

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



Ю.А. ГИЧЁВ

ОЧИСТКА ГАЗОВ

Часть I

Днепропетровск НМетАУ 2015

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

Ю.А. ГИЧЁВ

ОЧИСТКА ГАЗОВ

Часть I

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 I: Конспект лекций. - Днепропетровск: НМетАУ, 2015. – 51 с.

Приведены общие сведения об очистке промышленных газов: предельно допустимые концентрации, механизмы улавливания пыли, классификация пылеуловителей и оценка эффективности их работы.

Рассмотрены аппараты сухой механической очистки газов и аппараты мокрой очистки. Приведены методика и примеры расчетов батарейного циклона и скруббера Вентури.

Предназначен для студентов направления 6.050601 – теплоэнергетика.

Илл 25. Табл. 7. Библиогр.: 7 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)

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОЧИСТКЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ..... | 5 |
| 1.1 Источники загрязнения и характеристика промышленных газов | 5 |
| 1.2 Предельно допустимые концентрации вредных веществ..... | 6 |
| 1.3 Основные механизмы улавливания пыли..... | 7 |
| 1.4 Классификация пылеуловителей и оценка эффективности их работы. | 8 |
| 2 АППАРАТЫ СУХОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ | 10 |
| 2.1 Пылеосадительные камеры | 10 |
| 2.2 Инерционные пылеуловители..... | 13 |
| 2.3 Циклоны..... | 16 |
| 2.4 Расчет батарейного циклона | 19 |
| 2.4.1 Методика расчета..... | 19 |
| 2.4.2 Пример расчета | 22 |
| 3 АППАРАТЫ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ | 25 |
| 3.1 Орошаемые газоходы..... | 25 |
| 3.2 Промывочные камеры | 26 |
| 3.3 Скрубберы..... | 26 |
| 3.4 Аппараты ударно-инерционного действия..... | 30 |
| 3.5 Тарельчатые газопромыватели | 32 |
| 3.6 Скоростные газопромыватели | 35 |
| 3.7 Расчет скруббера Вентури..... | 41 |
| 3.7.1 Методика расчета..... | 41 |
| 3.7.2. Пример расчета | 44 |
| ЛИТЕРАТУРА | 48 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 49 |

ВВЕДЕНИЕ

Данный конспект лекций по дисциплине «Очистка газов» предназначен для студентов, обучающихся по направлению 6.050601 – теплоэнергетика.

Для теплоэнергетики эта дисциплина имеет особое значение, т.к. энергетические промышленные объекты (тепловые электростанции, котельные и проч.) являются крупнейшими источниками пылегазовых выбросов в атмосферу. В связи с этим при проектировании и эксплуатации энергетических установок следует обладать необходимой информацией о возможности снижения вредных газопылевых выбросов в атмосферу и знаниями достаточными для использования пылеулавливающего оборудования на практике: расчет, выбор оборудования и эксплуатация.

В содержание дисциплины входит системное изучение основных видов пылеуловителей: аппараты сухой и мокрой очистки газов, механические фильтры и фильтры очистки газов в электрическом поле. Рассматриваются также основные направления удаления из промышленных газов вредных газообразных компонентов: оксидов серы, углерода и азота.

В конспекте приведены примеры расчета основных видов пылеуловителей, а также сведения о конструкциях серийных пылеуловителей, что позволяет получить навыки выбора необходимого пылеулавливающего оборудования при решении проектных и практических задач в процессе эксплуатации энергетических установок.

Теоретически дисциплина «Очистка газов» базируется на основе таких общетехнических дисциплин, как «Гидрогазодинамика», «Техническая термодинамика», «Тепломасообмен», «Электротехника», а по содержанию связана практически со всеми специальными дисциплинами, по направлению 6.050601 – теплоэнергетика: «Топливо и его сжигание», «Источники теплоснабжения промышленных предприятий», «Высокотемпературные теплотехнологические процессы», «Тепловые электростанции» и др.

Данный конспект лекций соответствует рабочей программе по дисциплине «Очистка газов» для специальности 6.050601 – теплоэнергетика и может быть использован студентами–теплоэнергетиками при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также выпускных работ бакалавров и магистров.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОЧИСТКЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ

1.1 Источники загрязнения и характеристика промышленных газов

Следует выделить четыре основных источника загрязнения атмосферы:

- промышленные предприятия;
- тепловые электростанции;
- транспорт;
- котельные в системах отопления жилищно-коммунального хозяйства.

В числе промышленных предприятий заметно выделяются по пылегазовым выбросам предприятия черной металлургии, на долю которых приходится: $\approx 20\%$ пыли, $\approx 40\%$ оксида углерода, $\approx 15\%$ оксидов серы и $\approx 20\%$ оксидов азота. В районах расположения крупных металлургических предприятий загрязнение атмосферы более чем на 50-60% обусловлено выбросами этих предприятий.

Таблица 1.1 – Ориентировочное распределение выбросов по отдельным производствам предприятий черной металлургии, %:

| Наименование производства | Наименование выбросов | | |
|---------------------------|-----------------------|----|-----------------|
| | Пыль | СО | SO ₂ |
| Агломерационное | 30 | 35 | 35 |
| Коксохимическое | 5 | 20 | 25 |
| Доменное | 10 | 10 | 15 |
| Мартеновское | 10 | 5 | 5 |
| Кислородно-конверторное | 20 | 15 | 10 |
| Прокатное | - | 5 | 5 |
| Энергохозяйство (ТЭЦ) | 25 | 10 | 5 |

Загрязненные промышленные газы представляют собой продукты сгорания топлив со взвешенными частицами золы и технологической пыли. Взвешенные частицы пыли в зависимости от размера разделяются на фракции.

Фракцией называют массовую долю частиц, размеры которых находятся в интервале значений, принятых в качестве нижнего и верхнего пределов этой фракции. Размер частиц пыли выражается обычно в микрометрах (мкм).

Например, пыль содержащая частицы до 100 мкм, может быть разделена на следующие фракции, мкм: 0÷5; >5÷10; >10÷15; >15÷20; >20÷30... >90÷100. Разделение на фракции дает дисперсный состав пыли.

Размеры частиц пыли зависят в основном от условий их образования. В результате механических процессов (дробление, размалывание, истирание и проч.) размеры частиц пыли находятся в пределах 5÷10 мкм. В результате высокотемпературных термохимических процессов размеры частиц пыли составляют до 5 мкм. Пыль, образующаяся в результате горения топлива (зола), имеет размеры 5÷70 мкм.

Размеры пыли и ее дисперсный состав являются основными критериями для выбора пылеуловителей.

1.2 Предельно допустимые концентрации вредных выбросов

Предельно допустимые концентрации (ПДК) представляют собой максимальные концентрации вредных веществ в окружающем воздухе, при которых ежедневное влияние на протяжении неограниченного времени не вызывает каких-либо болезненных изменений в организме человека.

В связи с возможными колебаниями концентрации вредного вещества в течение суток различают максимальную разовую предельно допустимую концентрацию (ПДК_{м.р.}) и среднесуточную предельно допустимую концентрацию (ПДК_{с.с.}).

ПДК_{м.р.} определяется в пробах воздуха на протяжении 20 минут. ПДК_{с.с.} определяется как средневзвешенная величина в пробах воздуха на протяжении 24 часов. В обоих случаях ПДК устанавливается на основе научно-обоснованных санитарных норм.

Таблица 1.2 – ПДК наиболее характерных загрязняющих веществ металлургических производств

| Наименование вещества | ПДК, мг/м ³ | |
|---------------------------------|------------------------|------|
| | м.р. | с.с. |
| Пыль (нетоксичная) | 0,50 | 0,05 |
| Оксид углерода (СО) | 3,00 | 1,00 |
| Диоксид серы (SO ₂) | 0,50 | 0,05 |
| Оксид азота (NO) | 0,60 | 0,06 |

Для санитарной оценки воздушной среды рабочей зоны применяют показатель предельно допустимой концентрации рабочей зоны ПДК_{р.з.}. Поскольку время пребывания человека в зоне составляет 6÷8 часов, т.е. значительно меньше продолжительности суток, то ПДК_{р.з.} выше ПДК_{с.с.}.

Для выбрасываемых в атмосферу с промышленными газами вредных веществ должно соблюдаться условие:

$$\frac{C}{\text{ПДК}} \leq 1, \quad (1.1)$$

где C – концентрация вредного вещества в атмосфере воздуха; ПДК – предельно допустимая концентрация вещества в атмосферном воздухе (максимально разовая или среднесуточная в зависимости от характера выбросов).

При одновременном присутствии нескольких вредных веществ с одинаково направленным характером вредного воздействия необходим учет их суммарного влияния, что обеспечивается условием:

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1, \quad (1.2)$$

где $C_{1,2,\dots,i}$ и $\text{ПДК}_{1,2,\dots,i}$ – фактические и предельно допустимые концентрации вредных веществ, характеризующихся одинаково направленным вредным воздействием.

1.3 Основные механизмы улавливания пыли

Пылеулавливание основано на использовании одного или нескольких механизмов осаждения взвешенных в газе частиц. В числе основных механизмов следует выделить:

- гравитационное осаждение;
- инерционное осаждение;
- осаждение под действием центробежной силы;
- осаждение вследствие зацепления (касания);
- электрическое осаждение.

Гравитационное осаждение происходит в результате вертикального осаждения частиц под действием силы тяжести при прохождении их через газоочистной аппарат.

Инерционное осаждение происходит в том случае, когда масса и скорость частиц пыли обеспечивают достаточную инерцию движения для выделения частиц из потока газа при резком изменении линии тока газа.

Осаждение под действием *центробежной силы* происходит при криволинейном движении запыленного потока газа, что обуславливает возникновение центробежных сил, под действием которых частицы выделяются из потока газа и отбрасываются на поверхность осаждения газоочистного аппарата.

Зацепление (касание) частиц пыли происходит в том случае, когда расстояние от центра частиц пыли до препятствия, которое обтекает газовый поток, равно или меньше радиуса частицы.

Электрическое осаждение происходит вследствие ионизации газового потока, что приводит к приобретению частицами пыли определенного электрического заряда достаточного для выделения частиц из потока газа под действием сил электрического поля и направленного движения частиц к поверхности газоочистного аппарата, имеющего противоположный заряд.

1.4 Классификация пылеуловителей и оценка эффективности их работы

В числе наиболее применяемых пылеуловителей можно выделить четыре класса:

- аппараты сухой механической очистки газа;
- аппараты мокрой очистки газа;
- аппараты для очистки газа фильтрацией (фильтры);
- аппараты для очистки газа в электрическом поле (электрофильтры).

В зависимости от конечного содержания пыли в очищаемом газе различают следующие виды пылеуловителей:

- аппараты грубой очистки газа (количество пыли на выходе более 1г/м^3);
- аппараты средней очистки газа (содержание пыли на выходе $0,1\div 1,0\text{г/м}^3$);
- аппараты тонкой очистки газа (количество пыли на выходе до $0,1\text{г/м}^3$).

Для агрегатов черной металлургии считается необходимой очистка выделяющихся газов от пыли до концентрации 100 мг/м^3 , при которой окраска газа становится едва заметной. При более высоких концентрациях пыли

отходящие газы имеют заметный бурый цвет, обусловленный содержанием в газах оксидов железа.

При использовании газа для химической переработки или в качестве топлива к степени очистки газа предъявляются требования технологического процесса, в котором предполагается использовать газ. Например, при использовании газа в качестве топлива, его запыленность не должна превышать 10 мг/м^3 .

Эффективность очистки газа в пылеуловителе (степень улавливания) может быть определена по содержанию пыли в газах до и после газоочистного аппарата:

$$\eta = \frac{Z_{\text{н}} - Z_{\text{к}}}{Z_{\text{н}}} \cdot 100, \% \quad (1.3)$$

где $Z_{\text{н}}$ и $Z_{\text{к}}$ – соответственно, начальная и конечная концентрация пыли в газе.

При известном фракционном составе пыли и степени улавливания отдельных фракций общая степень очистки газа может быть вычислена по формуле:

$$\eta = \frac{\Phi_1 \cdot \eta_{\phi 1}}{100} + \frac{\Phi_2 \cdot \eta_{\phi 2}}{100} + \dots + \frac{\Phi_n \cdot \eta_{\phi n}}{100} = \frac{1}{100} \sum_1^n \Phi_i \cdot \eta_{\phi i}, \quad (1.4)$$

где $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ – содержание (по массе) отдельных фракций на входе в аппарат, %; $\eta_{\phi 1}, \eta_{\phi 2}, \dots, \eta_{\phi n}$ – степень улавливания фракций, доли ед.

При многоступенчатой очистке газа в нескольких последовательно установленных аппаратах итоговая степень очистки газа определяется по формуле:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n), \quad (1.5)$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ – степень очистки газа, соответственно, в первом, во втором и n-м пылеуловителе.

Эффективность улавливания пыли может быть выражена в виде коэффициента проскока пыли (степени неполноты улавливания), который представляет собой отношение концентрации частиц в газе за пылеуловителем к концентрации частиц перед пылеуловителем.

По известной степени улавливания газоочистного аппарата η коэффициент проскока ζ вычисляется по формуле:

$$\zeta = 1 - \eta. \quad (1.6)$$

2 АППАРАТЫ СУХОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

В аппаратах сухой механической очистки пылеулавливание достигается исключительно механическим воздействием на пыль вследствие гравитационных, инерционных и центробежных сил. В большинстве случаев эти силы действуют на частицы пыли совместно. Тем не менее, для отдельных аппаратов сухой механической очистки одно из воздействий может преобладать, что позволяет по этому признаку выделить следующие группы аппаратов сухой очистки: *пылеосадительные камеры, инерционные пылеуловители и циклоны.*

2.1 Пылеосадительные камеры

Пылеосадительные камеры применяют для предварительной грубой очистки газов от пыли сравнительно больших размеров (>50-100 мкм). Выделение частиц пыли из газа осуществляется здесь вследствие гравитации (см. рис. 2.1).

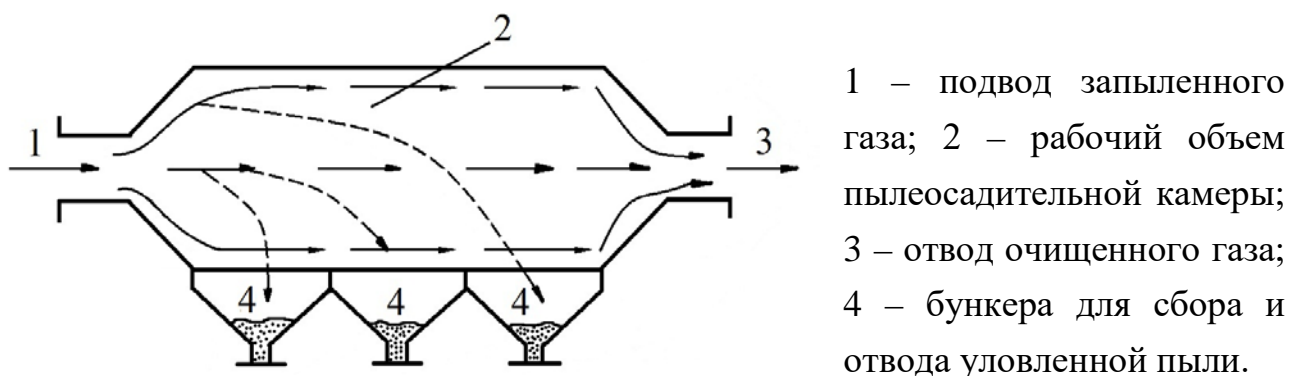


Рисунок 2.1 – Конструкция пылеосадительной камеры

Для гравитационного осаждения пыли необходимо, чтобы частички пыли успели осесть в камере за время пребывания в ней, что отражает следующее равенство соотношений:

$$L/w_{\Gamma} = H/w_{вч}, \quad (2.1)$$

где L – длина пылеосадительной камеры, м; w_{Γ} – скорость газа, м/с; H – высота пылеосадительной камеры, м; $w_{вч}$ – скорость витания частиц пыли (средняя скорость падения частиц в неподвижном газе), м/с.

В левой части уравнения (2.1) время нахождения частичек пыли при движении их в камере со скоростью потока газа:

$$\tau_1 = L/w_{\Gamma} . \quad (2.2)$$

В правой части уравнения (2.1) время необходимое для гравитационного осаждения частичек пыли:

$$\tau_2 = H/w_{\text{вч}} . \quad (2.3)$$

Для осаждения пыли необходимо выполнение условия $\tau_1 \geq \tau_2$.

Уравнение 1 можно использовать для ориентировочных конструкторских расчетов пылесадительной камеры. Например, при известной высоте камеры H длина камеры L составит:

$$L = H \cdot (w_{\Gamma}/w_{\text{вч}}) . \quad (2.4)$$

Скорость газа w_{Γ} в пылесадительных камерах составляет в пределах $0,2 \div 0,8$ м/с. Степень улавливания, зависит от размеров пыли и, например, для частиц 50 мкм, может составить 80–90%.

Достоинством пылесадительных камер является простота конструкции. *Недостатком* – громоздкость. Для гравитационного осаждения пыли необходимо достаточно длительное пребывание пыли в камере, а, следовательно, небольшие скорости газа, что увеличивает поперечное сечение пылесадительной камеры и размеры камеры в целом.

Одним из вариантов усовершенствования пылесадительной камеры является размещение в рабочем объеме камеры горизонтальных или наклонных полок (см. рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Пылесадительная камера с горизонтальными полками

Горизонтальные полки разделяют рабочий объем пылеосадительной камеры на ряд ячеек, которые выполняют функцию автономных пылеосадительных камер с высотой h :

$$h = H / (n + 1), \quad (2.5)$$

где n – количество полок; H – высота пылеосадительной камеры.

Время гравитационного осаждения в ячейке составит:

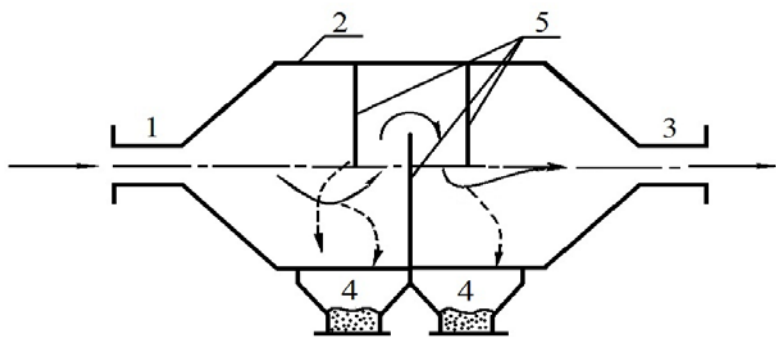
$$\tau_2 = h / w_{вч} = H / (n + 1) \cdot w_{вч}. \quad (2.6)$$

Из выражения (2.6) следует, что в случае установки горизонтальных полок время необходимое для гравитационного осаждения частиц уменьшается в $(n+1)$ раз, а, следовательно, уменьшается длина осадительной камеры:

$$L = h \cdot (w_{г} / w_{вч}). \quad (2.7)$$

Определенную сложность при установке полок вызывает удаление пыли из пылеосадительной камеры. Для этого пылеосадительную камеру оборудуют форсунками для периодического смыва пыли водой.

Усовершенствование пылеосадительных камер достигается также установкой вертикальных перегородок (см. рис. 2.3).



- 1 – вход запыленного газа;
- 2 – рабочий объем пылеосадительной камеры;
- 3 – выход очищенного газа;
- 4 – бункера для сбора и отвода уловленной пыли;
- 5 – вертикальные перегородки.

Рисунок 2.3 – Пылеосадительная камера с вертикальными перегородками

Вертикальные перегородки, обеспечивая многократное изменение направления потока газа, способствуют не только гравитационному, но и инерционному удалению частичек пыли.

2.2 Инерционные пылеуловители

В инерционных пылеуловителях наряду с гравитационными силами большое значение в осаждении пыли приобретает инерция движения частичек. Для этого в пылеосадительном аппарате обеспечивается резкое изменение направления движения потока газа. Пылевые частицы стремятся в силу инерции сохранить направление движения газа и при изменении направления выпадают из потока.

Инерционные пылеуловители отличаются между собой в зависимости от конструктивного решения, обеспечивающего изменение направления потока газа. *Возможны, например, следующие варианты:*

- с центральным подводом газа (радиальные пылеуловители);
- с боковым подводом газа;
- с вертикальной перегородкой;
- с жалюзийными решетками.

В инерционном пылеуловителе с центральным подводом газа поток запыленного газа, поступающего через центральную трубу, делает поворот на 180° и распределяется в кольцевом сечении пылеуловителя (см. рис. 2.4).

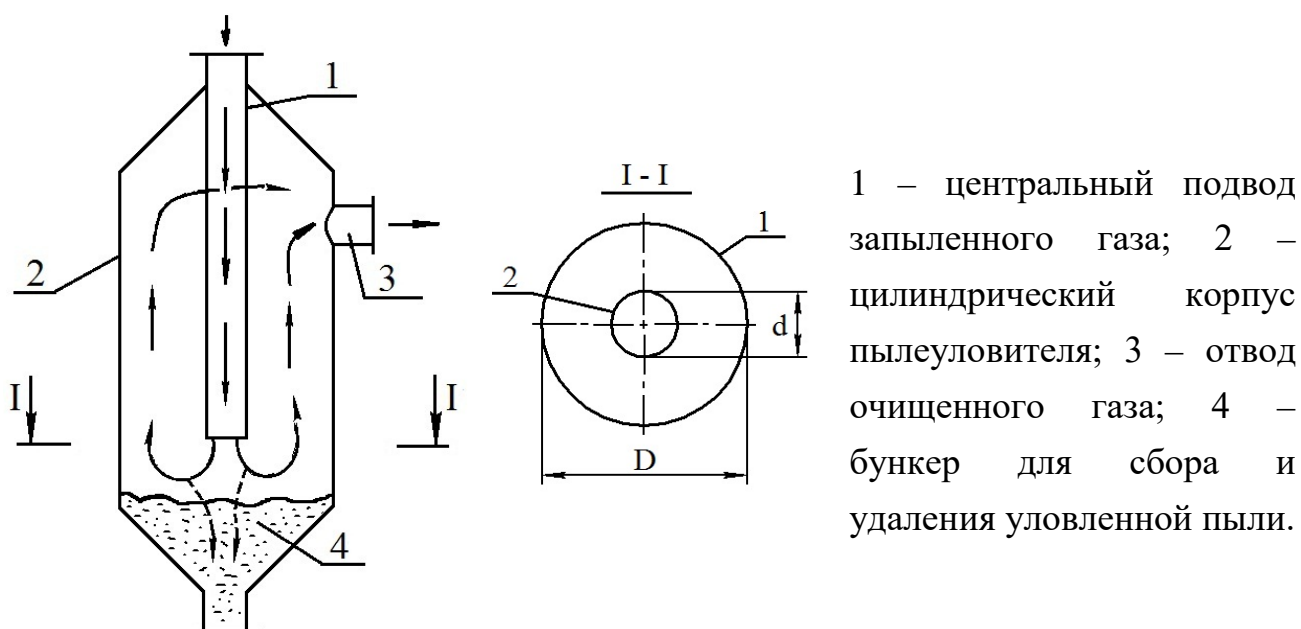


Рисунок 2.4 – Инерционный пылеуловитель с центральным подводом газа

Скорость газа в кольцевом сечении пылеуловителя должна быть меньше скорости витания частиц:

$$w_{вч} < w_{г} = \frac{V_{г}}{\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{V_{г}}{\pi(D^2 - d^2)}, \quad (2.8)$$

где $V_{г}$ – расход запыленного газа в пылеуловителе; D – диаметр цилиндрического корпуса пылеуловителя; d – диаметр центральной подводящей трубы.

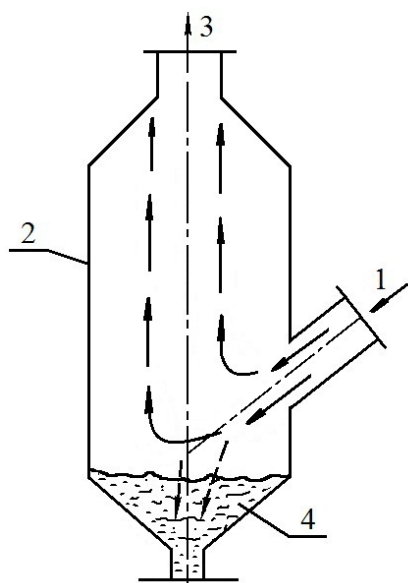
Выражение (2.8) можно использовать для ориентировочного конструктивного расчета инерционного радиального пылеуловителя. Например, при известной скорости витания частицы и при определенном диаметре трубы d центрального подвода запыленного газа диаметр пылеуловителя D определяется по формуле:

$$D^2 - d^2 = \frac{4V}{\pi w_{г}} \quad \text{или} \quad (2.9)$$

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi w_{г}} + d^2}. \quad (2.10)$$

Радиальные пылеуловители наиболее эффективно работают при скорости газа в кольцевом зазоре $0,6 \div 1,0$ м/с. При этом для частиц более 25–30 мкм степень улавливания пыли может составить 65–85 %.

В инерционном пылеуловителе с боковым подводом газа изменение направления потока газа достигается размещением патрубка для подвода газа в нижней части корпуса пылеуловителя (см. рис. 2.5). При этом отвод газа осуществляется в верхней части пылеуловителя, что вызывает резкий поворот газа в нижней части в сторону выхода и инерционное отделение частичек пыли.



- 1 – боковой подвод запыленного газа;
- 2 – цилиндрический корпус пылеуловителя;
- 3 – отвод очищенного газа;
- 4 – бункер для сбора и удаления пыли.

Рисунок 2.5 – Инерционный пылеуловитель с боковым подводом газа

Изменение направления потока и эффективность инерционного отделения пыли зависит здесь от угла наклона входного патрубка к оси вертикального корпуса пылеуловителя. В зависимости от скорости входа газа в корпус пылеуловителя угол наклона патрубка изменяется в пределах $30 \div 60^\circ$.

В инерционном пылеуловителе с вертикальной перегородкой (см. рис. 2.6) изменение направления потока газа и степень улавливания пыли определяется положением перегородки по отношению ко входу газа в пылеуловитель.

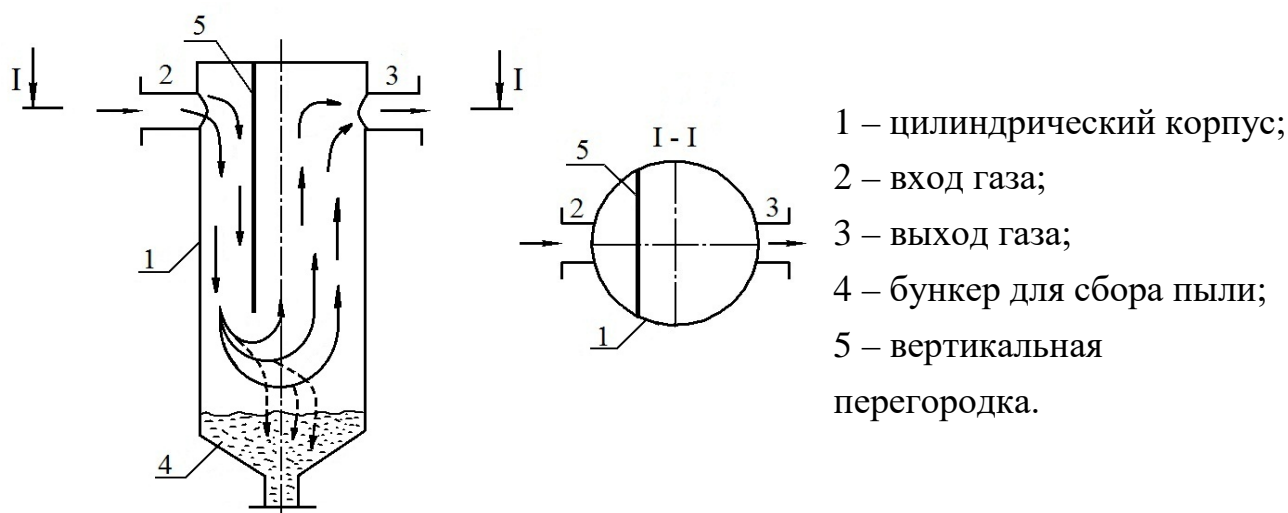
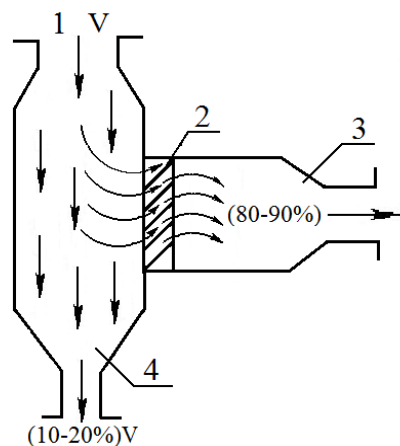


Рисунок 2.6 – Инерционный пылеуловитель с вертикальной перегородкой

Смещение перегородки в сторону входного патрубка обеспечивает снижение скорости газа перед выходным патрубком, что способствует не только инерционному, но и гравитационному осаждению пыли.

К числу инерционных пылеуловителей относятся также жалюзийные пылеуловители (см. рис. 2.7), которые обычно выполняют функцию концентраторов пыли, облегчающих последующую очистку газа.



1 – вход запыленного газа; 2 – жалюзийная решетка; 3 – выход большей части газа с пониженной концентрацией пыли; 4 – выход меньшей части газа с повышенной концентрацией пыли.

Рисунок 2.7 – Жалюзийный пылеуловитель (концентратор пыли)

В жалюзийных пылеуловителях поток запыленного газа разделяется на две части. Большая часть газа (80–90%) отводится принудительной тягой в боковой газоход через жалюзи и частично освобождается от пыли. В меньшей части газа (10–20%), проходящей мимо жалюзей, концентрация пыли увеличивается: во-первых, вследствие инерции движения пыли при повороте газа в жалюзийной решетки, и, во-вторых, вследствие отражения частичек пыли при ударе о жалюзийную решетку. Жалюзийные решетки применяют для концентрации пыли более 20 мкм. Скорость газов в решетках 12–15 м/с.

После жалюзийного концентратора поток газа с большей концентрацией пыли направляется на очистку, например, в циклоны. При этом вследствие небольшого объема газа с концентрированной пылью требуются аппараты очистки меньших размеров по сравнению с очисткой всего потока газа.

Недостатком жалюзийных пылеуловителей является абразивный износ решеток и отложение пыли внутри решеток.

2.3 Циклоны

В циклонах наряду с гравитацией и инерцией значение приобретают центробежные силы (см. рис. 2.8). Тангенциальный подвод газа в циклоне обеспечивает вращение потока и соответственно появление центробежных сил, которые отбрасывают частицы к стенкам циклона, где происходит торможение частиц пыли и гравитационное сползание пыли в бункер.

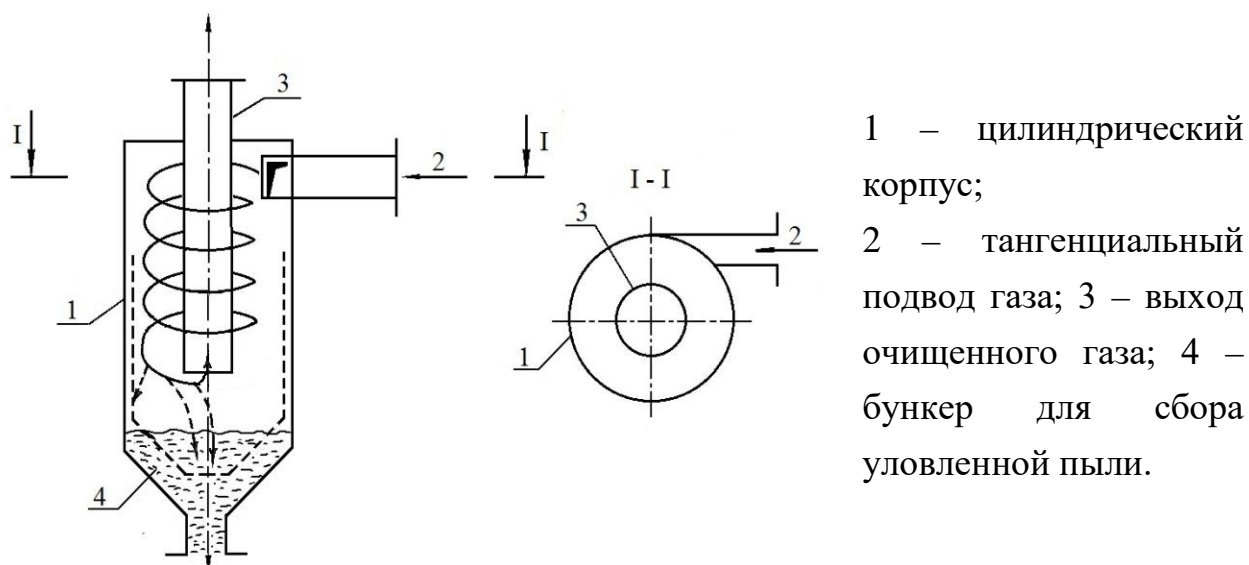
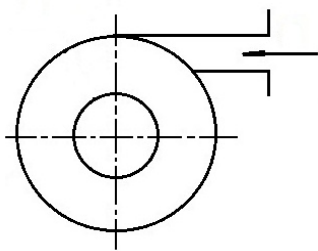


Рисунок 2.8 – Циклон с тангенциальным подводом газа

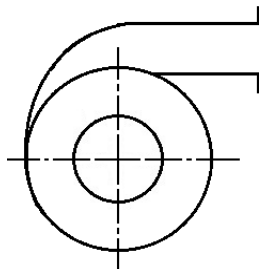
Оптимальная скорость газа на входе в циклон 20–25 м/с. При меньшей скорости недостаточно воздействие возникающих центробежных сил на частички пыли. При более высоких скоростях происходит ударение пыли о стенки циклона и обратное отражение пыли в поток газа, что снижает эффект очистки.

Основные варианты подвода газа:

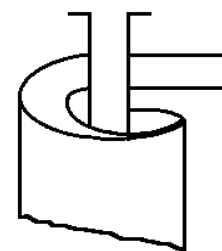
тангенциальный



спиральный

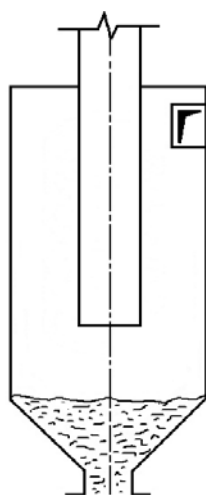


винтообразный

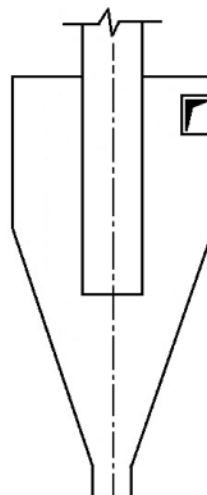


В зависимости от конфигурации корпуса циклоны делятся на два вида:

цилиндрический

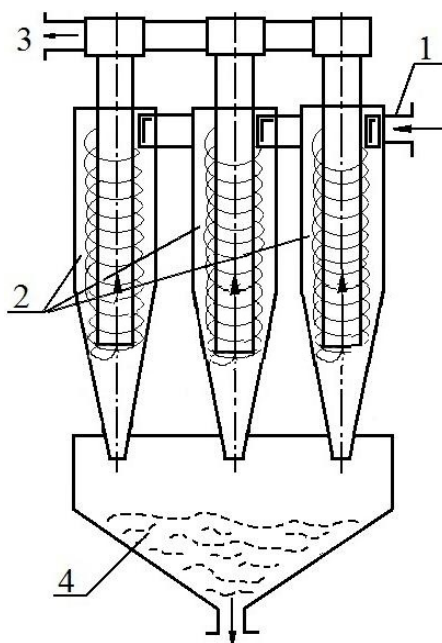


конический



Одиночные циклоны, как правило, выполняют цилиндрическими.

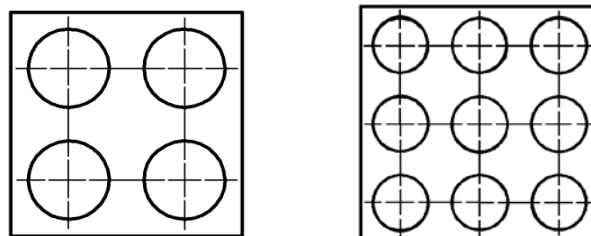
С увеличением диаметра циклона эффективность пылеулавливания в циклоне снижается, т.к. уменьшается закручивание газового потока и соответственно снижается действие центробежных сил на частицы. В том случае, если количество газа поступающего на очистку требует установки циклона диаметром более 800 мм, циклон делают групповым, т.е. состоящим из группы циклонов меньшего диаметра. Таким образом, групповой циклон представляет собой группу параллельно подключенных по газу циклонов меньших размеров по сравнению с одиночным циклоном (см. рис.2.9).



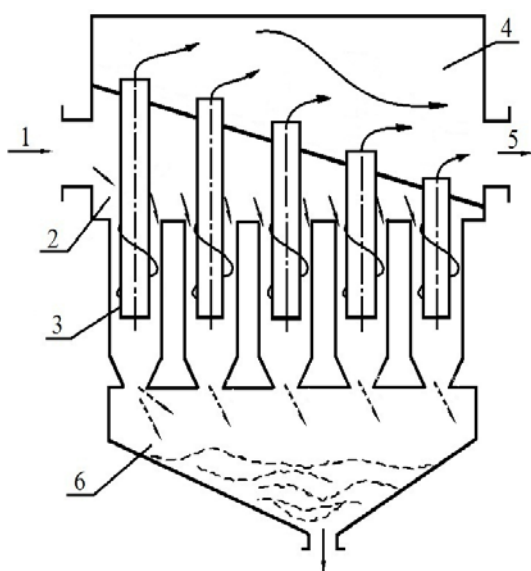
- 1 – коллектор для тангенциального подвода газа;
- 2 – элемент группового циклона;
- 3– коллектор для отвода очищенного газа;
- 4 – бункер для сбора уловленной пыли.

Рисунок 2.9 – Групповой циклон

Размещение элементов группового циклона:



При количестве циклонов больше девяти следует применять батарейные циклоны (см. рис. 2.10).



- 1 – подводящий патрубок запыленного газа;
- 2 – распределительная камера;
- 3 – элемент батарейного циклона с винтовым подводом газа;
- 4 – камера очищенного газа;
- 5 – патрубок для очищенного газа;
- 6 – бункер для сбора уловленной пыли.

Рисунок 2.10 – Батарейный циклон

Наиболее эффективно (до 80%) в циклонах улавливаются частицы больше 10 мкм. Для частиц менее 5 мкм циклоны малоэффективны.

2.4 Расчет батарейного циклона

2.4.1 Методика расчета

В зависимости от свойств улавливаемой пыли выбирается тип направляющего аппарата циклонных элементов (см. рис.2.11).

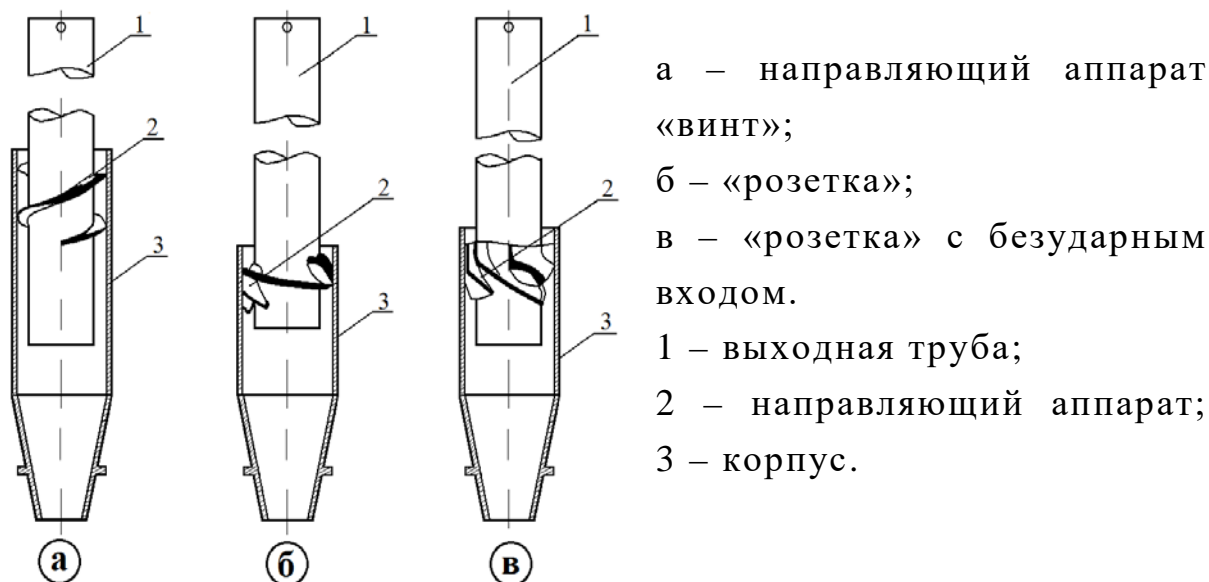


Рисунок 2.11 – Элементы батарейного циклона

Для пыли, склонной к слипанию, применяют направляющий аппарат типа "винт", который менее подвержен забиванию пылью. Диаметр циклонного элемента принимают в зависимости от запыленности поступающего на очистку газа.

Таблица 2.1 – Допустимая запыленность поступающего на очистку газа (г/м^3) в зависимости от диаметра циклонного элемента

| Диаметр циклонного элемента, мм | | 100 | 150 | 250 |
|---------------------------------|-----------|-----|-----|-----|
| Тип направляющего аппарата | «винт» | 25 | 50 | 100 |
| | «розетка» | 15 | 35 | 75 |

Потеря давления в батарейном циклоне, определяется по формуле:

$$\Delta P = \zeta \frac{w^2}{2} \rho, \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (2.11)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления циклонного элемента; w – условная скорость газа в циклонном элементе, м/с; ρ – плотность газа при рабочих условиях, кг/м³.

Для направляющих аппаратов типа «винт» $\zeta=85$, для аппаратов типа «розетка» с лопатками, наклоненными под углом $\alpha=25^\circ$ – $\zeta=90$, а при 30° – $\zeta=65$.

Условная скорость газа в циклонах составит:

$$w = (4 \cdot V_1) / (\pi \cdot D^2), \text{ м/с}, \quad (2.12)$$

где V_1 – расход газа через один циклонный элемент при рабочих условиях, м³/с; D – диаметр циклонного элемента, м.

Для батарейных циклонов при $\zeta=85-90$ оптимальное значение условной скорости $w_{\text{опт}}=3,85$ м/с, а при $\zeta=65$ оптимальное значение – $w_{\text{опт}}=4,5$ м/с. Значение условной скорости газа при рабочих условиях не должно отклоняться от оптимального более чем на $\pm 15\%$.

Расход газа через один циклонный элемент, составит:

$$V_1 = w_{\text{опт}} \cdot (\pi \cdot D^2) / 4, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.13)$$

Необходимое число циклонных элементов определяется отношением:

$$N = V / V_1, \quad (2.14)$$

где V – поступающий на очистку объем газа при рабочих условиях, м³/с.

Степень улавливания пыли в элементе батарейного циклона определяется в следующей последовательности.

На основании математической обработки уравнения для вероятностных функций получено выражение для определения степени улавливания пыли циклоном:

$$\eta = 100 \cdot \Phi(x), \%. \quad (2.15)$$

Значения нормальной функции распределения $\Phi(x)$ приведены в приложении А.

Значение x применительно к циклонам вычисляют по формуле:

$$x = \frac{\lg \cdot (d_m / d_{50})}{(\lg^2 \sigma^T + \lg^2 \sigma_n)^{0,5}}, \quad (2.16)$$

где d_m – среднемедианный размер улавливаемых частиц пыли, (размер частицы, при котором масса всех частиц размером более d_m равна массе всех частиц менее d_m) мкм; d_{50} – размер частиц, улавливаемых на 50% выбранным циклоном при фактических условиях работы, мкм; $\lg \sigma^T$ – величина,

характеризующая дисперсию частиц пыли, улавливаемых в условном циклоне; $lg\sigma_n$ – среднее квадратичное отклонение функции распределения (дисперсия) улавливаемых частиц пыли, которое определяет соотношение:

$$lg\sigma_n = \frac{lgd_{84,1}}{d_m} = \frac{lgd_m}{d_{15,9}}, \quad (2.17)$$

здесь $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$ – размер частиц пыли, для которых масса всех частиц, имеющих размер меньше $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$, составляет соответственно 84,1% и 15,9% общей массы пыли.

Необходимые для этих расчетов значения параметров d_{50}^T и $lg\sigma^T$ приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры, определяющие степень улавливания пыли элементами батарейных циклонов

| Характеристики элемента | | | d_{50}^T , мкм | $lg\sigma^T$ |
|----------------------------|------------------------------|---------------|------------------|--------------|
| тип направляющего аппарата | угол наклона α , град | диаметр D, мм | | |
| винт | 25 | 250 | 4,5 | 0,46 |
| розетка | 25 | 250 | 3,85 | 0,46 |
| розетка | 30 | 250 | 5,0 | 0,46 |
| розетка | 25 | 150 | 3,38 | 0,46 |
| розетка | 25 | 100 | 3,0 | 0,46 |

Размер частиц, улавливаемых элементами батарейного циклона на 50%, определяется по формуле:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{(\rho_{1T}/\rho_1 \cdot \mu/\mu_T \cdot w_T/w)}, \text{ мкм}, \quad (2.18)$$

где d_{50}^T – размер частиц, улавливаемых на 50% условным элементом (см. табл.2.2); ρ_1 , μ , w – параметры, соответствующие фактическим условиям работы; ρ_{1T} , μ_T , w_T – параметры, соответствующие условиям, принятым для условного элемента батарейного циклона:

$$\rho_{1T}=2200 \text{ кг/м}^3; \quad \mu_T=23,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad w_T=4,5 \text{ м/с}.$$

Полученное значение d_{50} используется при вычислении x (формула 2.16). В свою очередь x позволяет определить по приложению А значение соответствующей функции $\Phi(x)$. Вычисленная по формуле (2.15) степень

улавливания пыли элементом батарейного циклона сопоставляется с требуемым значением.

В случае необходимости степень улавливания пыли может быть увеличена уменьшением диаметра элемента батарейного циклона или выбором более эффективного типа направляющего аппарата.

Степень улавливания пыли батарейным циклоном обычно ниже, чем его отдельных элементов. Это вызвано перетоком очищаемого газа между элементами циклона вследствие разницы значений их гидравлических сопротивлений.

2.4.2 Пример расчета

Рассчитать батарейный циклон для очистки газов агломерационной машины, определить его гидравлическое сопротивление и степень улавливания пыли при следующих исходных данных: количество поступающего на очистку газа при нормальных условиях $V_0=200000 \text{ м}^3/\text{ч}$; плотность газа при нормальных условиях $\rho_0=1,29 \text{ кг/м}^3$; температура газа $t=150^\circ\text{C}$; вязкость газа при рабочих условиях $\mu=24,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$; разрежение в циклоне $p=8 \text{ кПа}$; запыленность поступающего на очистку газа $z_1=6 \text{ г/м}^3$; плотность пыли $\rho_1=4000 \text{ кг/м}^3$.

Дисперсный (фракционный) состав пыли:

| | | | | | |
|-----------------------|----|--------|---------|---------|-----|
| крупность частиц, мкм | <5 | 5...10 | 10...20 | 20...40 | >40 |
| массовая доля, % | 8 | 9 | 16 | 24 | 46 |

Решение выполняется в следующем порядке.

Определяется плотность газа при рабочих условиях:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (p_n - p)}{(273 + t) \cdot p_a},$$

где p_n – давление газа при нормальных условиях, 101325 Па;

$$\rho = 1,29 \frac{273 \cdot (101325 - 8000)}{(273 + 150) \cdot 101325} = 0,767 \text{ кг/м}^3.$$

Вычисляется расход газа при рабочих условиях:

$$V = V_0 \frac{\rho_0}{3600 \cdot \rho} = 200000 \frac{1,29}{3600 \cdot 0,767} = 93,44 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Исходя из свойств агломерационной пыли принимается циклонный элемент диаметром $D=250 \text{ мм}$ с направляющим аппаратом типа «розетка» с

$\alpha=30^\circ$. Оптимальная скорость газа в циклонном элементе в этом случае составляет 4,5 м/с, а расход газа через один циклонный элемент составит:

$$V_1 = 4,5 \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 0,22 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Необходимое число циклонных элементов составит:

$$N = \frac{93,44}{0,22} = 424,73.$$

Принимаем 400 циклонных элементов, т.е. компоновку из четырех групп по 100 циклонных элементов в каждой, с расположением по 10 элементов в каждом ряду. В этом случае условная скорость газа в циклонных элементах составит:

$$w = \frac{93,44}{0,785 \cdot 0,25^2 \cdot 400} = 4,76 \text{ м/с}$$

Отклонение от оптимальной скорости составит:

$$\Delta w = \frac{4,76 - 4,5}{4,5} \cdot 100 = 5,8\%,$$

т.е. не выходит из рекомендуемых пределов $\pm 15\%$.

Гидравлическое сопротивление батарейного циклона определяется по формуле (2.11):

$$\Delta p = 65 \frac{4,76^2}{2} \cdot 0,767 = 565 \text{ Па.}$$

В процессе эксплуатации батарейных циклонов их сопротивление растет из-за износа направляющих аппаратов, заноса их пылью и обычно в условиях агломерационного производства достигает 1,5–2,0 кПа и более.

Степень улавливания пыли определяется следующим образом.

Вычисляется по формуле (2.18) размер частиц, улавливаемых на 50% выбранным циклонным элементом:

$$d_{50} = 5,0 \left(\frac{2200}{4000} \cdot \frac{24,1 \cdot 10^{-6}}{23,7 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{4,5}{4,76} \right)^{0,5} = 3,64 \text{ мкм}$$

По заданному фракционному составу пыли строится интегральная кривая (рис.2.12), показывающая относительное содержание частиц пыли с размерами меньше данного размера.

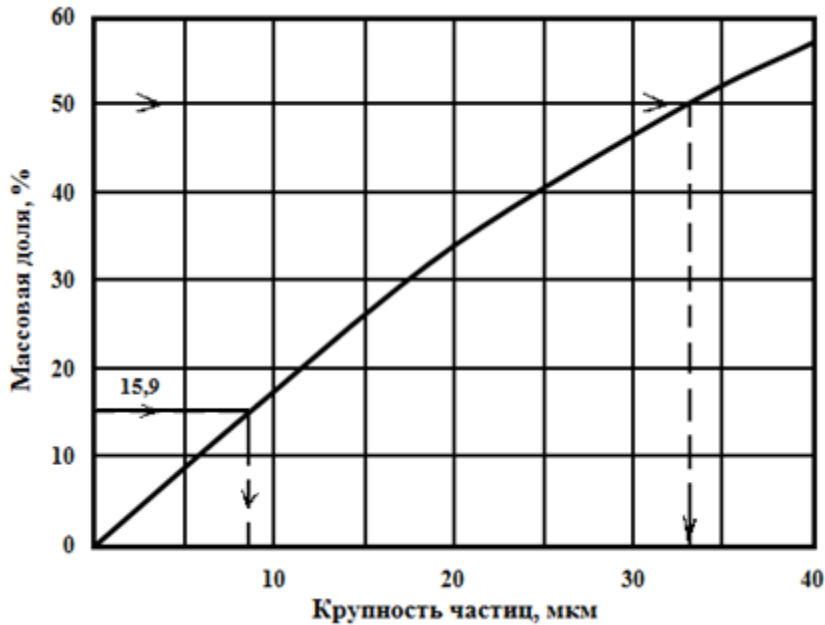


Рисунок 2.12 – Дисперсный (фракционный) состав пыли, представленный в виде интегральной кривой

Для определения значений d_m и $d_{15,9}$ из точек, соответствующих 50% и 15,9% содержания пыли, проводятся горизонтальные линии до пересечения с интегральной кривой и из полученных точек опускают перпендикуляры на ось абсцисс (пунктирные линии).

Найденные значения $d_m=33$ мкм и $d_{15,9}=9$ мкм позволят определить среднее квадратическое отклонение функции распределения улавливаемых частиц пыли по формуле (2.17):

$$\lg \sigma_n = \lg \frac{33}{9} = \lg 3,666 = 0,5643.$$

После подстановки численных значений из табл.2.2 в формулу (2.16), определяется значение x :

$$x = \frac{\lg 33 / 3,64}{(0,46^2 + 0,5643^2)^{0,5}} = \frac{0,9574}{(0,212 + 0,318)^{0,5}} = 1,315.$$

Значение функции $\Phi(x)$ по приложению А, соответствующее $x=1,315$, равно 0,905.

Степень улавливания пыли составит:

$$\eta = 100 \cdot 0,905 = 90,5\%.$$

В процессе эксплуатации батарейных циклонов по указанным причинам степень улавливания пыли снижается и в условиях агломерационного производства в большинстве случаев находится на уровне 80–85%.

3 АППАРАТЫ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

Для повышения эффективности очистки газа от мелкодисперсной пыли прибегают к коагуляции (укрупнению) частичек пыли. В аппаратах мокрой очистки коагуляция достигается смачиванием пыли. При мокрой очистке в запыленный поток газа вводят жидкость, обычно воду, которая смачивает пыль, что способствует слипанию частичек пыли между собой, т.е. укрупнению пыли.

При этом в результате контакта газа с водой образуется межфазная поверхность “газ–жидкость”, на которой происходит осаждение коагулированной пыли. Форма поверхности осаждения зависит от способа ввода жидкости и может быть в виде струй, пленок, капель и проч.

Воздействие воды на запыленный газ может быть разнообразным, т.е. не только очистка от пыли. В том случае, если очищаемый от пыли газ высокотемпературный, вода охлаждает газ. При наличии вредных газообразных компонентов в газе, например SO_2 или SO_3 , вода связывает эти компоненты с образованием сернокислотных соединений.

В число наиболее распространенных аппаратов мокрой очистки входят: орошаемые газоходы, промывочные камеры, скрубберы, аппараты ударно–инерционного действия тарельчатые и скоростные газопромыватели.

3.1 Орошаемые газоходы

Встроенные в орошаемый газоход форсунки (см. рис. 3.1) создают водяную завесу. Для исключения значительного уноса воды скорость газа в газоходе не должна превышать 3 м/с. Удельный расход воды – $0,1 \div 0,3 \text{ кг/м}^3$.

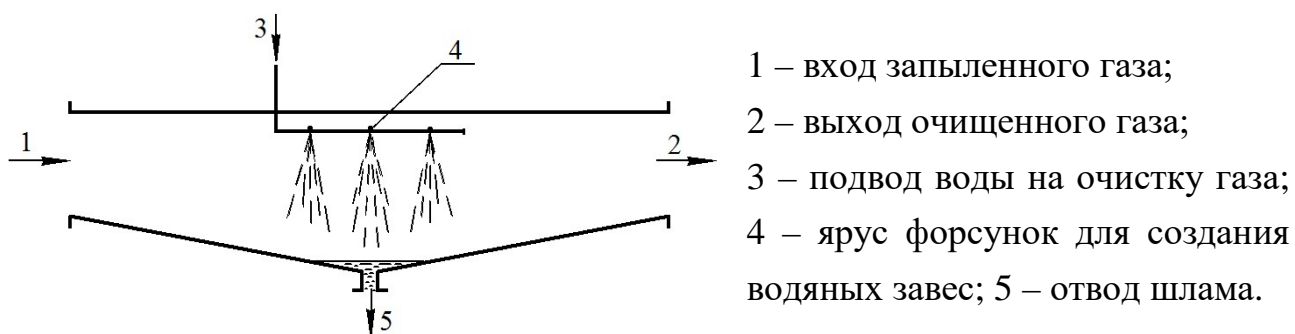
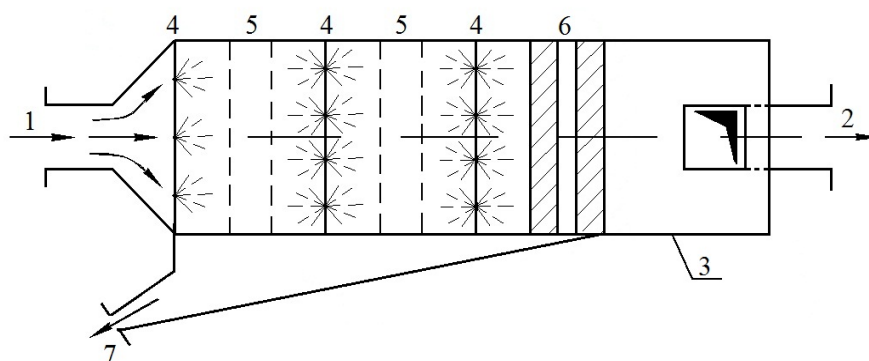


Рисунок 3.1 – Схема орошаемого газохода

3.2 Промывочные камеры

Промывочные камеры обычно применяют для очистки воздуха от пыли в системах вентиляции и кондиционирования воздуха (см. рис. 3.2).



1 – подвод запыленного газа; 2 – отвод очищенного газа; 3 – корпус камеры; 4 – форсуночные ряды для создания водяных завес; 5 – сетки или перфорированные листы для равномерного движения газа; 6 – каплеуловитель в виде жалюзийных решеток; 7 – отвод шлама.

Рисунок 3.2 – Схема промывочной камеры

Размеры камеры выбирают таким образом, чтобы скорость движения газов w_{Γ} составляла в них $1,5 \div 2,5$ м/с, а время пребывания газов в камере τ_{Γ} не менее 3 с. Заданное время пребывания газа τ_{Γ} и скорость газа w_{Γ} определяют длину камеры L_{κ} и площадь ее поперечного сечения S_{κ} :

$$L_{\kappa} = \tau_{\Gamma} \cdot w_{\Gamma}, \quad S_{\kappa} = V_{\Gamma} / w_{\Gamma}, \quad (3.1, 3.2)$$

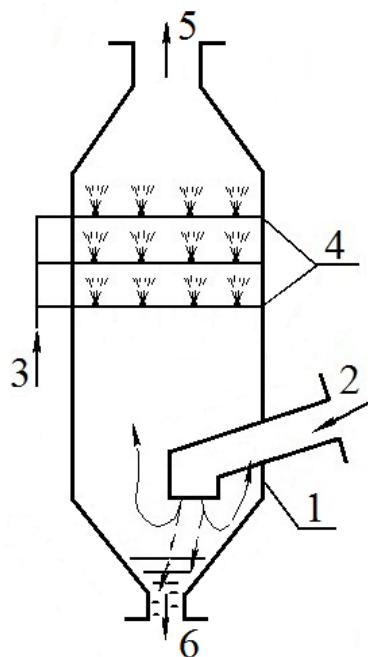
где V_{Γ} – расход очищаемого газа.

Удельный расход воды – $0,2 \div 1,0$ кг/м³.

3.3 Скрубберы

Скрубберы разделяют на полые и насадочные. На рисунке 3.3 представлена схема полого скруббера.

В металлургическом производстве это вертикальные полые цилиндры диаметром до 6–8 м, высотой до 20–30 м.



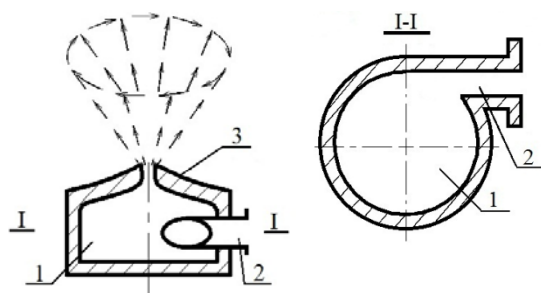
- 1 – цилиндрический корпус;
- 2 – подвод запыленного газа;
- 3 – подвод воды на орошение;
- 4 – ярусы орошающих форсунок;
- 5 – отвод очищенного газа;
- 6 – отвод шлама.

Рисунок 3.3 – Схема полого скруббера

Патрубок для подвода запыленного газа несколько смещен от оси скруббера, что улучшает равномерность распределения газа. Отверстие подводящего патрубка направлено к зеркалу воды, что обеспечивает ударный контакт газа с водой. В результате удара газа о воду происходит инерционное отделение наиболее крупных частиц пыли.

Форсунки обычно размещаются в несколько ярусов. Факел распыливания воды из форсунки может быть направлен вверх, вниз или под углом.

Наиболее распространенной конструкцией форсунок является центробежная форсунка (см. рис. 3.4).



- 1 – вихревая камера;
- 2 – тангенциальный подвод воды;
- 3 – сопло.

Рисунок 3.4 – Центробежная форсунка

В центробежной форсунке вода выходит из сопла в виде вращающегося полого конуса, который под действием центробежных сил распадается на отдельные капли. Удельный расход воды на очистку зависит от запыленности газа и может составить, например, до 6–8 кг воды на 1 м³ при запыленности 10–12 г/м³.

В скруббере происходит также охлаждение газа, если газ поступает на очистку высокотемпературный. Максимально допустимая температура газа на

входе в скруббер – 300 °С. При более высокой температуре газа интенсивное испарение воды исключает или снижает эффект коагуляции пыли.

Скорость газа в скруббере принимают в пределах 0,5÷1,5 м/с. При более высокой скорости происходит унос капель, что приводит к отложению шлама в последующих за скруббером газоходах. При менее высоких скоростях газа возрастают размеры скруббера и несколько снижается эффективность очистки вследствие уменьшения турбулизации потока газа, которая способствует лучшему перемешиванию газа с водой.

По заданной скорости газа в скруббере w_r определяется диаметр скруббера D_c :

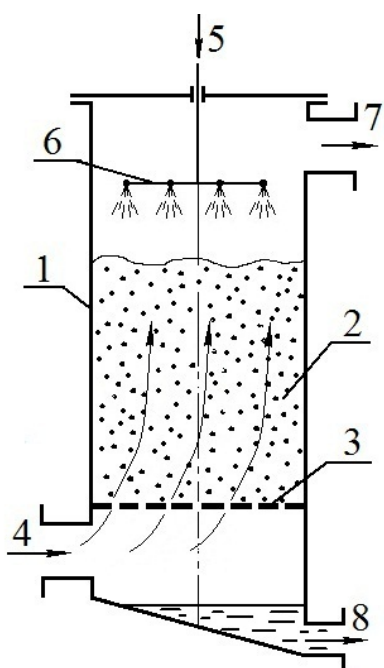
$$D_c = \sqrt{V_r / (0,785 \cdot w_r)}, \quad (3.3)$$

Оптимальное соотношение высоты и диаметра скруббера: $H_c / D_c = 2,5$.

Полые скрубберы обеспечивают довольно высокую степень очистки (свыше 80%) при улавливании частиц размером более 10 мкм и малоэффективны при улавливании частиц менее 5 мкм.

Внутреннюю поверхность скруббера для исключения коррозии (например сернокислотной) облицовывают керамической плиткой.

Насадочные скрубберы представляют собой полые цилиндры заполненные насадкой (см. рис. 3.5). Насадка засыпается без определенного порядка или укладывается на опорную решетку в определенного порядке (регулярная насадка).



1 – корпус скруббера; 2 – насадка; 3 – опорная решетка; 4 – вход запыленного газа; 5 – подача воды на орошение; 6 – ярус орошающих форсунок; 7 – выход очищенного газа; 8 – отвод шлама.

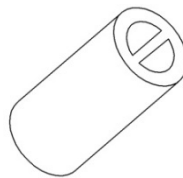
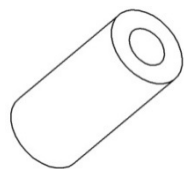
Рисунок 3.5 – Схема насадочного скруббера

Насадочные скрубберы широко применяются в химической промышленности для очистки газов от хорошо растворимой пыли и туманов. Улавливание пыли сопровождается охлаждением газов и адсорбцией определенных компонентов газа.

Применяются различные типы насадок:

кольца Рашига,

кольца с перегородкой и проч.



Скорость газа в насадочных скрубберах составляет $1,5 \div 2,5$ м/с.

В металлургии применяют скрубберы с хордовой насадкой. Хордовая насадка представляет собой деревянные брусья толщиной 10–15 мм и шириной 100–150 мм. Расход воды – $1,2 \div 2,5$ кг/м³. Соотношение высоты насадки H_n и диаметра насадки скруббера D_n принимается в пределах $0,5 \div 1,5$.

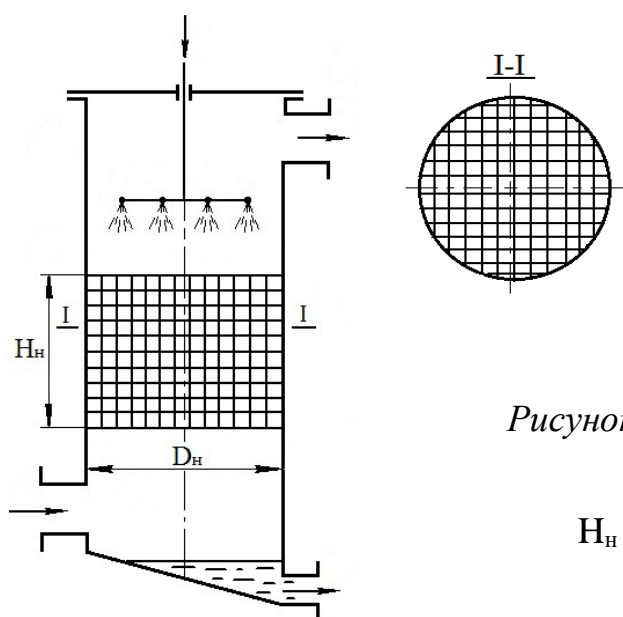


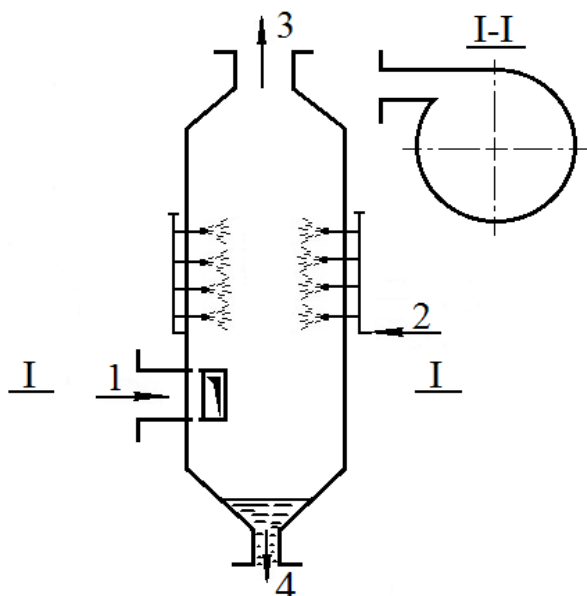
Рисунок 3.6 – Скруббер с хордовой насадкой

H_n и D_n – высота и диаметр насадки

Применение в технике пылеулавливания насадочных скрубберов ограничено из-за частого забивания насадки пылью.

Эффективность очистки в насадочных скрубберах может составить до 90% при улавливании частиц свыше 2 мкм.

В центробежных скрубберах (см. рис. 3.7) достигается комбинированное действие при улавливании пыли: коагуляция пыли водой и действие на пыль центробежных сил в закрученном потоке газа.



1 – тангенциальный подвод запыленного газа; 2 – подвод воды на форсуночное орошение; 3 – отвод очищенного газа; 4 – отвод шлама.

Рисунок 3.7 – Центробежный скруббер

Форсунки размещаются вдоль стенок скруббера. Над форсунками предусматривается зона свободная от подачи воды. Это дает возможность отбросить капли орошения на стенки скруббера, прежде чем газовый поток достигнет выходного патрубка.

Скорость газа на входе в скруббер составляет $20 \div 60$ м/с. Скорость очищаемых газов в сечении скруббера – $1,2 \div 2,4$ м/с, удельный расход воды на очистку – $0,4 \div 1,3$ кг/м³.

Степень очистки газов для частиц свыше 1 мкм может составить более 97%.

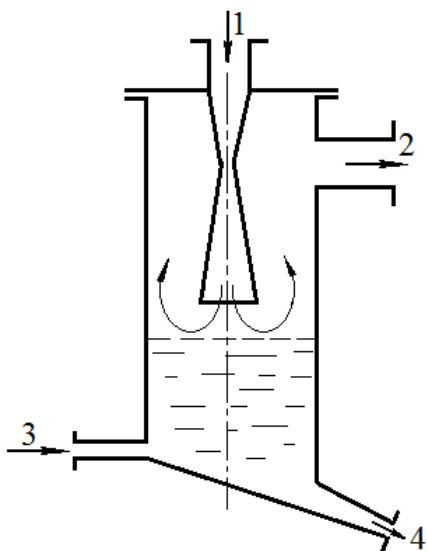
Высокая степень очистки газа достигается вследствие многократной промывки газа водой во вращающемся потоке.

В центробежных скрубберах одновременно с очисткой газа от пыли и охлаждением газа происходит абсорбция из газов оксидов серы. Степень улавливания оксидов серы может составить до 40–50%.

3.4 Аппараты ударно–инерционного действия

К аппаратам ударно–инерционного действия относится группа мокрых пылеуловителей, в которых газовый поток ударяется о поверхность жидкости на большой скорости, что приводит к частичному удалению пыли в результате углубления пыли в жидкость, а затем газовый поток резко изменяет направление движения, что приводит к удалению пыли вследствие действия на частицы инерционных сил.

Наиболее простой конструкцией пылеуловителя ударно–инерционного действия является вертикальная колонна (см. рис. 3.8), в верхней части которой установлен центральный входной газопровод, имеющий конфигурацию трубы Вентури, а в нижней части колонна заполнена водой.



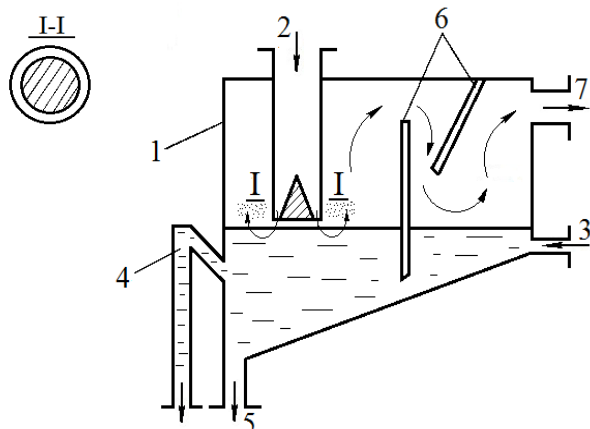
1 – подвод запыленного газа; 2 – отвод очищенного газа; 3 – подвод воды; 4 – отвод шлама.

Рисунок 3.8 – Ударно–инерционный пылеуловитель с центральным верхним подводом газа

Скорость очищаемого газа, направленного на поверхность воды, составляет до 20–30 м/с. При ударе газа о воду крупные частицы пыли углубляются в воду, смачиваются и выпадают на днище аппарата в виде шлама. После удара о воду направление движения газа изменяется на 180°.

При повороте газа на 180° оставшиеся в газе частицы пыли вследствие инерции отделяются от газа, и также улавливаются водой. Аппарат улавливает частицы более 20 мкм. Шлам из аппарата удаляется непрерывно или периодически. Для удаления уплотненного шлама со дна применяют смывные сопла.

За рубежом в числе аппаратов ударно–инерционного действия наиболее распространен скруббер Дойля (см. рис. 3.9).



1 – корпус скруббера; 2 – подвод запыленного газа; 3 – подвод воды в полость скруббера; 4 – перелив для отвода избытка воды; 5 – отвод шлама; 6 – перегородки для удаления капель; 7 – отвод очищенного газа.

Рисунок 3.9 – Скруббер Дойля

Скруббер Дойля представляет собой заполненный водой резервуар. Подвод запыленного газа осуществляется через вертикальную трубу, в нижней части которой установлен конус, создающий сужающий кольцевой зазор для выхода газа, что ускоряет поток запыленного газа перед контактом с водой.

Перелив для отвода избытка воды выполняет функцию гидрозатвора. Перегородки, размещенные в полости скруббера, обеспечивают многократное изменение направления движения газа при выходе его из скруббера, что способствует инерционному отделению капель уносимой влаги. Перегородки могут быть выполнены перфорированными или в виде жалюзей.

В щели кольцевого зазора на выходе из трубы скорость газа составляет до 35–55 м/с. Газовый поток ударяется о поверхность жидкости, создавая завесу из капель жидкости.

Ударно–инерционное проникновения пыли вглубь воды, а также коагулирование пыли в капельной завесе, обеспечивают улавливание пыли.

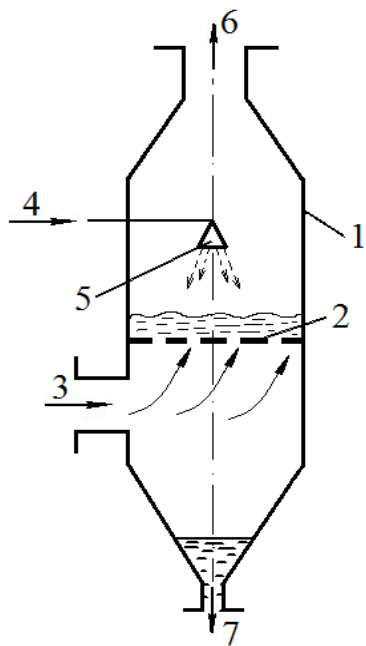
Зазор между нижним сечением трубы и уровнем воды в скруббере в статическом состоянии составляет 2–3 мм. Удельный расход воды на очистку – $0,1 \div 0,2 \text{ кг/м}^3$. В скруббере эффективно улавливаются частицы более 10–15 мкм.

Особенностью аппаратов ударно-инерционного действия является отсутствие средств для перемещения воды. Необходимая для очистки развитая поверхность контакта газа и воды создается за счет энергии ударяющегося о воду газа. В связи с этим пылеуловители ударно–инерционного действия называют *аппаратами с внутренней циркуляцией жидкости*.

3.5 Тарельчатые газопромыватели

Тарельчатые газопромыватели представляют собой вертикальные полые цилиндры (см. рис. 3.10), внутри которых установлены горизонтальные перегородки с отверстиями (тарелки).

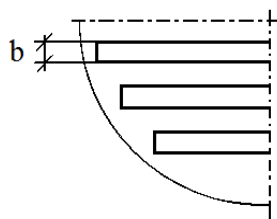
Тарельчатые газопромыватели в зависимости от конструкции тарелки разделяются на две группы: с *провальными тарелками* и *переливными тарелками*.



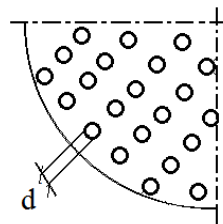
1 – корпус газопромывателя; 2 – провальная тарелка; 3 – подвод запыленного газа; 4 – подача воды на орошение; 5 – орошающее устройство; 6 – выход очищенного газа; 7 – отвод шлама.

Рисунок 3.10 – Схема газопромывателя с провальными тарелками

Подвод газа в зону контакта с жидкостью осуществляется через отверстия в тарелке, которые могут быть щелевыми или дырчатыми (круглыми):



щелевые тарелки
 $b=4-5$ мм



дырчатые тарелки
 $d=4-8$ мм

Оптимальная толщина тарелки с точки зрения гидравлического сопротивления 4–6 мм.

В зависимости от скорости газа возможны три режима работы тарельчатого газопромывателя:

- *барботажный*, при котором газ проникает в слой жидкости в виде пузырей (скорость газа до 1 м/с);
- *пенный*, при котором образуется высокотурбулизированная пена (скорость газа свыше 1,2 м/с);
- *волновой*, при котором газ проходит через слой воды струями (скорость газа свыше 2,0 м/с).

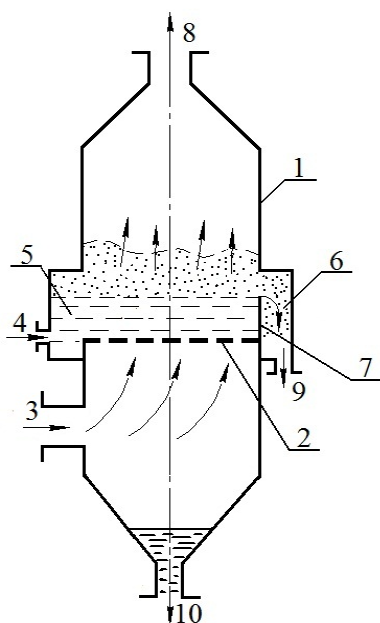
Барботажный режим вследствие небольших скоростей газа, что снижает производительность газопромывателя, имеет ограниченное применение. В барботажном режиме затруднено также удаление шлама с решетки, что создает

сложности при эксплуатации пылеуловителя (засорение решетки шламом, увеличение гидравлического сопротивления аппарата и проч.).

В *пенном режиме* происходит непрерывное образование, разрушение и слияние пузырей, что интенсифицирует улавливание пыли и способствует вследствие турбулизированного состояния пены динамичному смыву шлама с решетки. Тарельчатые пылеуловители, работающие в пенном режиме, называют также пенными газопромывателями. В пенных тарельчатых пылеуловителях возможно эффективное улавливание частиц более 2 мкм. Расход воды составляет $0,4 \div 0,9 \text{ кг/м}^3$.

Для *волнового режима* характерна гидравлическая нестабильность работы аппарата: прорыв газа через слой воды на решетке, нарушение схода шлама через решетку, увеличение слоя воды, что повышает гидравлическое сопротивление, повышенный каплеунос и проч.

В пылеуловителях с *переливными тарелками* (см. рис. 3.11) обычно устанавливают дырчатые тарелки с диаметром отверстий $2 \div 8 \text{ мм}$. Скорость газа в свободном сечении аппарата $1 \div 3 \text{ м/с}$. Основным режимом работы газопромывателя с переливными тарелками – пенный.



1 – корпус газопромывателя; 2 – тарелка; 3 – подача запыленного газа; 4 – подача воды; 5 – приемная камера; 6 – сливная камера; 7 – порог регулирующий уровень воды на тарелке; 8 – выход очищенного газа; 9 и 10 – отвод шлама.

Рисунок 3.11 – Схема газопромывателя с переливными тарелками

Перелив воды благодаря относительно беспровальному режиму движения воды позволяет более рационально использовать воду за счет снижения потерь воды со шламом и в 2–3 раза сократить расход воды на газоочистку по сравнению с провальными тарелками.

Недостатками газопромывателей с переливными тарелками являются образование отложений на поверхности тарелок вследствие менее

интенсивного перемещения воды на поверхности тарелки и брызгоунос вследствие пенного режима работы, что ограничивает применение газопромывателей с переливными тарелками.

3.6 Скоростные газопромыватели

Скоростные газопромыватели наиболее эффективные аппараты мокрой очистки газа, их применяют в основном для очистки газа от микронной и субмикронной пыли (десятые доли мкм).

В скоростных газопромывателях основным фактором, обеспечивающим очистку газа, является подача воды на очистку в высокоскоростной поток запыленного газа, что способствует тщательному диспергированию воды и последующей промывке газа водой в турбулентном режиме движения газа. Высокие скорости очищаемого газа обеспечивают трубы Вентури. В связи с этим скоростные газопромыватели называют также скрубберами Вентури.

В целом скрубберы Вентури представляют собой сочетание труб Вентури и последующих за трубами каплеуловителей. Вода поступает в наиболее скоростную часть труб Вентури (в конфузор или горловину).

Элементы скруббера могут быть смонтированы отдельно (см. рис. 3.12) или в одном корпусе (см. рис. 3.13).

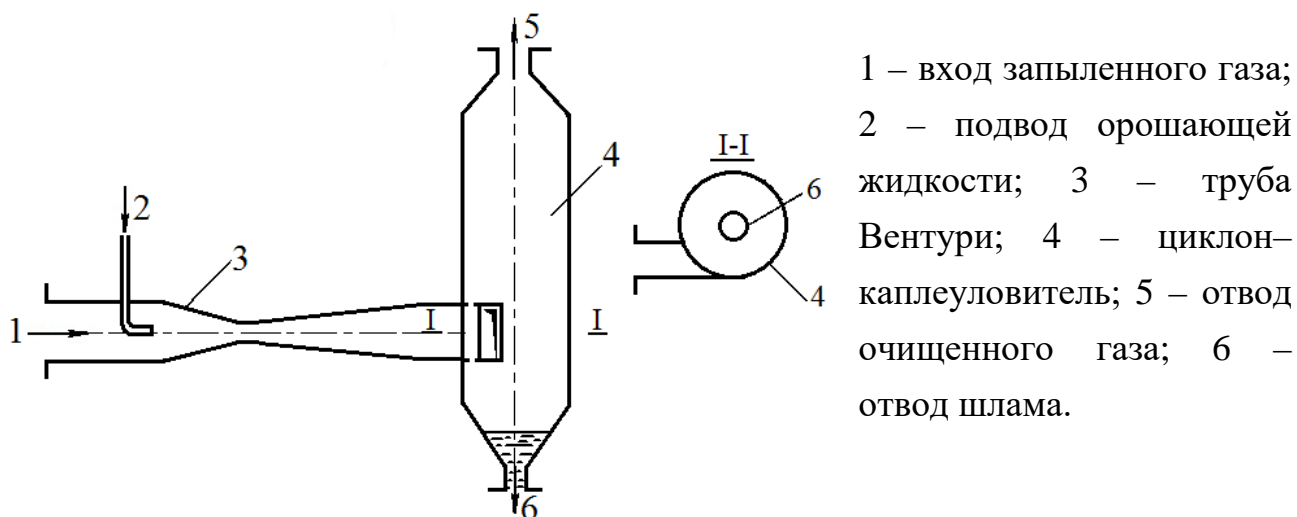
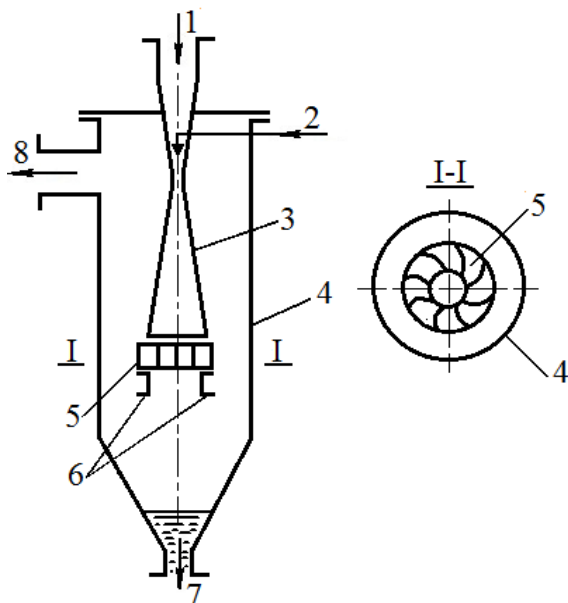


Рисунок 3.12 – Скруббер Вентури с выносным каплеуловителем



1 – подвод запыленного газа; 2 – подвод орошающей жидкости; 3 – труба Вентури; 4 – корпус каплеуловителя; 5 – центробежный завихритель; 6 – патрубок для концентрации шлама; 7 – отвод шлама; 8 – выход очищенного газа.

Рисунок 3.13 – Скруббер Вентури со встроенным каплеуловителем

Таким образом, принцип действия скруббера Вентури заключается в интенсивном дроблении жидкости, подаваемой на очистку газа в высокоскоростной газовой поток ($40 \div 150$ м/с), в коагуляции пыли жидкостью в турбулентном режиме движения газа и в последующем улавливании капель жидкости, образующих с пылью шлам.

Применение трубы Вентури для ускорения газа позволяет сделать процесс дробления жидкости с минимальными гидравлическими потерями.



Плавное сужение конфузора (оптимальное $25 \div 28^\circ$), а затем плавное расширение диффузора (оптимальное $6 \div 7^\circ$) делают трубу Вентури с аэродинамической точки

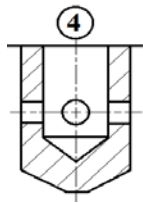
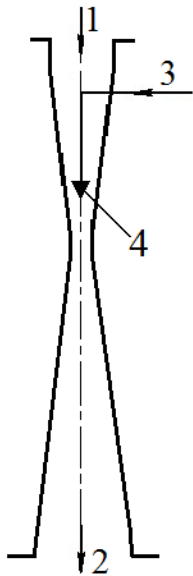
зрения наиболее предпочтительной для распыливания орошающей воды.

В конфузоре газ развивает большую скорость что способствует дроблению воды на мельчайшие капли, а в диффузоре вследствие снижения скорости происходит укрупнение капель воды с пылью, что облегчает их отделение в каплеуловителе.

В качестве каплеуловителя обычно используют простейшие аппараты инерционного типа или циклоны.

Разнообразие в конструкции скрубберов Вентури вносит способ подвода орошающей воды. Возможны следующие варианты:

1. Скруббер Вентури с центральным подводом воды



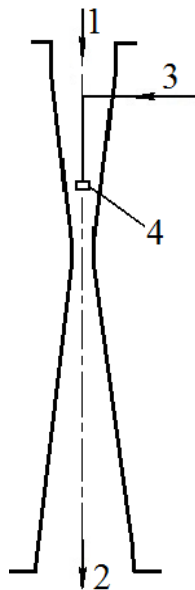
1 и 2 – подвод и отвод очищаемого газа; 3 – подвод воды на орошение; 4 – наконечник для струйной подачи орошающей воды.

Расположение наконечника, количество отверстий в нем и диаметр отверстий конструктивно принимаются таким образом, чтобы исключить ударение струи орошающей воды о стенки конфузора, т.к. в противном случае резко ухудшается распыливание воды газовым потоком.

Для более равномерного распределения воды в наконечнике могут быть два ряда отверстий. Диаметры отверстий от 6 мм до 8–12 мм. Удельный расход воды $0,5 \div 1,0$ кг/м³ газа.

Недостатком подачи воды через наконечники является забивание отверстий, т.к. в большинстве случаев для орошения применяется вода оборотного цикла, содержащая взвеси.

2. Скруббер Вентури с форсуночным подводом воды



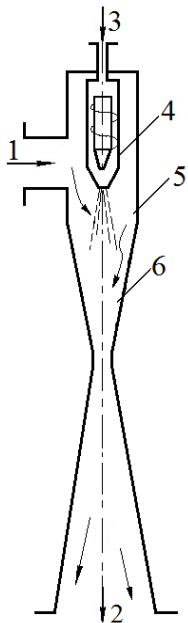
1 и 2 – подвод и отвод очищаемого газа; 3 – подвод воды на орошение; 4 – форсунка.

Форсунку размещают перед конфузуром или непосредственно в конфузуре. Обычно применяют центробежные форсунки. Давление воды перед форсунками $0,2 \div 0,3$ МПа.

При более высоком давлении воды перед форсункой ощутимее становится эффект эжекции от струй орошающей воды, т.е. создание разрежения в полости конфузора трубы Вентури.

3. Эжекторный скруббер Вентури

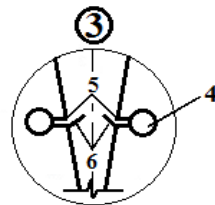
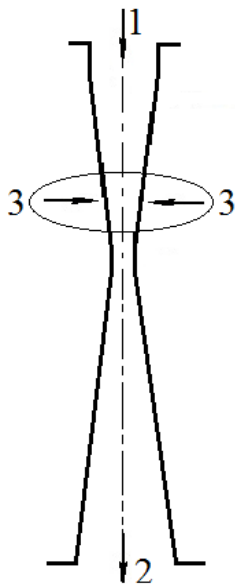
Подача воды под более высоким давлением и сопутствующий этому эффект эжекции используется в эжекторных скрубберах Вентури, которые можно отнести к разновидности скрубберов Вентури с форсуночным подводом воды.



1 и 2 – подвод и отвод очищаемого газа; 3 – подвод воды на орошение; 4 – центробежная форсунка с винтовым завихрителем; 5 – приемная камера; 6 – труба Вентури.

В эжекторных скрубберах Вентури основная энергия, затрачиваемая на очистку газа, подводится с орошающей жидкостью, обеспечивающей за счет эжекции движение очищаемого газа. Давление нагнетания воды в этих скрубберах составляет $0,4 \div 1,2$ МПа, а скорость истечения воды $15 \div 30$ м/с.

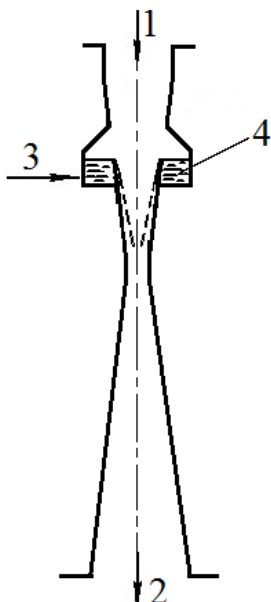
4. Скруббер Вентури с периферийной подачей воды



1 и 2 – подвод и отвод очищаемого газа; 3 – подача воды на орошение; 4 – коллектор; 5 – отверстия; 6 – отражательные пластины.

Струи воды вытекающие из отверстий коллектора срезаются о кромки отражательных пластин и становятся плоскими. Это увеличивает площадь поперечного сечения горловины, орошаемой водой.

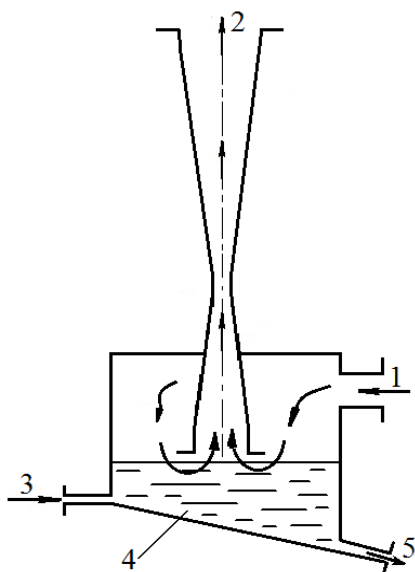
5. Скруббер Вентури с пленочным орошением



1 и 2 – подвод и отвод очищаемого газа; 3 – подвод воды на орошение; 4 – камера орошающей воды.

Пленочное орошение за счет непрерывного смыва водой уменьшает образование отложений на стенках диффузора трубы Вентури. Пленочное орошение целесообразно при недостаточно осветленной оборотной воде, применение которой нежелательно, например, при форсуночном подводе воды из-за забивания отверстий форсунки.

6. Скруббер Вентури с бесфорсуночным подводом воды



1 и 2 – подвод и отвод очищаемого газа; 3 – подвод воды на орошение; 4 – резервуар орошающей воды; 5 – отвод шлама.

При бесфорсуночном подводе воды орошение происходит за счет энергии газового потока.

Газ, подаваемый на очистку, в результате контакта с поверхностью воды в резервуаре захватывает капли воды и уносит их в трубу Вентури.

Гидравлическое сопротивление трубы Вентури при бесфорсуночном орошении ниже, чем при центральном и форсуночном орошении. Вместе с этим при бесфорсуночном орошении происходит меньшее дробление воды, что приводит к менее эффективной очистке газа от пыли.

В донной части резервуара с орошающей водой предусмотрен периодически отвод шлама, т.к. контакт газа с поверхностью воды и некоторое углубление запыленного газа могут вызывать захват пыли водой.

В зависимости от гидравлического сопротивления скрубберы Вентури можно разделить на:

- *высоконапорные* (20÷30 кПа), которые применяют для тонкой очистки газа от микронной и субмикронной пыли;
- *низконапорные* (3÷5 кПа), которые применяют для подготовки очищаемого газа перед последующим пылеуловителем второй ступени очистки.

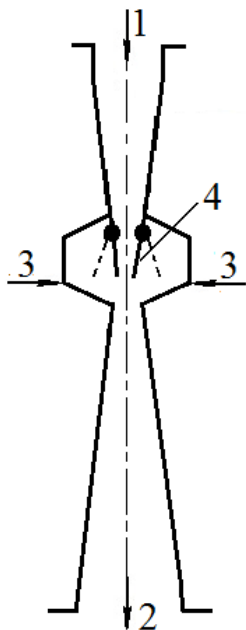
Степень очистки газа зависит от гидравлического сопротивления трубы Вентури: чем больше гидравлическое сопротивление, тем выше степень очистки. Увеличение гидравлического сопротивления обеспечивает увеличение скачка давления в очищаемом газовом потоке, что способствует диспергированию орошающей жидкости, интенсифицирует турбулизацию газового потока и в целом активизирует промывку газа.

В том случае, если количество очищаемых газов изменяется, для стабилизации эффективности очистки следует поддерживать постоянное гидравлическое сопротивление трубы Вентури.

Поддержание сопротивления трубы Вентури на постоянном уровне при изменении количества газа достигается регулированием площади поперечного сечения горловины трубы Вентури.

Следует выделить две конструкции труб Вентури с регулируемым сечением горловины.

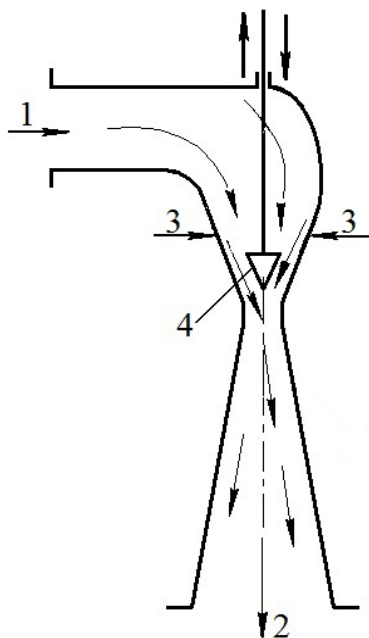
1. Регулирование сечения при помощи поворотных заслонок



1 и 2 – подвод и отвод очищаемого газа; 3 – подвод орошающей воды; 4 – поворотные заслонки.

Регулирование сечения при помощи поворотных заслонок применяется для труб Вентури прямоугольного сечения.

2. Регулирование сечения перемещением конуса



1 и 2 – подвод и отвод очищаемого газа; 3 – подача воды на орошение; 4 – регулирующий конус.

На практике отдают предпочтение регулируемому конусу по сравнению с поворотными заслонками, т.к. при регулировании конусом механизм перемещения вынесен из зоны действия запыленного потока.

В целом эффективность работы скрубберов Вентури определяется оптимальным соотношением между гидравлическим сопротивлением и удельным расходом орошающей жидкости. Оптимальное соотношение зависит от конструкции скруббера, характеристики частиц пыли и их дисперсного состава.

В целом количество орошающей жидкости для скрубберов Вентури в зависимости от особенностей конструкции скруббера составляет $0,5 \div 1,5 \text{ кг/м}^3$.

3.7 Расчет скруббера Вентури

3.7.1 Методика расчета

При расчете скрубберов Вентури отдают предпочтение энергетическому методу, согласно которому эффективность работы мокрых пылеуловителей определяется затратами энергии на процесс очистки газа. Затраты энергии складываются из гидравлического сопротивления аппарата $\Delta p_{ан}$ и давления распыляемой жидкости на входе в аппарат $\Delta p_{ж}$:

$$K = \Delta p_{ан} + m \cdot p_{ж}, \quad (3.4)$$

где m - удельный расход орошающей жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$ газа.

Степень улавливания пыли в зависимости от затрат энергии на очистку определяется по формуле:

$$\eta = 1 - \exp(-V_1 \cdot K^x), \quad (3.5)$$

где V_1 и x – константы, зависящие от свойств улавливаемой пыли (см. табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Значение констант V_1 и x для пылей в отходящих газах металлургических печей

| Пыль отходящих газов | V_1 | x |
|------------------------------|----------------------|-------|
| доменных печей | $6,61 \cdot 10^{-3}$ | 0,891 |
| мартеновских печей | $1,57 \cdot 10^{-6}$ | 1,619 |
| сталеплавильных конверторов | $9,88 \cdot 10^{-2}$ | 0,466 |
| электросталеплавильных печей | $2,42 \cdot 10^{-5}$ | 1,260 |
| известковообжиговых печей | $6,50 \cdot 10^{-4}$ | 0,053 |

Основные положения расчета скруббера Вентури:

1. По заданным начальной z_1 и конечной z_2 запыленностей газа вычисляется требуемая степень улавливания пыли:

$$\eta = \frac{z_1 - z_2}{z_1}. \quad (3.6)$$

2. В соответствии со значением η и принятыми значениями V_1 и x (см. табл. 3.1) из выражения (3.5) вычисляется значение K :

$$K = \sqrt{-\frac{1}{B_1} \cdot \ln(1 - \eta)}. \quad (3.7)$$

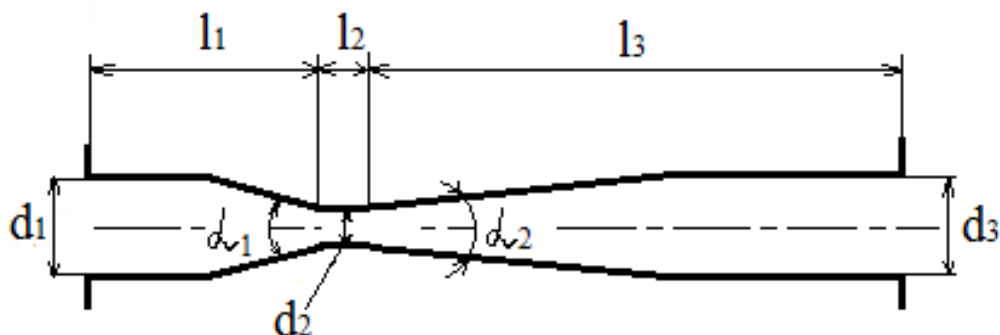
3. Принимается удельный расход орошающей жидкости m и в соответствии с выражением (3.4) определяется гидравлическое сопротивление скруббера Вентури:

$$\Delta p_{ан} = K - m \cdot p_{ж}. \quad (3.8)$$

4. Определяется гидравлическое сопротивление каплеуловителя $\Delta p_{к}$ (обычно по опытным данным) и вычисляется гидравлическое сопротивление трубы Вентури:

$$\Delta p_{тр} = \Delta p_{ан} - \Delta p_{к}. \quad (3.9)$$

5. Принимают обозначения конструктивных характеристик трубы Вентури:



- d_1, l_1, α_1 – диаметр входного сечения, длина и угол сужения конфузора;
- d_2, l_2 – эквивалентный диаметр и длина горловины;
- d_3, l_3, α_2 – диаметр выходного сечения, длина и угол раскрытия диффузора.

6. Определяются или принимаются значения коэффициента гидравлического сопротивления сухой (без подачи орошающей жидкости) трубы Вентури ξ_1 и коэффициента, учитывающего дополнительные потери давления, вызванные подачей в трубу орошающей жидкости ξ_2 .

При оптимальной с аэродинамической точки зрения длине горловины трубы-распылителя $l_2 = 0,15 \cdot d_2$ коэффициент сопротивления ξ_1 принимается в пределах $0,12 \div 0,15$. Указанные значения ξ_1 могут быть распространены как на круглые трубы так и на трубы с прямоугольным сечением горловины.

Коэффициент сопротивления трубы Вентури, обусловленный вводом орошающей жидкости определяется выражением:

$$\xi_2 = A \cdot \xi_1 \cdot m^{B_2}, \quad (3.10)$$

где A и B_2 – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Значение коэффициентов A и B_2 в формуле (3.10)

| Способ орошения трубы Вентури | Скорость газа в горловине, м/с | Длина горловины l_2 , м | Коэффициенты | |
|--|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | | | A | B_2 |
| центральное орошение перед конфузуром и пленочное орошение | >80 | $(0,15-12,0)d_2$ | $1,68(l_2/d_2)^{0,290}$ | $1-1,12(l_2/d_2)^{-0,045}$ |
| | <80 | $0,15d_2$ | $3,49(l_2/d_2)^{0,266}$ | $1-0,98(l_2/d_2)^{0,020}$ |
| центральное орошение в конфузур | $40\div 150$ | $0,15d_2$ | 0,63 | -0,3 |
| периферийное орошение в конфузур | >80 | $0,15d_2$ | 13,4 | 0,024 |
| | <80 | $0,15d_2$ | 1,4 | -0,316 |

7. Вычисляется скорость газа в горловине трубы Вентури, м/с

$$u_{\Gamma} = \left(\frac{2 \cdot \Delta p_{\text{тр}}}{(\xi_1 \cdot \rho_{\Gamma}) + (\xi_2 \cdot m \cdot \rho_{\text{ж}})} \right)^{0,5}, \quad (3.11)$$

где ρ_{Γ} и $\rho_{\text{ж}}$ – соответственно, плотность очищаемого газа и орошающей жидкости, кг/м³.

8. Определяется диаметр горловины трубы Вентури, м

$$d_2 = 1,13 \cdot \left(\frac{V}{u_{\Gamma}} \right)^{0,5}, \quad (3.12)$$

где V – расход очищаемого газа при рабочих условиях, м³/с; 1,13 – коэффициент, заменяющий $\sqrt{4/\pi}$.

9. Принимаются оптимальными следующие конструктивные соотношения трубы Вентури:

- угол сужения конфузора $\alpha_1=25\div 28^\circ$;
- длина конфузора $l_1 = [(d_1 - d_2)/2]: \text{tg}(\alpha_1/2)$;
- длина горловины трубы $l_1 = 0,15 \cdot d_2$;
- угол раскрытия диффузора $\alpha_2=6\div 7^\circ$;
- длина диффузора $l_3 = [(d_3 - d_2)/2]: \text{tg}(\alpha_2/2)$.

3.7.2. Пример расчета

Рассчитать скруббер Вентури для очистки отходящих газов мартеновской печи: определить размеры скруббера, эффективность и гидравлическое сопротивление.

Исходные данные:

- расход влажных газов при нормальных условиях - $V_0=150000 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- температура газов на входе в скруббер – $t_1=200^\circ\text{C}$;
- разрежение газа перед скруббером - $p_r=5\text{кПа}$;
- плотность газа при нормальных условиях - $\rho_0=1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- концентрация пыли в газе на входе в скруббер - $z_1=5 \text{ г}/\text{м}^3$;
- напор поступающей на орошение воды - $p_{\text{ж}}=300 \text{ кПа}$;
- необходимая концентрация пыли в газе на выходе из скруббера - $z_2=100\text{мг}/\text{м}^3$.

По формуле (3.6) определяется требуемая степень очистки газа:

$$\eta = \frac{z_1 - z_2}{z_1};$$

$$\eta = \frac{5 - 0,1}{5} = 0,98.$$

По формуле (3.7) с учетом коэффициентов B_1 и x , принятых по табл. 3.1, вычисляются затраты энергии на очистку газа:

$$K = \sqrt[x]{-\frac{1}{B_1} \cdot \ln(1 - \eta)};$$

$$K = \sqrt[1,619]{-\frac{1}{1,57 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln(1 - 0,98)} = 8928 \text{ кДж}/1000\text{м}^3 \text{ газа}.$$

Общее гидравлическое сопротивление скруббера Вентури определяется по формуле (3.8), в которой удельный расход орошающей жидкости m принят $0,001 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ газа:

$$\Delta p_{an} = K - m \cdot p_{ж};$$

$$\Delta p_{an} = 8928 - 0,001 \cdot 300000 = 8628 \text{ Па.}$$

Плотность газа с учетом действительных условий составит:

$$\rho_d = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 - p_r)}{(273 + t_1) \cdot 101,3} = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot (101,3 - 5)}{(273 + 200) \cdot 101,3} = 0,71 \text{ кг/м}^3,$$

где 101,3 – давление газа при нормальных условиях, кПа

Объемный расход поступающего на очистку газа при действительных условиях:

$$V_d = V_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_d} = 150000 \cdot \frac{1,29}{0,71} = 273000 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Расход орошающей жидкости (воды):

$$M = m \cdot V_d = 0,001 \cdot 273000 = 273 \text{ кг/ч.}$$

Гидравлическое сопротивление циклона-каплеуловителя Δp_k на основании опыта работы аналогичных установок принимается 100 Па.

Гидравлическое сопротивление трубы Вентури определяем по формуле (3.9):

$$\Delta p_{тр} = \Delta p_{an} - \Delta p_k;$$

$$\Delta p_{тр} = 8628 - 100 = 8528 \text{ Па.} \approx 8,5 \text{ кПа.}$$

Температура насыщенного влагой газа на выходе из скруббера Вентури определяется по формуле:

$$t_2 = (0,133 - 41 \cdot m) \cdot t_1 + 35; \quad (3.13)$$

$$t_2 = (0,133 - 41 \cdot 0,001) \cdot 200 + 35 = 53,4 \text{ }^\circ\text{C.} \approx 53^\circ\text{C.}$$

Плотность газа на выходе из трубы Вентури:

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot [101,3 - (p_r + \Delta p_{тр})]}{(273 + t_2) \cdot 101,3};$$

$$\rho_2 = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot [101,3 - (5 + 8,5)]}{(273 + 53) \cdot 101,3} = 0,93 \text{ кг/м}^3.$$

Выбирается труба Вентури с центральным подводом орошающей жидкости в конфузор. При этом значение коэффициента гидравлического сопротивления ξ_1 сухой трубы без орошения принимается средней в интервале $0,12 \div 0,15$, т.е. $\xi_1 = 1,25$.

Гидравлическое сопротивление орошаемой трубы определяется по формуле (3.10) с учетом соответствующих значений А и B_2 (см. табл.3.2):

$$\xi_2 = A \cdot \xi_1 \cdot m^{B_2};$$

$$\xi_2 = 0,63 \cdot 0,125 \cdot 0,001^{-0,3} = 0,62.$$

Скорость газа в горловине трубы Вентури вычисляется по формуле (3.11):

$$u_r = \left(\frac{2 \cdot \Delta p_{тр}}{(\xi_1 \cdot \rho_2) + (\xi_2 \cdot m \cdot \rho_ж)} \right)^{0,5};$$

$$u_r = \left(\frac{2 \cdot 8528}{(0,125 \cdot 0,93) + (0,62 \cdot 0,001 \cdot 1000)} \right)^{0,5} = 152 \text{ м/с.}$$

Объемный расход газа на выходе из трубы Вентури составит:

$$V_2 = V_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_2};$$

$$V_2 = 150000/3600 \cdot \frac{1,29}{0,93} = 57,8 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Диаметр горловины трубы Вентури составит:

$$d_2 = 1,13 \cdot \left(\frac{V_2}{u_r} \right)^{0,5};$$

$$d_2 = 1,13 \cdot \left(\frac{57,8}{152} \right)^{0,5} = 0,69 \text{ м.}$$

Полученное значение диаметра горловины значительно превышает наибольший диаметр горловины типоразмерного ряда высоконапорных труб Вентури: 115, 135, 155, 180, 200, 240, 280, 320, 370, 420.

В связи с этим следует установить несколько параллельно работающих труб Вентури. Принимается число труб $n=4$. В этом случае диаметр горловины каждой из четырех идентичных труб составит:

$$d_2 = 1,13 \cdot \left(\frac{V_2}{n \cdot u_r} \right)^{0,5};$$

$$d_2 = 1,13 \cdot \left(\frac{57,8}{4 \cdot 152} \right)^{0,5} = 0,35 \text{ м.}$$

В соответствии с типоразмерным рядом принимается диаметр горловины трубы Вентури 370 мм.

При этом длина горловины составит: $l_2=0,15 \cdot d_2=0,15 \cdot 0,35 \text{ м.}$

Скорость газа в горловине трубы в этом случае составит:

$$u_r = \frac{1,13^2 \cdot V_2}{d_2^2 \cdot n};$$

$$u_r = \frac{1,13^2 \cdot 57,8}{0,35^2 \cdot 4} = 150,6 \text{ м/с.}$$

Принимается скорость газа на входе в конфузор и на выходе из диффузора трубы Вентури равной 20 м/с. При этой скорости диаметр входного сечения конфузора составит:

$$d_1 = 1,13 \cdot \left(\frac{273000}{3600 \cdot 4 \cdot 20} \right)^{0,5} = 1,1 \text{ м,}$$

а диаметр выходного сечения диффузора составит:

$$d_3 = 1,13 \cdot \left(\frac{57,8}{4 \cdot 20} \right)^{0,5} = 0,96 \text{ м.}$$

Угол сужения конфузора принимается $\alpha_1=25^0$. Длина конфузора составит:

$$l_1 = [(d_1 - d_2)/2]: \text{tg}(\alpha_1/2);$$

$$l_1 = [(1,1 - 0,35)/2]: \text{tg}(25/2) = 1,7 \text{ м.}$$

Угол раскрытия диффузора принимается $\alpha_2=6^0$. Длина диффузора составит:

$$l_3 = [(d_3 - d_2)/2]: \text{tg}(\alpha_2/2);$$

$$l_3 = [(0,96 - 0,35)/2]: \text{tg}(6/2) = 5,8 \text{ м.}$$

Таблица 3.3 – Результаты расчета скруббера Вентури

| Наименование показателей | Обозначение | Величина |
|--|------------------------|----------|
| Размеры скруббера: | | |
| • диаметр входного сечения конфузора, м | d_1 | 1,1 |
| • длина конфузора, м | l_1 | 1,7 |
| • угол сужения конфузора, град. | α_1 | 25 |
| • диаметр горловины, м | d_2 | 0,35 |
| • длина горловины, м | l_2 | 0,05 |
| • угол раскрытия диффузора, град. | α_2 | 6 |
| • длина диффузора, м | l_3 | 5,8 |
| • диаметр выходного сечения диффузора, м | d_3 | 0,96 |
| Эффективность (степень) улавливания пыли | η | 0,98 |
| Гидравлическое сопротивление: | | |
| • трубы Вентури, Па | $\Delta p_{\text{тр}}$ | 8528 |
| • циклона-каплеуловителя, Па | $\Delta p_{\text{к}}$ | 100 |
| • скруббера Вентури в целом, Па | $\Delta p_{\text{ан}}$ | 8628 |

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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Значения нормальной функции распределения

| x | $\Phi(x)$ | x | $\Phi(x)$ | x | $\Phi(x)$ | x | $\Phi(x)$ |
|-------|-----------|-------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| -2,70 | 0,0035 | -1,06 | 0,1446 | 0,00 | 0,5000 | 1,08 | 0,8599 |
| -2,60 | 0,0047 | -1,04 | 0,1492 | 0,02 | 0,5080 | 1,10 | 0,8643 |
| -2,50 | 0,0062 | -1,02 | 0,1539 | 0,04 | 0,5160 | 1,12 | 0,8686 |
| -2,40 | 0,0082 | -1,00 | 0,1587 | 0,06 | 0,5239 | 1,14 | 0,8729 |
| -2,30 | 0,0107 | -0,98 | 0,1635 | 0,08 | 0,5319 | 1,16 | 0,8770 |
| -2,20 | 0,0139 | -0,96 | 0,1685 | 0,10 | 0,5398 | 1,18 | 0,8810 |
| -2,10 | 0,0179 | -0,94 | 0,1736 | 0,12 | 0,5478 | 1,20 | 0,8849 |
| -2,00 | 0,0228 | -0,92 | 0,1788 | 0,14 | 0,5557 | 1,22 | 0,8888 |
| -1,98 | 0,0239 | -0,90 | 0,1841 | 0,16 | 0,5636 | 1,24 | 0,8925 |
| -1,96 | 0,0250 | -0,88 | 0,1894 | 0,18 | 0,5714 | 1,26 | 0,8962 |
| -1,94 | 0,0262 | -0,86 | 0,1949 | 0,20 | 0,5793 | 1,28 | 0,8997 |
| -1,92 | 0,0274 | -0,84 | 0,2005 | 0,22 | 0,5871 | 1,30 | 0,9032 |
| -1,90 | 0,0288 | -0,82 | 0,2061 | 0,24 | 0,5948 | 1,32 | 0,9066 |
| -1,88 | 0,0301 | -0,80 | 0,2119 | 0,26 | 0,6026 | 1,34 | 0,9099 |
| -1,86 | 0,0314 | -0,78 | 0,2177 | 0,28 | 0,6103 | 1,36 | 0,9131 |
| -1,84 | 0,0329 | -0,76 | 0,2236 | 0,30 | 0,6179 | 1,38 | 0,9162 |
| -1,82 | 0,0344 | -0,74 | 0,2297 | 0,32 | 0,6255 | 1,40 | 0,9192 |
| -1,80 | 0,0359 | -0,72 | 0,2358 | 0,34 | 0,6331 | 1,42 | 0,9222 |
| -1,78 | 0,0375 | -0,70 | 0,2420 | 0,36 | 0,6406 | 1,44 | 0,9251 |
| -1,76 | 0,0392 | -0,68 | 0,2483 | 0,38 | 0,6480 | 1,46 | 0,9279 |
| -1,74 | 0,0409 | -0,66 | 0,2546 | 0,40 | 0,6554 | 1,48 | 0,9306 |
| -1,72 | 0,0427 | -0,64 | 0,2611 | 0,42 | 0,6628 | 1,50 | 0,9332 |
| -1,70 | 0,0446 | -0,62 | 0,2676 | 0,44 | 0,6700 | 1,52 | 0,9357 |
| -1,68 | 0,0465 | -0,60 | 0,2743 | 0,46 | 0,6772 | 1,54 | 0,9382 |
| -1,66 | 0,0485 | -0,58 | 0,2810 | 0,48 | 0,6844 | 1,56 | 0,9406 |
| -1,64 | 0,0505 | -0,56 | 0,2877 | 0,50 | 0,6915 | 1,58 | 0,9429 |
| -1,62 | 0,0526 | -0,54 | 0,2946 | 0,52 | 0,6985 | 1,60 | 0,9452 |
| -1,60 | 0,0548 | -0,52 | 0,3015 | 0,54 | 0,7054 | 1,62 | 0,9474 |
| -1,58 | 0,0571 | -0,50 | 0,3085 | 0,56 | 0,7123 | 1,64 | 0,9495 |
| -1,56 | 0,0594 | -0,48 | 0,3156 | 0,58 | 0,7190 | 1,66 | 0,9515 |

Продолжение приложения А

| x | $\Phi(x)$ | x | $\Phi(x)$ | x | $\Phi(x)$ | x | $\Phi(x)$ |
|-------|-----------|-------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| -1,54 | 0,0616 | -0,46 | 0,3228 | 0,60 | 0,7257 | 1,68 | 0,9535 |
| -1,52 | 0,0643 | -0,44 | 0,3300 | 0,62 | 0,7324 | 1,70 | 0,9554 |
| -1,50 | 0,0668 | -0,42 | 0,3372 | 0,64 | 0,7389 | 1,72 | 0,9573 |
| -1,48 | 0,0694 | -0,40 | 0,3446 | 0,66 | 0,7454 | 1,74 | 0,9591 |
| -1,46 | 0,0721 | -0,38 | 0,3520 | 0,68 | 0,7517 | 1,76 | 0,9608 |
| -1,44 | 0,0749 | -0,36 | 0,3594 | 0,70 | 0,7580 | 1,78 | 0,9625 |
| -1,42 | 0,0778 | -0,34 | 0,3669 | 0,72 | 0,7642 | 1,80 | 0,9641 |
| -1,40 | 0,0808 | -0,32 | 0,3745 | 0,74 | 0,7703 | 1,82 | 0,9656 |
| -1,38 | 0,0838 | -0,30 | 0,3821 | 0,76 | 0,7764 | 1,84 | 0,9671 |
| -1,36 | 0,0869 | -0,28 | 0,3897 | 0,78 | 0,7823 | 1,86 | 0,9686 |
| -1,34 | 0,0901 | -0,26 | 0,3974 | 0,80 | 0,7881 | 1,88 | 0,9699 |
| -1,32 | 0,0934 | -0,24 | 0,4052 | 0,82 | 0,7939 | 1,90 | 0,9713 |
| -1,28 | 0,1003 | -0,22 | 0,4129 | 0,84 | 0,7995 | 1,92 | 0,9726 |
| -1,26 | 0,1038 | -0,20 | 0,4207 | 0,86 | 0,8051 | 1,94 | 0,9738 |
| -1,24 | 0,1075 | -0,18 | 0,4286 | 0,88 | 0,8106 | 1,96 | 0,9750 |
| -1,22 | 0,1112 | -0,16 | 0,4364 | 0,90 | 0,8159 | 1,98 | 0,9761 |
| -1,20 | 0,1151 | -0,14 | 0,4443 | 0,92 | 0,8212 | 2,00 | 0,9772 |
| -1,18 | 0,1190 | -0,12 | 0,4522 | 0,94 | 0,8264 | 2,10 | 0,9821 |
| -1,16 | 0,1230 | -0,10 | 0,4602 | 0,96 | 0,8315 | 2,20 | 0,9861 |
| -1,14 | 0,1271 | -0,08 | 0,4681 | 0,98 | 0,8365 | 2,30 | 0,9893 |
| -1,12 | 0,1314 | -0,06 | 0,4761 | 1,00 | 0,8313 | 2,40 | 0,9918 |
| -1,10 | 0,1357 | -0,04 | 0,4840 | 1,02 | 0,8461 | 2,50 | 0,9938 |
| -1,08 | 0,1401 | -0,02 | 0,4920 | 1,04 | 0,8508 | 2,60 | 0,9953 |
| | | | | 1,06 | 0,8554 | 2,70 | 0,9965 |

Учебное издание

Гичёв Юрий Александрович

ОЧИСТКА ГАЗОВ

Часть I

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