

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ**



Ю.А. ГИЧЁВ

ОЧИСТКА ГАЗОВ

Часть II

Днепропетровск НМетАУ 2015

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ**

Ю.А. ГИЧЁВ

ОЧИСТКА ГАЗОВ

Часть II

Утверждено на заседании Ученого совета академии
в качестве конспекта лекций. Протокол №

Днепропетровск НМетАУ 2015

УДК 628.511+669.015.7.074

Гичёв Ю.А. Очистка газов. Часть II: Конспект лекций. - Днепропетровск: НМетАУ, 2015. – 48 с.

Рассмотрены аппараты для очистки газов фильтрацией и аппараты для очистки газов в электрическом поле (электрофильтры). Приведены методики и примеры расчетов тканевого фильтра и электрофильтра. Рассмотрены основные направления очистки промышленных газов от оксидов углерода, серы и азота.

Предназначен для студентов направления 6.050601 – теплоэнергетика.

Илл. 17. Табл. 6. Библиогр.: 8 наим.

Ответственный за выпуск М.В. Губинский, д-р техн. наук, проф.

Рецензенты: В.А. Габринец, д-р техн. наук, проф. (ДНУЖТ)

А.О. Ерёмин, д-р техн. наук, проф. (НМетАУ)

© Национальная металлургическая академия Украины, 2015

© Гичёв Ю.А., 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АППАРАТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА ФИЛЬТРАЦИЕЙ.....	5
1.1 Волокнистые фильтры.....	6
1.2 Зернистые фильтры.....	7
1.3 Тканевые фильтры.....	12
1.4 Расчет тканевого рукавного фильтра.....	18
1.4.1 Методика расчета.....	18
1.4.2 Примеры расчета.....	21
2. АППАРАТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ (ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ).....	24
2.1 Классификация электрофильтров.....	26
2.2 Конструктивные элементы электрофильтров.....	27
2.3 Сухие электрофильтры.....	29
2.4 Мокрые электрофильтры.....	31
2.5 Расчет сухого пластинчатого электрофильтра.....	32
2.5.1 Методика расчета.....	32
2.5.2 Пример расчета.....	34
3. ОЧИСТКА ГАЗОВ ОТ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ.....	40
3.1 Очистка газов от оксидов углерода.....	41
3.2 Очистка газов от оксидов серы.....	42
3.3 Очистка газов от оксидов азота.....	43
ЛИТЕРАТУРА.....	45
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	46

ВВЕДЕНИЕ

В первой части конспекта лекций по дисциплине “Очистка газов” приведены общие сведения об очистке промышленных газов: предельно допустимые концентрации, механизмы улавливания пыли, классификация пылеуловителей и оценка эффективности их работы. В первой части конспекта рассмотрены также два класса аппаратов для очистки промышленных газов от пыли: аппараты сухой механической очистки и аппараты мокрой очистки. Приведены методики и примеры расчетов батарейного циклона и скруббера Вентури.

Стремление к повышению эффективности очистки промышленных газов от пыли привело к разработке ещё двух классов пылеуловителей: аппаратов для очистки газов фильтрацией и аппаратов для очистки газов в электрическом поле (электрофильтров). В связи с этим во второй части конспекта рассмотрены пылеуловители, относящиеся к этим классам. Приведены методики и примеры расчетов тканевого фильтра и электрофильтра. Во второй части конспекта рассмотрены также основные направления очистки промышленных газов от оксидов углерода, серы и азота.

В целом данные, приведенные в конспекте лекций, позволяют в зависимости от конкретных условий сделать выбор пылеуловителей для очистки промышленных газов. Сведения, приведенные в конспекте, позволяют также выполнить необходимые расчеты при выборе аппаратов для очистки и осуществить выбор аппаратов из числа серийно выпускаемых.

Материалы, представленные в конспекте, тесно взаимосвязаны с рядом других специальных дисциплин, читаемых для студентов теплоэнергетиков: “Котельные установки”, “Источники теплоснабжения промышленных предприятий”, “Тепловые электростанции”, “Вторичные энергоресурсы” и другие. Чтение этих дисциплин совместно с дисциплиной “Очистка газов” позволяет оценить технические решения, принимаемые в теплоэнергетике не только с точки зрения энергетической эффективности, но и с точки зрения влияния на экологию.

Конспект лекций соответствует рабочей программе по дисциплине “Очистка газов” для специальности 6.050601 – теплоэнергетика и может быть использован студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также выпускных работ бакалавров и магистров.

1 АППАРАТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА ФИЛЬТРАЦИЕЙ

Очистка газов при движении их через пористые среды называется *фильтрацией*. Соответственно, аппараты для очистки газов от пыли путем фильтрации, называются *фильтрами*.

Осаждение пыли при фильтрации осуществляется вследствие касания, зацепления, просеивания, а также действия гравитации, инерции и электростатических сил. В зависимости от характеристики частиц пыли, вида фильтрующей пористой среды и скорости фильтрации могут преобладать те или иные силы, осаждающие пыль.

В начальный период, когда в пористой фильтрующей среде отсутствует пыль, частички пыли аккумулируются в порах, а затем наслаиваются на поверхность пористых перегородок, что создает дополнительный, наряду с пористой перегородкой, фильтр для очистки газов. По мере очистки сопротивление пористых перегородок возрастает, и фильтры требуют регенерации или замены фильтрующего материала.

Большое разнообразие конструкций фильтров условно можно разделить в зависимости от назначения на три класса:

- *Фильтры тонкой очистки* – предназначены для высокоэффективной (свыше 99%) очистки газа от субмикронной пыли при низкой входной концентрации пыли (до 5 мг/м³) и скорости фильтрации до 0,1 м/с.

Такие фильтры применяют для ультратонкой очистки воздуха и других газов в различных технологиях. Фильтрующий материал обычно не подлежит регенерации.

- *Воздушные фильтры* – применяются для очистки атмосферного воздуха в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха. Входная концентрация пыли до 50 мг/м³, скорость фильтрации до 2,5-3,0 м/с.

- *Промышленные фильтры* – применяют для очистки промышленных газов с различной начальной концентрацией пыли.

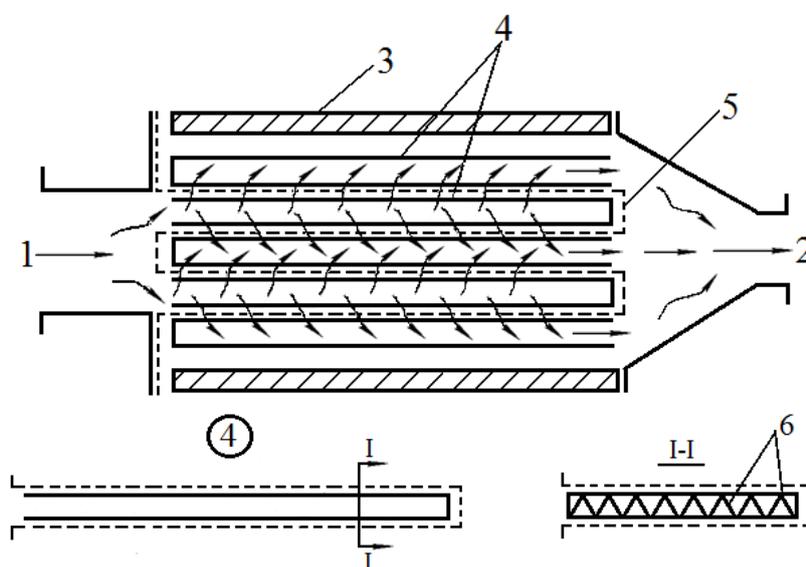
В числе фильтров промышленного применения следует выделить *волокнистые, зернистые и тканевые фильтры*.

1.1 Волокнистые фильтры

Волокнистые фильтры применяют для очистки газов и воздуха при проведении технологических процессов или при сбросе обработанных технологических газов в атмосферу. Начальная концентрация частиц пыли составляет до 5 мг/м^3 , размеры частиц до 5–10 мкм.

Для фильтров применяют искусственные волокна толщиной от 0,1 мкм до 100 мкм из полимерных смол (полистирол, перхлорвинил, полиарилат и др.). Скорость фильтрации $0,01 \div 0,10 \text{ м/с}$.

В качестве примера рассмотрим конструкцию рамного волокнистого фильтра (см. рис. 1.1).



1 и 2 – вход и выход очищаемого газа; 3 – корпус фильтра; 4 – П-образные рамки; 5 – фильтрующий материал; 6 – каркас.

Рисунок 1.1 – Схема рамного волокнистого фильтра

Фильтрующий материал укладывается между П-образными рамками в виде ленты. П-образные рамки при сборке пакета чередуются открытыми и закрытыми сторонами в противоположных направлениях. Для удерживания фильтрующей ленты внутри рамки размещается каркас.

Фильтры предназначены для работы без регенерации до трех лет с последующей заменой фильтрующего материала или фильтрующего пакета в целом.

1.2 Зернистые фильтры

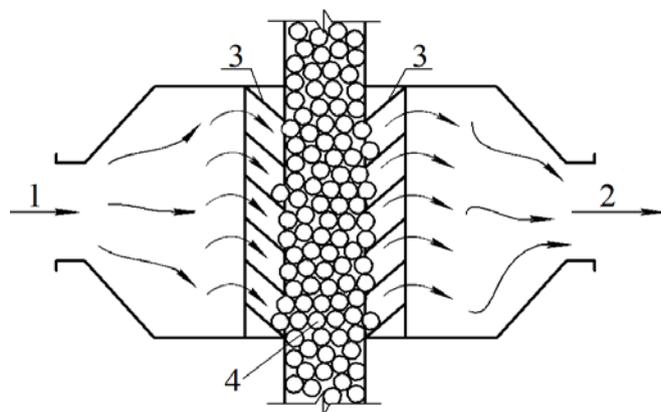
В зернистых фильтрах фильтрация запыленного газа происходит через зернистый слой, в качестве которого применяют:

- специально изготовленный искусственный зернистый или кусковой материал (гранулы, сферы, кольца и т.п.);
- подготовленный природный материал (гравий, щебень, песок, галька и проч.);
- промышленные отходы (металлургический шлак, стружка, получаемая при металлообработке, и т.п.);
- кусковое или зернистое сырье технологических процессов (окатыши, известняк, руда, уголь и др.).

Зернистую насадку обычно подбирают определенных размеров или готовят путем дробления, просеивания и сортировки для получения необходимых гранулометрических фракций.

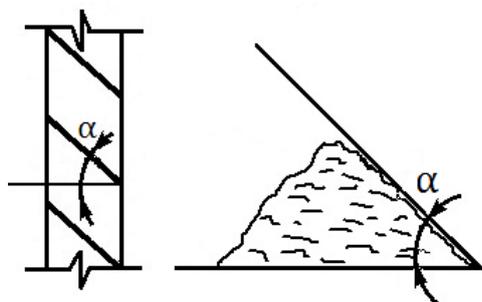
Для формирования зернистого слоя применяют:

I. Жалюзийные решетки (см. рис. 1.2)



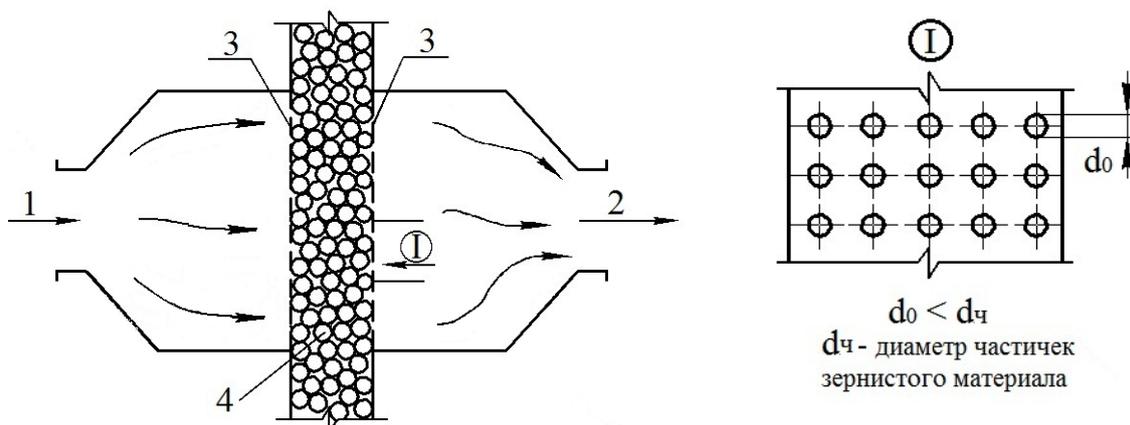
1 и 2 – вход и выход очищаемого газа; 3 – жалюзийная решетка; 4 – зернистый материал.

Рисунок 1.2 – Зернистый фильтр с жалюзийными решетками



Угол наклона жалюзей α должен быть не менее угла естественного откоса зернистого материала, т.е. угла который образует конус зернистого материала при насыпании материала на горизонтальную плоскость. Это исключает высыпание зерен насадки через жалюзийные решетки, $\alpha=55\div 65^\circ$.

II. Вертикальные перфорированные листы (см. рис. 1.3)



1 и 2 – вход и выход очищаемого газа; 3 – перфорированные вертикальные листы; 4 – зернистая насадка.

Рисунок 1.3 – Зернистый фильтр с перфорированными листами

Размеры отверстий (d_0) в перфорированных листах должны быть не более диаметра частиц ($d_{ч}$) самой мелкой фракции фильтрующего зернистого материала.

III. Комбинация жалюзийной решетки и перфорированного листа (см. рис. 1.4)

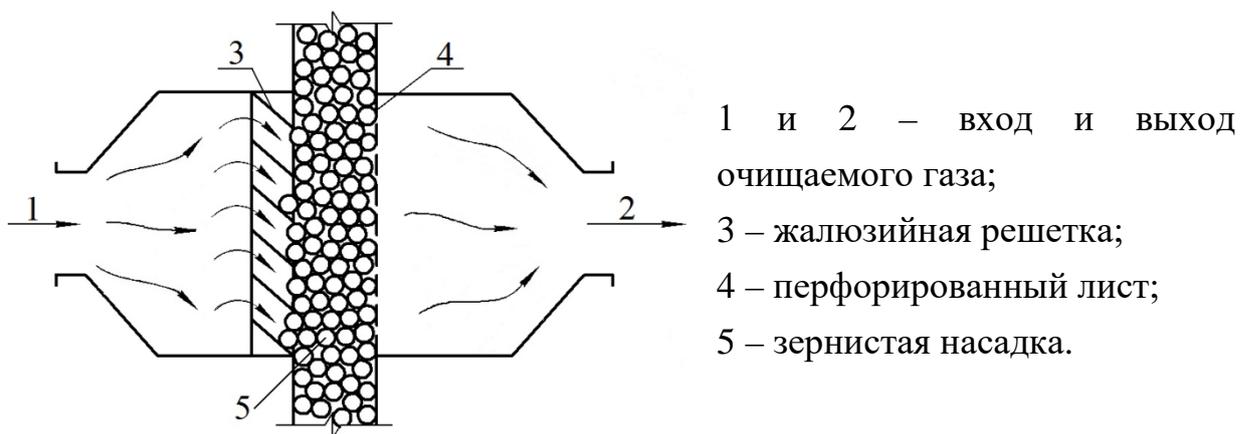
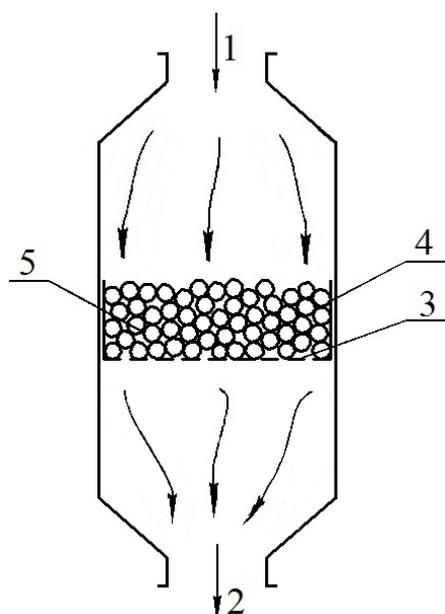


Рисунок 1.4 – Зернистый фильтр с жалюзийной решеткой и перфорированным листом

В этой комбинации перфорированный лист предотвращает вынос частиц фильтрующего зернистого материала при больших скоростях фильтрации.

IV. Горизонтальный перфорированный лист



1 и 2 – вход и выход очищаемого газа; 3 – горизонтальный перфорированный лист; 4 – контейнер; 5 – зернистый материал.

Рисунок 1.5 – Зернистый фильтр с горизонтальным перфорированным листом

Горизонтальный перфорированный лист выполнен в виде днища контейнера, в который загружают зернистый материал. Подача газа осуществляется сверху, что исключает со стороны входа перфорированный лист или жалюзи. Это позволяет подавать на фильтрацию высокотемпературный газ, а слой фильтрующего материала выполняет функцию тепловой защиты горизонтального перфорированного листа от высоких температур.

Для возможности фильтрации высокотемпературного газа (до 600-700 °С) жалюзийные решетки оборудуют *водоохлаждаемыми трубами* или выполняют в виде *трубчатых водоохлаждаемых панелей*.



Механизм осаждения пыли в зернистых фильтрах представляет собой сочетание касания, зацепления, отсеивания, гравитации, инерции и электростатики.

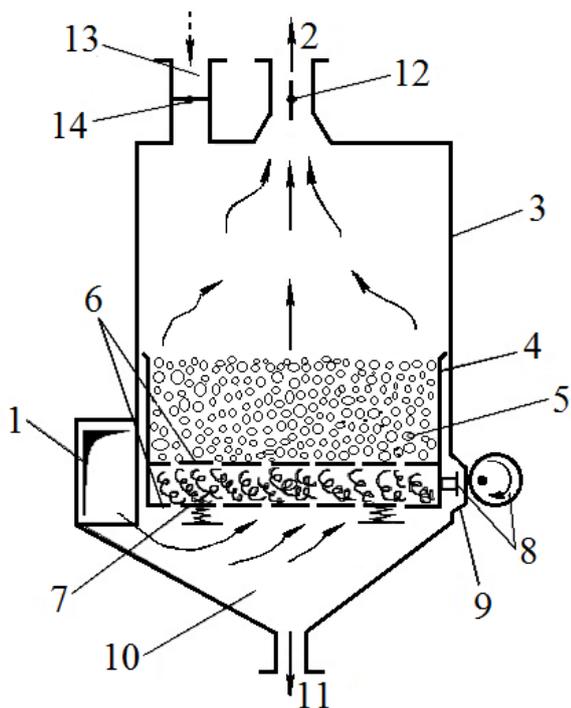
При малой запыленности газа и небольших скоростях фильтрации пыль улавливается в объеме зернистого материала, т.е. в порах между частичками слоя. При большой запыленности газа крупнодисперсной пылью и больших скоростях фильтрации пыль осаждается на поверхности слоя. В большинстве случаев сочетаются оба режима фильтрации.

Предельная начальная запыленность газа для зернистых фильтров до 15–20 г/м³, скорость фильтрации 0,2÷0,8 м/с, степень очистки – 95–98% (в некоторых фильтрах может составить 99% и выше).

Степень очистки газа зависит от свойств фильтрующего материала, характеристики улавливаемой пыли и режима фильтрации.

По мере накопления пыли в слое зернистого материала степень очистки повышается до определенной величины. Затем степень очистки начинает снижаться, т.к. вследствие забивания пылью увеличивается скорость газа в поровых каналах слоя, что приводит к выносу пыли. По мере очистки растет также гидравлическое сопротивление фильтра, что требует его регенерации. Регенерация осуществляется обратной продувкой, вибровстряхиванием или комбинацией обратной продувки и вибровстряхивания.

Схема зернистого фильтра с регенерацией путем обратной продувки и вибрации фильтрующего слоя представлена на рис. 1.6.



1 и 2 – вход и выход очищаемого газа; 3 – корпус фильтра; 4 – контейнер с фильтрующим слоем; 5 – слой гравия; 6 – перфорированные листы; 7 – слой металлической стружки; 8 – вибратор, выполненный в виде эксцентрика с толкателем; 9 – уплотняющий сальфон; 10 – бункер уловленной пыли; 11 – патрубок для удаления пыли; 12 – клапан, управляющий потоком очищаемого газа; 13 – патрубок для подачи воздуха при обратной продувке; 14 – клапан, управляющий потоком обратной продувки.

Рисунок 1.6 – Зернистый фильтр с комбинированной регенерацией

Слой стружки выполняет функцию фильтра грубой очистки. Окончательная очистка происходит при прохождении газа через слой гравия.

При регенерации клапан 12 *закрит*, а клапан 14 для подачи воздуха обратной продувки *открыт*. При этом происходит также вибрация контейнера. В результате уловленная пыль проваливается в бункер 10.

В промышленном варианте фильтр komponуется в виде нескольких секций, одна из которых находится в состоянии регенерации, а остальные в режиме фильтрации, что обеспечивает непрерывную работу фильтра в целом.

Такого типа фильтры применяются для улавливания пыли механического происхождения (после дробилок, грохотов, мельниц, сушилок) при производстве цемента, извести, гипса, фосфорных удобрений и проч.

Для фильтра с зернистым подвижным слоем (см. рис. 1.7) исключается регенерация в процессе фильтрации, т.к. слой непрерывно или периодически обновляется.

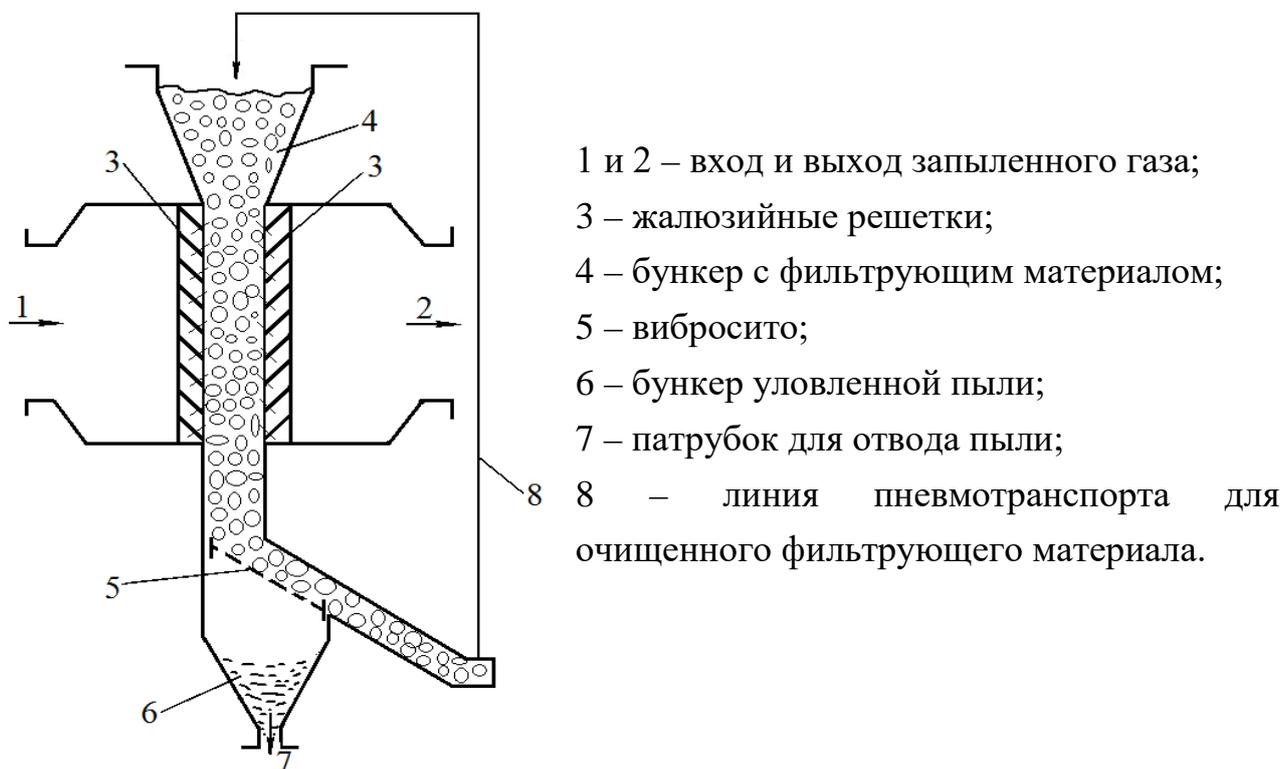


Рисунок 1.7 – Зернистый фильтр с подвижным слоем

В фильтре за счет вибрации сита происходит гравитационное движение зернистого материала с уловленной пылью. На вибрирующем сите уловленные частицы пыли отсеваются и проваливаются в бункер. Очищенный зернистый материал подается в верхний бункер для повторного использования, например, пневмотранспортом или механическим конвейером.

При использовании фильтрующего материала в качестве сырья технологического процесса фильтр с движущимся слоем существенно упрощается, т.к. нет необходимости в отсеивании пыли и в транспортировке фильтрующего материала в верхний бункер. Например, при очистки отходящих газов известково-обжиговых печей применяют движущийся слой известняка, который вместе с уловленной известковой пылью загружается в печь. При этом помимо очистки утилизируется теплота отходящих из печи газов на предварительный подогрев известняка, загружаемого печь.

В целом следует отметить ряд достоинств зернистых фильтров:

- компактность и сравнительно невысокая стоимость;
- возможность работать при высоких температурах, агрессивных средах и при больших механических нагрузках;
- доступность фильтрующего материала, т.к. можно использовать большое разнообразие кусковых и зернистых материалов, в том числе, применить в качестве фильтрующего материала сырьё технологического процесса.

1.3 Тканевые фильтры

В тканевых фильтрах в качестве фильтрующего материала применяются различные виды фильтровальных тканей из натуральных или синтетических волокон: хлопчатобумажные, шерстяные, нитроновые, лавсановые, стеклоткани и проч.

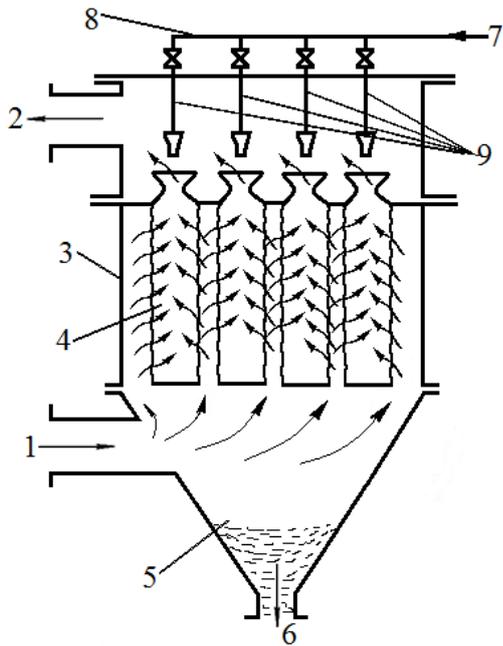
Основные формы тканевых фильтровальных элементов: *рукавные и плоские*.

Опоры фильтровальных элементов выполняют в виде *каркасов или рам*.

В промышленности наиболее распространены *каркасные рукавные* фильтры (см. рис. 1.8).

Оптимальная скорость фильтрации в тканевых фильтрах составляет $0,5 \div 1,0$ м/мин.

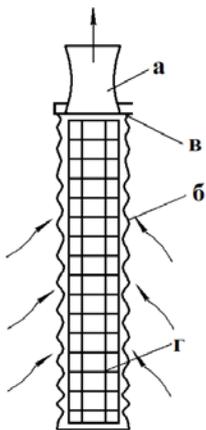
При скоростях более 1 м/мин снижается эффективность улавливания пыли из-за выноса частиц пыли из ткани, а также возрастает газодинамическое сопротивление фильтра. При скоростях менее 0,5 м/мин увеличивается поверхность фильтрации и, соответственно, увеличиваются габариты фильтра.



1 и 2 – вход и выход очищаемого газа; 3 – корпус фильтра; 4 – рукав фильтровального элемента; 5 – бункер для сбора уловленной пыли; 6 – патрубок для отвода пыли; 7 – подача воздуха для импульсной продувки при регенерации фильтровальных элементов; 8 – коллектор импульсной продувки; 9 – сопла.

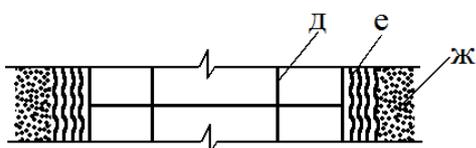
Рисунок 1.8 – Тканевый рукавный каркасный фильтр

Рукавная форма фильтровального элемента создается цилиндрическим каркасом.



а – выходной патрубок фильтровального элемента;
 б – фильтровальный рукав;
 в – хомут для крепления фильтра;
 г – каркас.

При фильтрации запыленного газа через чистую ткань в начальный период продувки в объеме ткани задерживаются частицы пыли вследствие касания, зацепления, гравитации, инерции и электростатических сил. Затем начинает формироваться слой пыли на поверхности ткани, т.е. начинает действовать ситовой эффект задерживания пыли. Слой пыли на поверхности ткани (вторичный слой, автослой) постепенно возрастает и становится главной фильтрующей средой.



д – каркас;
 е – ткань;
 ж – вторичный слой пыли.

Эффективность вторичного пылевого слоя на поверхности ткани подтверждается высокой степенью очистки газов при запыленном состоянии тканевых фильтров. Степень очистки может составить свыше 99,9%.

С течением времени за счет увеличения вторичного слоя на поверхности фильтров возрастает сопротивление фильтров, что требует их регенерации.

Следует выделить два основных способа регенерации тканевых фильтров: встряхивание и обратная продувка.

1. *Встряхивание фильтрующих элементов,* может быть механическим, аэродинамическим и акустическим.

При *механическом встряхивании* фильтры включают необходимые конструктивные элементы, обеспечивающие периодическое резкое смещение фильтровальных рукавов (продольное, вертикальное или комбинированное). Например, поднятием штанги подвеса рукавов на 7–10 см и последующим сбрасыванием штанги вместе с рукавами. Подъем и сброс рукавов повторяется 5÷15 раз в зависимости свойств пыли, вида и степени запыленности ткани.

При *аэродинамическом встряхивании* импульс сжатого воздуха поочередно подается внутрь каждого фильтрующего элемента через сопла (см. рис. 1.8). Избыточное давление сжатого воздуха составляет 0,4÷0,8 МПа, длительность импульса 0,1–0,2 с, частота - 5÷10 импульсов в минуту на каждый рукав.

Акустическое встряхивание заключается в воздействии на фильтровальные элементы звуковым полем. Для этого фильтры оборудуют генераторами звука.

2. *Обратная продувка рукавных фильтров* может быть струйной и посекционной.

При *обратной струйной продувке* вдоль рукава вверх и вниз движется полое кольцо со щелью обращений к незапыленной поверхности ткани (см. рис. 1.9).

Через кольцевую щель шириной 0,2–2,0 мм происходит истечение кольцевой струи сжатого воздуха давлением 0,5–0,6 МПа со скоростью 10–30 м/с. Струя сжатого воздуха выдувает пыль из ткани внутрь рукава.

Обратная струйная продувка применяется при малых концентрациях пыли. Методическая и тщательная очистка фильтровального материала кольцевыми соплами позволяет применять скорость фильтрации до 3–5 м/мин. Регенерация обратной струйной продувкой не требует отключения фильтра.

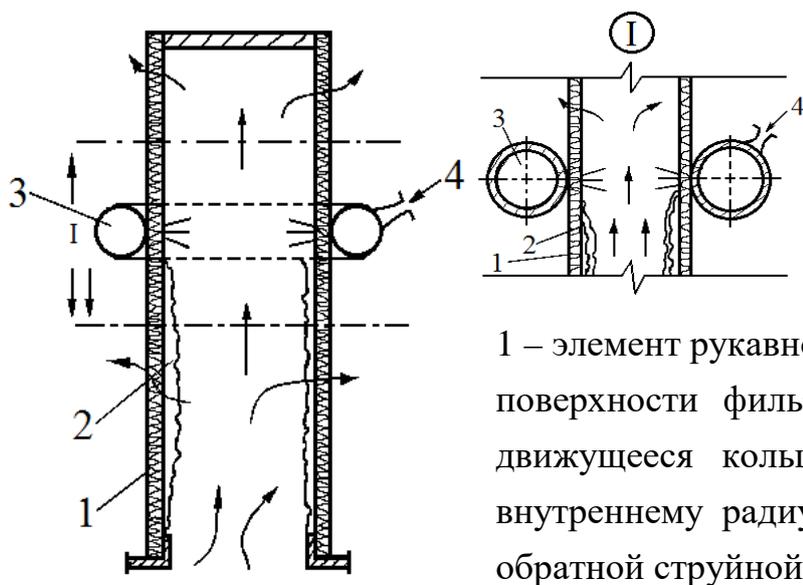
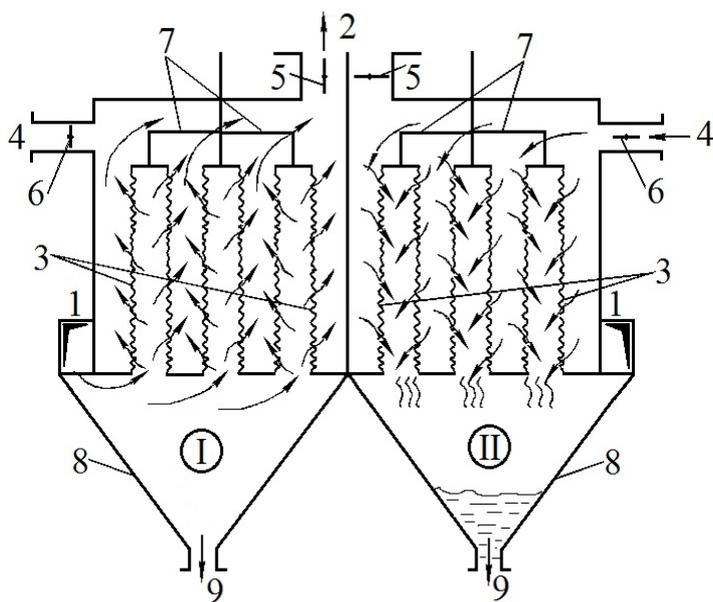


Рисунок 1.9 – Схема обратной струйной продувки

При *посекционной обратной продувке* тканевый фильтр включает несколько секций, одна из которых находится в режиме обратной продувки (см. рис. 1.10).



I – секция в режиме очистки газа; II – секция в режиме регенерации; 1 – подача запыленного газа; 2 – отвод очищенного газа; 3 – рукава фильтра; 4 – патрубок для подачи воздуха обратной продувки; 5, 6 – клапаны, управляющие потоками очищенного газа и продувочного воздуха; 7 – штанги для подвеса рукавов фильтра; 8 – бункер уловленной пыли; 9 – патрубок для отвода пыли.

Рисунок 1.10 – Схема посекционной обратной продувки

При работе секции в режиме очистки (I) запыленный газ поступает во внутрь рукавов снизу. Частицы пыли, содержащиеся в газе, оседают на

внутренней поверхности рукавов, что увеличивает газодинамическое сопротивление секции.

При достижении предельного газодинамического сопротивления секция переводится в режим регенерации (II). Клапан 5 на выходе очищенного газа закрывается, а клапан 6 на входе продувочного воздуха открывается. Фильтруясь через рукава в обратном направлении продувочный воздух разрушает слой пыли, образовавшийся на внутренней поверхности рукавов. Пыль сбрасывается в бункер и удаляется при помощи шнека или другого устройства. Отработанный продувочный воздух поступает в газопровод грязного газа.

Для повышения эффективности регенерации одновременно с обратной продувкой осуществляют встряхивание путем подъема и сбрасывания штанги для подвеса рукавов фильтра. Для этого штанги подвеса оборудованы специальным механизмом.

После регенерации снижается не только сопротивление фильтра, но и эффективность улавливания пыли, т.к. удаляется слой пыли на поверхности ткани. В последствии эффективность улавливания пыли восстанавливается. Для быстрого восстановления эффективности улавливания не следует при регенерации удалять пыль, проникшую во внутрь ткани и осевшую в порах. Для этого обратную продувку следует вести при невысоких скоростях, соизмеримых со скоростью фильтрации.

Секции фильтра переводят на регенерацию по очереди, что обеспечивает непрерывную работу фильтра.

В целом по всему фильтру количество газа, проходящего через фильтрующие рукава в режиме очистки, составляет:

$$V_{\Gamma} = V'_{\Gamma} + f \cdot V_{\text{пр}}, \quad (1.1)$$

где V'_{Γ} – объемный расход подводимого к фильтру запыленного газа; f – площадь поверхности фильтровальных рукавов одной секции; $V_{\text{пр}}$ – скорость воздуха при обратной продувке.

Второе слагаемое в правой части уравнения (1.1) учитывает расход отработанного продувочного воздуха, который присоединяется к очищаемому газу на входе в фильтр через газопровод грязного газа.

Необходимая общая поверхность рукавов всех секций составляет:

$$F = \frac{V_r}{v_\phi} + f, \quad (1.2)$$

где v_ϕ – скорость фильтрации очищаемого от пыли газа.

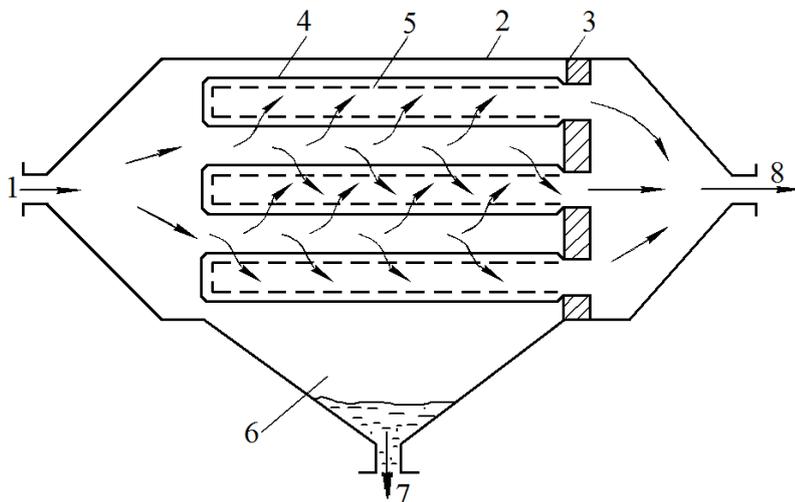
Количество секций в фильтре определяется отношением:

$$n = F/f. \quad (1.3)$$

Диаметр рукава тканевого фильтра – от 0,135–0,220 м до 0,5– 0,6 м. Длина рукава составляет от 2,4–3,4 м до 9 м. Срок службы рукавов из достаточно прочных синтетических тканей (нитрон, лавсан) до 12 месяцев.

Термостойкость тканевых фильтров зависит от вида волокна и составляет до 250–300 °С (стекловолокно).

Помимо рукавных фильтров применяют фильтры с плоскими фильтрующими элементами (см. рис. 1.11).



1 – подвод газа на очистку; 2 – корпус фильтра; 3 – перегородка; 4 – фильтрующий материал; 5 – каркас (сеточный или проволочный); 6 – бункер для уловленной пыли; 7 – патрубок для удаления пыли; 8 – отвод очищенного газа.

Рисунок 1.11 – Тканевый фильтр с плоскими фильтрующими элементами

Фильтрующая ткань размещается на проволочном или сеточном каркасе. Фильтр может работать в непрерывном и периодическом режиме. Регенерация может осуществляться вибрацией или импульсной продувкой.

Плоские фильтры значительно компактнее рукавных, однако менее удобны при эксплуатации: быстрое истирание тканей на каркасе и сложная замена фильтровального материала, что ограничивает применение плоских фильтров.

1.4 Расчет тканевого рукавного фильтра

1.4.1 Методика расчета

Необходимая площадь фильтровальной ткани в рукавном фильтре определяется потерей давления газа, которая зависит от скорости фильтрации, частоты регенерации и ряда других факторов.

Скорость фильтрации принимают, как правило, на основании опытных данных в зависимости от вида применяемой ткани, метода регенерации и свойств пыли.

Рекомендуемые скорости фильтрации в зависимости от вида пыли и способа регенерации фильтра приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Рекомендуемые скорости фильтрации в рукавных фильтрах, м/с

Класс пыли	Вид пыли	Способ регенерации фильтра		
		встряхиванием и продувкой	импульсной продувкой	обратной продувкой
1	Сажа, кремнезем, возгоны свинца и цинка, активированный уголь, цемент.	0,0075-0,0100	0,0133-0,0333	0,0055-0,0075
2	Возгоны железа и ферросплавов, литейные пыли, известь, глинозем.	0,0100-0,0125	0,0250-0,0417	0,0075-0,0092
3	Каменный уголь, известняк, рудные пыли, фритта эмалей.	0,0117-0,0133	0,0333-0,0583	0,0100-0,0150
4	Асбест, волокнистые пыли, соли, пыли шлифовальных процессов.	0,0133-0,0258	0,0417-0,0750	—
5	Древесная пыль, грубые растительные волокна (пенька, джут и проч.).	0,0150-0,0333	0,0417-0,1000	—

В фильтре, состоящем из n секций, площадь фильтровальной поверхности одной секции составит:

$$F_c = \frac{V}{v_\phi \cdot (n - n_p) - n_p \cdot v_p}, \text{ м}^2, \quad (1.4)$$

где V – объем поступающего на очистку газа при рабочих условиях в расчете на одну секцию, м³/с; v_{ϕ} – скорость фильтрации, м/с; n_p – число секций фильтра, одновременно находящихся в режиме регенерации; v_p – скорость газа в процессе регенерации, м/с.

Общая площадь фильтровальной поверхности составит:

$$F = n \cdot F_c, \text{ м}^2. \quad (1.5)$$

Обычно удельная нагрузка на фильтровальную ткань в процессе регенерации обратной продувкой в 1,5–2,0 раза превышает нагрузку при фильтрации в процессе очистки газа, т.е. $v_p/v_{\phi}=1,5-2,0$. Для синтетических и стеклянных тканей это отношение принимается несколько меньшим во избежание разрушения тканей от интенсивной обратной продувки.

При регенерации фильтра встряхиванием или импульсной продувкой в формуле (1.4) n_p и v_p равны нулю. Расход газа на импульсную продувку, обычно не превышает 0,1–0,2% от количества поступающего на очистку газа и учитывается соответствующим увеличением расхода газа в формуле (1.4), которая при регенерации импульсной продувкой принимает вид:

$$F_c = \frac{V + V_p}{v_{\phi} \cdot n}, \quad (1.6)$$

где V_p - расход воздуха на регенерацию импульсной продувкой.

После вычисления площади фильтровальной поверхности по формулам (1.4) и (1.5) выбирают (по каталогам) соответствующий фильтр или группу фильтров и определяют фактическую скорость фильтрации:

$$v'_{\phi} = \frac{V + n_p \cdot F_c \cdot v_p}{F_c \cdot (n - n_p)}, \text{ м/с}. \quad (1.7)$$

Потеря давления в фильтре (фильтровальном элементе) определяется выражением:

$$\Delta p = \frac{817 \mu v'_{\phi} (1 - m_{\Pi})}{d_{\Pi}^2 m_{\Pi}^3} \left[0,82 \cdot 10^{-6} d_{\Pi}^{0,25} m_{\Pi}^3 (1 - m_{\Pi}) h^{0,67} + \frac{z_1 v'_{\phi} \tau_p}{\rho_{\Pi}} \right], \text{ Па}, \quad (1.8)$$

где μ – динамическая вязкость газа при рабочих условиях, Па·с; m_{Π} – пористость слоя пыли, доли.ед; d_{Π} – средний размер частиц пыли, определенный методом воздухопроницаемости, м; m_{τ} – пористость фильтровальной ткани, доли. ед.; h – удельное гидравлическое сопротивление чистой ткани, отнесенное к толщине ткани 1 м при скорости фильтрации

воздуха 1 м/с, Па; z_1 – начальная запыленность очищаемого газа, кг/м³; τ_p – время между регенерациями, с; $\rho_{п}$ – плотность пыли, кг/м³.

Значение m_T и h для некоторых фильтровальных тканей приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Характеристика фильтровальных тканей

Ткань	Термостойкость, °С	Устойчивость к воздействию		Пористость (m_T), доли.ед	Удельное гидравлическое сопротивление (h), 10 ⁵ Па
		кислот	щелочей		
Хлопок	65-80	низк.	высок.	0,60	-
Шерсть	80-100	невысок.	низк.	0,86-0,91	0,84
Нитрон	120	высок.	невысок.	0,83	1,80
Лавсан	140	высок.	невысок.	0,75	3,50
Оксалон	250	высок.	-	-	7,20
Стекло	250-300	высок.	невысок.	0,55	8,40

Пористость слоя пыли $m_{п}$ зависит от крупности пыли, режима фильтрации, влажности газа, температуры газа и проч. Для металлургических пылей величина $m_{п}$ составляет 0,80÷0,95.

При заданном значении потери давления в фильтре зависимость (1.8) позволяет определить время между регенерациями фильтра τ_p или скорость фильтрации $v'_ф$.

Режим работы фильтра (скорость фильтрации и допустимое значение потери давления) также может быть выбран по экспериментальным данным, полученным на опытных установках в промышленных условиях. Например, на рисунке 1.12 показаны результаты промышленных испытаний фильтровального рукава из металлической сетки С-120 при очистке от пыли газов мартеновской печи в период продувки ванны кислородом, температура очищаемого газа – 600 °С. График на рисунке 1.12 позволяет установить сочетание $v'_ф$ и Δp , обеспечивающие содержание пыли в очищенном газе в пределах санитарных норм.

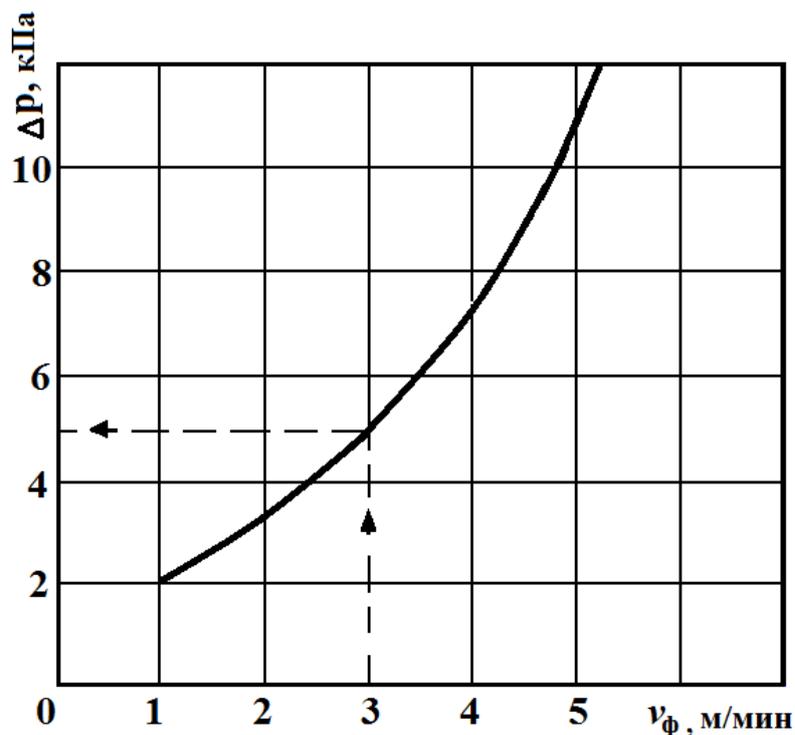


Рисунок 1.12 – Минимальные сопротивления Δp металлоткани С-120 перед регенерацией, обеспечивающие очистку газа мартеновских печей до санитарной нормы при различных скоростях фильтрации v_{ϕ} .

1.4.2 Примеры расчета

Пример 1. Рассчитать рукавный фильтр при следующих исходных данных:

- объемный расход очищаемого газа при рабочих условиях (на одну секцию фильтра) – $V_c=48 \text{ м}^3/\text{с}$;
- запыленность поступающего на очистку газа – $z_1=4 \text{ г}/\text{м}^3$;
- плотность пыли – $\rho_{\text{п}}=3500 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- средний размер частиц пыли – $d_{\text{п}}=1 \text{ мкм}$;
- пористость слоя пыли – $m_{\text{п}}=0,85$;
- температура газа – $t=100^\circ\text{C}$;
- динамическая вязкость газа при рабочих условиях – $\mu=22 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- допустимое сопротивление фильтра – $\Delta p=1 \text{ кПа}$.

Согласно заданию целесообразно выбрать фильтр из ткани нитрон, термостойкость которой 120°C , пористость $m_{\text{т}}=0,83$, удельное сопротивление $h=1,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (см. табл.1.2).

Для улавливания возгонной пыли в черной и цветной металлургии рекомендуется применять фильтры ФРГ, УРФМ и некоторые другие.

Например, выбираем фильтр УРФМ (укрупненный рукавный фильтр, модернизированный), который состоит из 20 секций, имеющих общую площадь фильтровальной поверхности 2300 м². Регенерация фильтра производится встряхиванием и обратной продувкой.

Согласно таблице 1.1 для возгонной пыли ($d_{п}=1\text{мкм}$) и способа регенерации выбранного фильтра (встряхиванием и продувкой) следует принять скорость фильтрации $v_{\phi}=0,0125$ м/с. В этом случае необходимая общая площадь фильтровальной поверхности в соответствии (1.4) и (1.5) составит:

$$F_c = \frac{V}{v_{\phi} \cdot (n - n_p) - n_p \cdot v_p}, \text{ м}^2,$$

$$F = n \cdot F_c, \text{ м}^2,$$

$$F = \frac{n \cdot F_c}{v_{\phi} \cdot (n - n_p) - n_p \cdot v_p}, \text{ м}^2, \quad (1.9)$$

$$F = \frac{20 \cdot 48}{0,0125 \cdot (20 - 1) - 1 \cdot 2 \cdot 0,0125} = 4518 \text{ м}^2,$$

где $n=20$, $n_p=1$ и $v_p=2 \cdot v_{\phi}$.

Принимаем к установке два фильтра УРМФ, т. к. $4518/2300=1,96$.

В двух фильтрах в режиме регенерации одновременно будут находиться две секции ($n_p=2$) и фактическая скорость фильтрации по формуле (1.7) составит:

$$v'_{\phi} = [V + n_p \cdot (2300/20) \cdot v_p] / [2300/20 \cdot (2 \cdot n - n_p)], \text{ м/с},$$

$$v'_{\phi} = [48 + 2 \cdot 115 \cdot 0,025] / [115 \cdot (40 - 2)] = 0,0123 \text{ м/с},$$

где $2300/20$ – площадь фильтровальной поверхности одной секции F_c выбранного фильтра.

Полученная скорость находится в рекомендуемых пределах скоростей фильтрации (см. табл. 1.1).

При допустимом сопротивлении фильтра $\Delta p=1$ кПа и фактической скорости фильтрации $v'_{\phi}=0,0123$ м/с время между регенерациями фильтра в соответствии с формулой (1.8) составит:

$$\tau_p = \frac{\rho_{п} \cdot (\Delta p - A \cdot B)}{A \cdot z_1 \cdot v'_{\phi}}, \quad (1.10)$$

где $A = (817 \cdot \mu \cdot v'_{\phi} \cdot (1 - m_{п})) / (d_{п}^2 \cdot m_{п}^3),$

$$B = 0,82 \cdot 10^{-6} \cdot d_{\text{п}}^{0,25} \cdot m_{\text{т}}^3 \cdot (1 - m_{\text{п}}) \cdot h^{\frac{2}{3}},$$

$$A = \frac{817 \cdot 22 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0123 \cdot (1 - 0,85)}{(1 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,85^3} = 54 \cdot 10^6;$$

$$B = 0,82 \cdot 10^{-6} \cdot (1 \cdot 10^{-6})^{0,25} \cdot 0,83^3 \cdot (1 - 0,85) \cdot (1,8 \cdot 10^5)^{\frac{2}{3}} = 7,09 \cdot 10^{-6};$$

$$\tau_{\text{р}} = \frac{3500 \cdot (1000 - 54 \cdot 10^6 \cdot 7,09 \cdot 10^{-6})}{54 \cdot 10^6 \cdot 0,004 \cdot 0,0123} = 813 \text{ с} \approx 14 \text{ мин.}$$

Пример 2. Рассчитать фильтр из металлоткани для очистки газов мартеновской печи перед котлом-утилизатором при следующих исходных данных:

- объем газа при рабочих условиях – $V=400000 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- запыленность газа – $z_1=5 \text{ г}/\text{м}^3$;
- температура газа – $t=600 \text{ }^\circ\text{C}$;
- пыль возгонная – $d_{\text{п}}=1 \text{ мкм}$;
- скорость фильтрации – $v_{\text{ф}}=3 \text{ м}/\text{мин}$.

В данном случае целесообразно использовать экспериментальные данные, представленные на рисунке 1.12.

В соответствии с графиком на рисунке 1.12 фильтр из металлоткани С-120 при скорости фильтрации $v_{\text{ф}}=3 \text{ м}/\text{мин}$ ($0,05 \text{ м}/\text{с}$) обеспечивает очистку газа мартеновской печи до санитарной нормы при сопротивлении перед регенерацией $\Delta p=5 \text{ кПа}$.

Принимается каркасный фильтр с импульсной регенерацией сжатым воздухом. Расход воздуха на регенерацию $V_{\text{р}}$ принимается 0,2% от объема поступающего на очистку газа V :

$$V_{\text{р}} = 0,002 \cdot 400000 = 800 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Необходимая площадь фильтровальных элементов фильтра составит:

$$F = \frac{V + V_{\text{р}}}{3600 \cdot v_{\text{ф}}}, \text{ м}^2,$$

$$F = \frac{400000 + 800}{3600 \cdot 0,05} = 2227 \text{ м}^2.$$

При диаметре фильтровальных рукавов $D=0,34 \text{ м}$ и длине $L=10 \text{ м}$ площадь поверхности одного рукава составит:

$$F_{\text{фр}} = 3,14 \cdot 0,34 \cdot 10 = 10,68 \text{ м}^2.$$

Необходимое число фильтровальных рукавов составит:

$$n_{\text{фр}} = \frac{F}{F_{\text{фр}}} = \frac{2227}{10,68} = 208,5.$$

Число фильтровальных рукавов принимается $n_{\text{фр}} = 210$, что позволит разместить рукава в 15 рядах по 14 рукавов в каждом. При этом фактическая скорость фильтрации составит:

$$v'_{\text{ф}} = \frac{V + V_{\text{р}}}{3600 \cdot F_{\text{фр}} \cdot n_{\text{фр}}}, \text{ м/с,}$$

$$v'_{\text{ф}} = \frac{400000 + 800}{3600 \cdot 10,68 \cdot 210} = 0,05 \text{ м/с.}$$

Время между регенерациями фильтра при принятом режиме ($v_{\text{фр}}=0,05$ м/с и $\Delta p=5$ кПа) по опытным данным составляет около 10 мин.

2 АППАРАТЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ (ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ)

Аппараты для очистки газа в электрическом поле называют *электрофильтрами*. Осаждение частиц пыли в электрофильтрах происходит под воздействием электрических сил. Для возможности воздействия на частицы пыли электрическими силами необходимы следующие преобразования:

- ионизация запыленного газа, сопровождающаяся образованием положительных ионов в газе;
- адсорбция положительных ионов газа на поверхности частиц пыли;
- зарядка частиц пыли от ионов, сопровождающаяся приобретением частиц отрицательного заряда;
- изменение направления движения частиц под воздействием электрического поля в сторону осадительного электрода, что приводит к выделению частиц пыли из потока газа;
- фиксация частиц на поверхности осадительного электрода.

В зависимости от формы осадительных электродов электрофильтры разделяются на *пластинчатые* и *трубчатые*.

В *пластинчатых* электрофильтрах осадительные электроды выполнены в виде вертикальных металлических пластин (см. рис. 2.1), между которыми размещены коронирующие электроды, т.е. электроды способные под действием

электрического тока высокого напряжения (25÷100 кВ) создавать коронный электрический разряд.

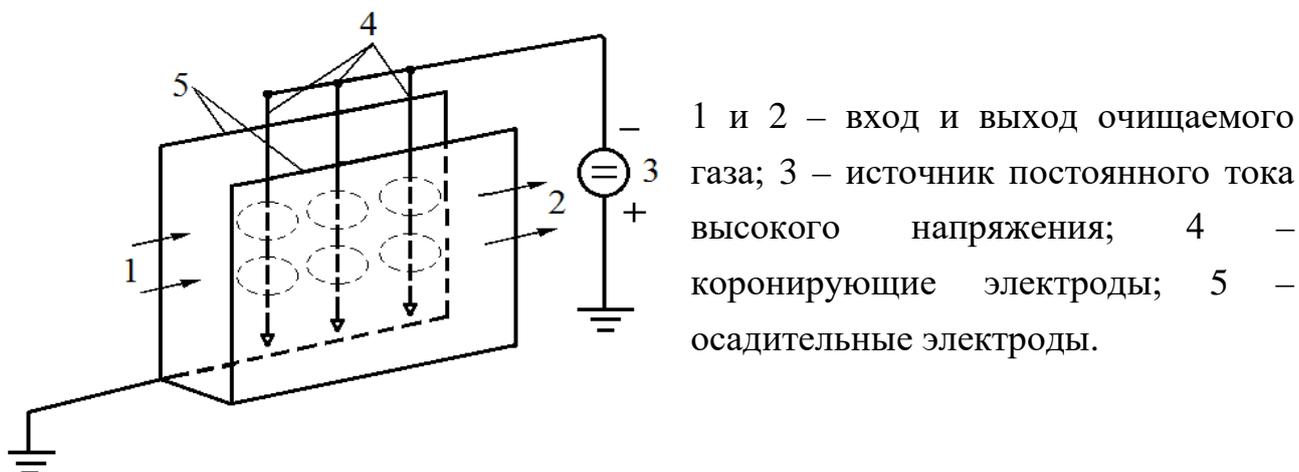


Рисунок 2.1 – Схема пластинчатого электрофильтра

Коронный разряд представляет собой незавершенный электрический разряд, создающий электрическое поле с резко изменяющейся напряженностью. Максимальная напряженность создается вблизи электрода, а к периферии короны напряженность поля резко снижается. Высокая напряженность около электродного пространства приводит к ионизации газа и его свечению, что обусловило название разряда – “коронный”.

Запыленный газ, поступающий в область коронного разряда, ионизируется. Ионы газа заряжают частицы пыли, которые под действием электрического поля движутся к осадительному электроду, т.е. выделяются из направления движения газа и в результате фиксируются на осадительном электроде.

В *трубчатых* электрофильтрах осадительные электроды выполнены в виде труб различных сечений (круглого, квадратного, шестигранного и проч.). Коронирующие электроды располагаются по оси труб в полости вертикально расположенных осадительных электродов (см. рис. 2.2).

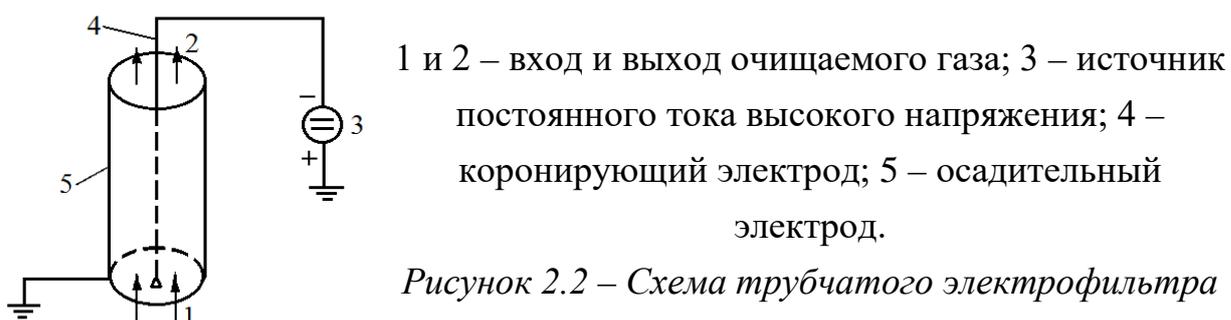


Рисунок 2.2 – Схема трубчатого электрофильтра

2.1 Классификация электрофильтров

Основными вариантами классификации являются:

I. По форме осадительных электродов электрофильтры разделяются на *пластинчатые и трубчатые* (см. рис. 2.1 и 2.2).

В трубчатых электрофильтрах по сравнению с пластинчатыми обеспечиваются:

- более качественные характеристики электрического поля за счет симметричного изменения напряженности поля;
- более равномерное распределение запыленного потока газа в полости электрофильтра.

Оба фактора создают условия для повышения эффективности улавливания пыли в трубчатом электрофильтре по сравнению с пластинчатым.

Недостатком трубчатых электрофильтров по сравнению с пластинчатыми является более сложным удаление уловленной пыли с осадительных электродов.

II. В зависимости от взаимного расположения зоны зарядки и зоны осаждения частиц пыли электрофильтры разделяются на *однозонные и двухзонные*.

В однозонных фильтрах зарядка и осаждение частиц пыли происходит в одной зоне. В двухзонных электрофильтрах зона зарядки и зона осаждения выполнены отдельно. Эти зоны в двухзонных электрофильтрах называют, соответственно, *ионизатором* и *осадителем*.

Для очистки промышленных газов преимущественно используют однозонные электрофильтры. Двухзонные электрофильтры применяют для тонкой очистки воздуха в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха.

III. По числу последовательно расположенных электрических полей электрофильтры разделяются на *однопольные и многопольные*.

Наличие нескольких последовательно расположенных электрических полей позволяет более тщательно очистить газ от пыли вследствие многоступенчатости очистки. Напряженность электрического поля на отдельных ступенях очистки может быть различной и поддерживаться на уровнях, обеспечивающих наиболее эффективную очистку газа в целом. Повышение эффективности очистки газа от пыли в многопольных

электрофильтрах достигается также за счет более рационального режима очистки электродов от пыли (последовательность очистки электродов, интенсивность, частота очистки и проч.).

IV. В зависимости от направления движения газа электрофильтры разделяются на *вертикальные и горизонтальные*.

V. В зависимости от способа очистки осадительных электродов от уловленной пыли электрофильтры разделяются на *сухие и мокрые*.

В сухих электрофильтрах пыль удаляется путем встряхивания электродов, в мокрых – путем смыва пыли водой.

2.2 Конструктивные элементы электрофильтров

К основным конструктивным элементам электрофильтров относятся: электропитание, коронирующие электроды, осадительные электроды и газораспределительные устройства.

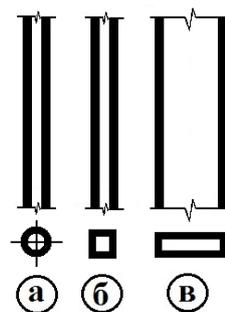
Электропитание фильтров осуществляется от электроагрегатов мощностью 20÷150 кВт, обеспечивающих постоянный ток высокого напряжения (25÷100 кВ). Постоянный ток получают путем преобразования переменного тока (380 В, 50 Гц).

Электроагрегат включает повысительный трансформатор, выпрямитель и регулятор напряжения.

Коронирующие электроды могут быть двух типов:

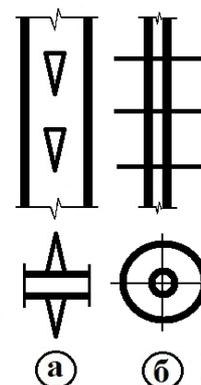
1) гладкие коронирующие электроды

- круглого (а),
 - квадратного (б),
 - прямоугольного (в),
- и других сечений.



2) электроды с фиксированными точками разряда, которые в зависимости от формы фиксированных точек разряда могут быть:

- игольчатые (а),
 - дисковые (б),
- и других форм.

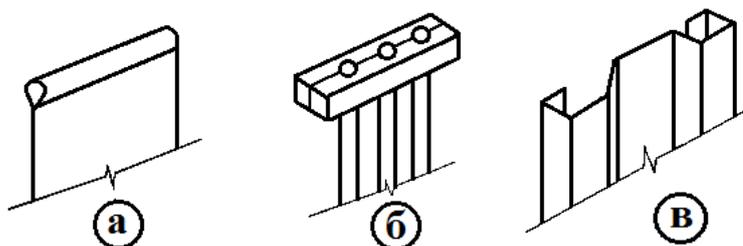


Коронные разряды возникают в фиксированных точках (иглах, дисках и проч.). При этом за счет изменения шага размещения фиксированных точек можно получать короны с определенными характеристиками, что позволяет создавать оптимальные электрические поля для улавливания различных видов пыли.

Осадительные электроды должны иметь форму обеспечивающую удаление пыли с поверхности электродов путем механического встряхивания или смыва водой.

В числе наиболее распространенных форм осадительных электродов следует отметить:

- листовые (а),
- прутковые (б),
- профилированные (в).

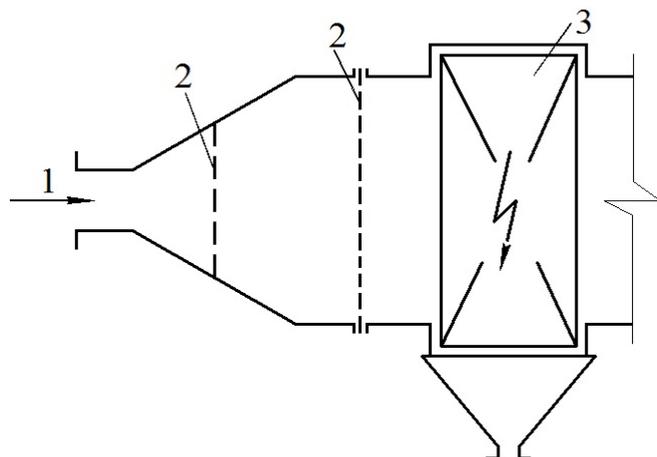


Газораспределительные устройства необходимы для равномерного распределения газа в активной зоне электрофильтра, т.е. в зоне обеспечивающей зарядку частиц пыли.

Эффективность улавливания пыли в электрофильтрах составляет до 99,5%, поэтому проскок даже нескольких процентов неочищенного газа значительно влияет на общую эффективность работы электрофильтра. Неравномерность газораспределения в активной зоне электрофильтра не должна превышать 0,5%.

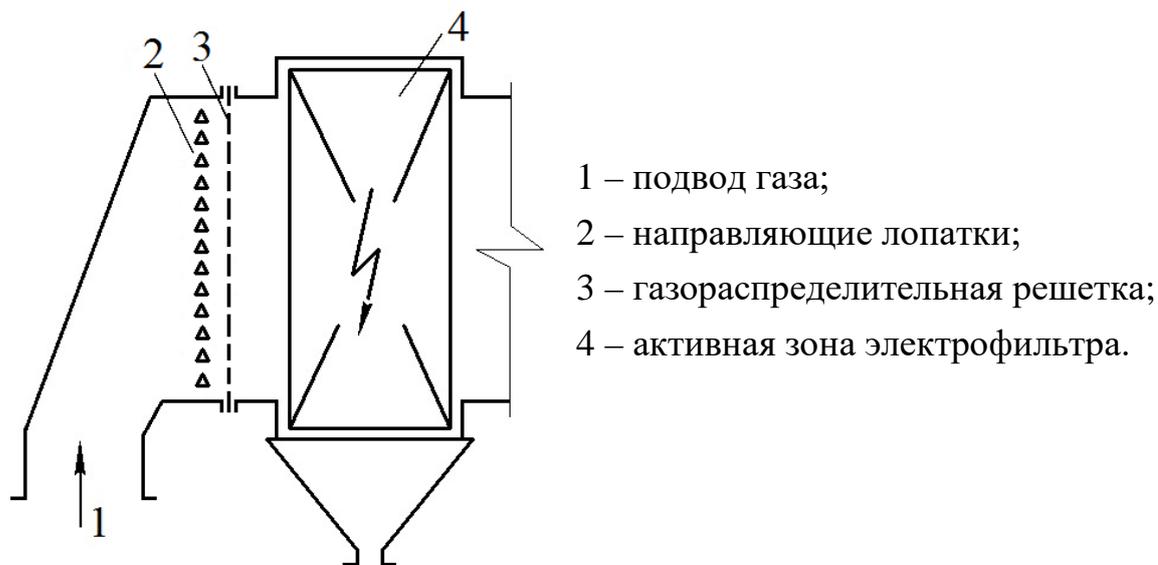
Газораспределительные устройства представляют собой решетки или направляющие лопатки, размещенные на входе газа в активную зону фильтра. При этом различают:

- а) центральный подвод газа (в горизонтальный электрофильтр)

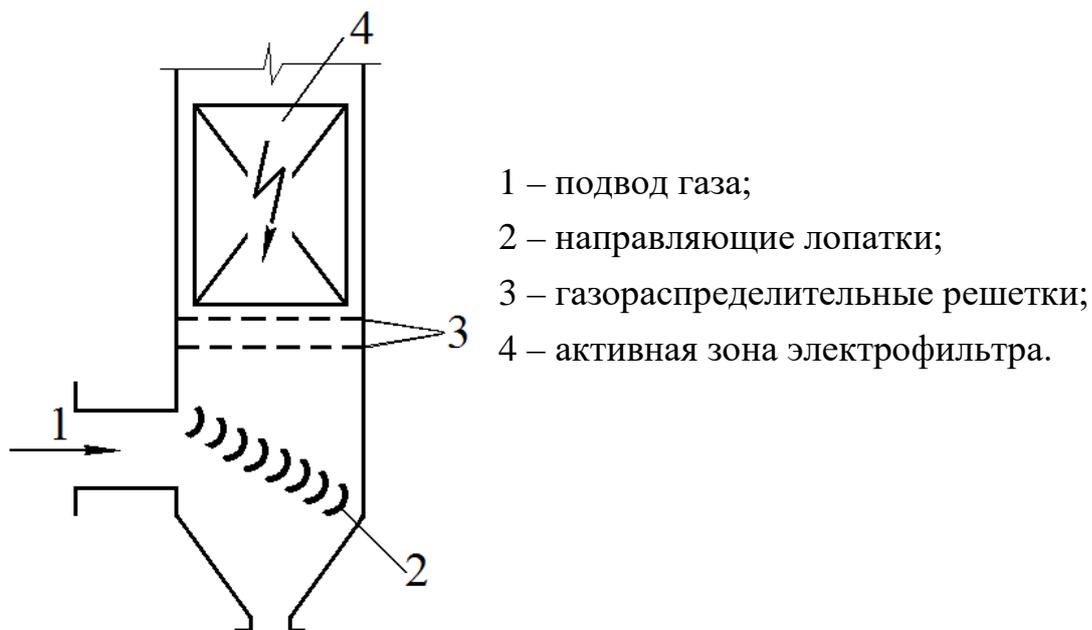


- 1 – подвод газа;
- 2 – газораспределительные решетки;
- 3 – активная зона электрофильтра.

б) нижний подвод (в горизонтальный электрофильтр)



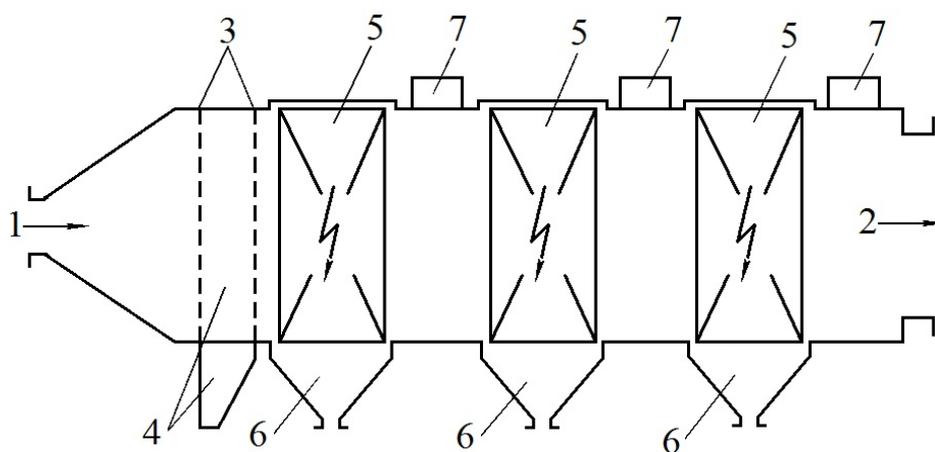
в) боковой подвод (в вертикальный электрофильтр)



2.3 Сухие электрофильтры

Наиболее распространенным типом сухих электрофильтров является многопольные горизонтальные электрофильтры. Такие электрофильтры широко применяются на тепловых электростанциях для очистки от золы газов, уходящих из паровых котлов.

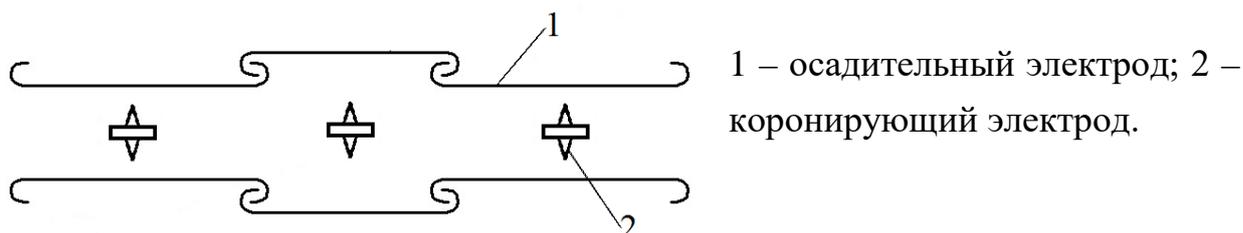
Схема горизонтального пластинчатого электрофильтра типа УГ (унифицированный, горизонтальный) представлена на рисунке 2.3.



1 и 2 – вход и выход газа; 3 – газораспределительные решетки; 4 – форкамера для улавливания крупных частиц пыли путем резкого снижения скорости газа на входе в электрофильтр; 5 – камеры для размещения электродов; 6 – бункеры для уловленной пыли; 7 – изоляторные коробки фильтра.

Рисунок 2.3 – Горизонтальный многопольный электрофильтр типа УГ

Коронирующие электроды выполнены игольчатыми () , осадительные электроды – С-образными ():



Максимальная высота электродов 7,5 м. Температура газа, поступающего на очистку до 250 °С, степень очистки около 96% при скорости газа 2,0-2,5 м/с.

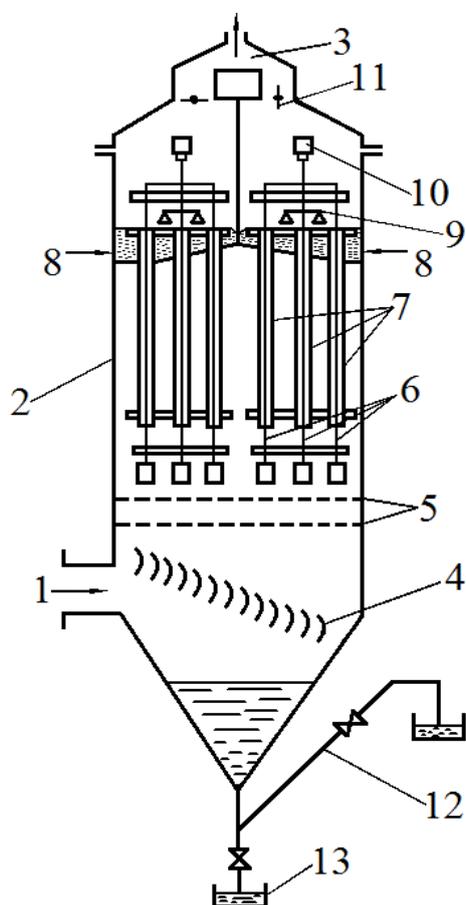
На коронирующие электроды подается электрический ток (выпрямленный, пульсирующий) напряжением до 80 кВ. Для очистки от пыли осадительные электроды оборудованы механизмом встряхивания.

Электрофильтры типа “УГ” отличаются экономным расходом электроэнергии на очистку и небольшим газодинамическим сопротивлением.

К недостаткам электрофильтров типа “УГ” следует отнести громоздкость конструкции, большие капитальные затраты, снижение степени очистки газа в случае неудовлетворительной очистки осадительных электродов от пыли и вследствие неравномерности распределения газа в активной зоне электрофильтра.

2.4 Мокрые электрофильтры

В числе мокрых электрофильтров наиболее распространенными являются вертикальные и однополюсные. На рисунке 2.4 представлена схема мокрого трубчатого электрофильтра типа ДМ (доменный, мокрый).



1 – подвод запыленного газа; 2 – корпус электрофильтра; 3 – отвод очищенного газа; 4 – направляющие лопатки; 5 – распределительные решетки; 6 – коронирующие электроды, зафиксированные в рамах на верхнем и нижнем уровнях; 7 – осадительные электроды, размещенные между верхней и нижней трубчатыми решетками; 8 – подача воды в желоб для непрерывной промывки осадительных электродов; 9 – коллектор с брызгалами для периодической промывки электрофильтра; 10 – изолятор для вертикальной подвески коронирующих электродов; 11 – дроссельный клапан; 12 – гидрозатвор; 13 – лоток для отвода шлама.

Рисунок 2.4 – Вертикальный однополюсный электрофильтр типа ДМ

Применяют два типоразмера электрофильтров ДМ: ДМ – 316 (316 электродов) и ДМ – 600 (600 электродов). Активная длина электрического поля в обоих электрофильтрах 4,5 м. Электрофильтры типа ДМ компонуют в виде секций.

Непрерывная обмывка осадительных электродов осуществляется в пленочном режиме, периодическая обмывка брызгалами выполняется каждые 8 часов в течении 10–20 минут. При периодической промывке секцию, находящуюся в состоянии промывки, отключают дроссельным клапаном и снимают напряжение.

Мокрые электрофильтры по сравнению с сухими обеспечивают более тщательную очистку газов, т. к. практически исключается вторичный унос пыли.

2.5 Расчет сухого пластинчатого электрофильтра

2.5.1 Методика расчета электрофильтра

При проектировании электрофильтров ожидаемую степень очистки газов рассчитывают по полуэмпирическим формулам. После выбора типа электрофильтра (например ЭГА – электрофильтр, горизонтальный, модификации А), удовлетворяющего требованиям проекта, на основании имеющихся исходных данных вычисляют следующие величины.

- *Относительную плотность очищаемого газа:*

$$\beta = \frac{p \cdot (273 + t_{ст})}{p_{ст} \cdot (273 + t)}, \quad (2.1)$$

где p и t – давление и температура очищаемого газа, кПа и $^{\circ}\text{C}$; $p_{ст}$ и $t_{ст}$ – давление и температура газа при стандартных условиях, кПа и $^{\circ}\text{C}$.

- *Критическую напряженность электрического поля:*

$$E_{кр} = 3,04 \cdot \left(\beta + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \text{ В/м}, \quad (2.2)$$

где R_1 – радиус острия коронирующего электрода ($R_1=1$ мм).

- *Критическое напряжение короны:*

$$U_{кр} = E_{кр} \cdot R_1 \cdot \left(\frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right), \text{ В}, \quad (2.3)$$

где H – расстояние между плоскостями коронирующих и осадительных электродов, м; S_1 – шаг коронирующих электродов.

Для электрофильтров типа ЭГА:

$$H = \frac{0,300}{2} \text{ м}; \quad S_1 = 0,18 \text{ м}.$$

- *Напряженность электрического поля:*

$$E = \left[\frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot H \cdot U \cdot (U - U_{кр})}{9 \cdot 10^9 \cdot \epsilon_0 \cdot S_1^3 \cdot \left(\frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right)} \right]^{0,5}, \text{ В/м}, \quad (2.4)$$

где f – коэффициент, зависящий от отношения H/S_1 (при $H/S_1=0,300/(2 \cdot 0,18)=0,833$ значение $f=0,0423$); U – среднее значение рабочего напряжения (60...100 кВ), В; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

- *Скорость дрейфа частиц пыли в электрическом поле:*

$$w = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot r}{\mu}, \text{ м/с}, \quad (2.5)$$

где r – эквивалентный радиус частицы пыли, м; μ – динамический коэффициент вязкости очищаемого газа при рабочих условиях, Па·с;

- *Фракционную степень улавливания пыли:*

$$\eta_i = 1 - \exp\left(-\frac{w \cdot T}{2 \cdot u}\right), \quad (2.6)$$

где T – отношение общей площади осаждения к площади активного сечения электрофильтра (см. приложение А); u – скорость газа в электрофильтре, м/с.

- *Общую степень улавливания пыли:*

$$\eta = \sum_1^n \eta_i \cdot \phi_i, \%, \quad (2.7)$$

где ϕ_i – содержание в улавливаемой пыли i -й фракции, %.

- *Требуемую эффективность очистки газа от пыли:*

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} \cdot 100, \%, \quad (2.8)$$

где z_1 и z_2 – заданные начальная и конечная запыленности газа, г/м³.

- *Необходимую площадь активного сечения электрофильтра:*

$$S = \frac{V}{3600 \cdot u}, \text{ м}^2, \quad (2.9)$$

где V – производительность электрофильтра, м³/ч.

На основе задания, справочных материалов и вычислений по формулам (2.1) – (2.5) подготавливаются следующие исходные данные:

- 1) скорости дрейфа частиц пыли крупностью 1, 3, 5, 7, 9 и 10 мкм (средний радиус частиц – 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5 и 5 мкм);
- 2) массовая доля указанных фракций улавливаемой пыли, %;
- 3) значение T – отношение общей площади осаждения к площади активного сечения для рассматриваемого типоразмера электрофильтра (значение T приведено в приложении А).

Принимается ряд значений скорости газа в электрофильтре и вычисляется по формулам (2.6) и (2.7) фракционная и общая степень улавливания пыли для принятых типоразмеров электрофильтров. По полученным данным для каждого из рассмотренных типоразмеров электрофильтра строят кривые зависимостей $\eta=f(u)$.

По формуле (2.8) вычисляют требуемую эффективность очистки газа от пыли $\eta_{тр}$.

Совмещая на графике полученные зависимости $\eta=f(u)$ и значение требуемой эффективности очистки газа, определяют типоразмеры электрофильтров, обеспечивающие при приемлемых скоростях газа необходимую эффективность очистки.

По формуле (2.9) определяют необходимую площадь активного сечения электрофильтра и по таблице конструктивных характеристик (приложение А) выбирают оптимальный типоразмер электрофильтра.

2.5.2 Пример расчета

Рассчитать и выбрать электрофильтр типа ЭГА, предназначенный для очистки газов электросталеплавильной печи и аспирационных установок цеха при следующих исходных данных:

- объем очищаемых газов при рабочих условиях – $V=10^6$ м³/ч;
- температура газа – $t=30$ С⁰;
- разрежение на входе в электрофильтр – $p_1=1$ кПа;
- коэффициент динамической вязкости газа – $\mu=18,65 \cdot 10^{-6}$ Па·с;
- начальная запыленность газа – $z_1=1,4$ г/м³;
- требуемая запыленность очищенного газа – $z_2=0,05$ г/м³.
- дисперсный (фракционный) состав улавливаемой пыли:

крупность, мкм	0÷2	2÷4	4÷6	6÷8	8÷10	10÷20
массовая доля, %	52,0	22,0	6,4	7,6	2,7	9,3

В соответствии с заданным фракционным составом характеристики частиц пыли по фракциям приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики частиц пыли

Крупность, мкм	0÷2	2÷4	4÷6	6÷8	8÷10	10÷20
Средний размер частиц, мкм	1	3	5	7	9	10
Средний эквивалентный радиус частиц r, мкм	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5

Расчет выполняется в следующей последовательности.

1. По формуле (2.1) определяется относительная плотность очищаемого газа (давление очищаемого газа $p = p_{ст} - p_1$):

$$\beta = \frac{p \cdot (273 + t_{ст})}{p_{ст} \cdot (273 + t)}$$

где $p_{ст} = 101,3$ кПа, $t_{ст} = 20$ °С.

$$\beta = \frac{(101,3 - 1) \cdot 293}{101,3 \cdot (273 + 30)} = 0,957.$$

2. Определяется критическая напряженность электрического поля (формула 2.2):

$$E_{кр} = 3,04 \cdot \left(\beta + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) \cdot 10^6, \text{ В/м,}$$

$$E_{кр} = 3,04 \cdot \left(0,957 + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{0,957}{0,001}} \right) \cdot 10^6 = 5,83 \cdot 10^6 \text{ В/м.}$$

3. Определяется критическое напряжение короны (формула 2.3):

$$U_{кр} = E_{кр} \cdot R_1 \cdot \left(\frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right), \text{ В,}$$

$$U_{кр} = 5,83 \cdot 10^6 \cdot 0,001 \left(\frac{3,14 \cdot 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right) = 34,84 \cdot 10^3 \text{ В.}$$

4. Определяется напряженность электрического поля при рабочем напряжении $U = 85$ кВ (формула 2.4):

$$E = \left[\frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot H \cdot U \cdot (U - U_{кр})}{9 \cdot 10^9 \cdot \varepsilon_0 \cdot S_1^3 \cdot \left(\frac{\pi \cdot H}{S_1} - \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1}{S_1} \right)} \right]^{0,5}, \text{ В/м,}$$

$$E = \left[\frac{8 \cdot 3,14 \cdot 0,0423 \cdot 0,15 \cdot 85 \cdot (85 - 34,84) \cdot 10^6}{9 \cdot 10^9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,18^3 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 0,15}{0,18} - \ln \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,001}{0,18} \right)} \right]^{0,5} =$$

$$= 4,9 \cdot 10^5 \text{ В/м.}$$

5. Определяется скорость дрейфа частиц пыли крупностью 1 мкм (формула 2.5):

$$w = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot r}{\mu}, \text{ м/с,}$$

$$w_1 = \frac{0,118 \cdot 10^{-10} \cdot (4,9 \cdot 10^5)^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}}{18,65 \cdot 10^{-6}} = 0,076 \text{ м/с.}$$

Аналогично вычисляют скорости дрейфа частиц крупностью 3, 5, 7, 9 и 10 мкм при соответствующих средних эквивалентных радиусах (см. табл. 2.1). Результаты расчета скорости дрейфа частиц представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Фракционный состав и скорость дрейфа частиц пыли в электрофилт্রে

Показатели	Размер частиц пыли, мкм					
	0÷2	2÷4	4÷6	6÷8	2÷10	10÷20
Средний размер частиц, мкм	1	3	5	7	9	10
Средний эквивалентный радиус r, мкм	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5
Массовая доля фракций Φ_i , %	52,0	22,0	6,4	7,6	2,7	9,3
Скорость дрейфа частиц, w, м/с	0,076	0,228	0,380	0,532	0,684	0,761

Принимают обозначения $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ типоразмеров электрофильтров ЭГА по значению $T=S_0/S$ (см. приложение А): $T_1=38,2, T_2=57,7, T_3=77,0, T_4=86,6, T_5=88,0, T_6=115,5$.

Электрофильтры в соответствии с принятым обозначением типоразмеров представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Принятые обозначения типоразмеров электрофильтров и значения отношений общей площади осадительных электродов к площади активного сечения электрофильтров ЭГА

Принятое обозначение типоразмера электрофильтра	Типоразмер электрофильтра	Отношение общей площади осадительных электродов к площади активного сечения электрофильтра
T ₁	ЭГА 1-10-6-4-2	38,2
T ₂	ЭГА 1-10-6-4-3; ЭГА 1-10-6-6-2; ЭГА 1-14-7,5-4-3; ЭГА 1-14-7,5-6-2; ЭГА 1-20-7,5-4-3; ЭГА 1-20-7,5-6-2; ЭГА 1-20-9-6-2; ЭГА 1-30-7,5-4-3; ЭГА 1-30-7,5-6-2; ЭГА 1-30-9-6-2; ЭГА 1-40-7,5-4-3; ЭГА 1-40-7,5-6-2; ЭГА 1-40-9-6-2.	57,7
T ₃	ЭГА 1-14-7,5-4-4; ЭГА 1-20-7,5-4-4; ЭГА 1-30-7,5-4-4; ЭГА 1-40-7,5-4-4.	77,0
T ₄	ЭГА 1-10-6-6-3; ЭГА 1-14-7,5-6-3; ЭГА 1-20-7,5-6-3; ЭГА 1-20-9-6-3; ЭГА 1-30-7,5-6-3; ЭГА 1-30-12-6-3; ЭГА 1-40-7,5-6-3; ЭГА 1-40-9-6-3; ЭГА 1-40-12-6-2; ЭГА 2-48-12-6-3; ЭГА 2-56-12-6-3; ЭГА 2-76-12-6-3; ЭГА 2-88-12-6-3.	86,6
T ₅	ЭГА 1-30-9-6-3	88,0
T ₆	ЭГА 1-20-9-6-4; ЭГА 1-30-9-6-4; ЭГА 1-30-12-6-4; ЭГА 1-40-9-6-4; ЭГА 1-40-12-6-4; ЭГА 2-48-12-6-4; ЭГА 2-56-12-6-4; ЭГА 2-76-12-6-4; ЭГА 2-88-12-6-4.	115,5

Принимают значения скоростей очищаемого газа u : 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 м/с и вычисляют по формулам (2.6) и (2.7) фракционные и общие степени улавливания пыли для указанных скоростей газа и приведенных в таблице 2.2 и 2.3 значений w и T . Результаты расчета представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты расчета фракционной (доли.ед.) и общей (%) степени улавливания пыли

T	u	η_1	η_3	η_5	η_7	η_9	η_{10}	η
T ₁ =38,2	0,6	0,9111	0,9993	1	1	1	1	95,36
	0,8	0,8371	0,9957	0,9999	1	1	1	91,43
	1,0	0,7659	0,9872	0,9993	1	1	1	87,54
	1,2	0,7018	0,9735	0,9977	0,9998	1	1	83,89
	1,4	0,6455	0,9555	0,9944	0,9993	1	1	80,54
T ₂ =57,7	0,6	0,9742	1	1	1	1	1	98,65
	0,8	0,9355	0,9998	1	1	1	1	96,64
	1,0	0,8884	0,9987	1	1	1	1	94,16
	1,2	0,8392	0,9959	0,9999	1	1	1	91,54
	1,4	0,7912	0,9909	0,9997	1	1	1	88,94
T ₃ =77,0	0,6	0,9924	1	1	1	1	1	99,60
	0,8	0,9743	1	1	1	1	1	98,66
	1,0	0,9464	0,9999	1	1	1	1	97,21
	1,2	0,9127	0,9994	1	1	1	1	95,44
	1,4	0,8764	0,9982	1	1	1	1	93,53
T ₄ =86,6	0,6	0,9959	1	1	1	1	1	99,78
	0,8	0,9837	1	1	1	1	1	99,15
	1,0	0,9628	1	1	1	1	1	98,06
	1,2	0,9356	0,9998	1	1	1	1	96,64
	1,4	0,9047	0,9992	1	1	1	1	95,02
T ₅ =88,0	0,6	0,9963	1	1	1	1	1	99,80
	0,8	0,9848	1	1	1	1	1	99,20
	1,0	0,9648	1	1	1	1	1	98,16
	1,2	0,9384	0,9998	1	1	1	1	96,79
	1,4	0,9083	0,9993	1	1	1	1	95,21
T ₆ =115,5	0,6	0,9994	1	1	1	1	1	99,96
	0,8	0,9959	1	1	1	1	1	99,78
	1,0	0,9876	1	1	1	1	1	99,35
	1,2	0,9743	1	1	1	1	1	98,66
	1,4	0,9566	1	1	1	1	1	97,74

По результатам расчета строят графики зависимости эффективности электрофильтра от его типоразмера при различных скоростях газа (см. рис. 2.5).

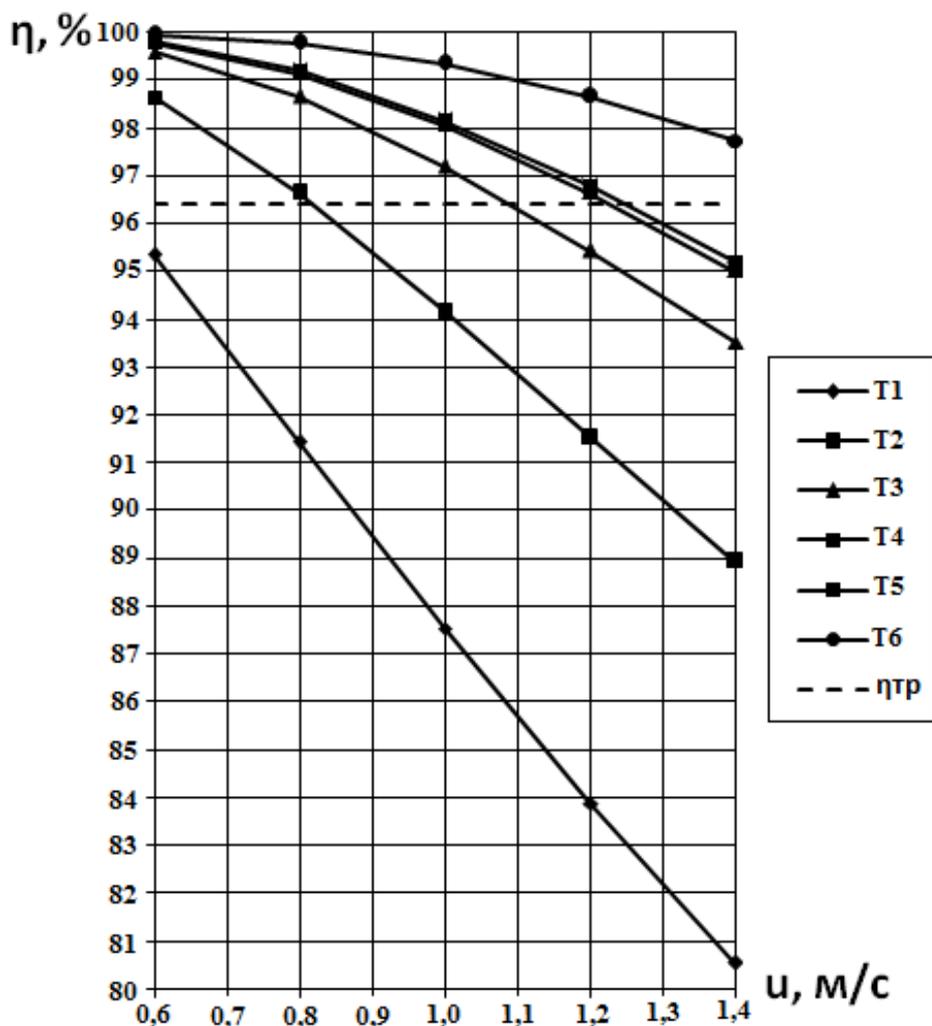


Рисунок 2.5 – Зависимость эффективности очистки газа от скорости газа u и типоразмера электрофильтра T

Требуемая степень улавливания пыли при начальной запыленности $z_1=1,4$ г/м³ и конечной $z_2=0,05$ г/м³ составит:

$$\eta_{тр} = \frac{1,4 - 0,05}{1,4} \cdot 100 = 96,4 \%$$

Значение требуемой запыленности наносят на график (рис. 2.5).

Сравнение требуемой запыленности и расчетной эффективности электрофильтра при различных типоразмерах показывает возможность применения для удовлетворительной очистки газа типоразмер T_2 – при скорости газа до 0,8 м/с, T_3 – при скорости газа до 1,1 м/с, T_4 и T_5 – при

скорости газа до 1,2 м/с и T_6 – во всем диапазоне принятых в расчете скоростей газа.

Опыт эксплуатации электрофильтров показывает в качестве наиболее предпочтительной скорости газа интервал 1,0÷1,2 м/с. В частности, при скорости 1,2 м/с и $\eta_{\text{тр}}=96,4\%$ принимаются к рассмотрению электрофильтры типоразмеров, которые на графике лежат выше линии требуемой степени очистки (кривые T_4 , T_5 , T_6), поскольку электрофильтры с типоразмерами, лежащими под этой линией, не обеспечивают необходимую степень улавливания пыли.

В рассматриваемом случае целесообразно установить электрофильтр типоразмера T_4 , как имеющего меньшие габаритные размеры и металлоемкость конструкции по сравнению с типоразмерами T_5 и T_6 .

При очистке в электрофильтре 10^6 м³/ч газа и скорости газа 1,2 м/с необходимая площадь активного сечения электрофильтра составит:

$$S = \frac{1000000}{3600 \cdot 1,2} = 231,5 \text{ м}^2.$$

Наиболее близким по площади активного сечения является электрофильтр ЭГА 2-76-12-6-3, у которого $S=246,6$ м² (см. приложение А). Скорость очищаемого газа в этом электрофильтре составит:

$$U = \frac{1000000}{3600 \cdot 246,6} = 1,13 \text{ м/с}.$$

При такой скорости газа в электрофильтре степень улавливания пыли составит свыше 97 %, что соответствует условиям расчета.

3 ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ ОТ ВРЕДНЫХ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ

В числе вредных газообразных выбросов следует выделить оксиды углерода, серы и азота, на долю которых приходится основная масса вредных веществ, поступающих в атмосферу воздуха от промышленных предприятий. При этом речь идет о промышленных газах, концентрация в которых оксидов углерода, серы и азота находится в пределах от десятых долей процентов до нескольких процентов, что исключает возможность их утилизации в процессе очистки и, соответственно, дальнейшее использование.

Вследствие больших объемов промышленных газов и высокой запыленности, ограничивающих применение целого ряда методов очистки, специальная очистка промышленных газов от оксидов углерода, серы и азота практически не производится. Реальное сокращение выбросов этих газов осуществляется в основном на стадии промышленных технологий, например, путем снижения недожога топлива, что уменьшает выбросы СО, снижения содержания серы в топливе и сырье, что уменьшает выбросы оксидов серы и снижения температуры топочных процессов, что уменьшает выбросы оксидов азота.

Тем не менее, известен ряд промышленных и опытно-промышленных установок, научно-исследовательских и проектно-конструкторских разработок в направлении снижения вредных газообразных выбросов с промышленными газами.

Серийно выпускаемые аппараты для очистки промышленных газов от небольших содержаний оксидов углерода, серы и азота отсутствуют. Ниже приведено краткое изложение состояния вопроса по очистке промышленных газов от этих выбросов.

3.1 Очистка газов от оксидов углерода

Следует выделить три способа очистки газов от СО, которые можно применить в промышленных масштабах:

- *дожигание СО в промышленных газах;*
- *сорбция СО жидкими и твердыми поглотителями;*
- *каталитическое окисление СО.*

Дожигание СО до СО₂ возможно при соблюдении двух условий: концентрация СО в газах должна быть выше нижнего предела воспламенения СО (более 12,5%), а температура газов в процессе дожигания должна быть выше температуры воспламенения СО (~ 800 °С). Выполнение обоих условий применительно к отходящим промышленным газам весьма проблематично, т.к. отходящие газы обычно покидают технологические печи, агрегаты, энергетические установки и прочее при небольшой концентрации СО (до 1% или максимум несколько процентов) с температурой значительно ниже температуры воспламенения.

При поглощении CO определенную сложность представляет выбор сорбента для CO, т.к. для поглощения CO необходимо использовать только те сорбенты, которые не вступают в реакцию с CO. В числе таких сорбентов возможно применение медноаммиачных солей. Процесс идет при высоких давлениях (до 30 МПа), что практически исключает его применение для очистки газов в промышленных масштабах. Применение других сорбентов, например, цеолитов, малоперспективно вследствие небольшой поглотительной способности сорбентов и необходимости глубокой предварительной очистки газов от пыли и избыточной влаги.

Реализация каталитического окисления CO промышленных газов в CO₂ вследствие запыленности газов и наличия в промышленных газах ряда нежелательных соединений, например, оксидов серы, сдерживается выбором катализатора.

3.2 Очистка газов от оксидов серы

Для извлечения оксидов серы из промышленных газов возможно применение абсорбции (жидкими поглотителями), адсорбции (твердыми поглотителями) и каталитические методы, заключающиеся в окислении сернистого ангидрида SO₂ в присутствии катализатора до сернистого ангидрида SO₃ с поглощением последнего водой и образованием серной кислоты.

Для очистки промышленных газов от SO₂ разработан ряд методов: известково-известняковый, аммиачный, содовый, магнезитовый и др. Эти методы помимо очистки позволяют получить ценные попутные продукты (серную кислоту, удобрение и прочее). Рентабельны эти методы только при относительно высоких концентрациях сернистого ангидрида в очищаемых газах. Концентрация SO₂ в отходящих промышленных газах обычно не превышает десятых долей процента.

В промышленных масштабах наиболее приемлемым является известково-известняковый метод удаления оксидов серы, который основан на способности сернистого ангидрида образовывать с водой кислоту, легко вступающей в реакции со щелочами. При этом возможны три варианта реализации метода.

1. *Промывка газа в скрубберах известковым молоком*, что требует применение извести (CaO), получаемой из известняка (CaCO₃) в обжиговых

агрегатах. При больших объемах промышленных газов это приводит к значительным капитальным и энергетическим затратам.

2. *Промывка газа в скрубберах суспензией тонкоизмельченного известняка.* Недостаток этого метода обусловлен малой реакционной способностью известняка по сравнению с известью, что требует избыточных расходов и высокую степень измельчения известняка, скрубберов больших размеров и обильного орошения, на которое затрачивается большое количество воды.

3. *Введение измельченного известняка непосредственно в топку технологических печей или котлов.* Это приводит к обжигу известняка и образованию извести. Известь уносится в скруббер газоочистки вместе с продуктами сгорания, где происходит нейтрализация оксидов серы. Недостатком этого метода является загрязнение поверхностей рабочих объемов технологических агрегатов и поверхностей нагрева котлов, возможны также пережог и дезактивация извести, что делает ее применение практически бесполезной.

При содержании сернистого ангидрида в газах до 0,5% целесообразно применение известнякового метода, который заключается в обработке очищаемого газа суспензией известняка (CaCO_3) в полых или насадочных форсуночных скрубберах. Вывод сернистого ангидрида из газов происходит вследствие реакций:



Сульфид кальция (CaSO_3) плохо растворим в воде и выпадает из раствора в виде мелких кристаллов.

Степень очистки газов известняковым методом составляет до 70%.

3.3 Очистка газов от оксидов азота

К основным методам очистки газа от оксидов азота относятся:

- очистка жидкими щелочными и селективными сорбентами;
- очистка с применением кислот и окислителей;
- очистка адсорбентами (селикогелем, алюмогелем, активированным углем и прочее);

- каталитическое разложение оксидов азота в присутствии газ-восстановителей;
- термическое разложение оксидов азота в присутствии восстановителей (метана, жидкого углеводорода, кокса).

Применение перечисленных методов требует довольно сложного аппаратного оформления, а при больших объемах промышленных газов значительных расходов реактивов и энергозатрат. Все это делает целесообразным снижение выбросов оксидов азота в атмосферу непосредственным воздействием на процесс их образования в топках технологических печей и котельных агрегатов.

Образование оксидов азота в процессе сгорания топлива уменьшается при снижении температуры горения, уменьшении избытка кислорода и времени пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур. Соответственно, в качестве основных мероприятий по снижению образования оксидов азота можно отметить: рециркуляцию продуктов сгорания в зону повышенных температур и двухступенчатое сжигание, что снижает температуру в топке, уменьшение избытка воздуха и прочее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теверовский Б.З. Очистка промышленных газов в черной металлургии. Справочное пособие. – К.: Техника, 1993. – 151 с.
2. Теверовский Б.З. Розрахунки пристроїв для очищення промислових газів від пилу: Навч. посібник. – К.: НМК ВО, 1991. – 89 с.
3. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: Учебник для вузов. 2-е изд.: М.: Металлургия. 1990. – 400 с.
4. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистка промышленных газов от пыли: Справ. изд. М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
5. Очистка технологических и неорганизованных выбросов от пыли в черной металлургии / А.И. Толочко, О.В. Филиппьев, В.И. Славин и др. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.
6. Пылеулавливание в металлургии: Справ. изд. / В.М. Алешина, А.Ю. Вальдберг, Г.М. Гордон и др. – М.: Металлургия, 1984. – 336 с.
7. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. – М.: Энергоавтомиздат, 1983. – 312 с.
8. Ганз С.Н. Очистка промышленных газов. Справочное пособие. – Днепропетровск.: Промінь, 1977. – 114 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Конструктивные характеристики электрофильтров ЭГА

Типоразмер электрофильтра	Активная высота электродов, м	Число полей	Площадь активного сечения S, м ²	Общая площадь осаждения S ₀ , м ²	Габаритные размеры электрофильтра, м			$T = \frac{S_0}{S}$
					Длина	Ширина (по осям опор)	Высота	
ЭГА 1-10-6-4-2	6,0	2	16,5	630	9,26	3,2	12,4	38,2
ЭГА 1-10-6-4-3	6,0	3	16,5	950	13,44	3,2	12,4	57,6
ЭГА 1-10-6-6-2	6,0	2	16,5	950	11,82	3,2	12,4	57,6
ЭГА 1-10-6-6-3	6,0	3	16,5	1430	17,28	3,2	12,4	86,7
ЭГА 1-14-7,5-4-3	7,5	3	28,7	1660	13,44	4,4	13,9	57,8
ЭГА 1-14-7,5-4-4	7,5	4	28,7	2210	17,62	4,4	13,9	77,0
ЭГА 1-14-7,5-6-2	7,5	2	28,7	1660	11,82	4,4	14,9	57,8
ЭГА 1-14-7,5-6-3	7,5	3	28,7	2480	17,28	4,4	14,9	86,4
ЭГА 1-20-7,5-4-3	7,5	3	41,0	2360	13,44	6,2	15,4	57,6
ЭГА 1-20-7,5-4-4	7,5	4	41,0	3160	17,62	6,2	15,4	77,0
ЭГА 1-20-7,5-6-2	7,5	2	41,0	2360	11,82	6,2	15,4	57,6
ЭГА 1-20-7,5-6-3	7,5	3	41,0	3550	17,28	6,2	15,4	86,6
ЭГА 1-20-9-6-2	9,0	2	49,0	2830	11,82	6,2	16,9	57,7
ЭГА 1-20-9-6-3	9,0	3	49,0	4240	17,28	6,2	16,9	86,5
ЭГА 1-20-9-6-4	9,0	4	49,0	5660	22,74	6,2	16,9	115,5
ЭГА 1-30-7,5-4-3	7,5	3	61,4	3550	13,44	9,2	14,9	57,8
ЭГА 1-30-7,5-4-4	7,5	4	61,4	4730	17,62	9,2	14,9	77,0
ЭГА 1-30-7,5-6-2	7,5	2	61,4	3550	11,82	9,2	14,9	57,8
ЭГА 1-30-7,5-6-3	7,5	3	61,4	5320	17,28	9,2	14,9	86,7
ЭГА 1-30-9-6-2	9,0	2	73,4	4240	11,82	9,2	16,4	57,8
ЭГА 1-30-9-6-3	9,0	3	73,4	6460	17,28	9,2	16,4	88,0
ЭГА 1-30-9-6-4	9,0	4	73,4	8480	22,74	9,2	16,4	115,5
ЭГА 1-30-12-6-3	12,0	3	97,4	8430	17,28	9,2	19,4	86,5
ЭГА 1-30-12-6-4	12,0	4	97,4	11240	22,74	9,2	19,4	115,4
ЭГА 1-40-7,5-4-3	7,5	3	81,9	4730	13,44	12,2	15,4	57,7
ЭГА 1-49-7,5-4-4	7,5	4	81,9	6310	17,62	12,2	15,4	77,0
ЭГА 1-40-7,5-6-2	7,5	2	81,9	4730	11,82	12,2	15,4	57,5
ЭГА 1-40-7,5-6-3	7,5	3	81,9	7100	17,28	12,2	15,4	86,7
ЭГА 1-40-9-6-2	9,0	2	97,9	5650	11,82	12,2	16,9	57,7

Продолжение приложения А

Типоразмер электрофильтра	Активная высота электродов, м	Число полей	Площадь активного сечения S, м ²	Общая площадь осаждения S ₀ , м ²	Габаритные размеры электрофильтра, м			T = $\frac{S_0}{S}$
					Длина	Ширина (по осям опор)	Высота	
ЭГА 1-40-9-6-3	9,0	3	97,9	8480	17,28	12,2	16,9	86,6
ЭГА 1-40-9-6-4	9,0	4	97,9	11300	22,74	12,2	16,9	115,4
ЭГА 1-40-12-6-2	12,0	3	129,8	11240	17,28	12,2	19,9	86,5
ЭГА 1-40-12-6-3	12,0	4	129,8	15000	22,74	12,2	19,9	115,6
ЭГА 2-48-12-6-3	12,0	3	155,8	13500	17,28	15,2	19,9	86,6
ЭГА 2-48-12-6-4	12,0	4	155,8	18000	22,74	15,2	19,9	115,3
ЭГА 2-56-12-6-3	12,0	3	181,7	15750	17,28	17,6	19,9	86,7
ЭГА 2-56-12-6-4	12,0	4	181,7	21000	22,74	17,6	19,9	115,6
ЭГА 2-76-12-6-3	12,0	3	246,6	21400	17,28	23,6	19,9	86,8
ЭГА 2-76-12-6-4	12,0	4	246,6	28500	22,74	23,6	19,9	115,6
ЭГА 2-88-12-6-3	12,0	3	285,6	24750	17,28	27,2	19,9	86,7
ЭГА 2-88-12-6-4	12,0	4	285,6	33000	22,74	27,2	19,9	115,5

Условные обозначения типоразмера электрофильтра: Э – электрофильтр; Г – горизонтальный; А – модификация; числа после букв обозначают: первое – количество секций, второе – количество газовых проходных каналов, третье – номинальная высота электродов (м), четвертое – количество элементов в осадительном электроде, пятое – количество электрических полей по длине электрофильтра.

Учебное издание

Гичёв Юрий Александрович

ОЧИСТКА ГАЗОВ

Часть II

Конспект лекций

Тем. план. . . , поз.

Подписано к печати Формат 60×84 1/16. Бумаги типогр. Печать плоская.

Уч.-изд. л. . . Усл. печ. л. . . Тираж 50 экз. Заказ №

Национальная металлургическая академия Украины
49600, г. Днепропетровск-5, пр. Гагарина, 4

Редакционно-издательский отдел НМетАУ