов на электродах, В;

D_1, D_2 – соответственно внутренний диаметр осадительного и диаметр коронирующего электродов, м;

δ – расстояние от поверхности коронирующего электрода до внутренней поверхности осадительного электрода, равное $[(D_1/2)–(D_2/2)]$, м.

Если действительная величина U неизвестна, определяют E по максимально возможному напряжению, при котором еще не образуется дуга, а для высокоомных пылей – обратная корона. Первое значение можно принимать в пределах 40...50 кВ, второе – 30...40 кВ. Для определения ориентировочной величины E в электрофильтрах с проволочными коронирующими и плоскими осадительными электродами также можно использовать эту формулу, приняв за δ расстояние между осадительным и коронирующим (или половину шага между осадительными) электродами и подставив вместо D_1 величину шага между осадительными электродами.

В большинстве современных электрофильтров применяются игольчатые, зубчатые и другие сложные формы коронирующих элементов. Собранные из них электроды создают в активной зоне неоднородное электрическое поле с апериодическим градиентом напряжения. Напряженность такого поля меняется

от нуля до максимума по всем направлениям, и результаты ее вычисления могут рассматриваться лишь как оценочные.

3. Величину параметра β находят из соотношения

$$\beta = \frac{\varepsilon_0 E^2 D_{50} l}{w k_{rg} \eta \delta},$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85\ 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная,

l – активная длина электрофильтра,

δ – расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м,

k_{rg} – коэффициент равномерности газового потока.

Коэффициент динамической вязкости газа η, Па·с, находят из справочных данных, учитывая состав и параметры состояния газовой фазы выбросов.

Значение k_{rg} можно принимать 0,85 для горизонтальных конструкций с большим числом газовых проходов и 1 для вертикальных одноходовых конструкций.

Пример 7.5. Определить эффективность электрофильтрации отбросных газов содорегенерационного котлоагрегата (СРКА) целлюлозно–бумажного комбината и параметры работы электрофильтра. Состав дисперсной части выбросов и остальные данные принять по предыдущим примерам.

Выбираем из действующих каталогов электрофильтр ЭГ2–2–4–37СРК, специально предназначенный для очистки выбросов СРКА.

По маркировке определяем некоторые из необходимых конструктивных параметров: количество полей – 2 (вторая цифра), активная длина каждого поля 4 м (третья цифра), площадь активного сечения f = 37 м^2. Общую площадь осаждения (2256 м^2) и габариты электрофильтра (12,6^{x}9,55^{x}14,84 м) принимаем из табл. 7.23. По каталожному описанию скорость газов до 1 м/с, температура 130...250^0 С, запыленность на входе до 7 г/м^3, разрежение до 3 кПа, гидравличе-

ское сопротивление аппарата 200 Па. Степень очистки при этих условиях предположительно может достигать 98 %.

Осадительные электроды электрофильтра плоские, коронирующие выполнены в виде трубчатых рам с ленточно–игольчатыми или зубчатыми элементами. Высота электродов h = 7200 мм, расстояние между осадительными электродами 300 мм. Регенерация производится механическим встряхиванием. Ввиду отсутствия других сведений об интервале между встряхиваниями, принимаем интервал в 4 часа (табл. 7.23).

Предполагая, что по габаритам аппарат можно разместить на производственной площадке, сопоставим его характеристики с заданными параметрами обрабатываемых газов. Исходная запыленность z составляет 4,1 г/м^3, а количество газов W = 5 м^3/с, что находится в пределах допустимого для выбранного типа электрофильтра. Заданная температура газов (140° С) также соответствует показателям аппарата. Заметим, что в данном случае важен не только верхний, но и нижний температурный предел вследствие повышенной влажности обрабатываемых газов и возможной конденсации паров при температурах ниже 130° С. Можно констатировать, что по техническим параметрам выбранный тип аппарата удовлетворяет заданным условиям, что позволяет перейти к расчету полного коэффициента очистки

1. Подсчитываем скорость газов в активном сечении:

$$w = W/f = 5/37 = 0{,}135 \text{ м/с.}$$

Относительная скорость газов составит

$$w_{rl} = w/1 = 0{,}135,$$

а относительная длина электродов будет равна

$$h_{rl} = h/8 = 7{,}2/8 = 0{,}9.$$

Определим ориентировочную величину пылеемкости электродов m как количество пыли, осевшее на площади 2256 м^2 за время между регенерациями 14400 с (4 часа) при W = 5 м^3/с, z = 4,l 10^{-3} кг/м^3 и степени улавливания 98 %:

$$m = 5 \cdot 4{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 14400 \cdot 0{,}98 / 2256 = 0{,}128 \text{ кг/м}^2.$$

Тогда относительная пылеемкость составит

$$m_{rl} = m/1 = 0{,}128.$$

Вычисляем величину коэффициента вторичного уноса

$$K_{fl} = 1 - 0{,}275 w_{rl}^{0,35} h_{rl}^{0,51} \exp(-1{,}72 m_{rl}) =$$
$$1 - 0{,}275 \cdot 0{,}135^{0,35} \cdot 0{,}9^{0,51} \exp(-1{,}72 \cdot 0{,}128) = 0{,}897$$

2. Напряженность поля у осадительного электрода вычислим, внеся необходимые поправки на геометрические характеристики электродов (рис. 7.25): принимаем за D_1 шаг между осадительными электродами a = 0,3 м; за D_2 расстояние между концами игл или зубьев коронирующих электродов b = 0,03м; за δ расстояние от конца иглы (c = 0,015м) до осадительного электрода. Расчет ведем на максимальное напряжение U = 50 kB:

$$E = \frac{U}{\left[\delta \ln\left(D_1 / D_2\right)\right]} = \frac{50 \cdot 10^3}{(0{,}15 - 0{,}015)\ln(0{,}3 / 0{,}03)} = 160{,}85 \cdot 10^3 \text{ В/м.}$$

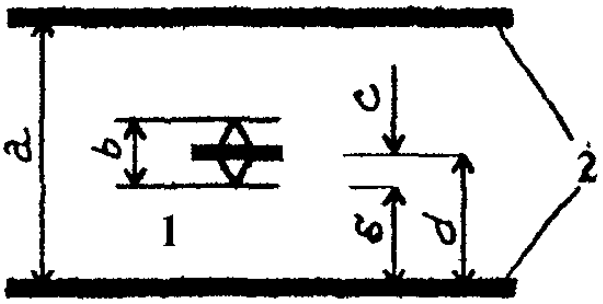


Рис. 7.25 Схема расположения электродов:
1 – ленточно–игольчатый; 2 – осадительный

Подсчитываем коэффициент k при температуре газа T = 140 + 273 = 413 К, абсолютном давлении в электрофильтре p = 101325 – 3000 = 98325 Па и среднем размере дисперсных частиц $D_{50} = 1{,}1\ 10^{-6}$ м:

$$k = \frac{0{,}55 \cdot 10^{-4} T\left[\left(1/p\right) + \left(10/E\right)\right]}{D_{50}} =$$

$$\frac{0{,}55 \cdot 10^{-4} \cdot 413\left[1/98325 + 10/160850\right]}{1{,}1 \cdot 10^{-6}} = 1{,}49.$$

Принимаем величину f_{rl}=0,9 и из таблицы 7.23 при заданной σ =1,7 и максимальном значении k, которое имеется в таблице, находим параметр A = 2,452.

3. Аппарат ЭГ–2–2–4–37 СРК имеет порядка 20 газовых проходов (шири-

на активной зоны 6000 мм, расстояние между осадительными электродами 300 мм). Принимаем для него среднее значение k_{rg} =0,93.

Подсчитываем коэффициент динамической вязкости η газа–носителя заданного состава для нормальных условий и пересчитываем на рабочую температуру (используем табл.7.26).

Исходный состав газа Таблица 7.26

компоненты	CO_2	N_2	O_2	H_2S	CO и пр
r_i(доли)	0,17	0,8	0,024	0,002	0,004
$\eta_{oi}\ 10^6$, Па с	13,7	17	20,3	11,66	16,6
k_i	254	114	131	396(по SO_2)	100
$T_{кi}$, K	304,2	126	154 3	373,5	132,9

$$\eta_{273} = (13{,}7\cdot10^{-6}\cdot0{,}17\sqrt{13{,}7\cdot10^{-6}\cdot304{,}2}+17\cdot10^{-6}\cdot0{,}80\sqrt{17\cdot10^{-6}\cdot126}+$$
$$+20{,}3\cdot10^{-6}\cdot0{,}024\sqrt{20{,}3\cdot10^{-6}\cdot154{,}3}+11{,}66\cdot10^{-6}\cdot$$
$$\cdot0{,}002\sqrt{11{,}66\cdot10^{-6}\cdot375{,}5}+16{,}6\cdot10^{-6}\cdot0{,}004\sqrt{16{,}6\cdot10^{-6}\cdot132{,}9})/$$
$$(0{,}17\sqrt{13{,}7\cdot10^{-6}\cdot304{,}2}++0{,}80\sqrt{17\cdot10^{-6}\cdot126}+0{,}024\sqrt{20{,}3\cdot10^{-6}\cdot154{,}3}+$$
$$+0{,}002\sqrt{11{,}66\cdot10^{-6}\cdot375{,}5}++0{,}004\sqrt{16{,}6\cdot10^{-6}\cdot132{,}9})=16{,}16\cdot10^{-6}\,\text{Па}\cdot\text{с}$$

$$k = 0{,}17\cdot254+0{,}8\cdot114+0{,}024\cdot131+0{,}002\cdot396+0{,}004\cdot100=138{,}72$$

$$\eta_{413}=16{,}16\cdot10^{-6}\,\frac{273{,}15+138{,}72}{413{,}15+138{,}72}\left(\frac{273{,}15}{413{,}15}\right)^{1{,}5}=6{,}48\cdot10^{-6}\,\text{Па}\cdot\text{с}$$

Определяем параметр β

$$\beta = \frac{\varepsilon_0 E^2 D_{50} l}{w k_{rg} \eta \delta} = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \left(72 \cdot 10^3\right)^2 1{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 8}{0{,}135 \cdot 0{,}93 \cdot 6{,}48 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}15} = 3{,}308.$$

3. Подсчитываем коэффициент очистки

$$\eta_{tot} = 1 - \exp\left(-K_{fl} A \beta^{0{,}42}\right) = 1 - \exp\left(-0{,}897 \cdot 2{,}152 \cdot 3{,}308^{0{,}42}\right) = 0{,}9736$$

Результаты расчетов значительно зависят от подбора значений опытных параметров, таких как интервал между встряхиваниями, напряжение на электродах и др. Так, при напряжении 40 кВ расчетный проскок составляет уже около 6 %. Поскольку для электрических полей, создаваемых электродами, расчетная напряженность практически не соответствует реальной, можно предполагать, что в неоднородном поле проскок возрастет еще более резко.

Можно сделать вывод о целесообразности электрофильтрации данных выбросов, если при эксплуатации удастся поддерживать параметры процесса очистки (пылеемкость, температуру газов, напряжение на электродах и т.д.) на уровне расчетных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alden J. L. Design of Industrial Exhaust Systems / J. L. Alden. 3rd ed.: The Industrial Press, New York. 1959.

2. Аспирационное укрытие места загрузки ленточного конвейера / И. Н. Логачев и [др.] // Авт. свидет. СССР 1686185. 1991. Бюл. N 239.

3. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений / А.М. Белевицкий. Л : Химия, 1990. 288 с.

4. Биргер М. И. Справочник по пыле – золоулавливанию / М. И. Биргер, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягкое. М. : Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

5. Большая советская энциклопедия. Т. 2 стр. 485. М. : Советская энциклопедия, 1975.

6. Зиганшин М.Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М.Г. Зиганшин, А.А. Колесников, В.Н. Посохин. М. : Экопресс – 3М, 1998. 505 с.

7. Jennings R. F. i. Iron Steel Inst. / R. F. Jennings R. F. 164, 305, 1950.

8. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. Л. : Химия, 1987. 264 с.

9. Lancaster B.W. Ind. Engng Chem Fundamentals / B.W. Lancaster, W. Strauss. S. 10-362, 9. 1971.

10. Mitchell R.I., Pilcher J.M. 5th A.E.C. Air Cleaning Conf. / R.I. Mitchell, J.M. Pilcher. T.I.D. 7551 p. 67, 1957.

11. McCabe L. C. Ind. Engng Chem. / L. C. McCabe. 44 (11), 123A, Nov. 1952.

12. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров логарифмически нормального распределения / ГОСТ 11.009–79. М. : Изд–во стандартов. 14 с.

13. Ромашов Г. И. Основные принципы и методы определения дисперсного состава промышленных пылей / Г. И. Ромашов. Л. : ЛИОТ, 1935.

14. Sisk F.J. Private communication / F.J. Sisk. 1970.

15. Справочник по добыче и переработке нерудных строительных материалов /

под. ред. В.Я. Валюжинича, Москва, 1965.

16. Справочник по пыле и – золоулавливанию / под ред. А.А. Русанова. М. : Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

17. Stokes G.G. Trans. Camb. Phil. Soc. / G.G. Stokes. 9(ii), 8. 1950.

18. Страус В. Промышленная очистка газов / В. Страус. пер. с англ. М. : Химия, 1981. 616 с.

19. Устройство для форматирования потока сыпучего материала на ленте конвейера / Логачев И. Н. и [др.]. // Авт. свидет. СССР 1105419. МКИ В 65 G 47 /22. Открытия, Изобретения. 1984. N 228. С. 54.

20. Харланов С.А. Монтаж систем вентиляции и кондиционирования воздуха / С.А. Харланов, В.А.Степанов В.А. М. : Высшая школа, 1986. 224 с.