

РАЗДЕЛ 1. ОЧИСТКА ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ПЫЛИ

ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗОЛЫ И ПЫЛИ

1.1. Плотность частиц

В технике пыле- и золоулавливания принято различать несколько видов плотности твердых частиц пыли.

Истинная плотность твердой частицы пыли определяется как отношение массы ее вещества к занимаемому ею объему за вычетом объема пор и газовых включений, которые может иметь частица.

Кажущаяся плотность твердой частицы пыли определяется как отношение массы частицы к занимаемому ею объему, включая объемы пор и газовых включений. Для гладких монолитных твердых частиц кажущаяся плотность совпадает с истинной.

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

В связи с трудностью получения данных о кажущейся плотности частиц широко используется прием косвенного учета этого параметра в соответствующих расчетах. В основные из уравнений, используемых при расчете эффективности систем пыле- и золоулавливания, в явной или скрытой форме входит определяющее инерционные свойства подлежащих улавливанию частиц отношение их размера к кажущейся плотности. Например, отношение d_m/d_{50} , в котором d_m является средним размером подлежащих улавливанию частиц, найденным по результатам их дисперсионного анализа, а d_{50} — взятый из технических характеристик газоочистного аппарата размером частиц, улавливаемых с эффективностью 50 %.

Если кажущаяся плотность подлежащих улавливанию частиц отличается от кажущейся плотности частиц, использованных при изучении эффективности газоочистного аппарата, то значения d_m и d_{50} должны быть приведены к одинаковой кажущейся плотности путем умножения одного из них соответ-

ственно на $\sqrt{\rho_q/\rho_{q,50}}$ или на $\sqrt{\rho_{q,50}/\rho_q}$,

где ρ_q — кажущаяся плотность подлежащих улавливанию частиц;

$\rho_{q,50}$ — кажущаяся плотность частиц, для которых в характеристике газоочистного аппарата указано значение d_{50} .

Методы дисперсионного анализа основаны на разделении частиц по размерам в зависимости от их инерционных свойств. Следовательно, в уравнение, используемое при обработке экспериментальных данных дисперсионного анализа, так же как и при расчете эффективности газоочистных аппаратов, необходимо подставлять значения кажущейся плотности частиц. Но поскольку, основное значение имеют именно инерционные свойства частиц, а не абсолютные значения параметров, влияющих на эти свойства, при обработке экспериментальных результатов дисперсионных анализов оказывается возможным условно принимать кажущуюся плотность анализируемых частиц равной 1000 кг/м^3 и находить после этого такие размеры частиц при которых они будут обладать такими же инерционными свойствами, как и анализируемые частицы с реальными значениями их размеров и кажущейся плотности. Таким образом, во многих случаях оказывается возможным обходиться без экспериментального определения кажущейся плотности подлежащих улавливанию частиц.

Насыпная плотность твердых частиц пыли определяется отношением массы свеженасыпанных твердых частиц к занимаемому ими объему, при этом учитывается наличие воздушных промежутков между частицами. Величиной насыпной плотности пользуются для определения объема, который занимают зола или пыль в бункерах сухих газоочистных аппаратов. С увеличением однородности частиц по размерам их насыпная плотность уменьшается, так как увеличивается относительный объем воздушных прослоев. Насыпная плотность слежавшейся пыли оказывается в 1,2 - 1,5 раза больше, чем свеженасыпанной.

1.2. Дисперсный состав золы и пыли

Принято различать первичные размеры частиц, свойственные им в момент их образования; размеры агрегатированных частиц, возникающих в процессе коагуляции частиц в пылегазовых трактах; размеры частиц в виде

хлопьев и комочков после выделения их из газовой фазы.

В первых двух случаях используется понятие стоксовских размеров частиц. Под **стоксовским** размером любой, в том числе агрегатированной частицы неправильной формы понимается размер сферической частицы, имеющей такую же скорость седиментации, как и данная несферическая частица или агрегат. Одни методы и приборы для экспериментального определения дисперсности частиц позволяют находить их фактические размеры, другие – стоксовские диаметры. Кроме того, в одних случаях может быть найдено распределение частиц по первичным размерам, в других – с учетом степени их агрегации в газовых потоках.

При решении большинства вопросов, связанных с очисткой газов, основной интерес представляют распределения по стоксовским размерам, приобретаемым частицами в пылегазовых трактах и определяющим их поведение в пыле- и золоулавливающих аппаратах. С этой точки зрения исследования дисперсного состава золы и пылей целесообразно выполнять с помощью методов, позволяющих разделять частицы на фракции непосредственно в газах.

Дисперсным составом пыли называется характеристика состава дисперсной фазы по размерам или скоростям оседания частиц. Она показывает, какую долю по массе, объему, поверхности или числу частиц составляют частицы в любом диапазоне их размеров или скоростей оседания. Дисперсный состав может быть выражен в виде таблицы, кривой или формулы распределения или плотности распределения частиц пыли.

Фракцией называют относительную долю частиц, размеры которых находятся в определенном интервале значений, принятых в качестве нижнего и верхнего пределов. Можно также составить таблицу, из которой будет видно, какую долю частиц составляют частицы крупнее определенного размера.

Принимая равномерным распределение частиц по размерам внутри каждой фракции, можно построить ступенчатый график, называемый гистограммой. 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. 1.1).

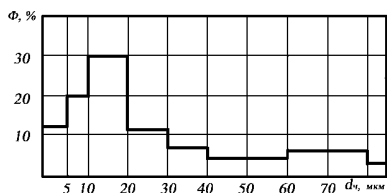


Рис. 1.1. Графическое изображение дисперсного состава частиц пылей - распределение по фракциям

Если процентное содержание каждой фракции разделить на разность размеров частиц, принятых в качестве граничных, и найденные значения отложить в системе координат, как ординаты точек, абсциссы которых равны среднему для соответствующих фракций размеру частиц, то через полученные точки можно провести плавную дифференциальную кривую распределения частиц по размерам (рис. 1.2).

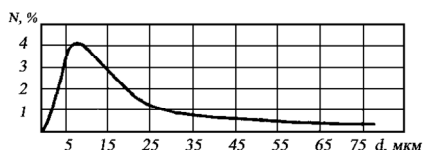


Рис. 1.2. Графическое изображение дисперсного состава частиц пылей - дифференциальная кривая распределения

Однако наиболее удобным является графическое изображение результатов дисперсионных анализов в виде интегральных кривых $D(d_q)$ или $R(d_q)$, каждая точка которых показывает относительное содержание частиц с размерами больше или меньше данного размера (рис. 1.3).

Обозначения D и R на осях ординат соответствуют начальным буквам немецких слов *Durchgang* (проход) и *Ruckstand* (остаток), так как вначале характеристики зернового состава пылевидных материалов давались в основном по результатам ситового анализа и соответствующие значения отвечали относительной доле материала, прошедшего сквозь сито с ячейками данного

размера или оставшегося на нем.

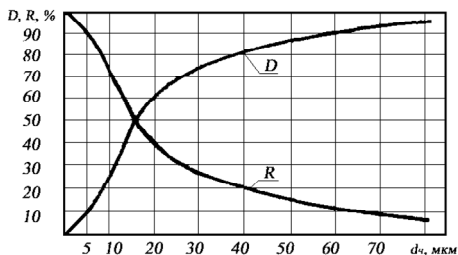


Рис. 1.3. Графическое изображение дисперсного состава частиц пыли - интегральное распределение в линейном масштабе координат

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

Интегральные кривые для частиц с логарифмически-нормальным распределением удобно строить в вероятностно-логарифмической системе координат, в которой они приобретают вид прямых линий (рис. 1.4).

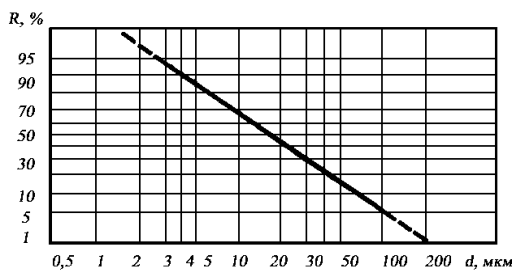


Рис. 1.4. Графическое изображение дисперсного состава частиц пыли - интегральное распределение в вероятностно-логарифмической системе координат

Для построения такой системы координат по оси абсцисс в логарифмическом масштабе откладывают значения d_q , а по оси ординат - значения

$D(d_q)$ или $R(d_q)$.

Поскольку в вероятностно-логарифмической системе координат ось абсцисс начинается от точки на оси ординат, соответствующей значению 50 %, значения x для $D(d_q)$ или $R(d_q)$ большее 50 % откладываются вверх от начала оси абсцисс, а меньше 50 % - вниз.

Значению d_m отвечает точка пересечения построенного графика с осью абсцисс, а $\lg \sigma_q$ находят из соотношения, которое является свойством интеграла вероятности

$$\lg \sigma_q = \lg d_{15,9} - \lg d_m = \lg d_m - \lg d_{84,1}, \quad (1.1)$$

если строился график функции $R(d_q)$, или

$$\lg \sigma_q = \lg d_{84,1} - \lg d_m = \lg d_m - \lg d_{15,9}, \quad (1.2)$$

если строился график функции $D(d_q)$,

где $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$ - абсциссы точек, ординаты которых имеют значения 84,1 и 15,9 соответственно.

Определение дисперсного состава определяется при помощи приборов, называемых импакторами, принцип действия которых основан на инерционной сепарации частиц по размерам при прохождении через сопла или сопловые решетки.

1.3. Аутогезионные свойства частиц

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

Адгезионные свойства могут проявляться только в монослое частиц, осевших на стенках или фильтрующих поверхностях газоочистных аппаратов, и из-за очень малой толщины такого слоя, как правило, не оказывают влияния на работу систем пыле- и золоулавливания.

Эксплуатационная надежность систем пыле- и золоулавливания зависит

главным образом от *аутогезионных свойств* (сцепления частиц друг с другом), причем в технике газоочистки за этими свойствами прочно закрепился термин «слипаемость».

Одной из распространенных неполадок систем газоочистки является частичное или полное забивание отдельных аппаратов и других элементов улавливаемым продуктом. Поэтому для многих газоочистных аппаратов, пылевых затворов установлены определенные границы применимости в зависимости от слипаемости подлежащих улавливанию золы или пыли. Для установления таких границ используется условное разделение золы или пыли по степени слипаемости на четыре группы (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Слипаемость некоторых видов золы и пыли

Группа слипаемости, разрывная прочность P по Е.И. Андрианову, Па	Наименование золы и пыли
1	2
I. Неслипающиеся, $P < 60$	Шлаковая пыль, глиноземная пыль, доломитовая пыль, шамотная пыль
II. Слабослипающиеся, $60 < P < 300$	Летучая зола с недожогом более 30 % при пылевидном сжигании каменных углей, летучая зола при слоевом сжигании любых углей, коксовая пыль, магнезитовая пыль (не сорбировавшая влагу), сланцевая зола, доменная пыль (после первичных пылеосадителей), апатитовая сухая пыль
III. Среднеслипающиеся, $300 < P < 600$	Летучая зола без недожога (зола подмосковных углей), торфяная зола, марганцевая пыль (сорбировавшая влагу), пыль концентратов цветной металлургии и железного колчедана, пыль окиси цинка, свинца, олова (предварительно скоагулировавшаяся); влажная магнезитовая пыль, сухой цемент
IV. Сильнослипающиеся, $P > 600$	Цементная пыль, выпавшая из воздуха с большим влагосодержанием, гипсовая и алебастровая пыль, пыль глины, каолина мергелей (мелкая), огарковая пыль при 500 °С, мучная пыль, волокнистые пыли (асбест, хлопок, шерсть), пыль, содержащая крупные примеси (после отсеивания зерна и т. п.), зола антрацитового штыба с недожогом менее 25 %, пыль с максимальной величиной частиц 10 мкм

Первоначально вопрос о занесении различных видов золы или пылей в ту или иную группу по слипаемости решался на основании качественных суждений об их поведении в тех или иных условиях. В зависимости от того к какой группе относится улавливаемая пыль, решается вопрос о выборе пылеулавливающего аппарата. Так, слипаемость пыли определяет выбор типа на-

правляющего элемента батарейных циклонов и необходимость оснащения бункеров специальными ворошителями или вибраторами.

В настоящее время достаточно широкое распространение получил прибор Е.И. Андрианова, позволяющий сравнивать между собой и относить к той или иной группе различные по слипаемости пыли на основании количественного показателя - разрывной прочности специально сформированных пылевых слоев.

Со слипаемостью тесно связана другая характеристика золы или пыли – ее **сыпучесть**. Сыпучестью определяются статический и динамический углы естественного откоса, от которых, в частности, зависит поведение золы или пыли в бункерах газоочистных аппаратов, крутизна стенок которых и диаметры пылевыпускных отверстий выбираются с учетом сыпучести улавливаемых частиц.

1.4. Абразивность частиц

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

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

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

Интенсивность абразивного износа пыле- и золоулавливающих установок при прочих равных условиях зависит от твердости, размера и плотности

частиц. Частицы, имеющие острые грани при прочих равных условиях, разрушают металл более чем в 10 раз быстрее, чем частицы округлой формы. По мере увеличения размеров частиц золы износ металла вначале возрастает и затем, достигнув максимума, снижается. Максимальный износ металла вызывают частицы золы с размерами 90 ± 2 мкм.

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

Коэффициент абразивности a определяет утонение стенки поперечно обтекаемой трубы из стали 20 в местах ее максимального износа при концентрации частиц 1 г/м^3 и скорости потока 1 м/с , при равномерном распределении поля скоростей и концентраций, при комнатной температуре в течение 1 ч.

1.5. Удельное электрическое сопротивление слоя частиц золы или пыли

Удельное электрическое сопротивление слоя частиц золы или пыли влияет на эффективность работы установок электрической очистки газов. Зависимость удельного сопротивления от температуры и влажности, а также от некоторых других факторов используется в практике электрогазоочистки для подготовки газов перед электрофильтрами для улучшения их работы.

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

От условий формирования слоя зависит плотность упаковки частиц. Сопротивление слоя пыли может быть измерено тераомметром или определено расчетным путем с учетом величины напряжения, приложенного к измерительным электродам прибора, и тока, протекающего через слой пыли.

1.6. Электрическая заряженность частиц

Электрическая заряженность частиц оказывает влияние на эффективность их улавливания в газоочистных аппаратах, на взрывоопасность и аутогезионные свойства, в том числе на сыпучесть пылей. Например, в бункерах

электрофильтров свежееуловленная зола или пыль, сохраняя электрический заряд, имеет угол естественного откоса, близкий к нулю, т. е. ведет себя почти как жидкость, а через несколько часов, после потери частицами электрического заряда, угол естественного откоса становится близким к 50° , достигая в отдельных случаях 90° . Этот пример сильного влияния заряженности частиц относится к случаю их искусственной зарядки, когда практически все частицы имеют заряд одного знака. Если частицы приобретают заряд в процессе своего образования или в результате адсорбции ионов естественного происхождения, трения друг о друга или о стенки газоходов, то среди них наряду с некоторым количеством нейтральных частиц присутствуют как положительно, так и отрицательно заряженные частицы. Внешние проявления электрической заряженности частиц зависят при этом от их суммарного заряда, определяемого соотношением между нейтральными, положительно и отрицательно заряженными частицами.

1.7. Смачиваемость частиц

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

Для определения смачиваемости частиц для оценки их поведения в системах газоочистки применяется метод пленочной флотации. Метод основан на определении доли массы затонувших за определенное время частиц порошка, насыпанного тонким слоем на поверхность воды.

По смачиваемости, определенной методом пленочной флотации, промышленная пыль разделяется на три группы:

- плохо смачиваемая - от 0 до 30%;
- средне смачиваемая - от 30 до 80%;

- хорошо смачиваемая - от 80 до 100%.

Смачиваемость определяется по формуле

$$\frac{M_{в.п.} - M_в}{M_n} \cdot 100, \quad (1.3)$$

где $M_{в.п.}$ - масса воронки с пылью, г;

$M_в$ - масса чистой воронки, г;

M_n - масса взятой для опыта навески, г.

1.8. Пожаро- и взрывоопасность частиц пыли

Многие виды пыли из-за сильно развитой поверхности частиц способны гореть, самовоспламеняться, образовывать с воздухом взрывоопасные смеси даже в тех случаях, когда исходный материал, из которого получена пыль, является негорючим. Наиболее опасным является свойство пыли образовывать с воздухом взрывоопасные смеси. Первичный взрыв возникает при небольших скоплениях пыли вблизи источника воспламенения. Взрывная волна и вибрация от первичного взрыва могут поднять в воздух крупные скопления пыли, осевшей в относительном отдалении от места первичного взрыва, и тем самым вызвать вторичный взрыв значительно большей силы.

Показатели пожаро- и взрывоопасности пыли определяются экспериментально. Поскольку существующие для этого методы не позволяют адекватно воспроизводить различные сочетания реальных условий, при которых возможно загорание или взрыв пыли, результаты соответствующих определений в известной мере условны и относительны.

Среди многочисленных характеристик пожаро- и взрывоопасных свойств пыли основное значение имеют такие показатели, как температура воспламенения и самовоспламенения, концентрационные пределы взрыва, скорость распространения фронта пламени, минимальная энергия зажигания, максимальное давление взрыва и скорость нарастания давления.

Температура воспламенения - наименьшая температура горючего вещества, при которой вещество выделяет горючие пары или газы с такой скоростью, что после воспламенения их от внешнего источника зажигания вещество устойчиво горит.

Температура самовоспламенения - наименьшая температура вещества (или его смеси с воздухом), при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, приводящее к возникновению пламенного горения. За величину температуры самовоспламенения принимают минимальную температуру стенки реакционного сосуда, при которой наблюдается самовоспламенение смеси. Эта температура не является константой данного вещества и зависит от условий эксперимента.

Пыль, взвешенная в воздухе, может воспламеняться только при определенных концентрациях. Различают нижний и верхний пределы воспламенения. Область концентрации между этими пределами называется **диапазоном воспламенения**.

В зависимости от скорости распространения фронта пламени различают воспламенение, сопровождающееся спокойным сгоранием пыли; **вспышки**, имеющие скорость горения от 4 до 10 м/с; **взрывы**, имеющие скорость горения более 100 м/с; **детонацию**, протекающую со скоростью распространения фронта пламени более 1000 м/с.

За **нижний предел воспламенения** взвесей твердых веществ принимается наименьшая концентрация вещества в воздухе, при которой смесь способна воспламеняться.

Наибольшая концентрация пыли в воздухе, при которой возможен взрыв, называется **верхним пределом взрыва (воспламенения)**. Верхние пределы при рассмотрении вопросов пылеулавливания не имеют практического значения.

Так как значение нижнего предела воспламенения зависит от метода его определения, всегда указывается, каким способом оно определялось.

Концентрацию пыли при воспламенении или взрыве определяют путем деления количества пыли, перешедшей во взвешенное состояние, на объем взрывного цилиндра.

Нижний предел воспламенения найденный таким способом, относится к условиям практически неподвижного воздуха. При движении воздуха, содержащего пыль, со скоростью 5 м/с нижний предел повышается в 2 – 3 раза.

Под **минимальной энергией зажигания взвеси пыли в воздухе** понимают наименьшую энергию конденсатора, при разрядке которого через воздушный промежуток возникает искра, зажигающая с вероятностью 0,01 наиболее легко воспламеняемую смесь данного вещества с воздухом. Минимальная энергия зажигания позволяет сравнивать чувствительность различных

пылей к воспламенению от внешних источников зажигания, а также непосредственно считать допустимую энергию электрических разрядов во взрывоопасной среде, разрабатывать эффективные противопожарные меры.

Предельно допустимая энергия электрического разряда не должна превышать 40 % значения минимальной энергии зажигания.

Максимальное давление взрыва - это наибольшее давление, которое возникает при взрыве наиболее пожаровзрывоопасной смеси в замкнутом сосуде. Максимальное давление взрыва учитывают в расчетах аппаратов на взрывоустойчивость, в расчетах предохранительных клапанов и взрывных мембран, а же оболочек взрывонепроницаемого электрооборудования.

Вопросы для самопроверки

1. Какая плотность определяет поведение твердых частиц в газовом потоке?
2. Что такое дисперсный состав пыли?
3. Каким свойством определяется прочность сцепления частиц друг с другом?
4. Как влияет электрическая заряженность частиц пыли на эффективность работы пылеулавливающих аппаратов?
5. Каким образом можно определить смачиваемость частиц пыли?
6. Что такое концентрационные пределы взрыва?
7. Почему необходимо учитывать пожаро- и взрывоопасные характеристики частиц пыли?

ТЕМА 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩИХ АППАРАТОВ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ

2.1. Классификация пылеулавливающих аппаратов

По способу очистки от пыли пылеуловители делятся на группы сухой, мокрой и электроочистки.

В основе работы сухих аппаратов лежат гравитационные, инерционные, центробежные и фильтрационные механизмы осаждения. В мокрых пылеуловителях осуществляется контакт запыленных газов с жидкостью. При этом осаждение происходит на капли, на поверхность газовых пузырей или на пленку жидкости. В электрофильтрах осаждение происходит в результате сообщения частицам пыли электрического заряда.

СУХИЕ АППАРАТЫ:

- *гравитационно-инерционные:*
 - осадительные камеры;
 - инерционные;
 - циклоны;
- *фильтрующие:*
 - волокнистые фильтры;
 - тканевые фильтры;
 - зернистые фильтры;

МОКРЫЕ АППАРАТЫ:

- *промывные:*
 - форсуночные скрубберы;
 - скрубберы Вентури;
 - динамические газопромыватели;
- *жидкопленочные:*
 - центробежные;
 - ударно-инерционные;
 - пенные;

ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ:

- *однозонные:*
 - сухие пластинчатые с горизонтальным ходом газов;
 - сухие пластинчатые с вертикальным ходом газов;
 - мокрые трубчатые и пластинчатые;
- *двухзонные.*

2.2. Оценка эффективности работы пылеуловителей

Работа пылеуловителей характеризуется **коэффициентом очистки**, под которым понимают отношение количества уловленной пыли ΔM к количеству пыли, поступающей в пылеуловитель M_1

$$h = \frac{\Delta M}{M_1} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} = 1 - \frac{M_2}{M_1} = \frac{\Delta M}{M_2 + \Delta M}, \quad (2.1)$$

где M_2 – масса пыли, выходящей из пылеуловителя.

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

$$K_{np} = 1 - h = \frac{M_2}{M_1} = \frac{M_2}{M_2 + \Delta M} \quad (2.2)$$

Эффективность пылеуловителя можно определить на основании замера концентрации пыли в газе до пылеуловителя Z_1 , и после него Z_2

$$h = \frac{V_1 \cdot Z_1 - V_2 \cdot Z_2}{V_1 \cdot Z_1} = 1 - \frac{V_2 \cdot Z_2}{V_1 \cdot Z_1}, \quad (2.3)$$

где V_1, V_2 – расходы газа на входе в пылеуловитель и выходе из него.

Эффективность очистки для частиц пыли различных размеров неодинакова. В большинстве случаев лучше улавливается более крупная пыль и кривая парциальных коэффициентов очистки, построенная для условий, при которых проводилось испытание, имеет вид, изображенный на рис. 2.1.

Фракционный коэффициент очистки $h_{фр}$ – массовая доля данной фракции, осаждаемая в пылеулавливающем аппарате. Фракционный коэффициент очистки может быть найден по рис. 2.1 как среднее значение парциальных коэффициентов частиц пыли, входящих в данную фракцию.

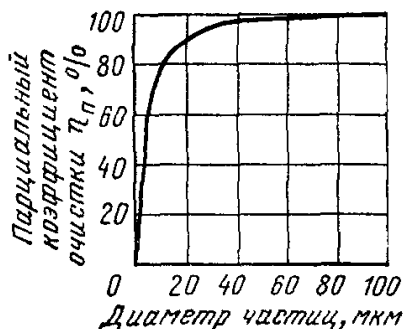


Рис. 2.1. Кривая парциальных коэффициентов очистки пылеулавливающих аппаратов.

Зная фракционный состав пыли и фракционные коэффициенты очистки пылеулавливающего аппарата можно определить общий коэффициент очистки аппарата из выражения

$$h_0 = \frac{h_1 \cdot \Phi_1}{100} + \frac{h_2 \cdot \Phi_2}{100} + \dots + \frac{h_n \cdot \Phi_n}{100}. \quad (2.4)$$

Коэффициент очистки в значительной степени зависит от свойств пыли и параметров газового потока.

При *последовательном соединении нескольких пылеулавливающих аппаратов* коэффициенты проскока через первый, второй и третий аппараты будут соответственно равны

$$\frac{M_2}{M_1} = 1 - h_1; \quad \frac{M_3}{M_2} = 1 - h_2; \quad \frac{M_4}{M_3} = 1 - h_3. \quad (2.5)$$

Следовательно, общий коэффициент очистки трех последовательно включенных аппаратов будет равен

$$h_o = 1 - \frac{M_4}{M_1} = 1 - (1 - h_1) \cdot (1 - h_2) \cdot (1 - h_3). \quad (2.6)$$

В этом случае следует учитывать изменение фракционного состава пыли переходе от аппарата к аппарату, что можно сделать по формуле

$$\Phi_{1\text{вых}} = \Phi_{2\text{вх}} = \Phi_{1\text{вх}} \cdot \frac{100 - h'_{\text{фр}}}{100 - h_1}, \quad (2.7)$$

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

$h'_{\text{фр}}$ – фракционный коэффициент очистки данной фракции в первом аппарате;

h_1 – общий коэффициент очистки первого аппарата.

Остаточную запыленность газа можно найти по начальной запыленности и коэффициенту проскока, г/м³

$$Z_2 = K_{np} \cdot Z_1 \cdot \frac{V_1}{V_2}. \quad (2.8)$$

Вопросы для самопроверки

1. На какие группы делятся пылеуловители по способу очистки?
2. Что такое коэффициент проскока?
3. Как определить фракционный коэффициент очистки?
4. Как определить эффективность работы нескольких последовательно соединенных пылеулавливающих аппаратов?

ТЕМА 3. СУХАЯ ОЧИСТКА ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ПЫЛЕЙ

3.1. Движение частиц пыли в неподвижной среде

С момента начала движения частицы в вязкой среде возникает сила сопротивления этому движению P , которая согласно закону Ньютона, выражается следующим образом

$$P = C \cdot F \cdot \frac{\omega \cdot \rho_z}{2}, \quad (3.1)$$

где C - аэродинамический коэффициент;

F - площадь сечения, нормального к направлению движения, м^2 ;

ω - скорость движения частицы относительно среды, м/с ;

ρ_z - плотность вещества окружающей среды, кг/м^3 .

Этот закон применим и в том случае, если частица неподвижна, а поток газа обтекает ее со скоростью ω .

При движении частицы в неподвижной среде или обтекании неподвижной частицы потоком газа возможны ламинарный и турбулентный режимы движения. Основной характеристикой режима движения является в этом случае число Рейнольдса, определяемое по размеру движущейся частицы d и относительной скорости ω , которое можно найти из выражения

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot d}{\nu} = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho_z}{\mu}. \quad (3.2)$$

Численное значение Re позволяет установить не только режим движения, но и численное значение аэродинамического коэффициента C . Так, для областей с ламинарным режимом, турбулентным режимом и промежуточной характерны значения Re , соответственно ≤ 2 ; ≥ 500 и < 500 и значения C , соответственно равные $24/\text{Re}$; $0,44$; $18,5/\text{Re}^{0,6}$.

При ламинарном режиме для частиц сферической формы после подстановки в уравнение (3.1) $F = p \cdot d^2/4$ и развернутого значения величины аэро-

динамического коэффициента получим

$$P = \frac{24 \cdot \mu}{\omega_z \cdot d \cdot \rho_z} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot Z \cdot 2} \cdot \omega_z^2 \cdot \rho_z = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot \omega_z. \quad (3.3)$$

Этой формулой выражается закон Стокса, справедливый для ламинарного режима движения частицы сферической формы в однородной, не ограниченной стенками вязкой среде.

В наиболее простом случае, когда частица движется вниз под действием силы тяжести с возрастающей скоростью, вследствие возрастания силы сопротивления быстро наступает момент, когда обе эти силы приходят в равновесие. С этого момента частица начинает двигаться вниз по инерции с постоянной скоростью ω_g , которую легко определить из уравнения равновесия

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho_n - \rho_z) \cdot g = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot \omega_g, \quad (3.4)$$

откуда

$$\omega_g = \frac{(\rho_n - \rho_z) \cdot d^2 \cdot g}{18 \cdot \mu}, \quad (3.5)$$

где ρ_n и ρ - плотность частицы пыли и окружающей среды, кг/м³;

ω_g - скорость витания, м/с.

Очевидно, что ω_g можно рассматривать и как скорость направленного вверх вертикального потока газа, при которой данная частица будет удерживаться в занимаемом ею положении. Вес частицы G в пределах применимости закона Стокса может быть выражен через скорость витания следующим образом

$$G = M \cdot g = C \cdot F \cdot \frac{\omega_g^2 \cdot \rho_z}{2} = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot \omega_g. \quad (3.6)$$

Решая уравнение (3.6) относительно диаметра частицы, получим, что

$$d = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot \omega_g}{(\rho_n - \rho_g) \cdot g}}. \quad (3.7)$$

Полученное выражение показывает, что при постоянной плотности ρ_g и вязкости среды μ каждой скорости витания соответствует свой размер частиц.

3.2 Движение частиц пыли в прямолинейном потоке газа

При движении частицы в газовом потоке на нее действует, помимо силы тяжести, сила сопротивления газового потока, обусловленная разностью скоростей движения газа ω_g и частицы пыли ω_n , которую можно определить по закону Ньютона

$$P = C \cdot F \cdot \frac{(\omega_g - \omega_n)^2 \cdot \rho_g}{2}. \quad (3.8)$$

Из приведенного выражения видно, что эта сила достигает максимума при $\omega_n = 0$ и обращается в нуль при $\omega_g = \omega_n$.

В случае горизонтального движения газового потока дифференциальное уравнение движения вдоль оси $x - x$ может быть записано следующим образом

$$C \cdot F \cdot \frac{(\omega_g - \omega_n)^2 \cdot \rho_g}{2} = M \cdot \frac{d\omega_n}{dt}, \quad (3.9)$$

где M - масса частицы пыли.

После разделения переменных и интегрирования получим

$$C \cdot F \cdot \rho_g \cdot t = \frac{2 \cdot M \cdot \omega_n}{(\omega_g - \omega_n) \cdot \omega_g}. \quad (3.10)$$

Из этого выражения следует, что скорость пыли может сравняться со скоростью газа $\omega_e = \omega_n$ только при $t = \infty$.

Исследуя это уравнение, можно сделать вывод, что частица пыли, помещенная в поток газа без начальной скорости, сначала очень быстро набирает скорость, которая затем начинает асимптотически приближаться к скорости газа.

Поэтому при грубых подсчетах скорость движения частиц в камерах и газоходах можно принимать равной скорости газа.

В случае вертикального движения газового потока дифференциальное уравнение движения вдоль вертикальной оси будет иметь следующий вид

$$P - G = M \cdot \frac{d\omega_n}{dt}, \quad (3.11)$$

или, в соответствии с выражениями (3.1) и (3.6)

$$C \cdot F \cdot \frac{(\omega_e - \omega_n)^2}{2} \cdot \rho_e - \frac{C \cdot F \cdot \omega_e^2}{2} \cdot \rho_e = M \cdot \frac{d\omega_n}{dt}. \quad (3.12)$$

После разделения переменных и интегрирования получим

$$\frac{\omega_e}{2} \ln \frac{1 - \frac{\omega_n}{\omega_e + \omega_e}}{1 - \frac{\omega_n}{\omega_e - \omega_e}} = 2 \cdot g \cdot t. \quad (3.13)$$

Как следует из уравнения (3.13), при $t = \infty$ $\omega_n = \omega_e - \omega_e$.

Скорость частицы пыли, помещенной в газовый поток, сначала очень быстро нарастает, а затем начинает медленно приближаться к предельной величине, равной при движении потока вверх $\omega_e - \omega_e$, а при движении потока вниз $\omega_e + \omega_e$.

3.3 Осаждение частиц пыли в камерах и газоходах

В осадительных камерах выпадение частицы пыли из газового потока происходит под действием сил гравитации. Эффективность осаждения в значительной мере определяется временем пребывания частицы в камере, что вызывает увеличение размеров камеры. В наиболее неблагоприятных условиях находятся частицы под потолком камеры, которым для осаждения нужно пройти наибольший путь, равный высоте камеры H (рис. 3.1).

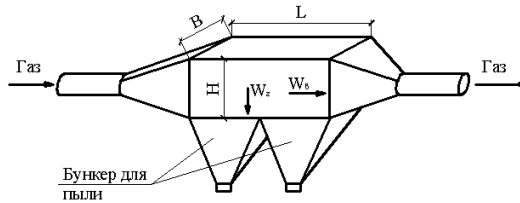


Рис. 3.1. Схема пылеосадительной камеры

При приближенном расчете осадительных камер принимают, что частицы движутся вдоль камеры со скоростью ω_n , равной скорости газового потока ω_z , и одновременно опускаются вниз со скоростью, равной скорости витания ω_g . Для осаждения частица должна достичь дна раньше, чем газовый поток вынесет ее из камеры, поэтому время ее осаждения $t = H / \omega_g$ не должно превышать времени ее пребывания в камере $t = L / \omega_z$

$$\frac{H}{\omega_g} \leq \frac{L}{\omega_z}. \quad (3.14)$$

Выражая скорость газа через расход V_z , деленный на площадь поперечного сечения камеры $H \times B$, получим $\frac{H}{\omega_g} = \frac{L \cdot H \cdot B}{V_z}$, откуда следует, что

$$V_z = L \cdot B \cdot \omega_g = L \cdot B \cdot \frac{d^2 \cdot \rho_n \cdot g}{18 \cdot \mu} . \quad (3.15)$$

Из формулы (3.15) находят предельное количество газа, которое можно пропустить через камеру при условии осаждения частиц диаметром d .

Решая обратную задачу, можно найти диаметр частиц, которые будут осаждаться при пропускании через камеру расхода газа V_z

$$d = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot V_z}{L \cdot B \cdot \rho_n \cdot g}} . \quad (3.16)$$

Формулы (3.15) и (3.16) показывают, что решающую роль при осаждении играет площадь дна камеры, увеличение которой существенно улучшает условия осаждения. Уменьшение высоты камеры без увеличения площади дна камеры ничего не дает, так как одновременно уменьшается площадь поперечного сечения камеры, а следовательно, растет скорость газа и сокращается время пребывания частицы в камере.

Формулы (3.15) и (3.16) справедливы лишь при условии ламинарного режима движения в осадительных камерах.

Процессы осаждения, происходящие в пылевых камерах, наблюдаются и в горизонтальных газоходах. Однако в этих условиях осаждение пыли в большинстве случаев нежелательно, поэтому скорости в газоходах принимают значительно более высокими (18 - 20 м/с), чтобы обеспечить турбулентный режим движения и унос даже крупных частиц, а также экономию металла при изготовлении газоходов.

3.4 Инерционные пылеуловители

Работа инерционных пылеуловителей основана на том, что при всяком изменении направления движения потока запыленного газа частицы пыли (вследствие действия сил инерции) сходят с линий тока, могут быть выведены за пределы потока и уловлены.

3.4.1. Жалюзийные пылеуловители

С помощью жалюзийной решетки (рис. 3.2), установленной в газоходе и состоящей из ряда наклонных пластин, поток газа можно разделить на две части.

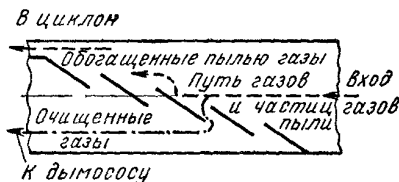


Рис. 3.2. Схема жалюзийной решетки

Большая часть газа ($\approx 95\%$) огибает пластины и, частично освобождаясь при этом от пыли, продолжает двигаться дальше в прежнем направлении. Меньшая часть газа ($\approx 5\%$), обогащенная пылью, отводится для очистки в циклон, после чего присоединяется к основному потоку газа. Движение газа через циклон осуществляется главным образом за счет перепада давления на жалюзийной решетке.

В основе работы жалюзийного пылеуловителя лежит инерционно-отражательный принцип. С одной стороны частицы пыли выпадают из потока газа за счет сил инерции при кругом повороте газа в жалюзийной решетке, а с другой – отражаются при непосредственном ударе о пластину. В обоих случаях частицы попадают в меньшую часть потока, обогащая ее пылью.

Общая эффективность очистки газа в жалюзийном пылеуловителе определяется произведением коэффициентов очистки решетки η_p и циклона $\eta_{\text{ц}}$

$$\eta_o = \eta_p \cdot \eta_{\text{ц}}. \quad (3.17)$$

Оптимальная скорость подхода газа к решетке лежит в пределах 12 - 20 м/с в зависимости от конструкции решетки, т. е. примерно равна скорости газа в газоходах.

Оптимальное значение скорости отсоса газа в циклон примерно на 25 % выше скорости подхода газа к решетке.

Из промышленных жалюзийных пылеуловителей наиболее известен пылеуловитель системы ВТИ (рис. 3.3), в котором решетка выполнена из стали углового профиля, обычно 40×40 мм. Пылеуловитель ВТИ прост в изготовлении, затраты металла минимальны, места для установки почти не требуется, так как его размещают непосредственно в газоходе.

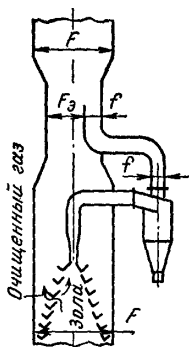


Рис. 3.3. Жалюзийный пылеуловитель системы ВТИ

Однако он может эффективно улавливать только крупную пыль размером более 30 - 40 мкм, и поэтому общая эффективность его не высока. Основное назначение этого аппарата - предохранить от износа дымососы паровых котлов, перекачивающие газ, засоренный золой (в основном крупных фракций).

Расход металла на изготовление жалюзийных пылеуловителей незначителен и составляет 40 - 50 кг на $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ газа.

3.4.2. Радиальные пылеуловители (пылевые мешки)

Пылеуловители такого типа широко применяют в доменном производстве в качестве первой ступени очистки доменного газа (рис. 3.4).

По центральному газопроводу запыленный газ поступает в пылеуловитель сверху. Потеря скорости при выходе в большой объем пылеуловителя и поворот газового потока на 180° создают необходимые условия для выделе-

ния крупных частиц пыли, размером более 100 мкм, из потока газа и осаждения их под действием силы тяжести и сил инерции на дно пылеуловителя.

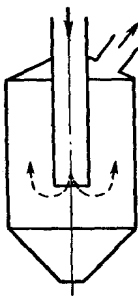


Рис. 3.4. Схема радиального пылеуловителя

Очищенный газ отводится через специальный патрубок в верхнем днище пылеуловителя. Скорость газа во входном патрубке принимают равной скорости газа в газопроводе, т. е. порядка 20 м/с, а скорость в подъемной части пылеуловителя не должна превышать 0,6 - 1,0 м/с.

Повышение этой скорости приводит к ухудшению пылеосаждения, а снижение - к неоправданному увеличению габаритов пылеуловителя.

Обычно эффективность радиальных пылеуловителей определяют приближенно с учетом действия только силы тяжести.

Если скорость витания больше скорости подъема газа в пылеуловителе, то частица выпадает в бункер, а если меньше, то будет вынесена за пределы пылеуловителя.

Зная дисперсный состав пыли, можно найти предельный размер частиц, которые будут уловлены и, следовательно, подсчитать эффективность работы пылеуловителя.

В условиях грубой очистки доменного газа коэффициент эффективности очистки радиальных пылеуловителей не превышает 60 – 70 %.

Гидравлическое сопротивление радиальных пылеуловителей невелико и обычно составляет 200 - 300 Па.

3.4.3. Вентиляторные пылеуловители

При работе вентилятора на запыленном потоке газа вследствие действия центробежных, а иногда кориолисовых сил, происходит сепарация частиц пыли из газового потока. В обычных вентиляторах в дальнейшем эта пыль снова диспергируется в потоке газа. Однако при соответствующем устройстве кожуха и рабочего колеса вентилятора можно достичь улавливания этой пыли.

Вентиляторы-пылеуловители с отводом пыли из кожуха. При работе вентилятора за счет центробежных сил частицы пыли отбрасываются к стенке спиралеобразного кожуха и одновременно движутся по ней в направлении выхлопного отверстия. Через специальное пылеприемное отверстие в кожухе пыль с небольшим количеством газа отводится в циклон, откуда очищенный газ снова поступает в газовый поток. В вентиляторе-пылеуловителе ТБИОТ - ММК (рис. 3.5) на некотором участке кожух делают двойным, причем внутреннюю его часть перфорируют.

Через отверстия перфорации пыль выводится за пределы вентилятора и собирается в образованном стенками пространстве. Такой пылеуловитель может быть изготовлен из серийного вентилятора путем его переделки. Для повышения эффективности предусмотрено непрерывное смачивание лопаток колеса вентилятора водой.

Ротоклон Д. Особенностью пылеуловителя «Ротоклона Д» (рис. 3.6) является вогнутая форма диска и передней стенки, что увеличивает время пребывания газа в криволинейном канале.

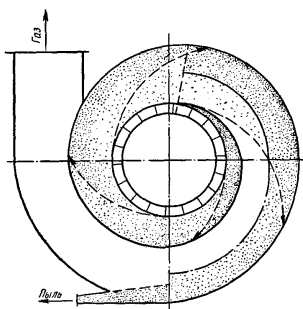


Рис. 3.5. Вентилятор-пылеуловитель ТБИОТ - ММК

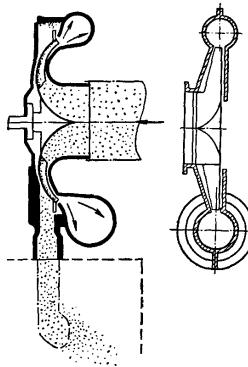


Рис. 3.6. Пылеуловитель «Ротоклон Д»

Узкие концы лопаток удлинены и выходят за пределы диска. Пылевые частицы под действием центробежных и кориолисовых сил скользят по стенкам межлопаточного канала и через кольцевой зазор проходят с частью воздуха в пылевую полость кожуха, откуда поступают в бункер, в котором происходит разделение пыли и газа.

Вентиляторные пылеуловители относятся к аппаратам грубой и полутонкой очистки газа. Они отличаются большой компактностью, так как вентилятор и пылеуловитель совмещены в одном агрегате. Расход энергии в них составляет 0,30 - 0,35 кВт·ч на 1000 м³ газа.

Вследствие затруднений при эксплуатации (повышенный износ, засорение, разбалансировка) вентиляторные пылеуловители не получили широкого распространения.

3.5 Улавливание пыли в циклонах

Циклон является одним из наиболее распространенных пылеулавливающих аппаратов. Однако с высокой эффективностью циклоны способны улавливать пыль только размером 15 - 20 мкм и более.

3.5.1. Принцип действия и основы теории циклона

Работа циклона основана на использовании центробежных сил, возникающих при вращении газового потока внутри корпуса циклона. Это вращение достигается путем тангенциального ввода газа в циклон. В результате действия центробежных сил частицы пыли, взвешенные в потоке газа, отбрасываются на стенки корпуса и выпадают из потока. Газ, освобожденный от пыли, продолжая вращаться, совершает поворот на 180° и выходит из циклона через расположенную по оси выхлопную трубу (рис. 3.7).

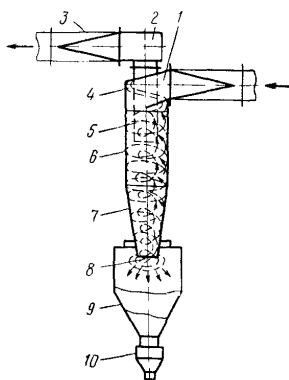


Рис. 3.7. Схема циклона: 1 – входной патрубок; 2 – раскручивающая улитка; 3 – выходной патрубок, 4 – крышка; 5 – выхлопная труба; 6 – цилиндрическая часть; 7 – коническая часть; 8 – пылевыпускное отверстие; 9 – бункер для пыли; 10 – пылевой затвор

Частицы пыли, достигшие стенок корпуса, под действием перемещающегося в осевом направлении вращающегося потока и сил тяжести движутся по направлению к выходному отверстию корпуса и выводятся из циклона. Ввиду того, что решающим фактором, обуславливающим движение пыли, являются аэродинамические силы, а не силы тяжести, циклоны можно располагать наклонно и даже горизонтально.

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

противления. Масса частицы обычно пренебрежимо мала. Скорость частиц пыли в циклоне можно считать равной скорости вращения газового потока.

Величина центробежной силы, действующей на частицу пыли массой M , равна

$$P_{ц} = \frac{M \cdot w_{\epsilon}^2}{R} = \frac{p \cdot d_n^3}{6} \cdot r_n \cdot \frac{w_{\epsilon}^2}{R}, \quad (3.18)$$

где R - радиус кривизны траектории в рассматриваемой точке.

Под влиянием центробежной силы частица приобретает скорость в радиальном направлении, встречая при своем движении сопротивление газового слоя.

Если рассматривать движение частицы в радиальном направлении для момента, когда сила сопротивления уравновесит центробежную силу, то, применяя закон Стокса, можно написать

$$\frac{p \cdot d_n^3}{6} \cdot r_n \cdot \frac{w_{\epsilon}^2}{R} = 3 \cdot p \cdot d \cdot m \cdot w_{np}. \quad (3.19)$$

Таким образом, предельная скорость, которой может достигнуть частица пыли в радиальном направлении, равна

$$w_{np} = \frac{d^2 \cdot r_n \cdot w_{\epsilon}^2}{18 \cdot R \cdot m}. \quad (3.20)$$

В связи с непрерывным перемещением частицы в радиальном направлении величина радиуса R , а следовательно, и величина предельной скорости непрерывно меняются и могут быть выражены производной dR/dt . Следовательно

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d^2 \cdot r_n \cdot w_{\epsilon}^2}{18 \cdot R \cdot m}. \quad (3.21)$$

После разделения переменных и интегрирования в пределах от R_1 до R_2 и от 0 до t получим

$$R_2^2 - R_1^2 = \frac{d^2 \cdot r_n \cdot w_\varepsilon^2}{9 \cdot m} \cdot t. \quad (3.22)$$

Откуда время прохождения частицей пути $R_2 - R_1$ равно, с

$$t = \frac{9 \cdot m}{d^2 \cdot r_n \cdot w_\varepsilon^2} \cdot (R_2^2 - R_1^2). \quad (3.23)$$

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

$$d = \frac{3 \cdot \sqrt{(R_2^2 - R_1^2) \cdot m}}{w_\varepsilon \cdot \sqrt{r_n \cdot t}} \quad (3.24)$$

Эффективность работы циклона возрастает с увеличением скорости газа w_ε , размера d и плотности частиц пыли и уменьшается с увеличением вязкости газа m и размеров циклона.

3.5.2. Типы циклонов и основные правила их эксплуатации

Наибольшее распространение получили циклоны Научно-исследовательского института очистки газов (НИИОгаз), показанные на рис. 3.8, а. Отличительной их особенностью является наклонный входной патрубок, сравнительно короткая цилиндрическая часть и выхлопная труба, а и также малый угол раскрытия конической части.

Наклон входного патрубка и винтообразная верхняя крышка способствуют направлению вращающегося газового потока вниз, что снижает гидравлическое сопротивление циклона. На выхлопной трубе циклона иногда устанавливают улитку, раскручивающую вращающийся газовый поток. Наклон

входного патрубка и крышки, равно как и установка улитки, снижает сопротивление циклона.

Под циклоном устанавливают бункер для сбора уловленной пыли. В конической части циклона пыль не должна скапливаться, во избежание взмучивания и вторичного уноса в выхлопную трубу.

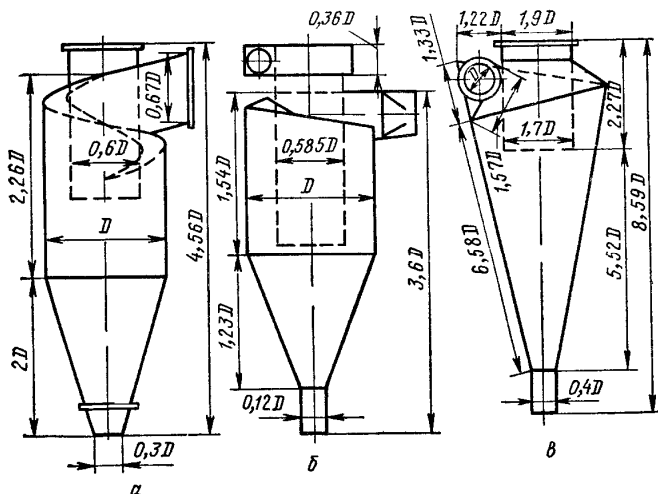


Рис. 3.8. Основные типы циклонов: а – циклон типа ЦН; б – циклон типа ЛИОТ; в – циклон типа СИОТ

Существует три типа циклона НИИОгаза основной серии ЦН, различающихся между собой углом наклона входного патрубка:

- ЦН-15 с углом наклона 15° , нормальный и укороченный (ЦН-15у);
- ЦН-11 с углом наклона 11° , повышенной эффективности с большим гидравлическим сопротивлением;
- ЦН-24 с углом наклона 24° , с повышенной пропускной способностью с меньшей эффективностью и гидравлическим сопротивлением.

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

Все циклоны НИИОгаза нормализованы. Любой из размеров каждого

типа может быть выражен в долях от диаметра циклона D .

Приняты следующие размеры диаметров, мм: 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; 2400; 3000. Вследствие снижения эффективности с увеличением размеров применять циклоны типа ЦН диаметром более 1000 мм не рекомендуется. В этом случае устанавливаются группа циклонов, работающих параллельно (рис. 3.9).

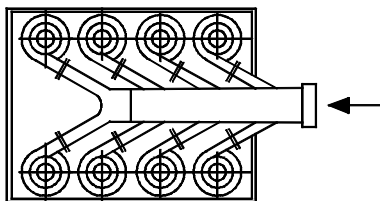


Рис. 3.9. Групповая компоновка циклонов

Основное требование, предъявляемое к компоновке циклонов в группу, заключается в необходимости одинаковых аэродинамических условий работы каждого циклона. При несоблюдении этого условия через одни циклоны проходит больше газа, через другие меньше и нормальная работа группы нарушается за счет перетоков газа через общий бункер.

Помимо циклонов НИИОгаза, достаточно широкое применение нашли циклоны институтов ЛИОТ (Ленинградский институт охраны труда) и СИОТ (Свердловский институт охраны труда), применяемые обычно в системах промышленной вентиляции.

Циклоны ЛИОТ (см. рис. 3.8, б) по сравнению с циклонами НИИОгаза имеют удлиненную цилиндрическую часть и глубоко введенную выхлопную трубу, а также больший угол раскрытия конической части.

Циклоны СИОТ (см. рис. 3.8, в) характеризуются полным отсутствием цилиндрической части и треугольной формой входного патрубка. Циклоны ЛИОТ и СИОТ также нормализованы, и любой их размер может быть выражен в долях диаметра.

По эффективности пылеулавливания циклоны ЛИОТ и СИОТ мало отличаются от циклонов НИИОгаза.

Циклоны НИИОгаза серии С (сажевые) типа СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34

(рис.3.10) отличаются улиточным вводом газа, удлиненной конической частью и меньшим диаметром выхлопной трубы.

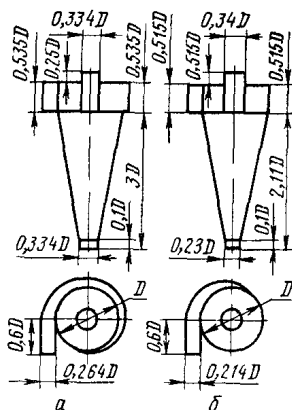


Рис. 3.10. Схемы конических циклонов:
а – СДК-ЦН-33; б – СК-ЦН-34

По сравнению с циклонами ЦН, они характеризуются не только значительно большим гидравлическим сопротивлением, но и гораздо более высокой эффективностью. Размеры циклонов СДК-ЦН-33 и СК-ЦН-34 намного превышают размеры циклонов серии ЦН диаметром до 3000 м.

Прямоточные одноходовые циклоны (рис. 3.11) широко распространены в качестве каплеуловителей в системах мокрой очистки газов.

Скоагулированная и укрупненная мокрая пыль повышенной плотности и капли жидкости улавливаются в таких аппаратах весьма эффективно при малом гидравлическом сопротивлении аппарата (отсутствует поворот на 180°). Для улавливания мелкой сухой пыли прямоточные циклоны практически не пригодны вследствие низкой эффективности.

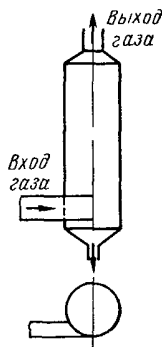


Рис. 3.11. Схема прямооточного циклона

Основные *правила эксплуатации циклонов* сводятся к следующему:

1. Необходимо следить, чтобы в конической части циклона не накапливалась пыль. Для сбора ее под циклоном предусматривают специальный бункер.

2. Подсос воздуха в нижней части циклона недопустим. Бункер для сбора пыли должен быть герметичным. Спуск пыли из бункера осуществляется через патрубок с двойным затвором - мигалкой, отрегулированной так, чтобы клапаны работали только поочередно.

3. Стандартные конструкции циклонов могут работать при температурах газа не выше 400°C и давлениях (разрежениях) не более 2,5 кПа

4. При работе на газе высокой температуры циклоны внутри футеруют огнеупорными плитками, а при температуре стенки ниже температуры точки росы ее покрывают снаружи изоляцией.

5. Начальная концентрация для неслипающихся пылей в циклонах диаметром 800 мм и более допускается до 400 г/м^3 . Для слипающихся пылей и циклонов меньших размеров концентрация пыли должна быть в 2 - 4 раза ниже.

6. Циклон должен работать с постоянной газовой нагрузкой. При значительных колебаниях расхода должны устанавливаться группы циклонов с возможностью отключения отдельных элементов.

7. Рекомендуется установка циклонов перед вентиляторами, чтобы последние работали на очищенном газе и не подвергались абразивному износу.

Таблица 3.2

Значения коэффициента κ_1

D , м	150	200	300	400	500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15; ЦН-15у; ЦН-24	0,85	0,90	0,93	1,0	1,0

Таблица 3.3

Значения коэффициента κ_2

Тип циклона	Начальная запыленность, г/м ³						
	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	0,97	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

Плотность газов при рабочих условиях, кг/м³, находят по формуле

$$r_z = r_o \cdot \frac{273 \cdot (P_{бар} \pm P_z)}{(273 + T_z) \cdot 101,3 \cdot 10^3}, \quad (3.27)$$

где r_o - плотность газа при нормальных условиях ($t_e = 0^\circ\text{C}$ и $P_{бар} = 101,3 \text{ кПа}$), кг/м³;

$P_{бар}$ - барометрическое давление, Па;

P_z - избыточное давление (разрежение) газа на входе в циклон, Па;

T_z - температура газов на входе в циклон, $^\circ\text{C}$.

Если дана плотность газов при нормальных условиях, то плотность влажных газов при тех же условиях равна, кг/м³

$$r_o = \frac{(r_{oc} + y) \cdot 0,804}{0,804 + y}, \quad (3.28)$$

где y - влагосодержание газа, кг/м³.

Скорость газа в циклоне равна расходу газа при рабочих условиях V , отнесенному к полному поперечному сечению циклона F , м/с:

$$w_{\text{ц}} = \frac{V}{F} = \frac{V_o}{F} \cdot \frac{(273 + T_c) \cdot 101,3 \cdot 10^3}{273 \cdot (P_{\text{бар}} + P_c)}. \quad (3.29)$$

Скорость газа в циклоне не должна отличаться более чем на $\pm 15\%$ от оптимальной скорости газа $w_{\text{опт}}$ в циклоне. Значения оптимальной скорости газа для различных типов циклонов приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Значения оптимальной скорости газа в циклоне

Тип циклона	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15у	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34
Оптимальная скорость $w_{\text{опт}}$, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7

При скоростях $w_{\text{ц}}$, выходящих за указанные пределы в большую сторону, превышает допустимый расход энергии, в меньшую сторону – понижается эффективность.

3.5.4. Расчет эффективности циклонов

Полученные выше теоретические уравнения (3.23) и (3.24) позволяют проследить качественное влияние различных факторов на эффективность циклонного процесса.

Расчет циклонов по теоретическим формулам практически невозможен. Большой опыт, накопленный при испытаниях в промышленных условиях и на специальных стендах, позволил разработать методы расчета циклонов, основанные на полученных экспериментальных данных. Для облегчения расчетов широко используют графические методы с применением специально построенных графиков и номограмм.

Расчет эффективности по методике НИИОгаза

В вероятностно-логарифмических координатах дисперсный состав

большинства пылей аппроксимируется прямой линией и характеризуется двумя параметрами – среднемедианным размером d_m и среднеквадратичным отклонением $\lg \sigma_n$ функции распределения. **Среднемедианный размер d_m** представляет собой такой размер частицы, при котором суммарная масса всех частиц размером более d_m равна суммарной массе размером менее d_m . Среднеквадратичное отклонение $\lg \sigma_n$ находят из следующего соотношения, которое является свойством интеграла вероятности

$$\lg s_n = \lg \frac{d_m}{d_{84,1}} = \lg \frac{d_{15,9}}{d_m}, \tag{3.30}$$

где $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$ - абсциссы точек, ординаты которых имеют значения 84,1 и 15,9 % и определяются по заданному распределению пыли по размерам (рис. 3.12).

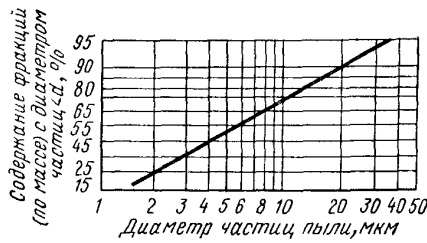


Рис. 3.12. График распределения частиц пыли по размерам

Кривые парциальной эффективности циклонов также могут быть охарактеризованы двумя аналогичными параметрами d_{50}^T и $\lg \sigma_\eta^T$, численные значения которых для различных типов циклонов НИИОГаза могут быть приняты согласно таблице 3.5.

Таблица 3.5

Значения параметров d_{50}^T и $\lg \sigma_\eta^T$

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-15у	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34
d_{50}^T	8,5	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95
$\lg s_h^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308

Приведенные данные соответствуют следующим условиям работы циклонов: скорость газа $\omega_g = 3,5 \text{ м/с}$; диаметр циклона $D_T = 0,6 \text{ м}$; плотность частицы пыли $\rho_{п.т.} = 1930 \text{ кг/м}^3$; динамический коэффициент вязкости газа $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н·с/м}^2$.

На основании математической обработки уравнения для вероятностных функций было получено следующее выражение для полного коэффициента очистки циклона, %

$$h = 50 \cdot [1 + \Phi(x)]. \quad (3.31)$$

Величина x применительно к циклонам может быть вычислена по следующей формуле

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 s_h + \lg^2 s_n}}. \quad (3.32)$$

Численное значение функции $\Phi(x)$ находят в зависимости от величины x по табл. 3.6.

Входящая в формулу (3.32) величина d_{50} представляет собой размер частиц, осажденных при фактических условиях работы выбранного циклона, с эффективностью 50 %. Эта величина может быть найдена из выражения, мкм

$$d_{50} = d_{50}^T \cdot \sqrt{\frac{D}{D_T} \cdot \frac{r_{п.т.}}{r_{п.}} \cdot \frac{m}{m_T} \cdot \frac{w_T}{w}}, \quad (3.33)$$

где D_T , $\rho_{п.т.}$, μ_T , ω_T - параметры, соответствующие условиям, при которых получены значения d_{50}^T и $\lg \sigma_{\eta}^T$;

D , $\rho_{п.}$, μ , ω_T - параметры, соответствующие фактическим условиям работы циклона.

Таблица 3.6

Значения нормальной функции распределения

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6	7	8
-2,7	0,0035	-1,06	0,1446	0	0,5	1,08	0,8599
-2,6	0,0047	-1,04	0,1492	0,02	0,508	1,1	0,8643
-2,5	0,0062	-1,02	0,1539	0,04	0,516	1,12	0,8686
-2,4	0,0082	-1	0,1587	0,06	0,5239	1,14	0,8729
-2,3	0,0107	-0,98	0,1635	0,08	0,5319	1,16	0,877
-2,2	0,0139	-0,96	0,1685	0,1	0,5398	1,18	0,881
-2,1	0,0179	-0,94	0,1736	0,12	0,5478	1,2	0,8849
-2	0,0228	-0,92	0,1788	0,14	0,5557	1,22	0,8888
-1,98	0,0239	-0,9	0,1841	0,16	0,5636	1,24	0,8925
-1,96	0,025	-0,88	0,1894	0,18	0,5741	1,26	0,8962
-1,94	0,0262	-0,86	0,1949	0,2	0,5793	1,28	0,8997
-1,92	0,0274	-0,84	0,2005	0,22	0,5871	1,3	0,9032
-1,9	0,0288	-0,82	0,2061	0,24	0,5948	1,32	0,9066
-1,88	0,0301	-0,8	0,2119	0,26	0,6026	1,34	0,9099
-1,86	0,3014	-0,78	0,2177	0,28	0,6103	1,36	0,9131
-1,84	0,0329	-0,76	0,2236	0,3	0,6179	1,38	0,9162
-1,82	0,0344	-0,74	0,2297	0,32	0,6255	1,4	0,9192
-1,8	0,0359	-0,72	0,2358	0,34	0,6331	1,42	0,9222
-1,78	0,0375	-0,7	0,242	0,36	0,6406	1,44	0,9251
-1,76	0,0392	-0,68	0,2483	0,38	0,648	1,46	0,9279
-1,74	0,0409	-0,66	0,2546	0,4	0,6554	1,48	0,9306
-1,72	0,0427	-0,64	0,2611	0,42	0,6628	1,5	0,9332
-1,7	0,0446	-0,62	0,2676	0,44	0,67	1,52	0,9357
-1,68	0,0465	-0,6	0,2743	0,46	0,6772	1,54	0,9382
-1,66	0,0485	-0,58	0,281	0,48	0,6844	1,56	0,9406
-1,64	0,0505	-0,56	0,2877	0,5	0,6915	1,58	0,9429
-1,62	0,0526	-0,54	0,2946	0,52	0,6985	1,6	0,9452
-1,6	0,0548	-0,52	0,3015	0,54	0,7054	1,62	0,9474
-1,58	0,0571	-0,5	0,3085	0,56	0,7123	1,64	0,9495
-1,56	0,0594	-0,48	0,3156	0,58	0,719	1,66	0,9515
-1,54	0,0618	-0,46	0,3228	0,6	0,7257	1,68	0,9535
-1,52	0,0643	-0,44	0,33	0,62	0,7324	1,7	0,9554
-1,5	0,0668	-0,42	0,3372	0,64	0,7389	1,72	0,9573
-1,48	0,0694	-0,4	0,3446	0,66	0,7454	1,74	0,9591
-1,46	0,0721	-0,38	0,352	0,68	0,7517	1,76	0,9608
-1,44	0,0749	-0,36	0,3594	0,7	0,758	1,78	0,9625
-1,42	0,0778	-0,34	0,3669	0,72	0,7642	1,8	0,9641
-1,4	0,0808	-0,32	0,3745	0,74	0,7703	1,82	0,9656
-1,38	0,0838	-0,3	0,3821	0,76	0,7764	1,84	0,9671

Продолжение табл. 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8
-1,36	0,0869	-0,28	0,3897	0,78	0,7823	1,86	0,9686
-1,34	0,0901	-0,26	0,3974	0,8	0,7881	1,88	0,9699
-1,32	0,0934	-0,24	0,4052	0,82	0,7939	1,9	0,9713
1,28	0,1003	-0,22	0,4129	0,84	0,7995	1,92	0,9726
1,3	0,1038	-0,2	0,4207	0,86	0,8051	1,94	0,9738
1,32	0,1075	-0,18	0,4286	0,88	0,8106	1,96	0,975
1,34	0,1112	-0,16	0,4364	0,9	0,8159	1,98	0,9761
1,36	0,1151	-0,14	0,4443	0,92	0,8212	2	0,9772
1,38	0,119	-0,12	0,4522	0,94	0,8264	2,1	0,9821
1,4	0,123	-0,1	0,4602	0,96	0,8315	2,2	0,9861
1,42	0,1271	-0,08	0,4681	0,98	0,8365	2,3	0,9893
1,44	0,1314	-0,06	0,4765	1	0,8413	2,4	0,9918
1,46	0,1357	-0,04	0,484	1,02	0,8461	2,5	0,9938
1,48	0,1401	-0,02	0,492	1,04	0,8508	2,6	0,9953
				1,06	0,8554	2,7	0,9965

3.5.5. Батарейные циклоны

Для объединения в группы обычные циклоны плохо приспособлены. Потому групповая компоновка их ограничена и конструктивно весьма несовершенна. Даже при создании группы из восьми циклонов ЦН-15 ее пропускная способность не превысит $50\,000\text{ м}^3/\text{ч}$, что часто недостаточно.

В связи с этим возникла необходимость в простых циклонных элементах небольшого диаметра, т. е. имеющих высокий коэффициент очистки и приспособленных для объединения в большие группы с высокой пропускной способностью.

Для этого применяют циклонные элементы с диаметром цилиндрической части корпуса 100, 150, 250 мм. В целях удобства объединения и компактности установки придание газовому потоку вращения достигается в них обычно не тангенциальным подводом газа, а размещением внутри циклонного элемента специального устройства, представляющего собой либо двухлопастной винт, либо розетку, состоящую из лопаток, установленных под углом к оси 25 - 30° (рис. 3.13, а, б). Розетки работают эффективнее, однако они чувствительнее к засорению и поэтому не рекомендуются при чрезмерно высокой запыленности газа и слипающейся пыли.

Циклонные элементы komponуют в батареи, где они работают параллельно (рис. 3.13, в). Очищаемые газы вводятся через входной патрубок в общую распределительную камеру, откуда распределяются по отдельным

элементам. Далее из сборной камеры очищенный газ по выходному патрубку, направленному вверх или в сторону, выводится из аппарата. Во избежание абразивного износа наружной поверхности выхлопных труб частицами пыли, взвешенными в грязном газе, поступающем в распределительную камеру, на выхлопных трубах первых рядов укрепляют специальные защитные щитки, выполненные из половинок труб несколько большего диаметра.

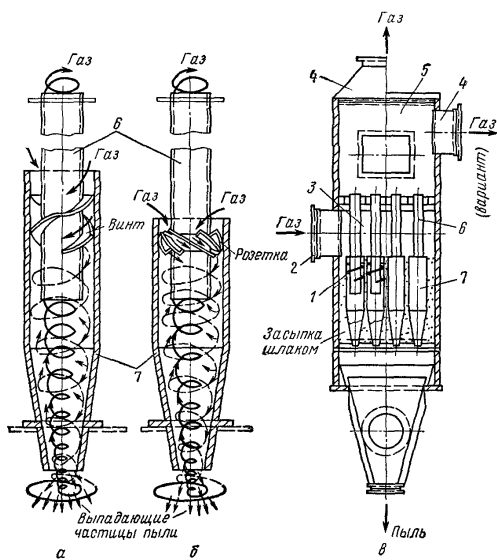


Рис. 3.13. Батарейный циклон: а – элемент с завихрителем «винт»; б – элемент с завихрителем «розетка»; в – общий вид: 1 – завихряющее устройство; 2 – входной патрубок; 3 – распределительная камера; 4 – выходной патрубок; 5 – выходная камера; 6 – выхлопные трубы; 7 – циклонные элементы

Пыль, осаждающаяся в циклонных элементах, ссыпается в общий для всех циклонных элементов бункер. Пространство между циклонными элементами засыпается шлаком.

Большое число циклонных элементов, объединенных общим пылевым бункером, заставляет обращать особое внимание на равномерное распределение газа по циклонным элементам. Последние должны быть строго одинаковыми.

вых размеров, смонтированы с одинаковыми допусками и одинаковым гидравлическим сопротивлением.

Число циклонных элементов, объединенных общим пылевым бункером, не должно превышать 8 в ряду по ходу газов и 12 в ряду, перпендикулярном ходу газов.

При устройстве в бункере поперечной перегородки, ограничивающей перетекание газов, число элементов может быть увеличено до 10 в ряду по ходу газов и до 16 в ряду, перпендикулярном ходу газов.

Для равномерного распределения газа по элементам подвод к распределительной камере следует осуществлять с помощью диффузора с углом раскрытия не более 15° , с шириной входа, равной ширине камеры. Высота распределительной камеры определяется из условия, что скорость газов в живом сечении первого по ходу газов ряда труб не должна превышать 10 - 14 м/с.

Неравномерное распределение газа по циклонным элементам приводит к перетеканию газа из одних элементов в другие через общий пылевой бункер. Подсос в слабозагруженные элементы газа из бункера резко ухудшает процесс осаждения в них пыли. Кроме того, неравномерное распределение газа по элементам создает предпосылки для забивания пылью завихряющихся устройств.

Расчет батарейных циклонов в принципе аналогичен расчету группы обычных циклонов. Сначала в зависимости от запыленности и свойств пыли выбирают диаметр циклонного элемента D . При большой начальной запыленности и слипающейся пыли принимают элементы больших диаметров.

Условную скорость, м/с, газа в циклоне определяют из уравнения

$$\Delta P = x \cdot \frac{w_y^2}{2} \cdot r_z, \quad (3.34)$$

откуда

$$w_y = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{x \cdot r_z}}, \quad (3.35)$$

где x - коэффициент сопротивления;

r_z - плотность газа при рабочих условиях, кг/м^3 .

Для винтовых завихрителей $\chi = 85$; для розеточных при α равных 30° и 25° , χ равно 65 и 90 соответственно.

Для батарейных циклонов при χ , равном 85 - 90 и 65, оптимальные значения скорости $w_{\text{ц}}$ составляют 3,85 и 4,5 м/с соответственно. Величина условной скорости газа при рабочих условиях не должна отклоняться от оптимальной более чем на $\pm 15\%$. По условной скорости определяют расход газа через один циклонный элемент

$$V_1 = w_{\text{ц}} \cdot \frac{p \cdot D^2}{4} \quad (3.36)$$

Необходимое число циклонных элементов находят из выражения

$$n = \frac{V_{\text{с}}}{V_1} \quad (3.37)$$

Эффективность батарейных циклонов находят с помощью кривой парциальных коэффициентов очистки по заданному дисперсному составу пыли.

Наиболее частыми причинами нарушения нормальной работы батарейных циклонов являются: засорение завихривающих устройств отдельных циклонных элементов, а также прохождение газов мимо циклонных элементов вследствие износа выхлопных труб или нарушения герметичности опорных решеток. И та, и другая причины вызывают изменение сопротивления циклона.

Эффективность батарейных циклонов в условиях промышленной эксплуатации обычно та же, что и у одиночных циклонов.

Преимущества батарейных циклонов:

- батарейные циклоны могут быть рассчитаны на большой расход газов, который слишком велик для установки группы одиночных циклонов;
- при одном и том же расходе газа батарейный циклон значительно компактнее группы одиночных циклонов.

Недостатки батарейных циклонов:

- повышенная металлоемкость, 200 - 500 кг металла на очистку $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ газа, т. е. примерно вдвое больше, чем у одиночных циклонов;

- меньшая надежность в эксплуатации из-за возможности неравномерного распределения газа между циклонными элементами и подсоса воздуха через общий бункер;
- засорение завихряющего устройства при начальной запыленности газа более 100 г/м^3 .

3.6. Очистка газов фильтрацией

3.6.1. Общие сведения о процессе фильтрации

В основе работы пористых фильтров всех видов лежит фильтрация запыленного газа через пористую перегородку, в процессе которой частицы пыли, взвешенные в газе, задерживаются перегородкой, а газ беспрепятственно проходит сквозь нее.

Пористые фильтры могут весьма полно и эффективно задерживать частицы пыли любых размеров и, как правило, отличаются высокой эффективностью.

В зависимости от вида, структуры и условий работы пористой перегородки уловленные частицы пыли либо осаждаются на стенках поровых каналов, накапливаясь во всем объеме, занимаемом пористой перегородкой, либо образуют на лобовой поверхности перегородки пылевой слой, являющийся высокоэффективной фильтрующей средой.

В обоих случаях скорость процесса фильтрации определяется перепадом давления на пористой перегородке, создаваемом вентилятором или другим побудителем тяги. По мере накопления уловленных частиц сопротивление движению газа непрерывно возрастает, в связи с чем при сохранении постоянного перепада давления на пористой перегородке скорость фильтрации непрерывно уменьшается. Наоборот, для поддержания постоянной скорости фильтрации необходимо непрерывно увеличивать перепад давления на пористой перегородке. В обоих случаях при достижении некоторого предельного сопротивления перегородку приходится подвергать регенерации, т. е. освобождению от уловленной пыли.

Применяемые пористые перегородки по своей структуре и свойствам весьма разнообразны. Они могут представлять собой зернистые слои, металлические сетки, керамику и металлокерамику, волокнистые материалы, бумагу, ткани.

Размеры поровых каналов в фильтрующей перегородке обычно во много раз превышают размеры улавливаемых частиц пыли, поэтому фильтрацию нельзя рассматривать как процесс просеивания через какое-то сито. Улавливание частиц, проникающих вглубь, происходит за счет осаждения их на стенках каналов, образованных твердыми элементами пористой перегородки, где они удерживаются силами адгезии.

Процесс фильтрации можно условно разделить на две стадии. На первой начальной стадии (**стационарная фильтрация**) осажденные частицы накапливаются внутри пористой перегородки в незначительном количестве, что практически не меняет ее структуры. На второй стадии процесса (**нестационарная фильтрация**) вследствие большого количества осажденных частиц пористая перегородка претерпевает непрерывные структурные изменения.

В соответствии с этим все время изменяется гидравлическое сопротивление и эффективность работы фильтра, что крайне осложняет течение процесса фильтрации и связанные с этим расчеты. В условиях эксплуатации большинства промышленных фильтров определяющее значение имеет именно нестационарная фильтрация.

3.6.2. Характеристики пористой перегородки

Основным свойством пористой перегородки является **пористость** e , представляющая собой отношение пустого пространства (объема пор) между твердыми непроницаемыми элементами пористой среды к общему объему, занятому пористой средой. Величину объема твердых элементов фильтрующей перегородки, заключенную в единице объема пористой среды, называют **плотностью упаковки** a .

Пористость фильтрующей среды или плотность упаковки при отсутствии закрытых пор внутри фильтрующих элементов можно определить из выражения

$$e = \frac{r_{\text{э}} - r_{\text{ф}}}{r_{\text{э}}} = 1 - a, \quad (3.38)$$

где $r_{\text{э}}$ - плотность материала элементов фильтрующей среды;

$r_{\text{ф}}$ - кажущаяся плотность фильтрующей среды.

Относительное живое сечение всех поровых каналов, по которым движется аэрозоль, численно равна пористости фильтрующей перегородки e . Общая поверхность всех поровых каналов равна суммарной поверхности фильтрующих элементов S в единице объема фильтрующего слоя.

Эффективный диаметр пор уменьшается с уменьшением размеров твердых частиц (при $e = const$).

Под **скоростью фильтрации**, w_ϕ , м/с понимают условную скорость, получаемую как отношение объемного расхода газа V_e , проходящего через фильтр, к полной площади фильтрующей перегородки F . Численно скорость фильтрации равна газовой нагрузке фильтра, т. е. объему газа, проходящего через единицу поверхности фильтра в единицу времени, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Фактическая скорость в поровых каналах существенно больше скорости фильтрации w_ϕ и зависит от пористости фильтрующей перегородки e

$$w'_e = \frac{w_\phi}{e}. \quad (3.39)$$

Важной характеристикой пористой перегородки является **пылеемкость**, которая представляет собой количество пыли, задерживаемое фильтром за период непрерывной работы, т. е. между двумя очередными регенерациями.

Критерием пылеемкости является интенсивность роста удельного сопротивления

$$j = \frac{(\Delta P_2 - \Delta P_1)}{M_1}, \quad (3.40)$$

где $\Delta P_1, \Delta P_2$ - начальное и конечное сопротивление фильтра, Па;

M_1 - удельная запыленность фильтра, $\text{кг}/\text{м}^2$;

$M_1 = M/F$ - количество уловленной пыли, кг ; F - рабочая поверхность фильтра, м^2 .

При заданном предельном сопротивлении ΔP_2 пылеемкость фильтра рассчитывают по формуле

$$M = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{j} \cdot F. \quad (3.41)$$

При улавливании мелких частиц пылеемкость фильтра оказывается всегда меньше, чем при улавливании крупной пыли.

3.6.3. Механизмы процесса фильтрации

Осаждение частиц пыли на твердых элементах пористой перегородки происходит в силу различных факторов, вызывающих столкновение движущейся в потоке частицы пыли с элементами фильтрующего слоя. Эффективность действия того или иного механизма осаждения определяется коэффициентом захвата.

Для одиночного изолированного фильтрующего элемента коэффициент захвата определяется как отношение площади сечения F_n набегающего потока, из которого все частицы полностью осаждаются на элементе, к площади проекции фильтрующего элемента F_g на плоскость, нормальную к направлению движения потока

$$h_z = \frac{F_n}{F_g}. \quad (3.42)$$

Для аналитического определения коэффициентов захвата необходимо использовать данные о поле скоростей при обтекании фильтрующего элемента. Такие данные имеются только для тел простейшей формы — шара, пластины, цилиндра. В большинстве случаев коэффициенты захвата определяют по формулам, использующим как теоретические, так и экспериментальные данные.

При определении коэффициентов захвата считают, что частица пыли, коснувшись фильтрующего элемента, удерживается на нем.

Механизм касания (прямого зацепления). Если частица движется по линии, проходящей около твердого элемента фильтра на расстоянии, меньшем радиуса частицы или равном ему, она непременно коснется этого элемента и удержится на нем (рис. 3.14).

Определяющим параметром эффекта касания является отношение размера частицы r к размеру твердого элемента фильтра r_o

$$R = \frac{r}{r_o}. \quad (3.43)$$

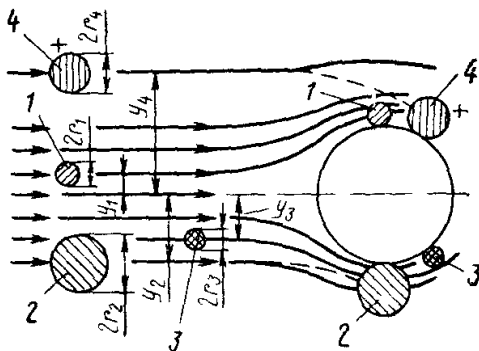


Рис. 3.14. Механизмы процесса фильтрации: 1- механизм касания; 2 – инерционный механизм; 3- диффузионный механизм; 4 - электростатический механизм

Рассматривая обтекание одиночного цилиндра потоком газа, применительно к волокнистым фильтрам можно получить формулы для определения коэффициента захвата за счет касания:

а) для вязкого обтекания

$$h'_R = \frac{1}{2 \cdot (2 - \ln \text{Re})} \cdot \left[2 \cdot (1 + R) \cdot \ln(1 + R) - (1 + R) + \frac{1}{1 + R} \right]; \quad (3.44)$$

б) для потенциального обтекания

$$h'_R = (1 + R) - \frac{1}{1 + R}, \quad (3.45)$$

где Re — число Рейнольдса, отнесенное к обтекаемому цилиндру.

Инерционный механизм. Механизм захвата за счет инерции тем эффективнее, чем выше скорость фильтрации и больше масса частицы. При обтекании твердого элемента фильтра цилиндра (волокна) или шара (зерна) линии тока искривляются, а частица пыли, стремясь, в силу инерции, сохранить движение прямолинейным, смещается с линии тока и направляется к поверхности твердого элемента, на котором и оседает (см. рис. 3.14). Определяющим параметром инерционного осаждения является критерий Стокса, характеризующий отношение инерционной силы, действующей на частицу, к силе сопротивления среды

$$Stk = \frac{d^2 \cdot w \cdot r_n}{18 \cdot m \cdot d_o}, \quad (3.46)$$

где d - диаметр частицы, м;

w - скорость обтекания препятствия, м/с;

r_n - плотность пыли, кг/м³;

m - вязкость газа, Н·с/м²;

d_o - определяющий размер твердого элемента фильтра, м.

Коэффициент захвата за счет инерции для одиночного цилиндра (волокна) можно выразить следующей формулой

$$h'_{Stk} = \frac{Stk^3}{Stk^3 + 1,54 \cdot Stk^2 + 1,76}. \quad (3.47)$$

При эксплуатации промышленных фильтров в большинстве случаев для частиц размером >1 мкм инерционный механизм захвата имеет решающее значение.

Диффузионный механизм. За счет неуравновешенных ударов молекул, находящихся в броуновском движении, происходит смещение мелких частиц аэрозоля с линий тока и осаждение их на обтекаемых препятствиях. Чем меньше частицы и меньше скорость течения, тем резче выражен этот эффект. Средний квадрат теплового смещения частицы в данном направлении $\overline{x^2}$ за время t пропорционален коэффициенту диффузии D_o и определя-

ется уравнением Эйнштейна

$$\overline{x^2} = 2 \cdot D_o \cdot t. \quad (3.48)$$

Коэффициент диффузии D_o резко уменьшается с увеличением размеров частиц, вследствие чего диффузионный эффект достаточно значителен для частиц размером менее 0,1 мкм.

Коэффициента захвата за счет молекулярной диффузии для одиночного цилиндра (волокна) можно определить по следующему выражению

$$h'_D \approx 2,16 \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot (2 - \ln \text{Re})} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \text{Pe}^{-\frac{2}{3}}, \quad (3.49)$$

где Pe - критерий Пекле, характеризующий относительную роль конвекции и диффузии в подводе частицы к поверхности цилиндра и выводе её из движущегося потока аэрозоля.

$$\text{Pe} = \frac{2 \cdot r_o \cdot w}{D}. \quad (3.50)$$

Величина, обратная критерию Пекле, $D = 1/\text{Pe}$, называется диффузионным параметром.

Из приведенных уравнений вытекает, что эффективность диффузионного осаждения возрастает с уменьшением размеров частиц и скорости фильтрации.

Гравитационный механизм. Захват частиц может осуществляться за счет осаждения их под действием силы тяжести. Коэффициент захвата для одиночного горизонтально расположенного поперек потока цилиндра при вертикально направленном потоке газа может быть определен из выражения

$$h'_G = \frac{w_s}{w} = \frac{r^2 \cdot w \cdot r_n \cdot C}{9 \cdot m \cdot r_o} \cdot \frac{2 \cdot r_o \cdot g}{w^2} = \frac{Stk}{Fr} = G, \quad (3.51)$$

где w_s - установившаяся скорость падения частицы;

w - скорость газового потока;

Fr - критерий Фруда, характеризующий соотношение инерцион-

ных и гравитационных сил; $Fr = w^2 / (2 \cdot r_o \cdot g)$;

g - ускорение свободного падения; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

C - постоянный коэффициент;

G - седиментационный параметр.

При горизонтальном течении газа

$$h'_G = G^2. \quad (3.52)$$

В обычных условиях промышленной фильтрации гравитационный механизм играет очень незначительную роль и становится заметным лишь при очень низких скоростях фильтрации ($< 0,05 \text{ м/с}$).

Электростатический механизм. В случае если волокно фильтра несет электростатический заряд или поляризовано внешним электрическим полем, оно создает вокруг себя неравномерное электрическое поле. Нейтральные частицы пыли поляризуются этим полем и притягиваются к поверхности волокна, причем знак заряда волокна в этом случае роли не играет.

Формула для определения коэффициента захвата для этого случая имеет вид

$$h'_E = \frac{E_o^2 \cdot r^2}{6 \cdot w \cdot m \cdot r_o}, \quad (3.53)$$

где E_o - напряженность электрического поля у поверхности волокна.

Коэффициент электростатического захвата растет с увеличением напряженности поля E и размера частиц r и уменьшается с возрастанием скорости фильтрации.

Суммарный коэффициент захвата. При обтекании одиночного цилиндра в той или иной степени могут проявляться все рассмотренные выше механизмы осаждения. Однако простое суммирование коэффициентов захвата по различным механизмам не дает точных результатов, так как не учитывает влияния одновременного действия нескольких механизмов на общий коэффициент захвата.

Наилучшие результаты получаются при вычислении суммарного коэффициента захвата из выражения

$$h'_{\Sigma} = 1 - (1 - h'_R) \cdot (1 - h'_{Stk}) \cdot (1 - h'_D) \cdot (1 - h'_G) \cdot (1 - h'_E). \quad (3.54)$$

В конкретных условиях суммарный коэффициент захвата h'_{Σ} определяют по наиболее вероятным механизмам осаждения, для которых величина h' максимальна. Остальными второстепенными механизмами осаждения в первом приближении можно пренебречь.

3.7. Типы фильтров

2.7.1. Волокнистые фильтры

Волокнистыми фильтрами называют пористые перегородки, составленные из беспорядочно расположенных, однако более или менее равномерно распределенных по объему волокон, каждое из которых принимает участие в осаждении аэрозольных частиц.

Общие свойства волокнистых фильтров. В связи с высокой пористостью ($a \leq 0,1$) аэрозольные частицы легко проникают в глубину пористой перегородки и фильтрация их осуществляется всем объемом загрузки фильтра.

Регенерация отработавших волокнистых фильтров в большинстве случаев затруднена и нерентабельна. По окончании срока службы отработавшую фильтрующую среду заменяют новой. Вследствие этого волокнистые фильтры применяют главным образом для фильтрации слабозапыленных потоков с концентрацией пыли не более 5 мг/м^3 . Волокнистые фильтры широко применяют для очистки атмосферного воздуха в системах приточной вентиляции, кондиционирования и воздушного отопления, а также в ряде установок специального назначения.

Для создания фильтрующих перегородок используют как естественные, так и специально изготовленные волокна толщиной $0,01 - 100 \text{ мкм}$, например, отходы текстильного производства, шлаковую вату, целлюлозно-асбестовые волокна, стекловолокно, волокна из кварца, базальта, графита, различных металлов, алюмоборосиликатов, полимеров и т.п.

Гидравлическое сопротивление волокнистых фильтров. В пределах ламинарного режима движения $Re = 0,5 \div 1,0$ сопротивление фильтра Δp прямо пропорционально скорости фильтрации.

$$\Delta p = \frac{\Delta p_1 \cdot w_{\phi}}{w_1}, \quad (3.55)$$

где Δp_1 - сопротивление фильтра при скорости $w_1 = 1$ м/с, называемое стандартным, Н/м²;

w_{ϕ} - скорость фильтрации, см/с.

3.7.2. Тканевые фильтры

Наиболее распространенным типом тканевого фильтра является рукавный фильтр (рис.3.16, а). Главным элементом такого фильтра является рукав, изготовленный из фильтровальной ткани. Корпус фильтра разделен на несколько герметизированных камер, в каждой из которых размещено по несколько рукавов.

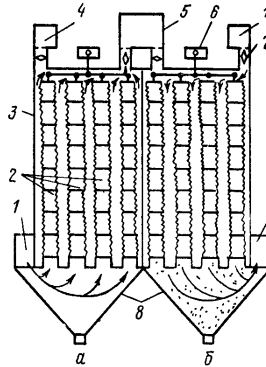


Рис. 3.16. Схема рукавного фильтра: 1- газопровод грязного газа; 2 – рукава; 3 – корпус секции; 4 – воздухопровод продувочного воздуха; 5 – газопровод чистого газа; 6 – механизм встряхивания; 7 – клапан; 8 – бункер

Газ из газопровода грязного газа подводится в нижнюю часть каждой камеры и поступает внутрь рукавов. Фильтруясь через ткань, газ проходит в камеру и через открытый выпускной клапан выходит из нее, поступая в газопровод чистого газа. Частицы пыли, содержащиеся в грязном газе, оседают на внутренней поверхности рукава, в результате чего сопротивление рукава про-

ходу газа постепенно увеличивается. Когда оно достигнет некоторого предельного, по условиям тяги, значения, фильтр переводится на режим регенерации (рис. 3.16, б), т. е. рукава освобождаются от осевшей на них пыли. Наиболее часто регенерация осуществляется обратной продувкой. Продувочный воздух от специального вентилятора направляют внутрь камеры, через открытый продувочный клапан (выпускной клапан закрыт). Фильтруясь через рукав в обратном направлении, он разрушает слой пыли, образовавшийся на внутренней поверхности рукава, которая падает в бункер, откуда удаляется при помощи шнека или другого устройства. Отработавший продувочный воздух через подводящий газ патрубок поступает в газопровод грязного газа. В целях повышения эффективности регенерации одновременно встряхивают рукава с помощью специального встряхивающего механизма, перемещающего вверх и вниз крышку, к которой крепится рукав.

Камеры фильтра переводят на регенерацию по очереди и, следовательно, фильтр в составе $n - 1$ камер все время находится в работе.

Движение запыленного газового потока через ткань. При проходе газа через чистую ткань, т. е. в начальный период работы фильтра, происходит осаждение частиц пыли на волокнах ткани. Захват частиц волокнами происходит за счет действия описанных ранее механизмов касания, инерции, диффузии, гравитации и электростатического взаимодействия. Далее, вследствие того, что плотность упаковки у ткани значительно выше, чем у волокнистых фильтров, на лобовой стороне фильтра начинает формироваться сплошной слой из частиц пыли, которые не могут проникнуть в глубь ткани.

Образующийся вторичный лобовой слой (автослой) начинает сам задерживать поступающие частицы, в результате чего толщина его постепенно возрастает, и он становится главной фильтрующей средой. Поскольку поры, образующиеся между частицами лобового слоя, и сами улавливаемые частицы имеют близкие размеры, значительную роль начинает играть ситовый эффект.

Снижение эффективности фильтра всегда связано с динамическим пробоем этого слоя и проскоком пыли в местах разрушения слоя, образования трещин, а также с наличием крупных пор в фильтрующем материале, где слой пыли вообще не может образоваться. Возникновение трещин и разрушение пылевого слоя могут происходить непосредственно в ходе процесса фильтрации в результате пульсаций газового потока и микровибрации промышленной установки.

Всякое увеличение внешних сил, действующих на систему, в частности рост перепада давления на фильтре, способствует возникновению динамических пробоев слоя.

Оптимальные значения скорости фильтрации в тканевых фильтрах лежат в пределах 0,5 - 1,0 м/мин. При больших скоростях фильтрации эффективность тканевых фильтров снижается вследствие выноса пылевых частиц, а гидравлическое сопротивление становится чрезмерно высоким. При меньших скоростях фильтрации необходимая поверхность фильтра возрастает.

С течением времени гидравлическое сопротивление и эффективность фильтра также непрерывно увеличиваются.

В процессе регенерации, как гидравлическое сопротивление, так и эффективность фильтра снижаются. Поэтому при регенерации следует разрушать и удалять пылевой слой, оставляя проникшую внутрь пыль в порах ткани. Для этого обратную продувку ведут при невысоких скоростях, соизмеримых со скоростями фильтрации.

Для технических расчетов тканевых рукавных фильтров И. Л. Пейсаховым и др. предложена формула, позволяющая найти гидравлическое сопротивление фильтра Δp , Па, в любой момент времени t от включения фильтра в работу

$$\Delta p = \frac{817 \cdot \mu \cdot w_f \cdot (1 - e_n)}{d_m^2 \cdot e_n^3} \cdot \left(\frac{581 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - e_n) \cdot d_m^{0,23}}{e_T^{3,24}} + \frac{Z_1 \cdot w_f \cdot t}{c_n} \right), \quad (3.56)$$

где w_f - скорость фильтрации, м³/(м²·с);

μ - динамический коэффициент вязкости газа, Н·с/м²;

e_n - пористость слоя пыли, доли единицы;

e_T - пористость ткани, доли единицы;

d_m - средний размер частиц пыли, м;

ρ_n - плотность пыли, кг/м³;

Z_1 - начальная запыленность, кг/м³.

При заданной величине максимального перепада давления на фильтре $\Delta p_{\max}$ можно найти необходимую продолжительность между регенерациями t_p

$$t_p = \frac{\frac{\Delta p}{\mu \cdot \omega_\phi} - A}{B \cdot \omega_\phi \cdot Z_1}; \quad (3.57)$$

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = \mu \cdot \omega_\phi \cdot (A + B \cdot Z_1 \cdot \omega_\phi \cdot t_p), \quad (3.58)$$

где μ , ω_ϕ , Z_1 - то же, что в формуле (3.56);

A , B - коэффициенты, зависящие от пористости, геометрических и аэродинамических характеристик слоя пыли:

$$A = \frac{0,475 \cdot (1 - \epsilon_n)^2}{d_m^{2,77} \cdot \epsilon_n^3 \cdot \epsilon_T^{3,24}}; \quad (3.60)$$

$$B = \frac{817 \cdot (1 - \epsilon_n)}{d_m \cdot \epsilon_n^3 \cdot \rho_n}, \quad (3.61)$$

где ϵ_n , ϵ_T , d_m , ρ_n - то же, что в формуле (3.56).

Количество пыли, накопленное на единице площади фильтра за время t_p , приблизительно равно

$$M_1 = Z_1 \cdot \omega_\phi \cdot t_p \quad (3.62)$$

Для облегчения расчетов на рис. 3.16 и 3.17 приведены номограммы для определения Δp_1 и Δp_2 . При повышении Δp , вследствие неравномерности структуры пылевого слоя и ткани, в отдельных местах происходят динамические пробои слоя, сопровождающиеся образованием трещин и каверн, в результате чего увеличивается вынос пыли и эффективность падает. При сокращении межрегенерационного периода и уменьшении Δp эффективность фильтра также падает из-за того, что значительную часть времени фильтр работает в условиях нарушенной целостности фильтрующего пылевого слоя. Таким образом, существует некоторая оптимальная продолжительность меж-

регенерационного периода, соответствующая максимальной эффективности работы фильтра, найти которую можно только экспериментально.

Фильтрующие ткани. Тканевые материалы представляют собой переплетения нитей диаметром 300 - 700 мкм. В случае специальной обработки - ворсования на поверхности ткани; образуется ворс из перепутанных между собой волокон.

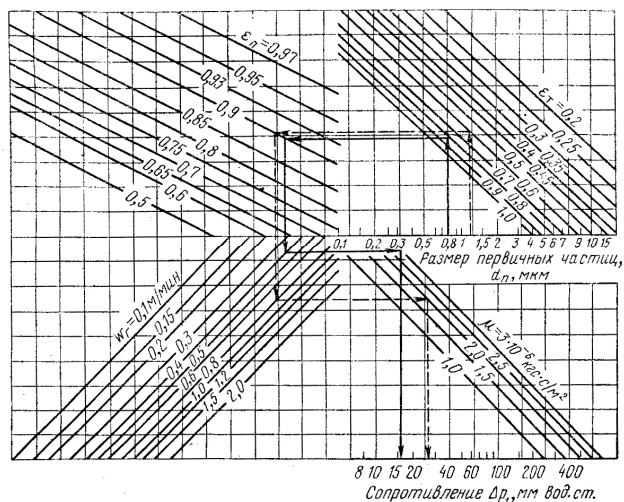


Рис. 3.16. Номограмма для определения сопротивления ткани ΔP_1

В условиях работы технологических фильтров для газов к тканям предъявляют следующие требования:

- термостойкость, достаточная для работы в условиях температур отходящих газов;
- химическая стойкость по отношению к агрессивным компонентам, присутствующим в отходящих газах;
- механическая прочность по отношению к истиранию и многократным изгибам во время регенерации тканей, а также стабильность размеров при рабочих условиях;

- высокая пылеемкость при фильтрации и способность удерживать при регенерации часть пыли, обеспечивающая достаточно высокую эффективность после регенерации;

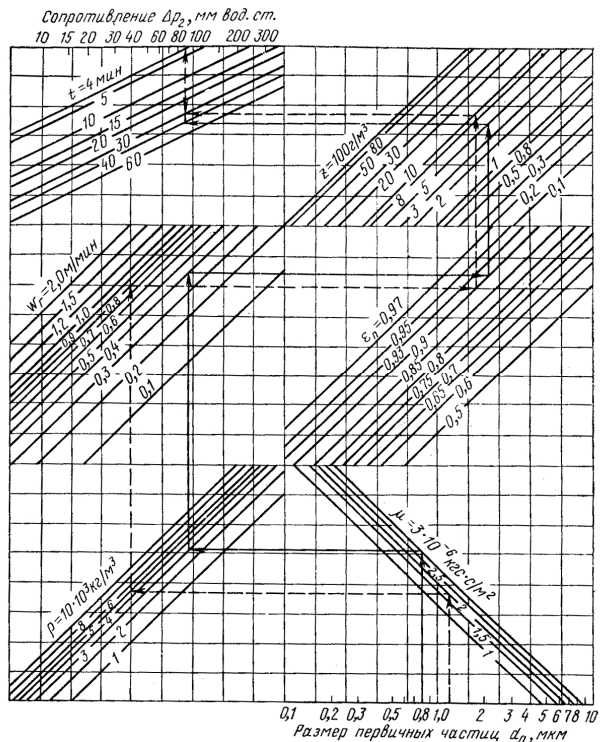


Рис. 3.17. Номограмма для определения сопротивления слоя пыли ΔP_2

- сохранение максимальной воздухопроницаемости в запыленном состоянии;
- минимальное влагопоглощение и способность к легкому удалению накопленной влаги (малая гигроскопичность);
- умеренная стоимость.

Фильтрующих материалов, полностью удовлетворяющих всем перечисленным требованиям, нет. Поэтому каждую ткань используют в наиболее благоприятных для нее условиях.

Выбор вида ткани определяется в основном температурой, а также влажностью и агрессивными свойствами газового потока, сроками службы ткани в рабочих условиях и стоимостью ткани.

Наряду с тканями из натуральных волокон (хлопок, лен, шерсть) широко применяют ткани из синтетических волокон - капрон, нитрон, лавсан, стеклоткани. В некоторых специальных случаях для фильтров используют и нетканевые материалы, такие как фетр и войлок.

Нитрон и лавсан обладают повышенной термостойкостью, достаточной химической стойкостью и механической прочностью, наряду с хорошей фильтрующей способностью. Срок службы рукавов из этих тканей 6 - 12 мес.

Ткани из стекловолокна характеризуются высокой термостойкостью и достаточной коррозионной стойкостью. Главный недостаток стекловолокна - низкая изгибоустойчивость, вследствие чего рукава быстро выходят из строя. Для улучшения свойств стеклоткани обрабатывают кремнийорганическими соединениями.

Конструкция тканевых фильтров. Наибольшее распространение в промышленности получили рукавные фильтры, в которых основным элементом является рукав. Обычно применяют рукава диаметром 135 - 220 мм, длиной 2,4 - 3,4 м и более. Иногда используют рукава диаметром до 0,5 м и длиной до 9,0 м. В настоящее время чаще всего применяют бесшовные рукава, так как шов является слабым местом, обычно в нем в первую очередь возникают повреждения и разрывы. Однако с появлением высокопроизводительных швейных машин и высокопрочных ниток снова начинают применять и шитые рукава.

Чаще всего рукава надевают на металлические патрубки с кольцевыми буртиками, приваренные к распределительной решетке. Уплотнение осуществляют с помощью хомутов с зажимами. Верхний конец рукава прикрепляют к штампованной крышке, имеющей крюк, с помощью которого рукав подвешивается к раме подвеса. Иногда, во избежание сплющивания рукавов, в них вшивают кольца или размещают проволоочные каркасы. Каркасные конструкции применяют в основном для стеклотканевых фильтров, а также в тех случаях, когда грязный газ подводят со стороны внешней поверхности рукавов. Наличие каркасов заметно увеличивает металлоемкость фильтра.

Регенерацию ткани рукавов выполняют различными способами. Наиболее распространенный способ заключается в обратной продувке воздухом со встряхиванием. Этот способ, как правило, дает хорошие результаты. Для стеклотканей, вследствие их малой изгибостойчивости, встряхивание при обратной продувке не применяют.

Достаточно хорошие результаты дает импульсная регенерация с подачей импульсов сжатого воздуха внутрь рукава (рис. 3.18, а). При этом длительность импульса составляет 0,1 - 0,2 с при избыточном давлении воздуха 400 - 800 кПа. Расход продувочного воздуха составляет 0,1 - 0,2 % количества очищаемых газов.

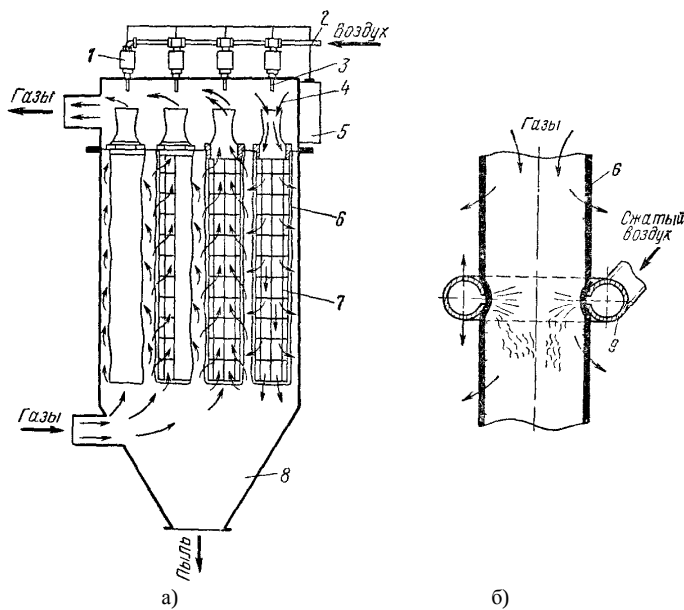


Рис. 3.18. Устройство для регенерации ткани в рукавных фильтрах: 1 – соленоидный клапан; 2 – ввод сжатого воздуха; 3 – сопло; 4 – струя сжатого воздуха; 5 – блок автоматического управления регенерации; 6 – рукав; 7 – каркас; 8 – бункер; 9 – движущееся кольцо

Управление импульсными электромагнитными клапанами сжатого воздуха автоматизировано. Импульсная регенерация осуществляется при работающем фильтре и не требует его отключения.

При малых начальных концентрациях пыли применяют обратную струйную продувку (рис. 3.18, б), при которой вдоль рукава верх и вниз медленно движется полое кольцо. Через его щель шириной 0,2 - 2 мм происходит истечение кольцевой струи сжатого воздуха давлением 500 - 600 кПа со скоростью 10 - 30 м/с, выдувающей пыль из ткани внутрь рукава. Струйная продувка позволяет применять скорость фильтрации до 3 - 5 м³/(м²·мин) и не требует отключения фильтра на регенерацию.

Также выпускаются шести- и восьмисекционные фильтры с рукавами из стеклоткани, предназначенные для работы на газах с температурой до 250 °С. Площадь фильтрации этих фильтров соответственно равна 2850 и 3730 м² при числе рукавов в секции 384. Диаметр рукава 127 мм, длина 3000 мм. Габаритные размеры фильтров в плане 20,45х7,36 м и 29,81х7,36 м при высоте 10,17 м. Пропускная способность 12 и 17 м³/с.

В химической промышленности используют и единичные установки с площадью фильтрации 5000м³ и более.

3.7.3. Зернистые фильтры

В зернистых фильтрах с *неподвижным фильтрующим слоем* фильтрация газа идет через слой зернистого материала - гравия, шлака, разных дробленых материалов, колец Рашига и т. п. При малых скоростях газа, мелкодисперсной пыли и малой запыленности преобладающее значение имеет пылезадержание всем объемом загрузки. При высоких скоростях фильтрации, крупной пыли и большой запыленности частицы в меньшей степени проникают в глубину слоя и процесс фильтрации происходит в основном в поверхностном слое. В большинстве случаев сочетаются оба вида фильтрации. Эффективность осаждения, как и в фильтрах любого типа, определяется действием механизмов касания, инерции, диффузии, гравитации и электростатики.

Наиболее перспективны конструкции фильтров с *подвижным фильтрующим слоем*, в которых движение слоя осуществляется за счет силы тяжести. В таком фильтре при работе питателя загрязненные слои фильтра непрерывно выводятся из газотока и заменяются чистыми. Например, применяя в качестве фильтрующего материала чугунную дробь, железорудные концентраты, дробленую стружку и т. д., можно вообще отказаться от процесса ре-

генерации и направлять отработавший фильтрующий материал вместе с уловленной пылью на аглофабрику или подавать его непосредственно в печь. Если жалюзийную решетку сделать водоохлаждаемой, то становится возможной очистка газов при высокой температуре.

При очистке воздуха от пыли применяют самоочищающиеся фильтры, в которых роль фильтрующего слоя играют накладываются друг на друга в три-четыре ряда сетчатые шторки. Шторки прикреплены к цепям, надетым на шестерни, размещенные на валах; к одному из них присоединен привод (рис. 3.19).

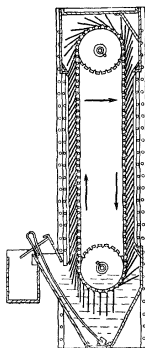


Рис. 3.19. Самоочищающийся фильтр для очистки воздуха

Полотно медленно движется с периодическими остановками на 10–12 мин, делая 1–2 оборота в сутки. В верхней части фильтра шторки переворачиваются, в нижней, при проходе через масляную ванну, разъединяются. При этом осажденная на них пыль выпадает на дно ванны, откуда периодически удаляется скребком. Допустимая удельная нагрузка полотна $8350 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$.

3.7.4. Металлокерамические фильтры

Фильтры изготовляют из металлических порошков различных металлов и сплавов методом прессования или прокатки с последующим спеканием.

Газовые нагрузки в металлокерамических фильтрах невысоки, а гидравлические сопротивления значительны, например при $V_2 = 0,2 \div 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{мин})$ $\Delta P = 100 \div 6000 \text{ Па}$.

Вследствие этого габаритные размеры металлокерамических фильтров велики и их применяют только для небольших расходов газа.

Эффективность металлокерамических фильтров очень высока, они способны полностью задерживать частицы размером до 1 мкм. Это объясняется тем, что на твердой поверхности образуется плотный лобовой слой пылевых частиц без трещин и каверн с высокой пылезадерживающей способностью.

Регенерация металлокерамических фильтров трудна, частицы пыли, застревающие в порах фильтра, удаляются либо обратной продувкой, либо импульсами сжатого воздуха давлением 600 - 1000 кПа.

Металлокерамические фильтры из нержавеющей стали можно использовать при температурах газа 500 – 600 °С и выше.

В большинстве случаев применяют трубчатые фильтрующие элементы, и по конструкции металлокерамический фильтр напоминает рукавный (рис. 3.20).

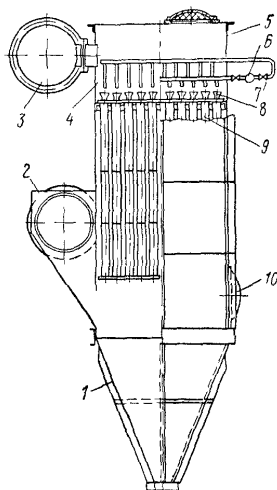


Рис. 3.20. Металлокерамический фильтр: 1 – бункер; 2 – коллектор входной; 3 – то же, выходной; 4 – сопла; 5 – корпус; 6 – коллектор компрессионного воздуха; 7 – электромагнитный клапан; 8 – насадки; 9 – фильтрующие элементы; 10 – люк.

Грязный газ входит в фильтр снизу и фильтруется через фильтрующие элементы длиной 2 м, составленные из пяти стандартных металлокерамических труб диаметром 100, длиной 400 мм. Очищенный газ отводится через коллектор чистого газа, а продувочный воздух подводится через коллектор продувочного воздуха.

Установка металлокерамических фильтров рекомендована для тонкой очистки небольших объемов запыленного газа.

Вопросы для самопроверки

1. От чего зависит эффективность осаждения частиц пыли в камерах и газоходах?
2. На чем основана работа инерционных пылеуловителей?
3. Можно ли располагать циклон наклонно и почему?
4. Какие силы действуют на частицу пыли находящуюся во вращающемся криволинейном потоке газа?
5. Что оказывает влияние на сопротивление циклона?
6. Назовите основные условия эксплуатации циклона.
7. От чего зависит коэффициент сопротивления циклона?
8. Что такое скорость фильтрации и как ее определить?
9. Как определить суммарный коэффициент захвата?
10. Как происходит движение газового потока в тканевых фильтрах?
11. Как проводится регенерация тканевых фильтров?
12. Что необходимо учитывать при выборе ткани фильтра?

ТЕМА 4. МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ

4.1. Физические основы мокрой очистки газов

Пылеуловители мокрого типа получили широкое распространение в технике. Отличительной их особенностью является захват улавливаемых частиц жидкостью, которая уносит их из аппаратов в виде шлама.

4.1.1. Мокрая очистка газов и область ее применения

Мокрые аппараты имеют следующие *достоинства*:

- простоту конструкции и сравнительно невысокую стоимость;
- более высокую эффективность по сравнению с сухими механическими пылеуловителями инерционного типа;
- меньшие габариты по сравнению с тканевыми фильтрами и электрофильтрами;
- возможность использования при высокой температуре и повышенной влажности газов;
- возможность работы на взрывоопасных газах;
- возможность улавливания вместе с взвешенными твердыми частицами паров и газообразных компонентов.

Однако мокрым пылеуловителям свойственны следующие *недостатки*:

- значительные затраты энергии при высоких коэффициентах очистки;
- получение уловленного продукта в виде шлама, что часто затрудняет и удорожает его последующее использование;
- необходимость организации оборотного цикла водоснабжения (отстойники, перекачивающие насосные, охладители и т. п.), что значительно увеличивает стоимость системы газоочистки;
- образование отложений в оборудовании и газопроводах при охлаждении газов до температуры точки росы или капельном уносе влаги из пылеуловителя;
- коррозионный износ оборудования и газопроводов при очистке газов, содержащих агрессивные компоненты;
- вредное влияние капельной влаги, содержащейся в газах, на стенки кирпичных и железобетонных дымовых труб;

- ухудшение условий рассеивания пыли и вредных газов, выбрасываемых через дымовые трубы в воздушный бассейн.

Несмотря на эти недостатки, мокрые аппараты широко применяют в металлургии, особенно в случаях, когда наряду с очисткой требуется охлаждение и увлажнение газа. Мокрые аппараты устанавливают также в случае отсутствия места для размещения электрофильтров или тканевых фильтров. Рентабельность мокрой очистки газов значительно повышается в случае возможности присоединения ее к существующему водному хозяйству.

4.1.2. Захват частиц пыли жидкостью

Для улавливания пыли с применением жидкости применяют два основных способа захвата частиц пыли:

- каплями жидкости;
- пленкой жидкости.

Для осуществления первого способа запыленный поток промывают диспергированной жидкостью. Во время промывки частицы пыли захватываются каплями жидкости и выводятся из газового потока. В зависимости от режима температур, давлений и влажности газа в процессе промывки может происходить испарение капель или конденсация паров из газового потока.

Второй способ осаждения пыли осуществляют, направляя поток частиц пыли на поверхность жидкости, смоченную жидкостью стенку или пленку специально полученных газовых пузырей.

В соответствии со способом захвата мокрые пылеулавливающие аппараты можно разделить на две группы:

- с промывкой газа жидкостью;
- с осаждением пыли на пленку жидкости.

Захват частицы пыли жидкостью происходит при помощи тех же механизмов, что и захват пыли элементами фильтрующего слоя (см. п. 3.6.3).

Захват частиц пыли каплями жидкости. При движении капли в пространстве, заполненном запыленным газом, осаждение пыли на капле происходит в основном вследствие кинематической коагуляции. При чисто гравитационной коагуляции захват частиц пыли плотностью $\rho_n = 2000 \text{ кг/м}^3$ запыленной водой возможен только при размере частиц $d_n > 1 \text{ мкм}$. Частицы менее 1 мкм на каплях не осаждаются.

Эффективность улавливания при прочих равных условиях возрастает с

уменьшением диаметра капли и может достичь высоких значений даже для мелких частиц.

Захват частиц пылью пленкой жидкости. При ударе частицы о твердую стенку возможны либо отскок частицы, либо прилипание к стенке за счет сил адгезии P_{ad} . Отскок частицы возникает, если кинетическая энергия отражающейся частицы больше энергии адгезии

$$\frac{m \cdot \psi^2}{2} > E_{ad}, \quad (4.1)$$

где m - масса частицы диаметром d и плотностью c_n ; $m = \rho \cdot d^3 \cdot c_n / 6$;

ψ - скорость отскока в предположении отсутствия сил адгезии (приближенно равна 0,8 от скорости при ударе).

Смачиваемость материалов ухудшается с уменьшением размеров, поэтому в технике пылеулавливания часто приходится иметь дело с гидрофобными частицами. Для улавливания таких частиц необходимо, чтобы их кинетическая энергия превышала работу погружения частицы в жидкость, т. е. работу преодоления сил поверхностного натяжения. Из этих условий получено, что предельная скорость удара частицы, обеспечивающая ее погружение в жидкость, равна

$$\psi = \frac{1}{\cos \theta} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot \gamma}{c \cdot d}}, \quad (4.2)$$

где θ — угол между направлением движения частицы и нормалью к поверхности жидкости в точке удара.

При $\theta = 0$, т. е. движении частицы по нормали к поверхности жидкости,

$$\psi = 2,83 \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{c \cdot d}}. \quad (4.3)$$

При больших углах θ частицы рикошетируют от поверхности и улавливание возможно только при высоких скоростях удара. Частицы при $Re < 5$

не погружаются в момент удара в пленку жидкости полностью и могут быть легко сорваны газовым потоком, так как поверхность жидкости после удара быстро выпрямляется, а удерживающие частицы силы адгезии (а в случае горизонтальной поверхности и силы тяжести) незначительны.

4.1.3. Тепло- и массообмен в мокрых пылеуловителях

Мокрые пылеуловители представляют собой аппараты контактного типа, в которых газ и жидкость непосредственно соприкасаются друг с другом.

Вследствие того что температура газа и жидкости, а также парциальные давления пара в газе p_g и над жидкостью $p_{жс}$ в мокрых пылеуловителях, как правило, не одинаковы, одновременно с пылезадержанием идут тепло- и массообменные процессы.

Основным расчетным уравнением для определения количества теплоты Q , Вт, передаваемого прямым теплообменом, является общеизвестное уравнение теплопередачи

$$\pm Q_1 = K \cdot F \cdot \Delta T + Q_{пот}, \quad (4.4)$$

где K - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C);

F - поверхность, через которую происходит теплообмен, м²;

ΔT - средняя разность температур, °C;

$Q_{пот}$ - потеря теплоты в окружающую среду.

Уравнение массообмена имеет вид

$$\pm M = v \cdot F \cdot (p_g - p_{жс}), \quad (4.5)$$

где v - коэффициент массообмена, кг/(м²·с·°C).

Процессы массообмена сопровождаются выделением (при конденсации) или поглощением (при испарении) теплоты, величину которой можно найти, зная теплоту парообразования

$$\pm Q_2 = r \cdot \Delta M = r \cdot v \cdot (p_g - p_{жс}). \quad (4.6)$$

В приведенных уравнениях (4.5) и (4.6) знак «плюс» ставится в случаях

перехода теплоты и массы от газа к жидкости ($T_g > T_{ж}$ и $p_g > p_{ж}$), а знак «минус» в случаях перехода теплоты и массы от жидкости к газу ($T_g < T_{ж}$ и $p_g < p_{ж}$).

Так как отходящие газы, подлежащие очистке, как правило, имеют высокие температуры, то в мокрых пылеуловителях обычно протекают процессы охлаждения газа.

Эти процессы могут осуществляться как с испарением воды, так и с конденсацией водяных паров, содержащихся в газе. В первом случае **охлаждение** называют **испарительным**, во втором случае — **конденсационным**.

Конденсационное охлаждение происходит, если горячий газ, насыщенный водяными парами, встречается с холодной водой ($T_g > T_{ж}$ и $p_g > p_{ж}$). При этом происходит охлаждение газа с конденсацией части водяного пара, находящегося в газе, в результате чего газ подсушивается. Вода при этом нагревается, получая теплоту в количестве $Q_1 + Q_2$.

Испарительное охлаждение происходит при взаимодействии горячего сухого или не насыщенного влагой газа с подогретой водой ($T_g > T_{ж}$ и $p_g < p_{ж}$). При охлаждении газа одновременно увеличивается его влагосодержание за счет испаряющейся воды, т. е. количество теплоты, передаваемое от газа к воде, составляет $Q_1 - Q_2$. По мере нагревания воды возрастает давление пара над ней $p_{ж}$ и уменьшается разность температур $T_g - T_{ж}$. При этом Q_1 снижается, а Q_2 возрастает до тех пор, пока они не станут равны. После этого вода, достигнув так называемой температуры мокрого термометра T_m , перестает нагреваться и будет только испаряться при постоянной температуре, а вся теплота, передаваемая газом воде, будет возвращаться к нему с образовавшимся паром, подмешивающимся к газу, т. е. процесс охлаждения пойдет при постоянной энтальпии газа.

Тепловой баланс процесса испарительного охлаждения составляют исходя из того, что сумма энтальпий (теплосодержаний) входящих потоков равна сумме энтальпий выходящих потоков

$$M_g \cdot (c_g \cdot T_1 + y_1 \cdot i_1) + M_{ж} \cdot c_{ж} \cdot T_n = M_g \cdot (c_g \cdot T_2 + y_2 \cdot i_2) + [M_{ж} - M_g \cdot (y_2 - y_1)] \cdot c_{ж} \cdot T_k + Q_{пот}, \quad (4.7)$$

где M_z и $M_{ж}$ - соответственно количество сухого газа и жидкости, кг/с;

T_1 и T_2 - соответственно начальная и конечная температуры газа, °С;

T_n и T_k - соответственно начальная и конечная температуры жидкости, °С;

c_z и $c_{ж}$ - соответственно теплоемкости газа и воды, Дж/кг;

y_1 и y_2 - соответственно начальное и конечное влагосодержание газа, кг/кг;

i_1 и i_2 - соответственно начальная и конечная энтальпии водяных паров, кДж/кг.

Если пренебречь потерями теплоты в окружающую среду и не учитывать изменения количества воды вследствие ее испарения, то из уравнения (4.7) можно сделать вывод

$$T_k = T_n + \frac{M_z \cdot [c_z \cdot (T_2 - T_1) + y_1 \cdot i_1 - y_2 \cdot i_2]}{M_{ж} \cdot c_{ж}}. \quad (4.8)$$

Из уравнения (4.8) видно, что чем меньше подача жидкости, тем выше ее конечная температура.

Однако, пределом конечной температуры воды является температура мокрого термометра T_m , выше которой вода не может нагреться, так как вся полученная ею теплота затрачивается на ее испарение.

Таким образом, для процесса испарительного охлаждения конечная энтальпия газа, соответствующая температуре мокрого термометра, равна начальной энтальпии плюс количество теплоты, переданное газу жидкостью, которая испарилась и присоединилась к газу в виде водяных паров

$$M_z \cdot (c_z \cdot T_m + y_m \cdot i_m) = M_z \cdot (c_1 \cdot T_1 + y_1 \cdot i_1) + M_z \cdot (y_m - y_1) \cdot c_{ж} \cdot T_m, \quad (4.9)$$

или

$$c_z \cdot T_m + y_m \cdot (2480 + 1,96 \cdot T_m) = c_1 \cdot T_1 + y_1 \cdot (2480 + 1,96 \cdot T_1) + (y_m - y_1) \cdot c_{ж} \cdot T_m. \quad (4.10)$$

Из этого уравнения подбором можно определить температуру T_m , предварительно задаваясь ею, находя соответствующее ей влагосодержание по формуле

$$y_m = \frac{0,804 \cdot p_m}{p - p_m} \quad (4.11)$$

и проверяя затем сходимость теплового баланса по формуле (4.10). Как следует из формулы (4.10), температура мокрого термометра зависит от начального состояния газа (его температуры T_1 и влагосодержания y_1).

Температуру мокрого термометра можно приближенно определить по $i - y$ -диаграмме, считая, что процесс испарительного охлаждения газа идет по линии $i = \text{const}$ до линии насыщения ($j = 100\%$).

4.2. Пылеулавливающие аппараты с промывкой газа жидкостью

В зависимости от способа диспергирования жидкости пылеулавливающие аппараты этого типа делят на три группы:

1. форсуночные скрубберы, где диспергирование жидкости осуществляется с помощью форсунок, за счет энергии насоса;
2. скрубберы Вентури, в которых дробление жидкости осуществляется за счет энергии турбулентного потока;
3. динамические газопромыватели, где разбрызгивание жидкости осуществляется за счет механической энергии вращающегося ротора.

4.2.1. Форсуночные скрубберы

В форсуночных скрубберах достаточно эффективно улавливаются частицы пыли размером более 10 - 15 мкм. Частицы размером менее 5 мкм практически не улавливаются.

Устройство и работа. В верхней части скруббера (рис. 4.1) размещено несколько поясов орошения с большим числом форсунок, создающих равномерный поток мелко диспергированных капель, движущихся под действием силы тяжести вниз. Нижняя часть скруббера, оканчивающаяся конусом,

заполнена водой, уровень которой поддерживается постоянным. Подводимый запыленный газ направляют на зеркало воды для осаждения наиболее крупных частиц пыли, после чего, распределяясь по всему сечению скруббера, газ движется вверх навстречу потоку капель воды. В процессе промывки капли жидкости захватывают частицы пыли и коагулируют. Образовавшийся шлам собирается в нижней части скруббера, откуда непрерывно удаляется промывочной водой.

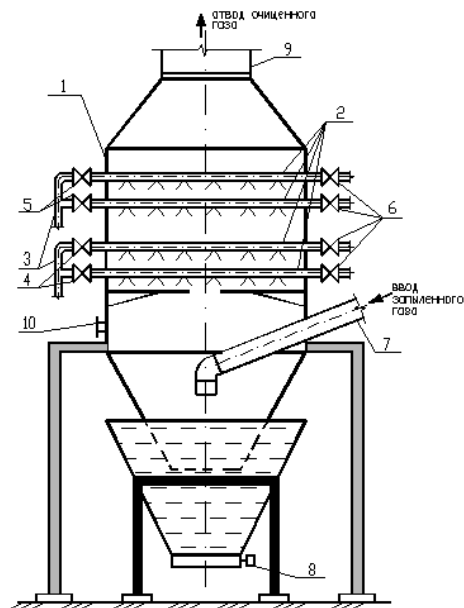


Рис. 4.1. Общий вид форсуночного скруббера для охлаждения и увлажнения газа:
 1 – корпус; 2 – зоны орошения; 3 – подвод воды к зонам орошения; 4, 5, 6 – промывочные вентили; 7 – патрубок для ввода запыленного газа; 8 – клапан; 9 – патрубок для выхода очищенного газа

Параллельно с очисткой газ, проходящий через скруббер, охлаждается до 40 – 50 °С и увлажняется обычно до состояния насыщения.

Скорость газа в скруббере принимают равной 0,7 - 1,5 м/с. При боль-

ших скоростях начинается капельный унос влаги, что способствует образованию отложений на выходном патрубке скруббера и в газопроводах.

Удельный расход воды на скруббер обычно находится в пределах 3 - 6 дм³/м³ газа. Гидравлическое сопротивление полых скрубберов незначительно и не превышает 250 Па.

Процессы тепло- и массообмена в скруббере. При орошении горячего газа холодной водой в скруббере естественно идут тепло- и массообменные процессы. Так как газ входит в скруббер обычно не насыщенным влагой, то в нижней части скруббера идет испарительное охлаждение. Испаряющаяся вода увеличивает влагосодержание газа до тех пор, пока при какой-то температуре он не становится насыщенным. Все это время охлаждение газа протекает при постоянной энтальпии, так как образующийся пар подмешивается к газу, возвращая ему теплоту, затраченную в процессе парообразования. Температура воды все это время также остается постоянной и равной температуре мокрого термометра, так как теплота, получаемая водой от газа, полностью расходуется на парообразование. В момент достижения газом состояния насыщения парообразование прекращается. В период испарительного охлаждения температура газа снижается наиболее интенсивно.

В верхней части скруббера протекает процесс конденсационного охлаждения.

С момента насыщения газа водяными парами дальнейшее охлаждение его вызывает конденсацию части паров. Выделяющаяся при этом теплота, как и теплота, передаваемая воде за счет разности температур газа и воды, затрачивается на нагрев воды, который продолжается до тех пор, пока вода не достигнет температуры мокрого термометра.

Эта стадия процесса сопровождается уменьшением энтальпии и влагосодержания газа.

Граница между испарительным и конденсационным режимами охлаждения газа в скруббере зависит от плотности орошения сечения, представляющей собой количество орошающей воды, приходящейся на 1 м² сечения скруббера в единицу времени.

Количество теплоты Q , кВт, передаваемое в скруббере от газа к воде, может быть подсчитано из выражения

$$Q = V_{oc} \cdot (I_1 - I_2) = V_{oc} \cdot [c_p \cdot (T_1 - T_2) + y_1 \cdot (i_1 - i_2)] \cdot 10^{-3}, \quad (4.12)$$

где V_{oc} - объемный расход сухих газов, м³/с;

I_1, I_2 - энтальпии газов на входе в скруббер и выходе из него, кДж/м³;

c_p - теплоемкость сухих газов, Дж/(м³·°C);

T_1, T_2 - начальная и конечная температуры газов, °C;

i_1, i_2 - начальная и конечная энтальпии водяных паров, содержащихся в газах, кДж/м³. $i_1 = (2480 + 1,96 \cdot T_1)$; $i_2 = (2480 + 1,96 \cdot T_2)$;

y_1 - начальное влагосодержание газа, кг/м³.

Среднюю разность температур между газом и водой находят, принимая конечную температуру воды близкой к температуре мокрого термометра T_m (обычно T_k на 5 – 10 °C ниже)

$$\Delta T_{cp} = \frac{(T_1 - T_k) - (T_2 - T_n)}{2,3 \lg \frac{T_1 - T_k}{T_2 - T_n}}, \quad (4.13)$$

где T_n - начальная температура воды.

Наиболее неопределенной величиной является коэффициент теплопередачи в скруббере, так как поверхность, к которой его следует относить (суммарная поверхность капель), трудноопределима и в значительной степени условна. Поэтому при расчетах приходится пользоваться значениями коэффициента теплопередачи, отнесенного к единице объема скруббера, полученными на практике для аналогичных условий ($K_o = 60 \div 240$ Вт/(м²·°C).

Необходимый объем скруббера, м³, определяют, исходя из условий теплообмена по известному выражению

$$V_{скр} = \frac{Q}{K_o \cdot \Delta T}. \quad (4.14)$$

Улавливание пыли в скруббере. Эффективность скруббера как пылеулавливающего аппарата невысока.

Влияние различных факторов на процесс пылеулавливания может быть установлено в результате рассмотрения процессов, происходящих в элементарном объеме и последующего интегрирования полученных дифференци-

альных уравнений.

Коэффициент эффективности очистки в скруббере возрастает с увеличением его активной высоты, относительной скорости движения частиц пыли, капель воды, удельного расхода воды и уменьшается с увеличением диаметра капель и их скорости.

Оптимальный размер капель в скруббере 0,8 - 1 мм.

При ориентировочных подсчетах эффективности улавливания пыли различных фракций можно пользоваться зависимостью коэффициента захвата от размера частиц пыли при диаметре капель воды 0,2 - 2 мм и плотности частиц пыли 2000 кг/м^3 , а также энергетическим методом расчета.

Общий коэффициент эффективности очистки скруббера, работающего в системе очистки доменного газа, не превышает обычно 60 - 70%.

4.2.2. Скрубберы Вентури

Работа скрубберов Вентури основана на дроблении воды турбулентным газовым потоком, захвате каплями воды частиц пыли, последующей их коагуляции и осаждении в каплеуловителе инерционного типа.

Устройство и работа. Простейший скруббер Вентури (рис. 4.2) включает в себя трубу Вентури и прямоточный циклон.

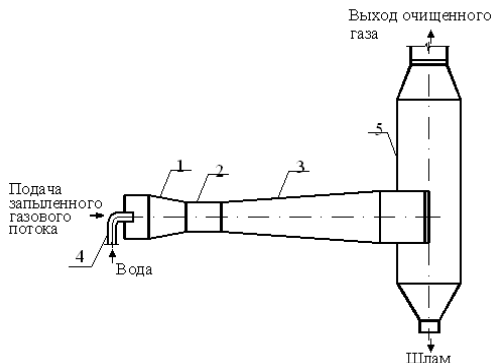


Рис. 4.2. Скруббер Вентури: 1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; 4 – подача воды; 5 – каплеуловитель

Труба Вентури состоит из конфузора, служащего для увеличения скорости газа, в котором размещают оросительное устройство, горловины, где происходит осаждение частиц пыли на каплях воды и диффузора, в котором протекают процессы коагуляции, а также за счет снижения скорости восстанавливается часть давления, затраченного на создание высокой скорости газа в горловине. В каплеуловителе, благодаря тангенциальному вводу газа, создается вращение газового потока, вследствие чего смоченные и укрупненные частицы пыли отбрасываются на стенки и непрерывно удаляются из каплеуловителя в виде шлама.

Скрубберы Вентури могут работать с высокой эффективностью $\eta = 96 \div 98\%$ на пылях со средним размером частиц 1 - 2 мкм и улавливать высокодисперсные частицы пыли (вплоть до субмикронных размеров) в широком диапазоне начальной концентрации пыли в газе — от 0,05 до 100 г/м³.

При работе в режиме тонкой очистки на высокодисперсных пылях скорость газов в горловине должна поддерживаться в пределах 100 - 150 м/с, а удельный расход воды — в пределах 0,5 - 1,2 дм³/м³. Это обуславливает необходимость большого перепада давления ($\Delta p = 10 \div 20$ кПа) и, следовательно, значительных затрат энергии на очистку газа.

В ряде случаев, когда труба Вентури работает только как коагулятор перед последующей тонкой очисткой (например, в электрофильтрах) или на крупной пыли размером частиц более 5 - 10 мкм, скорости в горловине могут быть снижены до 50 - 100 м/с, что значительно снижает энергозатраты.

Конструкции труб Вентури.

При расходах газа до 3 м³/с обычно применяют трубы Вентури круглого сечения. При больших расходах газа и увеличении диаметра трубы, возможности равномерного распределения орошения по сечению круглой трубы резко ухудшаются. Поэтому применяют несколько параллельно работающих труб, а при расходах газа более 10 м³/с рекомендуется придавать сечению трубы прямоугольную (щелевую) форму, при которой условия организации равномерного орошения значительно облегчаются.

По способу подачи жидкости трубы Вентури делят на три группы:

- с форсуночным орошением;
- с пленочным орошением;
- с периферийным орошением.

Периферийная подача жидкости применяется в трубах Вентури, как

круглого, так и прямоугольного сечения. Она позволяет организовать более равномерное орошение в трубах Вентури больших размеров, особенно прямоугольных, через отверстия с двух противоположных сторон, расположение в шахматном порядке.

Вода чаще всего подается в начальный участок горловины. Периферийная подача допускает чистку отверстий без прекращения работы аппарата, значительно снижает абразивный износ и замедляет рост отложений на орошающих устройствах.

При пленочном орошении, подаваемая вода непрерывно стекает по стенкам конфузора, образуя возобновляющуюся пленку. Дробление пленки на капли происходит за счет энергии высокоскоростного потока газа. Основным преимуществом пленочного орошения является отсутствие мелких отверстий, склонных к зарастанию и засорению, а также возможность подачи на орошение воды пониженного качества, что очень важно в условиях оборотного водоснабжения газоочисток. Пленочное орошение полностью устраняет отложения пыли, образующиеся обычно на границе между сухой и смоченной поверхностями конфузора. Однако пленочное орошение обеспечивает равномерность распределения воды по сечению только при ширине или диаметре горловины не более 100 мм.

В некоторых конструкциях применяют комбинированные способы орошения, например, центральную подачу совмещают с пленочной.

Представляют интерес так называемые эжекторные скрубберы, в которых газ поступает в трубу Вентури за счет эжектирующего действия орошающей жидкости или водяного пара, подаваемых под давлением до 120 Н/см^2 . При этом гидравлическое сопротивление трубы Вентури резко уменьшается, а в отдельных случаях может создаваться даже положительный напор, позволяющий отказаться от установки дымососа, что особенно важно при отсутствии для него места и при очистке агрессивных газов.

Для установок с изменяющимся по времени расходом газа применяют трубы Вентури с регулируемым сечением горловины, позволяющие сохранять в горловине трубы оптимальную скорость, несмотря на колебания расхода газа.

Конструкции каплеуловителей. В качестве каплеуловителей в турбулентных газопромывателях применяют преимущественно прямоточные циклоны. Рекомендуемая скорость газа в свободном сечении циклона составляет 2,5 - 4,5 м/с. При более высоких скоростях газа начинается вынос

капельной влаги и общая эффективность циклона снижается.

В качестве каплеуловителей часто применяют и центробежные скрубберы ВТИ, работающие без подачи воды на орошение. При двухступенчатой компоновке труб Вентури в качестве промежуточного каплеуловителя используют угловые сепараторы, не требующие специального места.

Компоновка скрубберов Вентури. Ограниченная пропускная способность трубы Вентури круглого сечения вызывает необходимость создания групповых компоновок, состоящих из нескольких параллельно работающих труб.

Целесообразнее представляется групповая компоновка из 6-8 более крупных труб Вентури, позволяющая вести наблюдение за каждой трубой и регулировать ее работу. Иногда применяют и батарейные компоновки из труб диаметром 90 мм каждая с общим орошением для всей батареи.

Трубы Вентури с регулируемой прямоугольной горловиной большого сечения достаточно хорошо зарекомендовали себя на практике. Во избежание излишне больших размеров и в целях некоторого резервирования в большинстве случаев устанавливают две трубы, работающие параллельно с неполностью открытой горловиной. При выходе из строя одной трубы другая может работать с повышенной пропускной способностью.

При улавливании высокодисперсной пыли применяют компоновки с последовательным включением двух труб с прямоугольной регулируемой горловиной. При этом первая по ходу газов труба работает с малым перепадом давления, осуществляя подготовку газов к очистке, а вторая в режиме тонкой очистки. Такие схемы широко применяют при очистке газов конверторного и ферросплавного производства.

Расчет скрубберов Вентури

Определение гидравлического сопротивления. Потеря давления в трубе Вентури зависит от скорости газов в горловине w и удельного расхода воды m и определяется как сумма двух слагаемых

$$\Delta p_T = \Delta p_C + \Delta p_{Ж}, \quad (4.15)$$

где Δp_C - гидравлическое сопротивление сухой трубы, Па (без подачи орошения) находят по известной формуле

$$\Delta p_C = o_c \cdot \frac{\psi_v^2 \cdot c_z}{2}, \quad (4.16)$$

где o_c - коэффициент сопротивления сухой трубы (круглого и прямоугольного сечения);

ψ_v - скорость газа в горловине трубы при рабочих условиях, м/с;

c_z - плотность газа при рабочих условиях, кг/м³.

Гидравлическое сопротивление, обусловленное введением жидкости, подсчитывают из выражения

$$\Delta p_{ж} = o_{ж} \cdot \frac{m \cdot x_z^2 \cdot c_{ж}}{2}. \quad (4.17)$$

Выбор и расчет каплеуловителей. Необходимый диаметр каплеуловителя выбирают, исходя из условной скорости в циклоне ψ_u , которая должна находиться в пределах 2,5 - 4,5 м/с, и объемного расхода газа V_z

$$D_u = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{V_z}{\psi_u}}, \quad (4.18)$$

Активная высота каплеуловителя H_u в зависимости от скорости газа в циклоне принимается равной:

ψ_u , м/с	2,5 - 3	3 - 3,5	3,5 - 4,5	4,5 - 5,5
H_u (в долях D_u)	2,5	2,8	3,8	4,5

Гидравлическое сопротивление каплеуловителя, Па

$$\Delta P_u = o \cdot \frac{\psi_u^2 \cdot c_z}{2}, \quad (4.19)$$

Таким образом, общее гидравлическое сопротивление скруббера Вен-

тури Δp_o равно сумме сопротивления трубы Вентури Δp_T и каплеуловителя Δp_K

$$\Delta p_o = \Delta p_T + \Delta p_K, \quad (4.20)$$

4.2.3. Динамические газопромыватели

Отличительной особенностью динамических газопромывателей является применение для диспергирования жидкости механической энергии. Наиболее типичными представителями этой группы пылеуловителей являются дезинтеграторы, вентиляторы, мокрые пылеуловители (ВМП), вентиляторные скрубберы (ротоклон W) и некоторые другие.

Вследствие значительного расхода энергии, а также относительной сложности эксплуатации и ремонта динамические газопромыватели практически не применяются.

4.3. Пылеуловители с осаждением пыли на пленку жидкости

Для успешной работы аппаратов этого типа необходимо, во-первых, образование непрерывно обновляющейся пленки или слоя жидкости, улавливающих частицы пыли и отводящих их с рабочей поверхности, и, во-вторых, подвод частиц пыли к этой пленке или слою жидкости.

4.3.1. Мокрые аппараты центробежного действия

В аппаратах центробежного типа частицы пыли отбрасываются на стенку центробежными силами, возникающими при вращении газового потока в аппарате за счет тангенциального подвода газа. Пленка на стенке аппарата, непрерывно стекающая вниз, создается за счет подачи воды специальными соплами, расположенными в верхней части аппарата

Центробежные скрубберы ЦС-ВТИ (рис. 4.3, а). Аппарат представляет собой вертикально стоящий стальной цилиндр с толщиной стенки 5 - 6 мм, имеющий коническое днище и тангенциально расположенный входной патрубок. Во избежание быстрого износа вследствие коррозии и абразивного действия пыли скруббер внутри футеруется керамической плиткой. Вода подводится внутрь через специальные сопла, установленные на расстоянии 500 мм друг от друга, над которыми размещен брызгоулавливающий козырек. Струя воды, выходящая из сопла, направлена тангенциально к стенке в сто-

рону вращения потока газа во избежание интенсивного уноса брызг. Образующаяся на стенке сплошная водяная пленка по спирали, направление которой совпадает с направлением вращения газового потока, непрерывно стекает вниз.

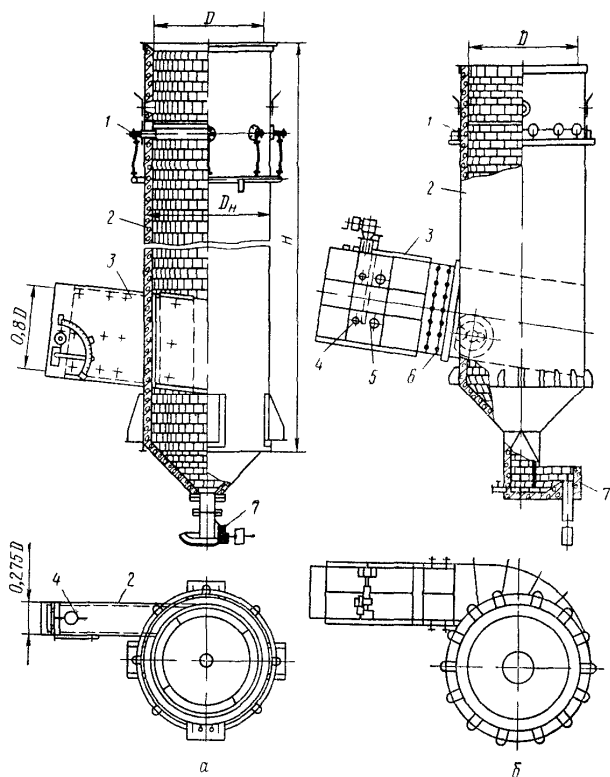


Рис. 4.3. Центробежные скрубберы: а – ЦС-ВТИ; б – МП-ВТИ: 1 – оросительные сопла; 2 – корпус; 3 – входной патрубок; 4 – смывные сопла; 5 – оросительные сопла прутковой решетки; 6 – прутковая решетка; 7 – гидрозатвор

Частицы пыли, отбрасываемые на пленку под действием центробежных

сил, захватываются ею и в виде шлама выводятся из скруббера через приемный бункер и гидравлический затвор.

Расход воды при работе центробежного скруббера определяется требованием создания сплошной водяной пленки на внутренней поверхности аппарата, толщиной не менее 0,3 мм. Такая толщина пленки предотвращает ее разрыв и образование отложений на стенках аппарата.

Скорости газа в подводящем патрубке, обеспечивающие подвод частиц пыли к пленке, равны 15 - 25 м/с.

С увеличением диаметра скруббера эффективность улавливания снижается, поэтому все расчеты ведутся на диаметр скруббера 1 м с последующим пересчетом.

С увеличением высоты скруббера H эффективность улавливания возрастает, однако после $H = (3 - 4) \cdot D$ она остается практически постоянной, что объясняется быстрым затуханием вращения газа. Поэтому обычно принимают $H = 4 \cdot D$.

Общий коэффициент очистки скруббера диаметром 1 м подсчитывают по фракционным коэффициентам и фракционному составу пыли.

Гидравлическое сопротивление скруббера находят по известной формуле

$$\Delta p = o \cdot \frac{\omega_c^2 \cdot c_z}{2}, \quad (4.21)$$

где o - коэффициент сопротивление скруббера, отнесенный к условной скорости ω_c в цилиндрической части скруббера при рабочих условиях;

c_z - плотность газа, кг/м³.

При прохождении через центробежный скруббер вследствие процесса теплообмена с водой газы охлаждаются.

Одновременно с охлаждением в центробежных скрубберах происходит абсорбция SO_2 и SO_3 из газов, проходящих через аппарат. Степень улавливания SO_2 и SO_3 обычно составляет 40 – 50%.

Центробежные скрубберы часто применяют в качестве каплеуловителей для скрубберов Вентури. В этом случае они работают без подачи воды на орошение.

Мокропрутковые скрубберы МП-ВТИ (рис. 4.3, б). Главным отличием скруббера МП-ВТИ от скруббера ЦС-ВТИ является наличие мокропрутковой решетки в подводящем патрубке.

Кроме того, аппараты МП-ВТИ отличаются от ЦС-ВТИ большими размерами и улиткообразной формой подводящего патрубка.

Решетка состоит из нескольких рядов шахматно расположенных прутков диаметром 16 мм из металла, дерева или песочно-бакелитовой массы. На металлические прутки часто надевают резиновые трубки.

В процессе эксплуатации решетка непрерывно орошается водой через специальные сопла и является основным элементом, улавливающим поступающие частицы пыли. То, что осталось неуловленным в решетке, улавливается в самом скруббере так же, как это происходит в аппарате ЦС-ВТИ.

Среднюю скорость в подводящем патрубке принимают равной 12–15 м/с, а скорость, отнесенную к поперечному сечению корпуса, 4–5 м/с.

При определении эффективности скруббера МП-ВТИ принимают, что улавливание пыли происходит в четырех зонах:

I — улавливание пыли каплями воды перед входом на решетку. Коэффициент очистки h_1 не превышает 6%.

II — улавливание пыли мокропрутковой решеткой. Эффективность улавливания приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Эффективность улавливания								
Размер частиц, мкм	0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 60	> 60
Коэффициент очистки, %	5,1	27,4	54,4	77,2	94,1	99,2	99,9	100

III — улавливание пыли каплями воды за мокропрутковой решеткой; коэффициент очистки h_3 не превышает 5–6%;

IV — улавливание пыли водяной пленкой на внутренней поверхности скруббера зависит от диаметра скруббера.

Общий коэффициент эффективности очистки определяют по формуле

$$h_o = 1 - (1 - h_1) \cdot (1 - h_2) \cdot (1 - h_3) \cdot (1 - h_4). \quad (4.22)$$

Гидравлическое сопротивление скруббера МП-ВТИ находят по

формуле

$$\Delta p = o \cdot \frac{\pi_{\text{вх}}^2 \cdot c_{\text{г}}}{2}, \quad (4.23)$$

где o - коэффициент сопротивления, отнесенный к скорости газа во входном патрубке $\pi_{\text{вх}}$; $o = 10$;

$c_{\text{г}}$ - плотность газа перед скруббером, кг/м^3 .

Эффективность улавливания SO_2 и SO_3 в скруббере МП-ВТИ составляет порядка 45%.

4.3.2. Мокрые аппараты ударно-инерционного действия

Скруббер Дойля (рис. 4.4). Через кольцевую щель, образованную входным патрубком и вдвинутым в него конусом, запыленный газ со скоростью 30 – 50 м/с ударяется о поверхности жидкости, находящейся на 2 – 3 мм ниже кромки трубы. За счет инерционных сил и образующейся вокруг щели завесы из капель жидкости частицы пыли улавливаются водой в виде периодически удаляемого шлама, собирающегося на дне пылеуловителя.

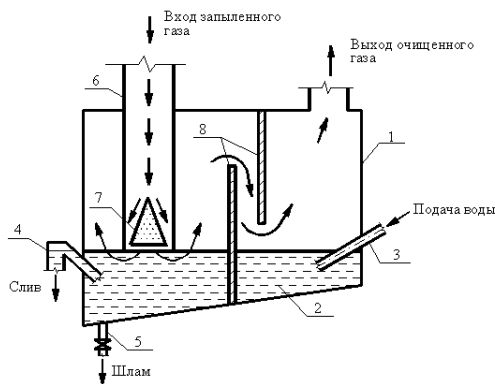


Рис. 4.4. Скруббер Дойля: 1 – корпус скруббера; 2 – резервуар, заполненный водой; 3 – патрубок для подачи воды; 4 – патрубок для слива излишков воды; 5 – патрубок для отвода шлама из резервуара; 6 – входной патрубок; 7 – рассекающий конус; 8 – брызгоуловители

Очищенный газ выводится из аппарата, предварительно пройдя брызгоуловители, т. е. перегородки, расположенные по ходу газа. Уровень воды в аппарате поддерживается постоянным с помощью гидрозатвора. Удельный расход воды в скрубберах Дойля составляет около $0,15 \text{ кг/м}^3$. Гидравлическое сопротивление аппарата около 1,5 кПа. В скруббере Дойля с высокой эффективностью улавливаются частицы размером более 10 – 15 мкм.

Ротоклон (типа N). Главной частью ротоклона (рис. 4.5) является щелевой канал (импеллер) сложной формы. При пуске вентилятора уровень жидкости в центральном отсеке понижается, в результате чего между поверхностью воды и верхней направляющей импеллера образуется щель, в которую (обычно со скоростью порядка 15 м/с) устремляется запыленный газ.

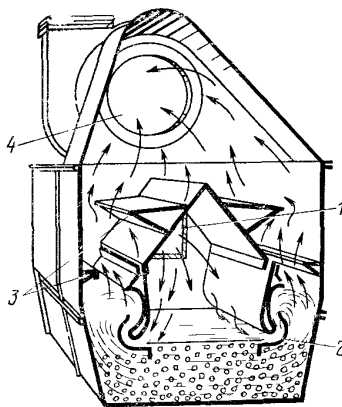


Рис. 4.5. Ротоклон (типа N): 1 – вход газов; 2 – направляющие лопасти (импеллеры); 3 – каплеотбойник; 4 – выход газов

Газовый поток подхватывает жидкость, движущуюся турбулизированным слоем вдоль нижней направляющей канала. Далее жидкость отбрасывается к верхней направляющей канала и при выходе из щели падает в виде сплошной водяной завесы, сквозь которую проходит газ. Под действием инерционных сил при поворотах частицы пыли проникают в слой жидкости и улавливаются им. Другая часть пыли улавливается при прохождении через водяную завесу. Во избежание выноса из аппарата капельной влаги на пути

выхода газов устанавливают специальные отбойные щиты. Вентилятор, вызывающий движение газов через ротоклон, часто устанавливают непосредственно на корпусе аппарата.

Уловленная пыль собирается на дне корпуса аппарата и удаляется вручную или с помощью размещенного на дне скребкового транспортера.

Отсутствие сопел и мелких отверстий позволяет работать при высокой запыленности газа на воде пониженного качества, расход которой обычно не превышает $0,03 \text{ кг/м}^3$ и определяется только испарением и потерями со шламом.

При эксплуатации ротоклона очень важно поддерживать постоянный уровень воды.

Эффективность работы ротоклона типа Н составляет 80 – 98 % при размерах частиц пыли $d_n = 2 - 7 \text{ мкм}$. Колебания в расходе газов через ротоклон в пределах $\pm 25 \%$ почти не отражаются на эффективности работы, что является существенным достоинством аппарата. Однако к температуре газа ротоклоны очень чувствительны и могут нормально работать только на холодном газе. Гидравлическое сопротивление ротоклона обычно не превышает $1,5 - 2 \text{ кПа}$.

4.3.3. Пенные газоочистные аппараты

Простейший пенный пылеуловитель представляет собой аппарат, перегороденный горизонтальной решеткой с равномерно распределенными мелкими отверстиями. Запыленный газ подается под решетку и отсасывается из верхней части аппарата. Пылезадерживающая жидкость подается на решетку сверху. Отработавшую жидкость можно отводить двумя способами: полным провалом ее через решетку в бункер или частичным переливом через порог, установленный с краю в конце решетки. В качестве пылеуловителей применяют обычно пенные аппараты, работающие в провальном режиме.

Пенный аппарат с провальными решетками (рис. 4.6). При малых скоростях газа наблюдается барботажный режим, при котором газ движется отдельными пузырями через слой жидкости. При скорости газа в аппарате около 1 м/с барботажный режим сменяется пенным, при котором жидкость, находящаяся на решетке, переходит в состояние турбулизованной пены. С момента возникновения пены резко увеличивается межфазная поверхность и снижаются диффузионные и термические сопротивления.

Межфазная поверхность, вследствие проникновения вихрей каждой из фаз через границу их раздела, непрерывно разрушается и снова восстанавливается, т. е. постоянно обновляется, что способствует отводу уловленной пыли, которая непрерывно осаждается на образующей пленке жидкости в силу действия уже рассмотренных ранее механизмов осаждения.

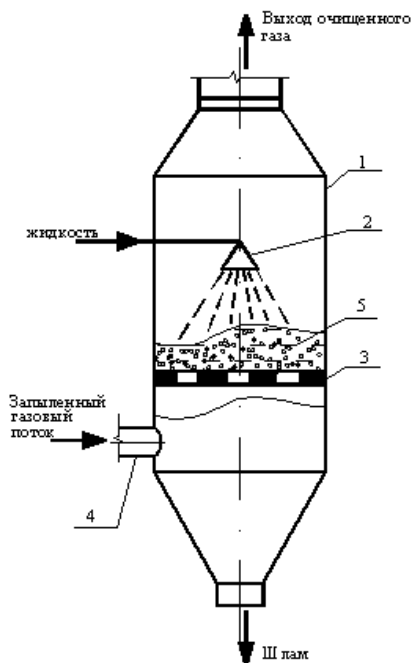


Рис. 4.6. Пенный аппарат с провальными решетками: 1 – корпус аппарата; 2 – ороситель; 3 – решетка; 4 – патрубок для подачи запыленного газа; 5 – жидкость над решеткой

Образующийся шлам удаляется с жидкостью, протекающей через отверстия решетки в бункер аппарата. При пенном режиме с увеличением скорости газа сопротивление слоя пены изменяется незначительно.

Дальнейшее повышение скорости газа приводит к возникновению волнового режима, характеризующегося колебаниями слоя жидкости вследствие

прорыва газовых струй на различных участках решетки. Характерными признаками этого режима являются значительный рост гидравлического сопротивления и интенсивный унос капель жидкости, что приводит к нарушению нормальной работы аппарата. Концом волнового режима является захлебывание пылеуловителя, при котором прекращается провал жидкости через решетки и происходит мгновенный подъем слоя жидкости.

Важным свойством пенного режима является его автомодельность. Высота слоя пены и гидравлическое сопротивление аппарата практически не зависят от его размеров.

Пенный аппарат с переливными решетками (рис. 4.7.). Отличительной чертой переливных решеток является устройство для слива отработанной жидкости в сливную коробку.

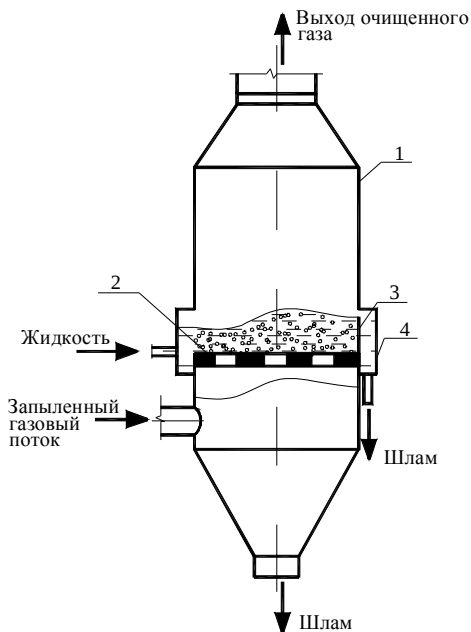


Рис. 4.7. Пенный аппарат с переливными решетками: 1 – корпус аппарата; 2 – решетка; 3 – порог; 4 – сливной отсек

Для фиксирования определенной толщины слоя жидкости решетку снабжают переливным порогом. Однако в целях предотвращения образования отложений на решетке часть жидкости (не менее 50%) должна отводиться через отверстия решетки в бункер. Величина провала зависит от скорости газа в отверстиях решетки. При скорости газа 10 – 17 м/с провал совершенно прекращается. Нормальный пенный режим устанавливается при скорости газа 6–10 м/с.

Применение переливных решеток позволяет в два-три раза сократить расход воды на очистку, составляющий 0,2 – 0,3 дм³/м³. Однако из-за возможности образования отложений пенные аппараты с переливными решетками не применяют в качестве пылеуловителей.

Главным недостатком пенных аппаратов является брызгоунос. Борьбу с брызгоуносом осуществляют, снижая скорость газа, а также устанавливая в верхней части аппарата инерционные брызгоуловители.

Конструктивное оформление пенных аппаратов. Корпус пенного аппарата может быть прямоугольным и цилиндрическим. В первом случае легче обеспечить равномерное распределение жидкости, во втором равномерное распределение газа. Размеры пенного аппарата определяются возможностью равномерного распределения газа, и диаметр его не должен превышать 2 - 2,5 м.

Решетки пенного пылеуловителя могут быть щелевыми (рис. 4.8, а) и дырчатыми (рис. 4.8, б).

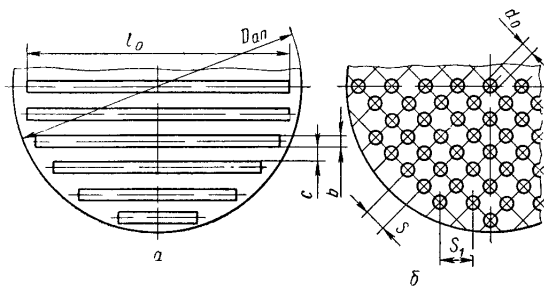


Рис. 4.8. Решетка пенного аппарата: а – щелевая; б – дырчатая

Живое сечение решетки находится в пределах 0,2 - 0,25 м²/м². Диаметр круглых отверстий принимают 4 - 8 мм, ширину щелей 4 - 5 мм по условиям

предотвращения возможности засорения, оптимальная толщина решетки 4–6 мм. При больших размерах аппаратов подвод воды на решетку секционируют.

Иногда пенные аппараты выполняют многополочными. В них очищаемый газ проходит через несколько последовательно установленных друг над другом решеток. Иногда на решетках размещают насадку из колец Рашига или шаров из полиэтилена или стекла. Однако это не дает значительного повышения эффективности пылеулавливания.

Аппараты с псевдоожиженной шаровой насадкой. В целях интенсификации тепло- и массообмена и инерционного осаждения частиц пыли на решетке аппарата размещают слой полых шаров из пластических масс. При работе шары приходят во взвешенное состояние (рис. 4.9); вынос их из аппарата ограничен верхней решеткой. В этих условиях скорость газа можно доводить до $8 - 9 \text{ м}^2/\text{с}$, а плотность орошения сечения до $70 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$, так как вынос брызг и переход к волновому режиму частично ограничиваются самой насадкой.

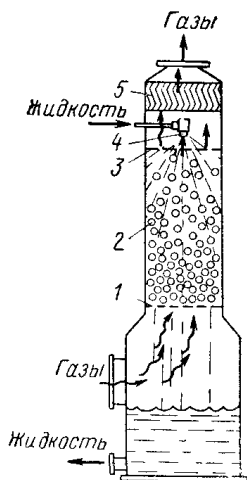


Рис. 4.9. Аппарат с псевдоожиженной шаровой насадкой: 1 – опорная тарелка; 2 – шаровая насадка; 3 – ограничительная решетка; 4 – оросительное устройство; 5 – брызгоуловитель

Вопросы для самопроверки

1. В чем достоинства и недостатки мокрой очистки газов от пыли?
2. Назовите и поясните способы улавливания пыли жидкостью.
3. Что такое конденсационное и испарительное охлаждение?
4. На какие группы делятся пылеулавливающие аппараты с промывкой газа жидкостью?
5. В чем состоят особенности конструкций труб Вентури?
6. В чем отличие центробежного скруббера МП-ВТИ от ЦС-ВТИ?
7. Как определить общий коэффициент очистки скруббера?
8. Какие режимы возникают при работе пенных аппаратов?
9. В чем преимущество переливных решеток пенных аппаратов?

ТЕМА 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ ОТ ПЫЛЕЙ

5.1. Физические основы электрической очистки газов

Электрофильтры являются наиболее совершенными конструкциями для очистки промышленных выбросов от пыли. Электрофильтры, применяемые в настоящее время, бывают двух типов: трубчатые и пластинчатые (рис.5.1).

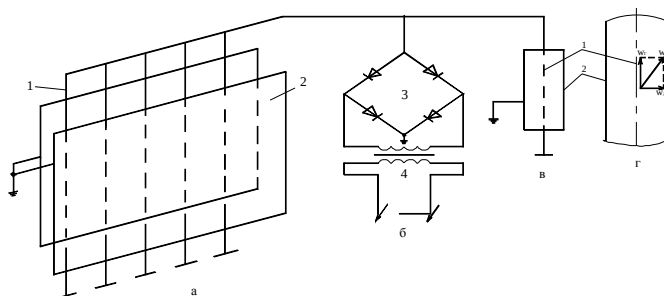


Рис. 5.1. Принципиальные схемы электрофильтров: 1 – коронирующий электрод; 2 – осадительный электрод; 3 – выпрямитель; 4 – повыситель напряжения

В трубчатых электрофильтрах (рис. 5.1, в) запыленный газ пропускают по вертикально расположенным трубам диаметром 200 - 250 мм, по оси которых натянут коронирующий электрод – провод диаметром 2 – 4 мм. Другим осадительным электродом служит сама труба, на внутренней поверхности которой и оседает основная масса уловленной пыли.

В пластинчатых электрофильтрах (рис. 5.1, а) коронирующими электродами являются также провода, натянутые в ряд между параллельными пластинами, которые служат осадительными электродами.

Электрическое поле создается присоединением коронирующих и осадительных электродов к источнику выпрямленного тока (рис. 5.1, б) высокого напряжения (50 – 100 кВ).

5.1.1. Зарядка аэрозольных частиц

Внешняя зона коронного разряда заполнена ионами отрицательного

знака и свободными электронами, движущимися к осадительному электроду.

Скорость движения ионов, пропорциональная напряженности поля, составляет 60 – 100 м/с и характеризуется величиной так называемой *подвижности ионов* k . Из выражения

$$\omega_i = k \cdot E \quad (5.1)$$

следует, что k представляет собой скорость движения иона при напряженности поля $E = 1 \text{ В/м}$.

В воздухе и дымовых газах подвижность отрицательных ионов больше, чем положительных. Это свойство ионов является одной из причин, по которым на коронирующем электроде электрофильтров поддерживается корона отрицательной полярности.

В рабочих условиях электрофильтров при давлениях от 13,3 до $58,8 \cdot 10^5$ Па и температурах 20 – 800 °С подвижность ионов можно считать пропорциональной абсолютной температуре и обратно пропорциональной давлению.

В тщательно очищенных газах (азоте, водороде, окиси углерода) подвижность ионов может возрасти в десятки и сотни раз.

При пропуске через электрофильтр запыленного газового потока частицы пыли адсорбируют на своей поверхности ионы, приобретая электрический заряд. В результате частицы получают ускорение, направленное в сторону осадительного электрода.

Столкновение частиц пыли с ионами газа определяется двумя различными механизмами:

- движением ионов по силовым линиям под действием сил электрического поля;
- тепловым (броуновским) движением молекул (ионов) газа и частиц пыли.

Первый механизм определяет зарядку крупных частиц размером более 1 мкм, а второй – зарядку мелких частиц размером менее 0,2 мкм. Для частиц промежуточных размеров действуют оба механизма зарядки.

Поток ионов на поверхность заряжающейся частицы, равно как его плотность, с течением времени непрерывно уменьшаются. По мере увеличения заряда частицы растет кулоновская сила, отталкивающая ионы, стремя-

щиеся к частице вследствие градиента концентрации их у ее поверхности. Таким образом, плотность потока ионов на частицу определяется двумя силами – результирующего электрического поля и диффузии, противодействующими друг другу. Когда обе эти силы сравняются, зарядка частицы прекратится.

В условиях работы электрофильтра скорость зарядки частиц очень велика и измеряется долями секунды.

Частицы пыли, взвешенные в газе, почти всегда заряжены. Этот заряд, получаемый главным образом за счет трения частиц о стенки оборудования и газопроводов, называют *трибозарядом*. Для одних материалов (кварц, окислы металлов, металлы) трибозаряд отрицателен, для других (уголь, сера, песок) положителен. Трибозаряд обычно не превышает 5 % заряда, получаемого частицей при коронном разряде.

5.1.2. Движение заряженных частиц к осадительному электроду

Скорость движения частиц во внешней зоне коронного разряда устанавливается вследствие совокупного действия следующих сил, действующих на частицу:

- аэродинамическая сила движущегося газового потока;
- силы тяжести;
- давления электрического ветра;
- взаимодействия электрического поля и заряда частицы (кулоновская сила).

Под действием аэродинамической силы частица движется в потоке газа со скоростью, близкой к скорости газового потока (см. рис. 5.1, г). В электрофильтрах обычных конструкций газовый поток движется вдоль осадительных электродов, и поэтому сила давления газового потока не дает составляющей, направленной в сторону осадительного электрода.

Сила тяжести для частиц пыли, как правило, невелика.

За время пребывания в электрофильтре (10 – 15 с) частицы размером 10 мкм падают всего на 3 – 5 см. В большинстве случаев сила тяжести также направлена вдоль электрода. Вследствие незначительной абсолютной величины силу тяжести можно не учитывать.

5.1.3. Осаждение заряженных частиц

Во внутренней зоне коронного разряда в равном количестве образуются ионы положительного и отрицательного знаков. Положительные ионы заряжают частицы пыли, проходящие во внутренней зоне коронного разряда, и нейтрализуются на отрицательном коронирующем электроде. Отрицательные ионы через внешнюю зону коронного разряда движутся к осадительному электроду, заряжают частицы, движущиеся в межэлектродном промежутке, и нейтрализуются на положительном осадительном электроде. Ввиду того, что объем внешней зоны коронного разряда во много раз больше объема внутренней, основная масса частиц пыли получает заряд отрицательного знака. Поэтому основная масса пыли осаждается на положительном осадительном электроде и лишь относительно небольшая часть – на отрицательном коронирующем электроде.

На процесс осаждения частиц влияют многочисленные факторы – проводимость и размер частиц, скорость, температура и влажность газа, состояние поверхности электрода и т. д.

Наиболее важное значение для хода процесса осаждения частиц пыли на электродах имеет электрическое сопротивление слоев пыли, по величине которого пыль можно разделить на три группы:

- пыли с малым удельным электрическим сопротивлением (менее 10^4 Ом·см), которые при соприкосновении с осадительным электродом мгновенно теряют свой заряд и перезаряжаются, приобретая заряд, соответствующий знаку электрода. Вследствие этого между частицей и электродом возникает отталкивающая сила, стремящаяся вернуть частицу в газовый поток, которой противодействует только сила адгезии. В большинстве случаев последняя оказывается недостаточной для удержания частицы и возникающий вторичный унос резко снижает эффективность осаждения;

- пыли с удельным сопротивлением $10^4 - 10^{10}$ Ом·см, хорошо осаждающиеся на электродах и легко удаляемые встряхиванием, не вызывающие трудностей при эксплуатации электрофилтра;

- пыли с удельным электрическим сопротивлением более 10^{10} Ом·см, которые труднее всего улавливаются в электрофилтрах. В этом случае оседающие на электроде частицы разряжаются медленно. В результате на электроде образуется слой отрицательно заряженных частиц, непрерывно увели-

чивающийся за счет вновь осаждающихся частиц и поджигаемый силой поля. С некоторого момента образующееся электрическое поле слоя препятствует осаждению новых частиц и эффективность электрофилтра начинает снижаться.

Пыли третьей группы часто образуют плотный и прочный изолирующий слой, трудно удаляемый с электрода.

Высоким удельным сопротивлением отличаются пыли некоторых огнеупорных материалов (магнезит, гипс), а также некоторые пыли цветной металлургии (окислы свинца и цинка, сульфид свинца). С повышением температуры газа удельное электрическое сопротивление пыли сначала увеличивается, вследствие испарения адсорбированной влаги, а затем начинает падать, вследствие повышения теплового возбуждения электронов в частицах пыли.

Снижение удельного сопротивления слоя пыли может быть достигнуто увлажнением газа, а также добавкой к газу некоторых реагентов (например, сернистого ангидрида, аммиака, хлоридов калия и натрия и т. д.). Аналогичные результаты можно получить при добавлении в газ электропроводных частиц сажи или кокса.

5.2. Классификация и конструкции электрофилтров

Электрофилтры по расположению зон зарядки и осаждения делятся на:

- однозонные, в которых зоны зарядки и осаждения совмещены;
- двухзонные, в которых коронирующий и осадительный электроды разделены и размещены в разных конструктивных зонах.

В соответствии с направлением движения газового потока филтры разделяют на:

- горизонтальные;
- вертикальные.

По форме осадительных электродов электрофилтры различают:

- пластинчатые;
- трубчатые.

По числу последовательно расположенных полей электрофилтры бывают:

- однополевые;
- многополевые.

По числу параллельно работающих секций электрофилтры делятся на:

- односекционные;
- многосекционные.

Вывод уловленной пыли из электрофилтра может осуществляться в сухом виде посредством встряхивания электродов и в мокром виде смывом водой. В соответствии с этим различают

- сухие;
- мокрые.

В зависимости от условий эксплуатации, состава, температуры, давления и влажности газов, физико-химических свойств пыли, требуемой степени очистки и т. д. создано много различных конструкций электрофилтров. Эти конструкции, часто значительно отличающиеся друг от друга, включают в себя следующие основные элементы:

- корпус электрофилтра;
- узлы подвода, распределения и отвода очищаемых газов;
- электроды, коронирующие и осадительные;
- устройства для удаления уловленной пыли с электродов;
- изоляторные коробки - узлы для подачи на электроды высокого напряжения;
- устройства для сбора и вывода уловленной пыли из аппарата.

Корпус электрофилтра выполняют из листовой стали, бетона, кирпича и других материалов в зависимости от температуры и агрессивности газов. При необходимости корпус футеруют или снабжают наружной теплоизоляцией.

Корпус может быть прямоугольным и цилиндрическим. В нем размещены коронирующие и осадительные электроды и собирается уловленная пыль.

Подвод газов к электрофилтру и отвод из него должны обеспечивать равномерное распределение газов в аппарате. Сечение подводящих и отводящих газопроводов определяют, исходя из скорости газа около 20 м/с, обеспечивающей отсутствие осаждения пыли в газопроводе. При присоединении газопроводов к электрофилтру устанавливают диффузоры и конфузоры, необходимые для осуществления плавного перехода от скорости газа в газопроводе к значительно более низкой скорости газа в электрофилтре. При много-

секционных электрофильтрах конструкция газопроводов должна позволять отключать отдельные секции.

На входе газов в электрофильтр устанавливают специальные устройства, выравнивающие скорости газа в сечении электрофильтра: направляющие аппараты, распределительные решетки.

Основным технологическим элементом электрофильтра являются электроды – коронирующие и осадительные.

Коронирующие электроды могут быть гладкими или иметь фиксированные точки разряда.

Коронирующие электроды с фиксированными точками разряда снабжены иглами, на которых и возникает коронный разряд. Меняя шаг игл и их высоту, можно получать определенное значение тока короны. Чаще всего применяют электроды из ленты со штампованными зубцами или шипами.

Осадительные электроды трубчатых электрофильтров чаще всего выполняют из труб круглого сечения диаметром 200 – 300 мм, длиной 3 – 5 м. Иногда применяют и трубы квадратного или шестиугольного сечений. Гладкие пластинчатые осадительные электроды применяют иногда только в мокрых электрофильтрах, так как в сухих при удалении пыли с электродов встряхиванием они дают значительный вторичный унос.

В целях снижения вторичного уноса применяют коробчатые и желобчатые электроды. Коробчатый осадительный электрод представляет собой двустенную коробку, в которую направляется отряхиваемая с электродов пыль. Таким образом, пыль выводится из зоны движения газового потока и падает вниз внутри изолированной от потока коробки. Коробчатые электроды бывают карманными, перфорированными, тюльпанообразными (при вертикальном потоке газов). Общий недостаток коробчатых электродов – сложность изготовления, значительный расход металла.

Пыль с электродов может удаляться как сухим, так и мокрым способами.

Сухое удаление пыли с электродов осуществляют встряхиванием, для чего существует несколько способов. Наибольшее распространение получили системы ударно-молоткового действия. В нижней части осадительные электроды связаны между собой полосой встряхивания (рис. 5.2).

При вращении вала, приводимого от специального электродвигателя, молоток периодически ударяет по наковальне, передающему удар полосе встряхивания и связанным с ней электродам. Молотки насажены со смещени-

ем на 24° , чтобы во избежание увеличения вторичного уноса не все электроды встряхивались одновременно.

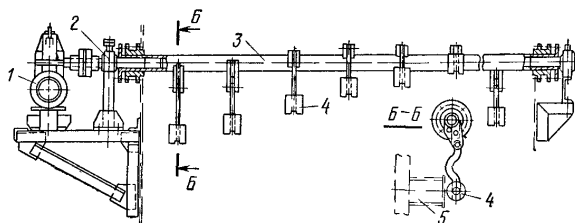


Рис. 5.2. Ударно-молотковый механизм встряхивания электродов: 1 – электропривод; 2 – подшипник; 3 – вал; 4 – молоток; 5 – наковальня

Пружинно-кулачковый механизм встряхивания выполняет ту же задачу при помощи кулачка и пружины.

Магнитно-импульсная система встряхивания основана на взаимодействии стального плунжера и электромагнитного поля.

Вибрационная система встряхивания электродов работает при помощи вибраторов, устанавливаемых в определенных местах на конструкции электрофильтра.

Работа механизмов встряхивания значительно влияет на эффективность электрофильтра. Для каждого поля следует подбирать оптимальную программу включения механизмов встряхивания и интенсивности ударов. Поля следует встряхивать не одновременно, чтобы в последующем поле улавливался вторичный унос предыдущего.

В мокрых электрофильтрах, удаление пыли осуществляется смывом ее водой с поверхности электродов. Смыв можно осуществлять непрерывно и периодически. В первом случае на поверхности осадительных электродов образуется непрерывно текущая пленка воды, которая и смывает осаждающиеся частицы пыли; во втором случае смыв осуществляется при помощи периодически включающихся брызгал и форсунок, направляющих смывающую жидкость на поверхность электродов.

В изоляторных колобках размещены изоляторы, обеспечивающие подачу напряжения на коронирующие электроды. Изоляторы работают в тяжелых условиях – высокая температура, загрязненный газ, значительные меха-

нические усилия, особенно в моменты встряхивания коронирующих электродов.

В зависимости от условий работы в электрофильтрах применяют изоляторы из фарфора, плавленного кварца, бакелита и других изоляционных материалов.

Для предотвращения осаждения пыли на внутренних поверхностях изолятора в шапках изоляторов делают отверстия для подсоса воздуха. При очистке влажных газов изоляторные коробки снабжают теплоизоляцией и электроподогревом для предотвращения конденсации паров на поверхностях изоляторов.

Для сбора пыли, уловленной в электрофильтрах, служат бункера, размещенные в нижней части аппарата. Как правило, каждое поле снабжают отдельным бункером. При большой влажности пыли во избежание слеживания, бункера теплоизолируют, а иногда снабжают обогревом. Если пыль склонна к налипанию, бункер может быть оборудован вибратором. Оптимальный цикл работы вибратора подбирают на месте в зависимости от свойств пыли. Обычно вибратор включают на 15 - 20 с через каждые 5 – 6 мин. Во избежание больших присосов воздуха пыль выгружается из бункера периодически. Для выгрузки применяют роторные (ячейковые) питатели, шнеки или скребковые транспортеры. Датчиками для автоматического включения питателей могут служить сигнализаторы уровня пыли в бункере.

5.3. Однозонные унифицированные сухие электрофильтры

Опыт эксплуатации горизонтальных сухих электрофильтров, применяемых для очистки промышленных газов, позволил унифицировать аппарат этого типа в целях серийного производства.

Унифицированные фильтры серии УГ (унифицированный горизонтальный) широко применяют на заводах черной металлургии для установки за мартеновскими печами, вращающимися и шахтными печами обжига доломита, паровыми котлами ТЭЦ.

В зависимости от температуры газов изготавливают унифицированные электрофильтры двух типов: аппараты УГ, предназначенные для работы при температурах не выше 250 °С, и аппараты УГТ, работающие при температурах до 400 °С.

Для организации равномерного распределения газа по всему сечению электрофильтра при входе в форкамеру устанавливаются две распределительные решетки из перфорированных листов с живым сечением 35 – 40 %, снабженные механизмами встряхивания. Для предотвращения перетоков газа вне активной зоны перед каждым полем устанавливаются направляющие козырьки.

Электрофильтры УГ выпускают трех типоразмеров, различающихся высотой электродов. В аппаратах первого габарита длина электродов составляет 4,0 м, в аппаратах второго габарита 7,26 м и в аппаратах третьего габарита 12,15 м.

Схема четырехпольного электрофильтра УГ изображена на рис. 5.3. Подлежащий очистке газ проходит последовательно через четыре электрических поля, где и подвергается очистке. Каждое поле включено на свой электрический агрегат и работает в своем оптимальном электрическом режиме. У каждого поля предусмотрены свои системы коронирующих и осадительных электродов, встряхивающие устройства, изоляторные коробки, бункер для сбора уловленной пыли.

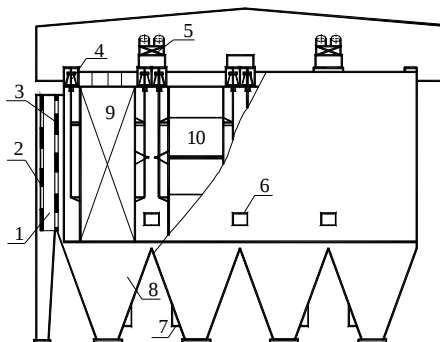


Рис. 5.3. Схема четырехпольного электрофильтра серии УГ:

1 – форкамера; 2 – передняя газораспределительная решетка; 3 – задняя газораспределительная решетка; 4 – опорно-проходной изолятор; 5 – привод встряхивания коронирующих электродов; 6 – смотровой люк; 7 – вибратор бункера; 8 – бункер; 9 – осадительный электрод; 10 – коронирующий электрод

Система встряхивания как осадительных, так и коронирующих электродов ударно-молотковая. Стряхиваемая с электродов пыль осыпается в бункера, которые при необходимости оборудуют вибраторами.

Для осмотра, ремонта и проведения монтажных работ на боковых стенках и крышке электрофильтра сделаны люки, а внутри него устроены площадки. Снаружи предусмотрена система лестниц и площадок для нормальной эксплуатации электрофильтра. Корпус электрофильтра рассчитан на работу под разрежением до 4 кПа.

Электрофильтры УГ рассчитаны для установки на открытом воздухе и снабжены шатровой крышей. Во избежание охлаждения газов ниже точки росы снаружи корпус электрофильтра покрыт теплоизоляцией.

5.4. Мокрые трубчатые электрофильтры

По сравнению с сухими, мокрые электрофильтры дают более тонкую очистку газа. Это объясняется тем, что при осаждении частиц пыли на смоченный осадительный электрод вторичный унос практически отсутствует.

Электрофильтр ДМ имеет цилиндрический корпус, выполненный из стального листа. Внутри корпуса между двумя трубными решетками размещены осадительные электроды, изготовленные из стальных труб внутренним диаметром 233 мм (рис. 5.4).

К верхнему концу каждой трубы приварено стальное кольцо, которым труба опирается на дно верхней трубной решетки. На это дно, разделенное на отсеки, подается вода, которая, достигнув определенного уровня, начинает переливаться по периметру трубы - осадительного электрода, образуя на его внутренней стенке тонкую непрерывно стекающую пленку. Для обеспечения равномерности распределения воды по трубам и периметру каждой трубы на верхние концы труб надевают специальные регулирующие насадки. Вода подается из двух коллекторов, расположенных снаружи корпуса электрофильтра. Непрерывно стекающая пленка смывает оседающую на стенке трубы пыль и отводит шлам в бункер.

Коронирующие электроды круглого сечения свободно висят по оси осадительных труб, прикрепленные к крючкам верхней коронирующей рамы. К нижним концам электродов прикреплены натяжные грузы, на которых лежит нижняя коронирующая рама, фиксирующая правильное положение коронирующих электродов и предохраняющая их от раскачивания.

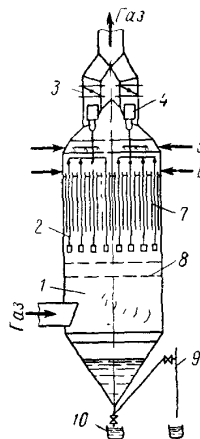


Рис.5.4. Схема трубчатого электрофильтра ДМ с вертикальным ходом газов: 1 - направляющие лопатки; 2 – коронирующие электроды; 3 – дроссель; 4 – изоляторные коробки; 5 – подача воды периодической промывки; 6 – то же, непрерывной промывки; 7 – осадительные электроды; 8 – газораспределительные решетки; 9 – гидрозатворы; 10 – сбросные лотки

Верхняя коронирующая рама подвешена к трем гирляндам высоковольтных фарфоровых изоляторов, размещенных в стальных изоляторных коробках на крышке электрофильтра. Для предохранения изоляторов от охлаждения и конденсации влаги на их поверхности изоляторные коробки покрыты теплоизоляцией и снабжены паровыми рубашками.

Для дополнительной периодической промывки осадительных и коронирующих электродов установлена система брызгал, равномерно распределяющих промывочную воду по сечению аппарата. Часть этой воды через систему желобов попадает на верхнюю раму коронирующих электродов и, стекая по каждому коронирующему электроду, смывает осевшую на нем пыль.

Периодическую промывку проводят посекционно. С помощью верхнего дроссельного клапана подачу газа к промываемой секции прекращают, и на время промывки (10 – 15 мин) снижают с нее напряжение.

Для равномерного распределения газа по сечению электрофильтра в нижней части корпуса установлены система направляющих лопастей и две газораспределительные решетки.

Многочисленные люки и лазы в корпусе электрофильтра, а также система лестниц и площадок обеспечивают доступ к внутренним частям электрофильтра для осмотра и ремонта.

Шлам, образующийся при периодической и непрерывной промывке, стекает в бункер, откуда выводится через гидравлический затвор.

Электрофильтры ДМ приспособлены для установки вне здания, для чего снабжены шатровой крышей.

5.5. Двухзонные электрофильтры

Отличительная особенность двухзонных электрофильтров состоит в наличии двух отдельных электрических полей, в одном из которых происходит зарядка взвешенных частиц, а в другом их осаждение. Благодаря этому каждое поле можно лучше приспособить к выполнению предназначенных ему функций.

Очищаемый газ прежде всего проходит через ионизатор, предназначенный для зарядки частиц пыли в поле коронного разряда, возникающего между электродами положительной и отрицательной полярности (рис. 5.5).

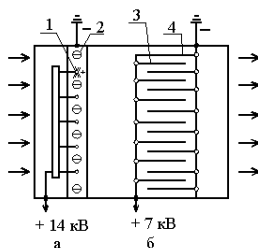


Рис. 5.5. Принципиальная схема двухзонного электрофильтра: а – ионизатор; б – осадитель; 1, 2 – положительные и отрицательные электроды ионизатора; 3, 4 – положительные и отрицательные электроды осадителя

Ионизатор выполнен с таким расчетом, чтобы при скорости около 2 м/с улавливаемая пыль успела зарядиться, но не успела осесть. Ввиду малого диаметра коронирующих электродов и незначительного межэлектродного промежутка ионизатор работает при напряжении 14 кВ, достаточном для получения напряженности поля, обеспечивающего возникновение коронного

разряда. Зарядившиеся частицы пыли газовым потоком выносятся в осадитель, представляющий собой систему пластин. Чередование заземленных пластин и пластин, присоединенных к положительному полюсу выпрямителя, создает равномерное электрическое поле осаждения. Заряженные частицы пыли оседают в поле осадителя на пластинах противоположной полярности. Небольшое расстояние между пластинами (6 – 7 мм) позволяет при небольшом напряжении между пластинами (7 кВ) получать напряженность поля 8 – 10 кВ/см, т. е. примерно вдвое выше, чем в однозонных электрофильтрах, что достаточно для осаждения самых мелких частиц субмикронного размера.

Высокая напряженность поля и малое расстояние между пластинами обуславливают высокую скорость осаждения пыли. Для улавливания 85 - 95% пыли достаточно время пребывания в осадителе 0,2 – 0,4 с.

5.6. Эксплуатация электрофильтров

Ввод электрофильтра в эксплуатацию осуществляют по специально разработанной программе. Перед пуском аппарата в работу снимают вольт-амперную характеристику на воздухе, позволяющую оценить качество монтажа.

После ввода электрофильтра в эксплуатацию необходимо отработать режим встряхивания электродов и газораспределительных решеток.

При нормальной эксплуатации поля электрофильтра должны питаться от своих рабочих агрегатов. При неисправности агрегата необходимо перевести питание на резервный агрегат, а в случае его отсутствия на агрегат соседнего поля.

Для обеспечения нормальной эксплуатации необходимо выполнение следующих требований.

Охлаждение газов. Наиболее эффективно охлаждение в котлах-утилизаторах или поверхностных холодильниках с использованием отнятой от газов теплоты. Возможно также охлаждение впрыском воды или подмешиванием холодного воздуха. Последний способ неэкономичен, так как связан со значительным увеличением объема газа, т. е. непроизводительным увеличением сечения газового тракта, размеров газоочистки и мощности дымососа.

Увлажнение газов. При малой влажности газов (менее 50 г/м³) работа электрофильтров в большинстве случаев неустойчива. Поэтому часто газы приходится увлажнять до 70 – 80 г/м³.

Это делается за счет испарения впрыскиваемой в газ тонкораспыленной воды. Для совмещения процессов увлажнения и охлаждения газа обычно используют скрубберы, устанавливаемые перед электрофильтром.

Хорошие результаты получают при смешивании газа с паром – на коротком участке пути можно получить значительное увлажнение газа.

Поддержание расчетной скорости газов. С течением времени разрушается кладка боровов, нарушается плотность швов, фланцевых соединений, прокладок смотровых люков и т. п. В результате увеличиваются присосы и объемы газа, проходящие через электрофильтр, начинают возрастать. За плотностью всех соединений в процессе эксплуатации необходимо тщательно следить.

Кондиционирование газа. При высоком удельном сопротивлении пыли во избежание образования обратной короны газ необходимо кондиционировать. При улавливании магнезитовой пыли достаточно кондиционировать газы с помощью подачи в них пара.

В более сложных случаях возможно добавление в газы серного ангидрида, аммиака, хлоридов натрия и калия.

Снижение запыленности газа. Если в процессе эксплуатации электрофильтра запыленность систематически повышается до 25 - 30 г/м³ и более, то следует принимать меры, обеспечивающие нормальную работу аппарата. Несколько ослабить явление запыления короны можно повышением напряжения на электродах, снижением скорости пылегазового потока, применением многопольных фильтров. Более радикальным решением вопроса является установка перед электрофильтром газоочистного аппарата грубой очистки, снижающего концентрацию пыли перед электрофильтром до допустимых пределов.

Предварительная коагуляция пыли. При работе на очень тонкодисперсной пыли эффективность работы электрофильтра может быть довольно низкой. Для повышения эффективности можно применить предварительную коагуляцию (агрегирование) частиц пыли. Коагуляция осуществляется различными способами: пропуском газа через акустическое или электрическое поле, а также через какой-либо аппарат мокрой очистки, работающий в режиме коагуляции.

Вопросы для самопроверки

1. Что является коронирующим и осадительным электродом в пластинчатых и трубчатых электрофильтрах?
2. Как происходит зарядка аэрозольных частиц?
3. Чем обусловлено столкновение частиц пыли с ионами газа?
4. На какие группы можно разделить пыль по величине удельного электрического сопротивления?
5. Перечислите основные элементы конструкции электрофильтра.
6. Каким образом происходит удаление пыли с электродов?
7. Что является отличительной особенностью двухзонных электрофильтров?
8. Какие требования необходимо соблюдать при эксплуатации электрофильтров?