МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

М.О. Амельченко, В.Ф. Строганов

РАСЧЕТ АППАРАТОВ ПЫЛЕОЧИСТКИ

Учебно-методическое пособие к проведению практических занятий
по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды»
для студентов очной формы обучения
направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность»

Казань
2020

УДК 504.064
ББК 20.17
А61

Амельченко М.О., Строганов В.Ф.

А61 Расчет аппаратов пылеочистки: Учебно-методическое пособие к проведению практических занятий по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды» для студентов очной формы обучения направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» / М.О. Амельченко, В.Ф. Строганов. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2020. – 42 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность», направленность (профиль) «Инженерная защита окружающей среды» и посвящено изучению принципа работы, типовым конструкциям аппаратов пылеочистки загрязненных воздушных сред, а также определению и расчету их основных технических характеристик.

Пособие предназначено для проведения практических занятий по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды» у студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность».

Рецензент
Доктор технических наук, зав. кафедрой ТГВ КазГАСУ
Р.Г. Сафиуллин

УДК 504.064
ББК 20.17

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2020

© Амельченко М.О., Строганов В.Ф., 2020

ВВЕДЕНИЕ

Развитие отраслей промышленности и автомобильного транспорта способствовало значительному росту качества и уровня жизни человека. Однако одновременно возросла антропогенная нагрузка на воздушный бассейн городов. В крупных городах планеты, особенно в Китае, отмечается большое количество заболеваний людей острыми респираторными заболеваниями, что, в первую очередь, связывают с неблагоприятной воздушной средой.

Основными загрязнителями атмосферы, как правило, являются оксиды различных неметаллов: серы, азота, углерода и др., доля которых среди всех загрязнителей воздуха достигает 90%.

Наряду с оксидами значительный вклад в ухудшение здоровья и экологической обстановки городов вносит наличие мелких взвешенных частиц – пылей различной химической природы, – образование которой обусловлено работой промышленных предприятий.

Для снижения возрастающей антропогенной нагрузки на атмосферный воздух предусмотрено выполнение ряда мероприятий, которые можно разделить на две группы:

– уменьшение количества выбрасываемых веществ;

– нейтрализация и обработка вредных выбросов системами очистки.

Первая группа предусматривает использование других видов топлива, изменение технологии производства путем внедрения мало- или безотходных технологий, создание вторичного цикла производства, снижение количества производимой продукции.

Вторая группа методов заключается в разработке и внедрении систем очистки, основанных на улавливании вредных примесей, в том числе пылей, специальными аппаратами.

В этой связи важным является ознакомление с основными принципами и закономерностями процессов очистки и владение навыками по подбору и расчету аппаратов пылеочистки.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

РАСЧЕТ ПЫЛЕОСАДИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Пылеосадительная камера является простейшим аппаратом очистки загрязненного воздуха от крупных частиц. Принцип работы пылеосадительной камеры заключается в улавливании мелких частиц пыли, перемещающихся с малой скоростью, за счет сил гравитационного осаждения. В промышленности данный вид аппаратов используется только для предварительной очистки, что обусловлено малым размером улавливаемых частиц, медленным проходом загрязненного потока воздуха, а также длительным временем, необходимым для полного отстаивания частиц. В этой связи с целью повышения эффективности пылеулавливания разработано большое количество конструкций камеры (рис. 1), среди которых наиболее известной является камера Говарда (рис. 2).

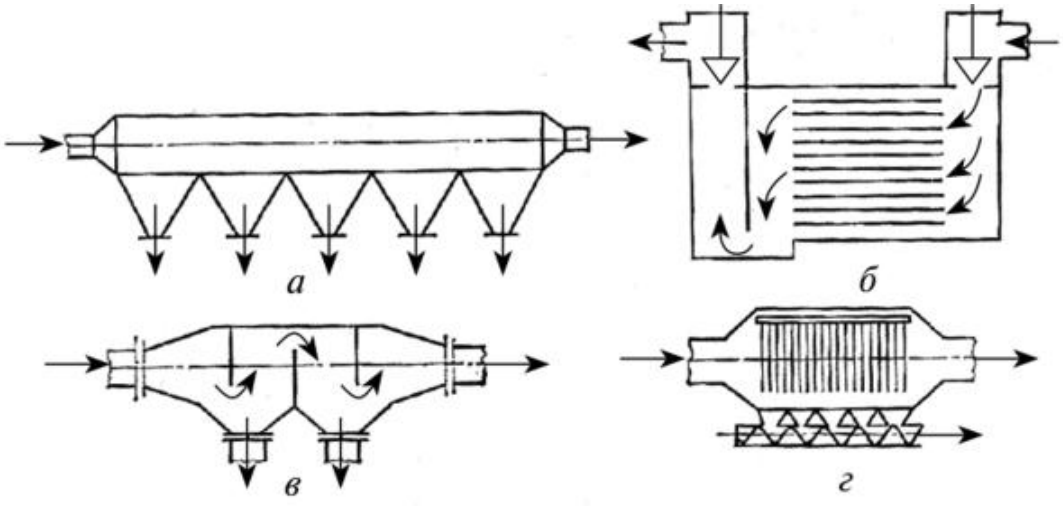


Рис. 1. Конструкции пылеосадительных камер:
а – простейшая пылеосадительная камера; б – многополочная камера;
в – камера с перегородками; г – камера с цепными или проволочными завесами

Принцип действия большинства пылеосадительных камер заключается в механическом улавливании частиц пыли – за счет резкого поворота воздуха и стремления частицы пыли удержать свое положение в пространстве они (частицы) выпадают из движущегося потока воздуха, оседая в бункере или на полках, откуда их потом утилизируют.

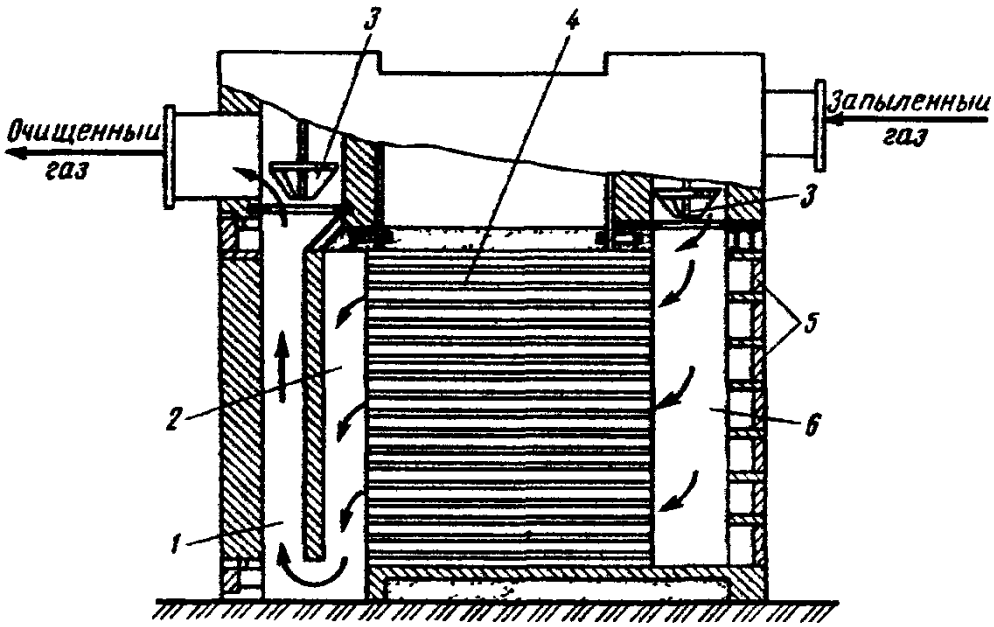


Рис. 2. Устройство пылеосадительной камеры Говарда:
1 – выходной канал; 2 – сборный канал; 3 – шибер; 4 – горизонтальная полка; 5 – дверцы; 6 – всасывающий канал

Данный вид пылеуловителей возможно наиболее эффективно использовать для частиц размером более 100 мкм. Обычно средняя расходная скорость движения газов в пылеосадительных камерах составляет 0,2…1 м/с, а в пылевых мешках – 1…1,5 м/с.

Таким образом, к достоинствам пылеосадительных камер следует отнести их простоту, доступность, возможность работы с воздухом высокой температуры, относительно низкую стоимость. Однако среди недостатков следует отметить громоздкость их конструкции, длительность процесса для достижения полной очистки, низкую степень очистки, обусловленную крупностью улавливаемых частиц пыли – более 100 мкм. В этой связи, основное распространение данный вид пылеулавливателей получил в производствах, в которых образуются крупные частицы, не требующие быстрого улавливания, например, при отводе горячих печных газов. В остальных же случаях их стремятся заменить на более совершенные аппараты.

Задача № 1

Определить размер пылеосадительной камеры для осаждения частиц размером $\boldsymbol{n}$ мкм, при расходе газовоздушной смеси $\boldsymbol{Q}$ м^3/ч, температурой $\boldsymbol{t}$ ^{o}С, и скоростью потока $\boldsymbol{v_г}$ м/с, если плотность частиц пыли составляет $\boldsymbol{\rho_ч}$ кг/м^3, а давление в камере близко к атмосферному. Состав запыленного

газа близок к атмосферному воздуху. Расстояние между полками ***n*** принять равным 0,2 м.

Номер варианта	$d_ч$, мкм	Q м^3/ч	t ^oC	$\rho_ч$ кг/м^3	$\nu_г$, м/с	n, шт
1	40	65000	400	2500	1,0	20
2	45	40000	430	2300	2,0	10
3	50	53000	220	2000	1,5	10
4	55	70000	200	2800	1,7	10
5	60	68000	180	2600	0,8	12
6	65	35000	270	2550	1,9	-
7	70	44000	180	2750	4,2	-
8	75	90000	310	2100	1,5	10
9	80	43000	120	2200	2,3	-
10	85	47000	500	2300	3,6	-
11	90	60000	400	2400	1,6	-
12	95	75000	110	2200	1,3	-
13	100	46000	420	3000	2,2	-

Методика расчета пылеосадительных камер

Для определения размеров пылеосадительной камеры первоначально следует определить скорость осаждения пылевых частиц заданного размера, в связи с чем используют формулу Стокса:

$$w_{ос} = \frac{d_ч^2 g(\rho_ч - \rho_г)}{18\mu_г},$$

где $d_ч$ – размер улавливаемых частиц пыли, мкм;

$\rho_ч$, $\rho_г$ – соответственно, плотность материала взвешенных частиц и сплошной газовой среды, кг/м^3;

g – ускорение силы тяжести, м/с;

$\mu_г$ – динамическая вязкость газа, Па·с.

Исходя из объема очищаемых газов, определяют требуемую площадь осаждения, м^2:

$$S = B \cdot H = \frac{Q_г}{3600 \cdot \nu_г},$$

здесь B, H – ширина и высота камеры, м;

$Q_г$ – объем загрязненного воздуха, проходящего через камеру, м^3/ч;
$v_г$ – скорость газового потока при низких значениях $w_{ос}$.

Исходя из значения площади, подбирают высоту ***H,*** и вычисляют ширину ***B***, как отношение площади к высоте. Полученное значение ширины не должно превышать высоту более чем в 2 раза.

Далее определяют длину камеры исходя из кинетики осаждения пыли при равенстве времени пребывания частиц в камере ($\tau_{пр}$) и времени их осаждения:

$$\tau_{пр} = \tau_{ос} = \frac{L}{v_г} = \frac{H}{w_{ос}},$$

где L – длина камеры, м;
$v_г$ – скорость газового потока, м/с;
H – высота камеры, м;
$w_{ос}$ – скорость осаждения частиц, м/с.

В случае, если значение длины камеры будет превышать значение высоты более чем в 4 раза, следует:

1. Увеличить ширину камеры (при неизменной ее высоте) или уменьшить скорость газов по горизонтальному направлению и, тем самым, не меняя высоты камеры, также увеличить ширину камеры. Данное решение увеличит общий объем камеры и повысит ее стоимость.

2. Уменьшить путь осаждения частиц пыли путем установки в камере по ее высоте горизонтальных или наклонных полок. Так, например, при установке горизонтальных полок в количестве N = 20 шт. на расстоянии h = 200 мм одна от другой общая высота камеры составит:

$$H = N \cdot h = 20 \cdot 0{,}2 = 4 \text{ м}.$$

Далее следует выполнить пересчет скорости осаждения исходя из расстояния между полками:

$$\tau_{ос} = \frac{h}{w_{ос}}$$

и определить, во сколько раз отличается первоначальное время осаждения от пересчитанного:

$$x = \frac{\tau_{ос1}}{\tau_{ос2}}.$$

Далее следует уменьшить первоначальное значение длины камеры ***L*** на полученную разницу ***x***.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

РАСЧЕТ ЦИКЛОННОГО АППАРАТА

Циклоны являются одними из самых распространенных аппаратов пылеочистки. Они предназначены для сухой очистки газов от пыли со средним размером частиц 10–20 мкм и, как правило, устанавливаются перед более высокоэффективными аппаратами очистки – рукавными фильтрами, электрофильтрами и т.п.

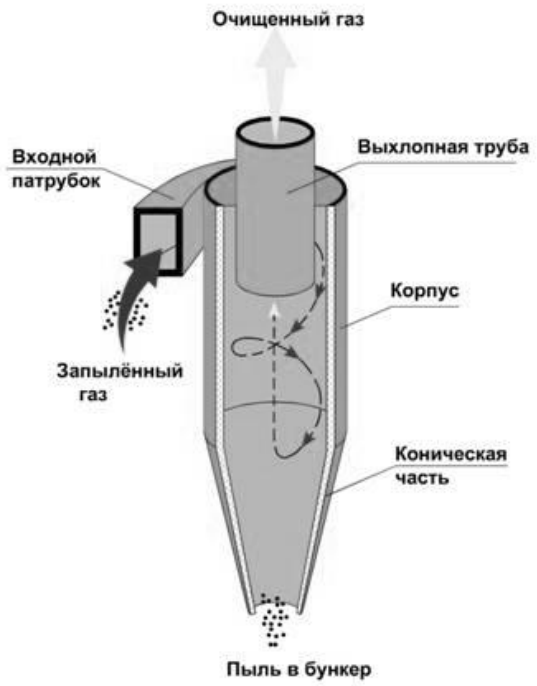


Рис. 3. Схема движения газа в циклоне

Принцип действия простейшего противоточного циклона (рис. 3) заключается в том, что загрязненный воздух подается тангенциально в верхнюю часть аппарата. В результате, в аппарате формируется вращающийся поток газа, который перемещается в нижнюю часть аппарата – к конической части. В результате сужения конструкции аппарата поток воздуха резко поднимается в разреженную зону, а частицы пыли вследствие действия сил инерции выносятся из потока и оседают первоначально на стенках аппарата, а затем, захватываясь вторичным потоком, оседают в бункере для сбора пыли. Очищенный от пыли газовый поток выводится через соосную выхлопную трубу в верхней части аппарата.

Избыточное давление поступающих в циклон газов не должно превышать 2500 Па, а их температура должна находиться в интервале от 30 до 500°С, что обусловлено необходимостью исключить возможную конденсацию паров жидкости.

Производительность циклонов во многом определяется их размерами и конструкцией. По форме циклоны разделяют на цилиндрические ($H_ц > H_к$) – серия ЦН и конические ($H_ц < H_к$) – серия СК.

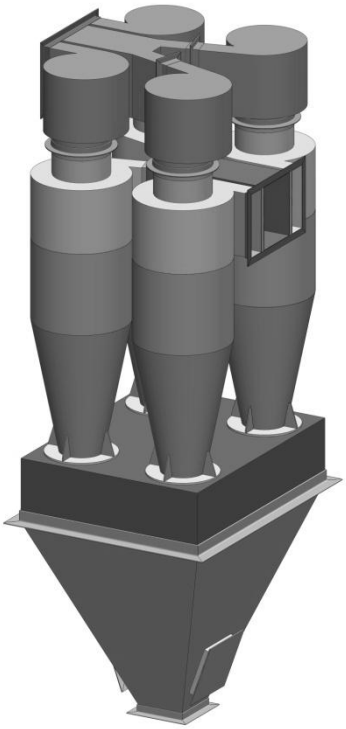


Рис. 4. Конструкция мультициклона

Циклоны типа ЦН являются достаточно «взрослой» моделью, они уже не обеспечивают необходимого уровня очистки загрязненных газов в условиях постоянного роста промышленных мощностей. В этой связи, для очистки больших объемов газов их объединяют в группы по 2, 4, 6 и 8 элементов, расположенных в два ряда, или по 10, 12 и 14 – в круговой компоновке. Такая компоновка аппаратов получила название батарейных или мультициклонов (рис. 4).

При использовании такой компоновки следует отметить что диаметр аппаратов для прямоугольного расположения не должен превышать 1800 мм, а для кругового – 1000 мм.

Существуют более совершенные конструкции циклонов, разработанные в институте НИИОГАЗ, отличительной особенностью которых является наклонный патрубок (рис. 5). В настоящее время широко применяют три типа таких циклонов:

1) с углом 24° (ЦН-24) – обеспечивают повышенную производительность при наименьшем гидравлическом сопротивлении; предназначены для улавливания крупной пыли;

2) с углом 15° (ЦН-15) – обеспечивают хорошую степень улавливания при сравнительно небольшом гидравлическом сопротивлении;

3) с углом 11° (ЦН-11) – обеспечивают повышенную эффективность и рекомендуются в качестве унифицированных пылеуловителей.

Конструкции циклонов стандартизированы, подбор их осуществляется, в основном, исходя из размера диаметра аппарата (мм): 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 160, 1800, 2000, 2400, 3000. Следует отметить, что эффективность улавливания с увеличением диаметра снижается, в связи с чем применение аппаратов с размером более 1000 мм не рекомендуется, а устанавливают группу параллельно работающих циклонов.

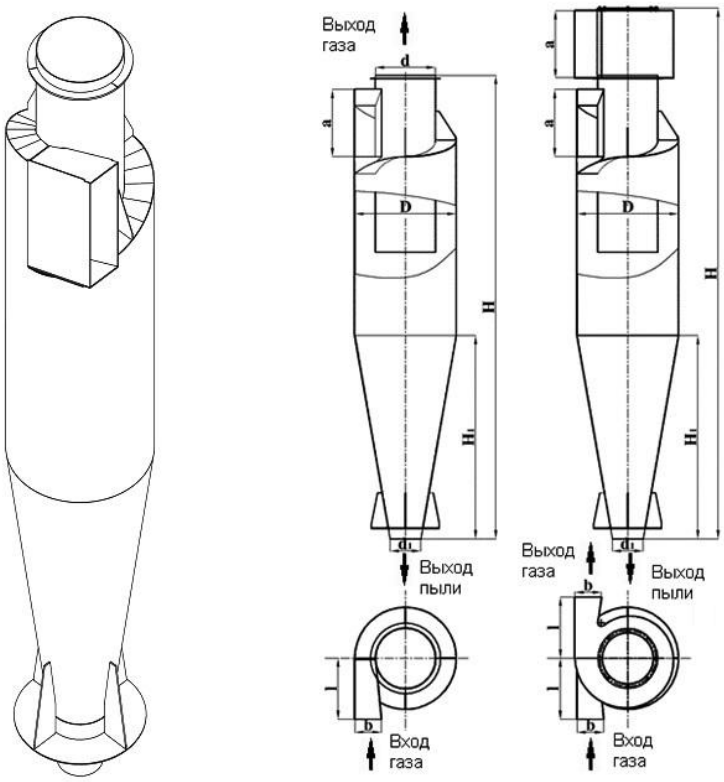


Рис. 5. Циклон ЦН-11 от НИИОГАЗ

Среди основных преимуществ циклонных пылеуловителей следует отметить:

– надежное функционирование при температурах газов вплоть до 500 °С без каких-либо конструктивных изменений (если предусматривается применение более высоких температур, то аппараты можно изготовлять из специальных материалов);

– возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями;

– пыль улавливается в сухом виде;

– гидравлическое сопротивление аппаратов почти постоянно;

– возможность эксплуатации аппаратов при высоких давлениях газов;

– простота конструкции и отсутствие движущихся частей в аппарате;

– рост запыленности газов не приводит к снижению фракционной эффективности очистки.

– возможность объединить аппараты для повышения степени очистки.

К недостаткам циклонов относят:

– снижение эффективности очистки аппаратов при наличии подсосов, в частности, в пылевом бункере;

– низкий процент улавливания частиц размером меньше 10 мкм;

– относительно высокое гидравлическое сопротивление;

– нарушение эксплуатационных характеристик аппарата в случае частиц с адгезионными свойствами вследствие их налипания на стенки.

Задача № 2

Требуется подобрать по приведенной таблице марку циклона и выполнить расчет размеров циклонного аппарата для очистки газовоздушной смеси от пыли с эффективностью улавливания не менее 85%, если известно, что:

– расход газовоздушной смеси $\boldsymbol{Q}$ составляет $8000 + 800 \cdot n$ м^3/ч;

– температура выбросов $\boldsymbol{t}$ равняется $25 + 3 \cdot n$ ^{o}С;

– начальная концентрация пыли $\boldsymbol{C_n}$ составляет $15 + 2 \cdot n$ г/м^3;

– плотность пыли $\boldsymbol{\rho_n}$ равняется $2000 + 45 \cdot n$ кг/м^3;

– медианный диаметр частиц $\boldsymbol{d_m}$ составляет $8 + n$ мкм.

В качестве $\boldsymbol{n}$ принять порядковый номер студента по списку.

Подбор марки циклона в зависимости от вида пыли

Последняя цифра по списку	Вид пыли	Марка циклона
0	Помольных и дробильных установок	ЦН-11
1	Дымовых газов котельных	ЦН-15
2	Дымовых газов котельных (при ограничении размеров)	ЦН-15у
3	Горелой земли литейных цехов	ЦН-24
4	Каталитического крекинга нефтепродуктов	СДК-ЦН-33
5	Угольная пыль, сажа	СК-ЦН-34
6	Угольная пыль, сажа	СК-ЦН34м
7	Сухая неволокнистая, неслипающаяся	СИОТ
8	Сухая неволокнистая, неслипающаяся	ЛИОТ
9	Абразивная, слабослипаюшаяся	ВЦНИИОТ

Методика расчета циклонных аппаратов

Перед выбором циклона следует определить необходимую площадь сечения циклона (F), м^2:

$$F = \frac{Q}{3600 \cdot \omega_0},$$

где Q – расход газовоздушной смеси через циклон, м^3;

ω_0 – оптимальная скорость воздуха в сечении циклона, м/с.

По полученному значению определяют диаметр (D) циклонного аппарата, задаваясь количеством циклонов (n), м:

$$D = 1{,}13 \cdot \sqrt{\frac{F}{n}}\ .$$

Полученное значение ***D*** округляют до большего стандартизованного диаметра циклона: 150, 200, 300, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400 и 1600 мм, и вычисляют действительную скорость воздуха в циклоне (ω_0'), м/с:

$$\omega_0' = \frac{1{,}27 \cdot Q}{3600 \cdot n \cdot D^2},$$

D – ближайший больший номенклатурный диаметр циклона.

Рассчитанная действительная скорость не должна быть выше оптимальной на 15%, в противном случае, следует увеличить количество циклонов:

$$\Delta = \frac{\omega_0 - \omega_0'}{\omega_0} \cdot 100\%\ .$$

Принять компоновку циклонов, и определить коэффициент местного сопротивления ($\Delta\varepsilon_0$).

Далее следует определить динамическую вязкость воздуха для рабочих условий (μ_0), Па/с:

$$\mu = 1{,}75 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{273 + t}{273}\right)^{0{,}683}\ .$$

Определяют аэродинамическое сопротивление циклона ($\Delta P_ц$):

$$\Delta P_ц = \xi_ц \cdot \frac{\varepsilon_г \cdot \omega_0'^{\,2}}{2},$$

где $\varepsilon_г$ – сопротивление газовоздушной смеси,

$\xi_ц$ – коэффициент местного сопротивления, отнесенный к скорости ω_0' и определяемый с учетом поправочных коэффициентов по формуле:

$$\xi_ц = k_1 \cdot k_2 \cdot \xi_0 + \Delta\varepsilon_0,$$

$\Delta\varepsilon_0$ – коэффициент местного сопротивления, зависящий от компоновки циклонов, определяемый по таблице:

Компоновка циклонов	Значение $\Delta\varepsilon_0$
Прямоугольная, с отводом очищенного воздуха из общего коллектора	35
Прямоугольная, но с отводом очищенного воздуха через улиточные раскручиватели	28
Круговая	60

k_1 – коэффициент, зависящий от диаметра циклона (таблица 3 Приложения);

k_2 – поправочный коэффициент на запыленность воздуха (таблица 4 Приложения);

ξ_0 – коэффициент местного сопротивления (таблица 2 Приложения).

Далее по графику фракционной эффективности очистки (рис. 1 Приложения) определяют размер пыли d_{50} с эффективностью улавливания 50% для выбранного типа циклона, с принятым диаметром.

Для определения эффективности циклона других размеров и скорости движения воздуха, его вязкости и плотности, вычисляют новое значение d_{50}' мкм по формуле:

$$d'_{50} = 548{,}5 \cdot d_{50} \cdot \sqrt{\frac{D' \cdot \mu \cdot \omega_0}{\varepsilon_г \cdot \omega'_0}}.$$

На график фракционной эффективности очистки (рис. 1 Приложения) наносят точку с координатами 50 % и d_{50}', и из нее проводят линию, параллельную линиям графиков, которая определяет фракционную эффективность очистки запроектированного циклона.

Из условий работы, по заданному медианному диаметру d_m находят соответствующую точку на оси X, восстанавливают перпендикуляр до пересечения с построенной кривой, и по горизонтальной прямой на пересечении с осью Y получают искомое значение эффективности очистки запроектированного циклона.

Если фракционная эффективность улавливания пыли составляет менее 85%, то следует увеличить количество циклонов (n) и выполнить повторные расчеты.

Основные размеры циклона определяют в долях от внутреннего диаметра D’ по следующим формулам:

– выходное отверстие циклона: $D_{вых} = 0{,}59 \cdot D'$, мм;

– размеры входного патрубка: a x b = 1,11·D’ x 0,26·D’, мм;

– общая высота циклона: 4,26 · D’, мм.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

РАСЧЕТ ВИХРЕВОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ

Вихревые пылеуловители, как и циклоны, работают на принципе завихрения воздуха, однако их конструкции принципиально отличаются. В отличие от циклона, в вихревом пылеуловителе создается дополнительное завихрение загрязненного потока. В зависимости от вида конструкции они бывают лопаточные и сопловые (рис. 6).

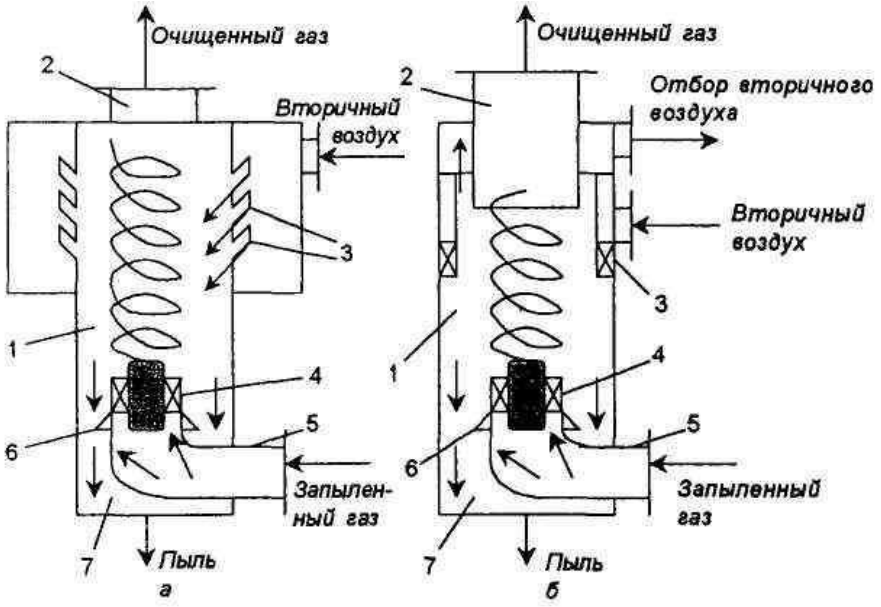


Рис. 6. Конструкции вихревых пылеуловителей:
а – сопловые; б – лопаточные;
1 – камера; 2 – выходной патрубок; 3 – сопла; 4 – лопаточный завихритель типа «розетка»; 5 – входной патрубок; 6 – подпорная шайба; 7 – пылевой бункер; 8 – кольцевой лопаточный завихритель

Принцип действия лопаточного вихревого пылеуловителя заключается в подаче снизу вверх запыленного воздушного потока, где его дополнительно закручивает лопаточным завихрителем (4), в результате возникает центробежная сила, обеспечивающая отскок частиц к стенкам аппарата и дальнейшее их оседание в бункере. Во избежание вторичного уноса частиц пыли со стенок аппарата, на периферии конструкции в ее верхней части расположен кольцевой лопаточный завихритель (8), который закручивает вторичный поток газа, уносящий загрязнения в бункер (7).

В сопловых аппаратах запыленный газ также закручивается лопаточным завихрителем, однако в верхней части конструкции из сопел (3) подается вторичный поток газа, который, закручивая отскакивающие частиц пыли, уносит их в нижнюю часть аппарата – бункер (7).

Среди достоинств вихревых пылеуловителей отмечают:

– возможность очистки от мелкодисперсной пыли (до 3–5 мкм);

– сниженный абразивный износ элементов конструкции аппарата;

– использование очищенного воздуха в качестве вторичного газа;

– возможность регулирования сепарации пыли.

Несмотря на высокую, по сравнению с циклонами, эффективность очистки – 97–98%, а также возможность улавливания мелкодисперсных частиц, вихревые пылеуловители имеют ряд недостатков. Среди них следует назвать: сложность конструкции в эксплуатации, потребность в дополнительном оборудовании (вентиляторах), а также увеличение общего объёма пропускаемого через устройство газа.

Задача № 3

Выполнить расчет по определению конструктивных размеров вихревого пылеуловителя и эффективность его пылеулавливания, если известно, что производительность аппарата по запыленному воздуху ($\boldsymbol{Q_г}$) составляет $2000+100\cdot n$ м^3/ч, температура входящего потока загрязненного газа (t) равна $20\cdot n$ ^{o}С, плотность частиц ($\boldsymbol{\rho_m}$) $4000+120\cdot n$ кг/м^3. Скорость воздуха в рабочей зоне ($\boldsymbol{v_г}$) составляет $1+n$ м/с. Давление в аппарате принять равным 0,1 МПа.

Дисперсный состав пыли:

Диаметр частиц (d_i), мкм	1..n+2	n+2…n+12	n+12… n+22	n+12…n+30
Содержание (Δg_i), %	15	78	3	7

В качестве n принять последнюю цифру своего номера по списку.

Методика расчета вихревых пылеуловителей

Расчет вихревого пылеуловителя начинают с определения диаметра аппарата, исходя из объемного расхода, м:

$$D_а = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \nu}},$$

где Q – объемный расход запыленного газа, м^3/с;

ν – скорость запыленного газа, принимают от 5 до 12 м/с.

Полученное значение диаметра следует округлить в большую сторону, а затем выполнить пересчет скорости газа для подобранного диаметра:

$$v = \sqrt{\frac{(4 \cdot Q)}{{D_а}^2 \cdot \pi}}.$$

Далее для расчета диаметра нижнего ввода (D_1) потока воздуха и вывода очищенного ($D_{вых}$), следует определить значения вспомогательных коэффициентов χ_1 и χ_2:

$$\chi_1 = \left(\frac{\gamma}{1+\alpha}\right)^{0,5}$$

$$\chi_2 = \left(1 - \frac{\alpha\gamma}{1+\alpha}\right)^{0,5},$$

где α – отношение площадей верхнего и нижнего патрубков, предварительно принять равным 2;

γ – отношение скоростей газа в нижнем и верхнем патрубках, принять равным 0,5.

Диаметр ввода нижнего и верхнего потоков вычисляют по формулам:

$$D_1 = \chi_1 \cdot D_а \text{ и } \quad D_{вых} = \chi_2 \cdot D_а.$$

Высота рабочей зоны аппарата ($H_{рз}$) составит:

$$H_{рз} = (2,8 \ldots 3,1) \cdot D_а.$$

Полученное значение $H_{рз}$ следует округлить в большую сторону.

Далее следует определить диаметр отбойной шайбы:

$$D_ш = (0,9 \ldots 0,95) \cdot D_а.$$

Рассчитывают площадь ввода верхнего и нижнего потоков:

$$S_2 = \frac{\pi}{4}(D_а^2 - D_{вых}^2),$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}.$$

После чего определяют фактическое соотношение величины α:

$$\alpha = \frac{S_2}{S_1}.$$

Значение α должно находиться в пределах 2..4; в случае если α имеет значительное отклонение от заданного интервала, следует выполнить корректировку ранее вычисленных геометрических размеров и выполнить перерасчет.

Далее следует определить диаметр вытеснителя:

$$d_{\text{выт}} = 0{,}1 \cdot D_{\text{а}}.$$

При проектировании вихревых аппаратов лопатки рекомендуется располагать под углом $\beta = 30^{\circ}$.

После определения геометрических размеров аппарата выполняют гидравлический расчет.

Потери давления в аппарате:

– конструктивный параметр интенсивности крутки потока:

$$n = \frac{8D_1^2}{3\pi} \cdot \frac{D_1^3 - d_{\text{выт}}^3}{D_1^2 - d_{\text{выт}}^2} \cdot tg\beta,$$

– коэффициент гидравлического сопротивления нижнего потока:

$$\xi_1 = 5{,}5n + [260 + 4{,}8(n - 3{,}8)^2]\left(\frac{Q_2}{Q_{\text{г}}} - 0{,}3\right)^3,$$

Q_2 – объемный расход вторичного потока газа, принять равным 70–80% от объемного расхода, $м^3/с$,

– коэффициент гидравлического сопротивления верхнего потока:

$$\xi_2 = 2{,}6 + 158\left(0{,}6 - \frac{Q_2}{Q_{\text{г}}}\right)^3.$$

Тогда общий гидравлический коэффициент сопротивления составит:

$$\xi = \xi_1 \left(1 - \frac{Q_2}{Q_г}\right)^3 \left(\frac{S}{S_1}\right)^2 + \xi_2 \left(\frac{Q_2}{Q_г}\right)^3 \left(\frac{S}{S_2}\right)^2.$$

S – площадь сечения аппарата, вычисляемая как:

$$S = \pi \cdot \left(\frac{D_а}{2}\right)^2.$$

Далее следует вычислить гидравлическое сопротивление аппарата (Δp):

$$\Delta p = \frac{\xi \rho_г v_г^2}{2}.$$

После вычисления значения гидравлического сопротивления определяют общую эффективность очистки в аппарате. Для этого первоначально разбивают площадь ввода нижнего потока на *n*-е количество кольцевых участков r_{1i} ($r_{1n} = D_1/2$; $r_{1n-1} = r_{1n}/2$ и т.д. не менее трех), после чего определяют значения эмпирических коэффициентов *a* и *b*, характеризующих аэродинамику аппарата:

$$a = -\left(5{,}5\frac{S_2}{S_1} + 2{,}8\right),$$

$$b = -\left(5{,}5\frac{S_2}{S_1} + 0{,}4\right)\frac{1}{0{,}5D_a}.$$

Радиус разделения потоков:

$$R_0 = \left(1 - 0{,}19\frac{S_2}{S_1}\right)\frac{D_a}{2}.$$

Далее переходят к вычислению поправочного коэффициента для определения минимального диаметра улавливаемых частиц для r_{1i}:

$$K_{1i} = \frac{b(r_{1i} - R_0)}{a(a + R_0)(a + br_{1i})} + \frac{1}{a^2}\ln\frac{R_0(a + br_{1i})}{br_{1i}(a + bR_0)}.$$

Затем переходят к определению минимального диаметра улавливаемых частиц, вылетающих с радиуса r_{1i}:

$$d_{1i} = \frac{7{,}52 \cdot R_а^3}{Q_г R_0} \left\{ \frac{\mu_г Q_2 ln\left[\left(\frac{R_0}{r_{1i}}\right)^2 (1+\alpha) K_{1i}\right]}{\rho_т H \cdot \ln(1+\alpha) \ln\left(\frac{R_0}{r_{1i}}\right)^2} \right\}.$$

Определяют фракционную эффективность улавливания частиц пыли, поступающих в пылеуловитель с нижним потоком и вылетающих с радиуса r_{1i}:

$$\eta_{ф1i} = \frac{R_1^2 - r_{1i}^2}{R_1^2 - 0{,}5 d_{выт}^2} \cdot 100\%.$$

Для удобства полученные значения K_{1i} d_{1i} и $\eta_{ф1i}$ для определенного r_{1i} лучше занести в табличную форму:

r_{1i}, м	K_{1i}, м	d_{1i}, м	$\eta_{ф1i}$, %
r_{11}			
r_{12}			
…			
r_{1n}			

Далее определяют аналогичные параметры (K_{2i} d_{2i} и $\eta_{ф2i}$), но для верхнего потока, который также разбивают на кольцевые участки с радиусами – r_{2i}. Разбивку выполнить произвольно, начиная от $r_{21} = D_{вых}/2$ и выше до r_{2i}, которое не должно превышать или быть равным $D_{вых}$:

$$K_{2i} = \frac{b(r_{2i} - 0{,}5 \cdot D_ш)}{a(a + R_ш)(a + br_{2i})} + \frac{1}{a^2} \ln \frac{(0{,}5 \cdot D_ш)(a + br_{2i})}{br_{2i}(a + b \cdot (0{,}5 \cdot D_ш))},$$

$$d_{1i} = \frac{4{,}95 \cdot R_а^3}{Q_г} \sqrt{\frac{\mu_г \cdot Q_2 \left\{R_0 \cdot ln\left[\frac{R_а - 0{,}5 D_ш}{R_а - r_{2i}}\right] - 1{,}15 \cdot (R_а - R_0)\right\} K_{2i}}{\rho_т \cdot H \cdot (R_а^2 - R_0^2) \cdot ln\left[\frac{R_а - 0{,}5 D_ш}{R_а - r_{2i}}\right]}},$$

$$\eta_{ф2i} = \frac{R_а^2 - r_{2i}^2}{R_а^2 - 0{,}5 d_{вых}^2} \cdot 100\%.$$

Выполнить анализ полученных результатов расчета, и построить график зависимости эффективности улавливания от диаметра частиц. Далее следует определить общую эффективность улавливания частиц исходя из данных об исходном распределении частиц в загрязненном газе:

– для нижнего потока:

$$\eta_1 = \sum_{j=1}^{n} \eta_{ф1} \cdot \Delta g_j ,$$

– для верхнего потока:

$$\eta_{21} = \sum_{j=1}^{n} \eta_{ф2} \cdot \Delta g_j ,$$

– общую эффективность пылеулавливания аппарата вычисляют как:

$$\eta = \left(\frac{Q_1}{Q_г}\eta_1 + \frac{Q_2}{Q_г}\eta_2\right) \cdot 100 .$$

Q_1 – принять равным $Q_г - Q_2$, м^3/с.

После расчета делают вывод об общей эффективности улавливания в вихревом аппарате.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

РАСЧЕТ РУКАВНОГО ФИЛЬТРА

Для тонкой очистки газовоздушной смеси после ее прохода на узлах предварительной очистки (пылеосадительная камера, циклоны) очень часто применяют тканевые фильтры, среди которых большой популярностью пользуются рукавные фильтры.

Рукавный фильтр представляет собой полый аппарат, в котором подвешены специальные рукава, представляющие собой металлический каркас, обтянутый фильтровальной тканью (рис. 7).

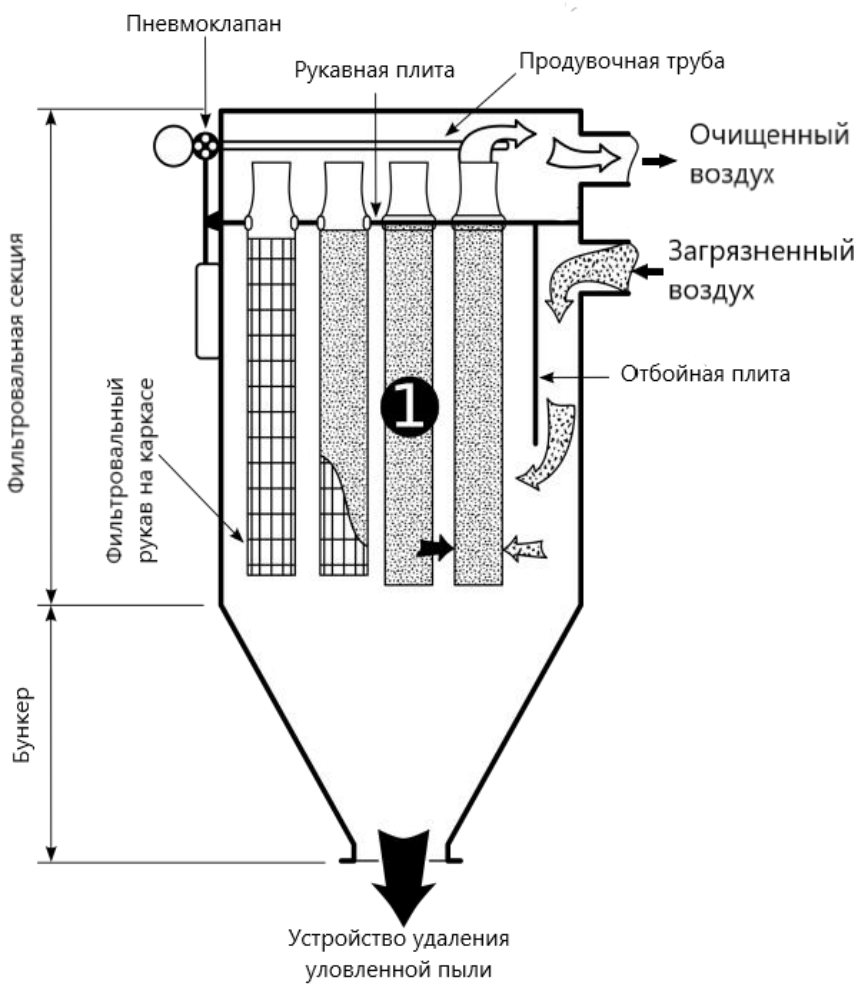


Рис. 7. Схема устройства рукавного фильтра

Запыленный газ из нижней части аппарата поднимается вверх, для чего проходит сквозь фильтровальную ткань, на которой и задерживаются частицы пыли. По мере того как поверхность фильтрующего материала насыщается пылью, увеличивается сопротивление движению воздуха и снижается пропускная способность фильтровальных рукавов. Иными словами, происходит забивание пор материала пылью, и поступающий загрязненный газ не может выйти из аппарата. В этой связи, для очистки рукавов в конструкции аппарата предусмотрены механизмы для периодической очистки рукавов (регенерация):

– вибровстряхивание, или ударный механизм;

– пневматическая продувка сжатым воздухом (рис. 8).

Сброшенная пыль попадает в нижнюю часть аппарата, где расположен бункер уловленных частиц.

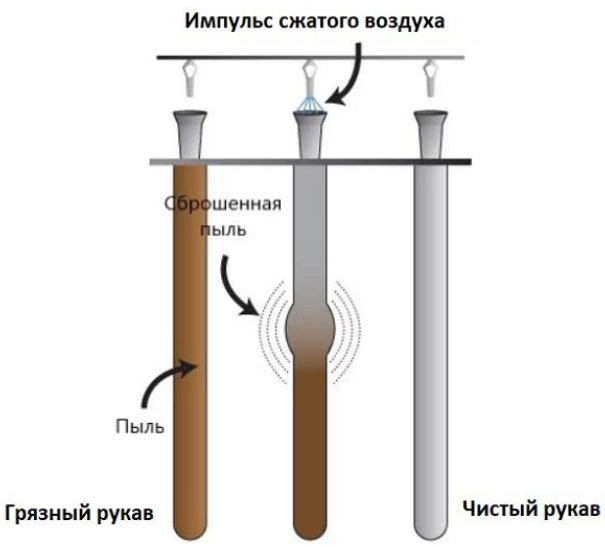


Рис. 8. Схема регенерации рукавов сжатым воздухом

В качестве материала для рукавов используют нетканые материалы и ткани из синтетических и природных волокон, например, лавсан, нитрон, полипропилен, полиамид, хлопок, шерсть, стекло, арселон и др. Толщина фильтровального материала варьируется от 0,5 мм до 6 мм.

Конструкции рукавных фильтров не сильно отличаются друг от друга и состоят, в основном, из:

– корпуса с фильтрующими элементами;

– входного (впускного) клапана для газовоздушной смеси;

– батареи рукавов или отдельного рукава на пути потока воздуха;

– выходного клапана с автоматикой для отслеживания давления;

– системы регенерации – устройства для быстрой очистки рукавов от накопившейся пыли.

Среди важных преимуществ рукавных фильтров следует отметить их тонкую очистку запыленных газовоздушных смесей (улавливание частиц размером менее 1 мкм), простоту конструкции, возможность установки во взрывоопасных помещениях и работы при отрицательных температурах, а также возможность их установки в стесненных условиях.

К недостаткам рукавных фильтров относят: сложную систему подвода сжатого воздуха, необходимость внимательного выбора фильтрующего материала, так как неправильный подбор влечет за собой значительное увеличение стоимости эксплуатации аппарата в связи с необходимостью частой замены рукавов и высокой стоимостью фильтрующего материала.

Отечественная промышленность выпускает различные марки рукавных фильтров, среди которых известны серии: ФРКДИ, ФР, ФРО, СМЦ и др., конструкции которых типизированы, а, следовательно, при выборе аппарата следует руководствоваться параметрами расхода и запыленностью газовоздушной смеси, гидравлическим сопротивлением фильтра и физическими параметрами газа.

Задача № 4

Подобрать и определить эффективность очистки рукавного фильтра от цементной пыли, если объем газа, поступающего на очистку (***$V_г$***) *50000 + 1000·n* м^3/ч, а его температура составляет (***t***) *25 + 3·n* ^{o}С. Концентрация пыли на входе в аппарат равна (***$C_{вх}$***) *5 + n* г/м^3, а медианный диаметр частиц пыли (***d_m***) *5 + n* мкм. Содержание пыли на выходе из рукавного фильтра не должно превышать 5 мг/м^3. В качестве фильтровальной ткани принять лавсан.

Число *n* принять согласно своему порядковому номеру по списку.

Методика расчета рукавного фильтра

Начало расчета для подбора рукавного фильтра начинают с определения удельной газовой нагрузки:

$$q = q_н \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5,$$

где $q_н$ – нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и ее свойств к слипанию – принять равной 2…3,5, м^3/(м^2 · мин);

c_1 – коэффициент, характеризующий особенность регенерации фильтрующих элементов, принять от 0,7…1;

c_2 – коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку (рис. 9);

c_3 – коэффициент, учитывающий влияние дисперсного состава пыли в газе (табл. 1);

c_4 – коэффициент, учитывающий влияние температуры газа (табл. 2);

c_5 – коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки.

Таблица 1

Зависимость коэффициента c_3 от диаметра частиц

d_m, мкм	<3	3-10	10-50	50-100	>100
c_3	0,7-0,9	0,9	1,0	1,1	1,2-1,4

Таблица 2

Зависимость коэффициента c_4 от температуры газа

t, °C	20	40	60	80	100	120	140	160
c_4	1	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,70

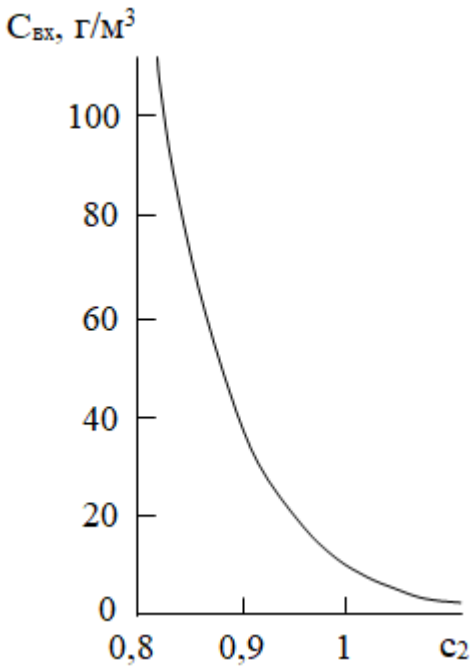


Рис. 9. Зависимость коэффициента c_2 от концентрации пыли на входе в фильтр

Коэффициент c_5, учитывает требования к качеству очистки, и, соответственно, оценивается по концентрации пыли в отходящем из фильтра газе. При концентрации пыли в отходящих газах 30 мг/м^3 c_5 = 1, а при 10 мг/м^3 c_5 = 0,95. Соответственно, для получения требуемого коэффициента его следует вычислить приблизительно:

$$c_5 = 0{,}05 \cdot C_{вых} + 0{,}9.$$

$C_{вых}$ – концентрация пыли на выходе, мг/м^3.

Далее определяют площадь поверхности фильтрования, м^2:

$$F = \frac{V_г}{60 \cdot q}.$$

После чего выполняют подбор рукавного фильтра по каталогу (табл. 5 Приложения) и определяют гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки:

$$\Delta P_п = К_п \cdot \mu_г \cdot w^n + К_1 \cdot \mu \cdot \tau \cdot C_{вх} \cdot w^2 \ ,$$

где $К_п$ – коэффициент, характеризующий сопротивление фильтровальной перегородки, м$^{-1}$. Для лавсана, фильтрующего цементную, пыль (10–20 мкм), равняется (1100…1500) $\cdot 10^6$ м$^{-1}$, а при более низких значениях размера частиц пыли – (10000…15000) $\cdot 10^6$ м$^{-1}$;

$\mu_г$ – динамическая вязкость газа, Па·с (табл. 1 Приложения);

w – скорость фильтрования, принять равной 0,015 м/с;

$К_1$ – параметр сопротивления слоя пыли, м/кг. Для цементной пыли (12-20 мкм) принимают равным (6,5…16)$\cdot 10^9$ м/кг;

τ – продолжительность фильтровального цикла, с. Принять равной 10…15 минут;

$C_{вх}$ – начальная концентрация пыли, кг/м^3;

n – показатель степени, зависящий от режима течения газа. Для ламинарного – n = 1, для турбулентного – n >1.

Далее следует определить гидравлическое сопротивление корпуса аппарата:

$$\Delta P_к = \frac{\zeta_к v_{вх}^2 \rho_г}{2},$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления корпуса. Принять равным 2;

$\rho_г$ – плотность газовоздушной смеси, кг/м^3;

$v_{вх}$ – скорость газовой смеси, м/с. Принять равной 5…10 м/с.

Общее сопротивление рукавного фильтра составит:

$$\Delta P_ф = \Delta P_п + \Delta P_к.$$

В случае если сопротивление слоя пыли на перегородке будет выше 600–800 Па или общее сопротивление фильтра превысит значение 2800 Па, необходимо изменить марку фильтра на аппарат с большей площадью поверхности фильтрования и выполнить расчет заново.

Далее переходят к определению количества регенераций в течение одного часа по формуле:

$$n_р = \frac{3600}{\tau + \tau_р},$$

где $\tau_р$ – время регенерации, принять равным 40 с.

Рассчитываем расход воздуха на регенерацию:

$$V_р = \frac{V_г \cdot n_р . \tau_р}{3600}.$$

Тогда необходимая площадь фильтрования составит:

$$F_ф = \frac{V_г + V_р}{w}.$$

После чего определяем поверхность фильтрования одной секции:

$$F_с = \frac{F_ф}{N_с},$$

где $N_с$ – количество секций в выбранном фильтре, шт. (табл. 5 Приложения).

Если площадь фильтрования одной секции выбранного ранее фильтра выше рассчитанного значения, то расчет продолжают, если нет – подбирают новый аппарат с учетом полученного значения. Рекомендуется подбирать аппарат с запасом площади 10–15%.

Определяем площадь фильтрования, отключаемую на регенерацию в течение одного часа:

$$F_р = \frac{N_с \cdot F_с \cdot n_р \cdot \tau_р}{3600}.$$

Находим уточненное количество воздуха ($V_{оп}$), расходуемое на обратную продувку, и рассчитываем окончательную площадь фильтрования ($F_ф$):

$$V_оп = \frac{w \cdot n_р \cdot \tau_р \cdot N_с \cdot F_с}{3600},$$

$$F_ф = \frac{V_г \cdot V_оп}{w} + F_р.$$

Если полученное значение уточненной площади фильтрования ниже суммарной площади выбранного фильтра, расчет продолжают, в противном случае – подбирают фильтр с суммарной площадью фильтрования выше расчетной.

Проверяем условие – продолжительность периода фильтрования должна быть выше суммарного времени регенерации остальных секций:

$$\tau > (N_с - 1) \cdot \tau_р.$$

В случае схождения условия, переходят к определению фактической удельной газовой нагрузки, в противном случае, – увеличивают время фильтрования и выполняют пересчет.

Фактические значения скорости фильтрования ($w_{факт}$) и удельной газовой нагрузки (q) составят:

$$w_{факт} = \frac{V_г + F_с \cdot w}{F_ф - F_с},$$

$$q = \frac{\frac{V_г}{60} + F_с \cdot q}{F_ф - F_с}.$$

Если полученное значение фактической удельной газовой нагрузки близко к вычисленному ранее, то фильтр подобран верно, если же нет – выбирают новый фильтр и выполняют пересчет.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

Электрофильтр является незаменимым аппаратом очистки от взвешенных в воздухе частиц пыли. В некоторых случаях электроочистка является единственно возможным способом.

Очистка запыленных газов в электрофильтре осуществляется путем действия на них электрических полей. Газ, содержащий взвешенные частицы, проходит через систему, состоящую из заземленных осадительных электродов и размещенных на некотором расстоянии коронирующих электродов, к которым подводится выпрямленный электрический ток высокого напряжения (рис. 10). При достаточно большом напряжении, приложенном к электродам, у поверхности коронирующего электрода возникает интенсивная ударная ионизация газа, сопровождающаяся возникновением коронного разряда (короны). ***Коронный разряд*** – это явление ударной ионизации газа под действием движущихся электронов или ионов вблизи коронирующего электрода.

Сила тока зависит от числа ионов и напряжения между электродами (рис. 11).

С повышением напряжения возрастает и сила тока до тех пор, пока все ионы не вовлекутся в движение. После этого наступает насыщение, т.е. когда все ионы вовлечены в движение и дальнейшее повышение напряжения не влияет на силу тока. При некотором критическом напряжении ($U_{кр}$) ионы и электроны настолько ускоряются, что, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их, превращая в положительные ионы и электроны. Образовавшиеся ионы и электроны

ускоряются электрическим полем и участвуют в ионизации молекул. Этот процесс называется ***ударной ионизацией газа***, после чего происходит пробой газа. Взвешенные частицы, поступающие в зону между электродами, адсорбируют на своей поверхности ионы, приобретая электрический заряд. Заряженные частицы под действием электрического поля движутся в сторону электрода с зарядом противоположного знака и оседают на коронирующем (1) и осадительном (2) электродах (рис. 10). Для работы электрофильтра требуется источник питания с высоким напряжением ~20–90 кВ.

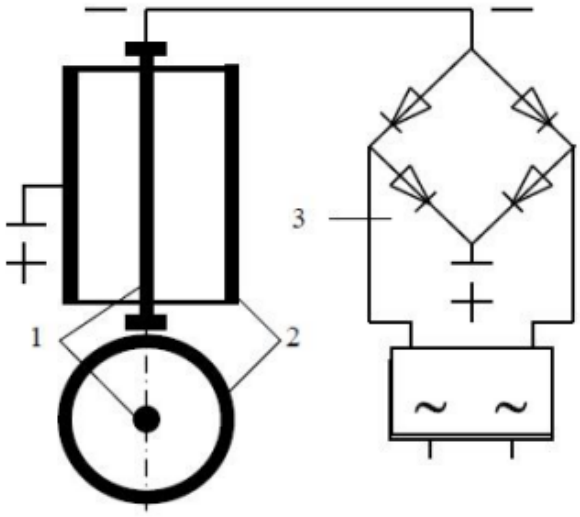


Рис. 10. Схема трубчатого электрофильтра

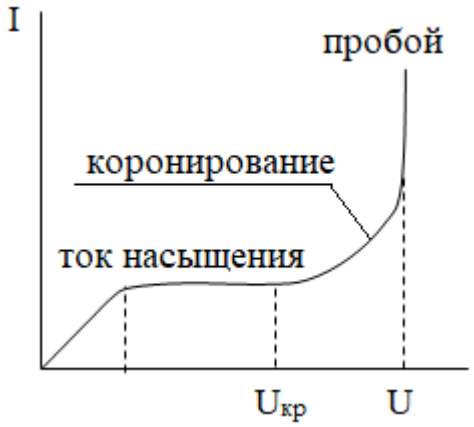


Рис. 11. Вольтамперная характеристика электрофильтра

Уловленная на электродах пыль удаляется в бункер, находящийся в нижней части аппарата, встряхивающим механизмом. Интервал между встряхиванием составляет ~ 3 мин.

При использовании для очистки запыленного газа электрофильтра важным является информация об электрическом сопротивлении пыли. Пыли с удельным сопротивлением 10^6–10^{12} хорошо осаждаются и легко удаляются встряхиванием. Пыли меньшего сопротивления быстро отдают заряд и возвращаются в поток. Пыли большего сопротивления разряжаются медленно и препятствуют осаждению новых частиц.

Типы электрофильтров различают по конструкции (вертикальные и горизонтальные), по виду электродов (пластинчатые и трубчатые), по типу улавливаемых частиц (сухие и мокрые), по форме корпуса (прямоугольные и цилиндрические).

Главным достоинством электрофильтра является высокая степень очистки (до 99,9%), возможность очистки корозионноактивных запыленных газов и газов с высокой температурой (до 500°С), процесс можно полностью автоматизировать.

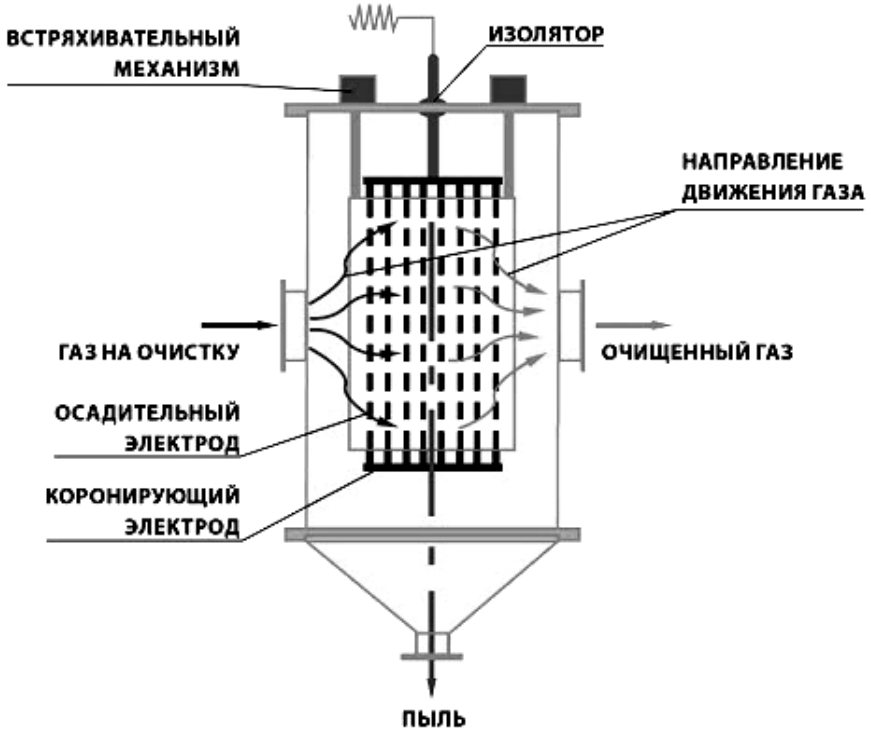


Рис. 12. Устройство электрофильтра

К основным недостаткам электрофильтров следует отнести высокую стоимость осуществления процесса (высокие затраты на электроэнергию), отсутствие возможности очищать взрывоопасные газы, необходимость дополнительного обучения персонала для работы с аппаратом.

Конструкции электрофильтров типизированы, поэтому при подборе соответствующего аппарата исходят из сведений об объемах газовоздушной смеси, требуемой степени очистки, электрическом сопротивлении пыли и ее концентрации в запыленном газе, а также других физических параметров пыли. Отечественной промышленностью производятся следующие типы электрофильтров: ЭГА, УГМ, ЭГТ, ЭСГ и др.

Задача № 5

Подобрать серийную конструкцию электрофильтра типа ЭГА с расстоянием между коронирующим и осадительным электродами (***δ***) 150 мм для очистки отходящего запыленного воздуха, имеющего температуру (***t***) *100+5·n,* размер частиц в потоке газа лежит в диапазоне от (***d₁***) *0,6·n* до (***d₂***) *10+n* мкм, объем очищаемой газовоздушной смеси составляет (***V***$_г$) *10200+10000·n* м^3/ч при нормальных условиях, степень очистки должна быть не ниже 99,8%. Значение *n* принять как номер студента по списку.

Методика расчета электрофильтров

Первоначально определяют скорость дрейфа частиц с наибольшим и наименьшим диаметром частиц:

– для частиц диаметром больше 1 мкм:

$$w_2 = \frac{E^2 \cdot d_2 \cdot 0{,}118 \cdot 10^{-10}}{2 \cdot \mu},$$

– для частиц диаметром меньше 1 мкм:

$$w_1 = \frac{E \cdot C_k \cdot 0{,}17 \cdot 10^{-11}}{\mu},$$

где E – напряженность электрического поля в электрофильтре, В/м. Принять равной $30 \cdot 10^4$ Вт/м.

μ – динамическая вязкость газа, Па·с

$C_к$ – поправка Кеннигема-Милликена:

$$C_к = 1 + \frac{2 \cdot A \cdot \lambda}{d_1},$$

A – численный коэффициент, равный 0,815…1,63;

λ – длина среднего пробега молекул газа, м, 10^{-7} м.

Далее следует определить время, необходимое для осаждения частиц наименьшего диаметра, в связи с их низкой скоростью дрейфа:

$$\tau = \frac{\delta}{w_1},$$

δ – расстояние между коронирующими электродами, м.

Необходимую величину активного сечения электрофильтра определяют согласно формуле:

$$S = \frac{V_г}{w_г},$$

где $V_г$ – объемный расход газовоздушной смеси, $м^3/с$;

$w_г$ – скорость движения газового потока, принять равной 0,5…1 м/с.

Согласно полученному значению площади активного сечения, выбирают из каталога (табл. 6 Приложения) электрофильтр с наименьшей площадью осаждения ($F_{ос}$).

Далее определяют удельную поверхность осаждения электрофильтра:

$$f = \frac{F_{ос}}{V_г},$$

где $F_{ос}$ – общая площадь осаждения фильтра, м^2 (табл. 6 Приложения).

Степень очистки запыленного газа в выбранном электрофильтре составит:

$$\theta = \left[1 - \exp\left(f \cdot -w_{1,2}\right)\right] \cdot 100\%.$$

Если качество очистки не удовлетворяет заданным условиям, то подбирают электрофильтр с большей поверхностью осаждения и выполняют перерасчет.

Далее следует выполнить проверку условия: $\tau_{ос} > \tau_{преб}$, для чего определяют время пребывания частиц в электрофильтре:

$$\tau_{преб} = \frac{l}{w_г},$$

l – путь движения запыленного потока в электрофильтре, м (l = 8,5 м).

При несоблюдении приведенного условия выбирают электрофильтр другой марки и выполняют расчет заново.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

РАСЧЕТ СКРУББЕРА ВЕНТУРИ

Скрубберы Вентури относятся к аппаратам мокрой очистки запыленных газов и является одним из видов аппаратов этого типа (скрубберы). Они получили широкое распространение при улавливании частиц пыли в газовоздушных смесях размером ниже 1,0 мкм, что обусловлено высоким уровнем степени очистки, достигающей 99,9 %.

Простейший скруббер Вентури (рис. 13) представляет собой трубу Вентури (рис. 14) и прямоточный циклон-каплеуловитель. Труба Вентури состоит из сужающейся части – конфузора, который служит для увеличения скорости газа, оросительного устройства, горловины, в которой происходит контакт жидкой фазы с твердыми частицами, осаждающимися на каплях воды, и расширяющейся части – диффузора, где протекают процессы коагуляции. Далее газ, проходя через трубу Вентури, подается в каплеуловитель, где благодаря тангенциальному вводу создается вращение газового потока, вследствие чего смоченные и укрупненные частицы пыли отбрасываются на стенки и непрерывно удаляются из каплеуловителя в виде шлама из нижней части аппарата.

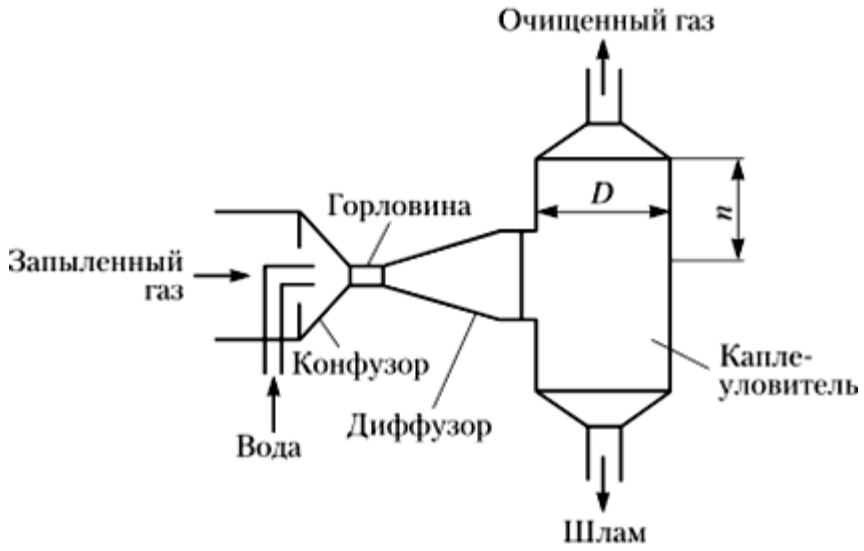


Рис. 13. Строение скруббера Вентури

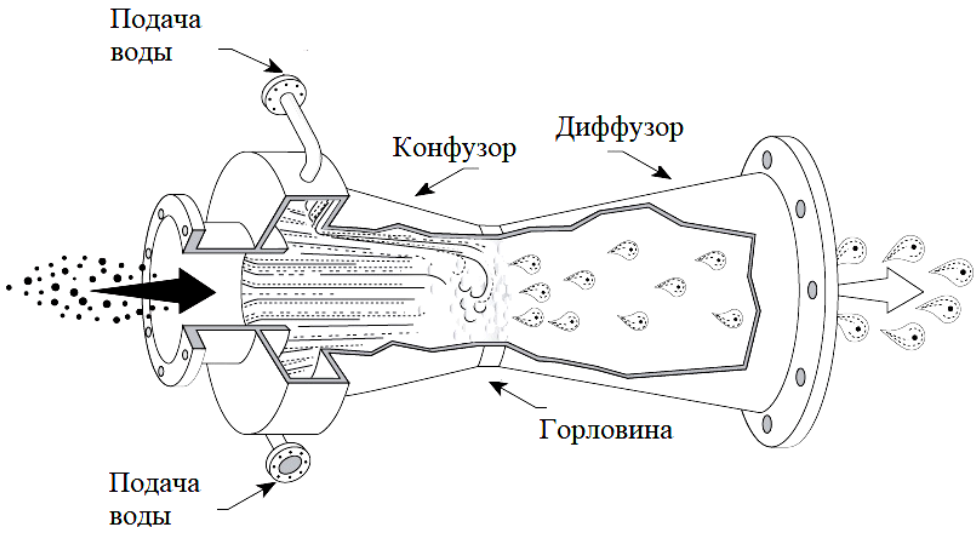


Рис. 14. Строение трубы Вентури

Конструкции скруббера Вентури отличаются, как правило, устройством каплеуловителей, конструкциями и способами установки труб Вентури, а также способами подвода жидкости. Каплеуловители могут быть выносными или размещаться в одном корпусе с трубой. Трубы могут иметь круглое, кольцевое или прямоугольное (щелевое) сечение горловины. Трубы с круглым сечением применяют при небольших расходах газа, а трубы со щелевым или регулируемым кольцевым сечением – при больших. По необходимости выполняют компоновку труб в группы и батареи.

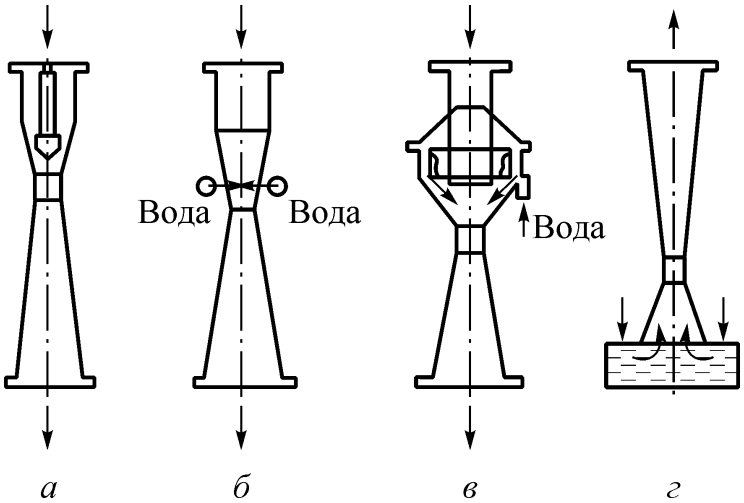


Рис. 15. Конструкции труб-распылителей:
а – центральный (форсуночный) подвод жидкости; б – периферийное орошение; в – пленочное орошение; г – бесфорсуночное орошение

Среди ряда достоинств скрубберов Вентури выделяют возможность работать с газами, имеющими низкую концентрацию пыли (от 0,05 г/м^3) и мелкодисперсный размер частиц (до 0,01 мкм). Кроме того, данные аппараты позволяют выполнять очистку взрывоопасных газовоздушных смесей, имеют простую конструкцию и обеспечивают высокую эффективность очистки.

Однако наряду с преимуществами скрубберы Вентури обладают и рядом недостатков, среди которых основным является усиленный абразивный износ стенок скруббера частицами пыли и жидкости, возникающий вследствие высоких скоростей газа, которые в горловине могут достигать значений 430 км/ч. Использование в качестве улавливающей среды жидкости способствует развитию коррозионных процессов отводящих систем. Более того, образование влажного шлама обусловливает необходимость конструирования дополнительного узла очистки для разделения твердых уловленных частиц от жидкости, что способствует повышению стоимости обслуживания.

Задача № 6

Выполнить расчет скруббера Вентури для очистки газов, содержащих известковую пыль, если известно, что объем поступающего газа (***V_0***) составляет *1000·n+750* м^3/ч, его температура (***t***) равна *50+10·n* ºС, а плотность (***ρ_0***) – 1,26 кг/м^3. Начальная концентрация пыли (***$C_н$***) *1,0 + n·0,3* г/м^3, конечная должна составлять (***$C_к$***) *10+0,8·n* мг/м^3. Разрежение перед газоочисткой (***P_1***) принять равным 1,6 кПа. Давление воды, поступающей на орошение (***$P_ж$***) – 300 кПа. Константы: ***B*** – 6,9·10^{-3}; ***χ*** – 0,67.

Число *n* принять согласно последней цифре своего порядкового номера по списку.

Методика расчета скрубберов Вентури

Первоначально определяется требуемая степень очистки газовоздушной смеси (η):

$$\eta = \frac{C_н - C_к}{C_н}.$$

Далее определяется общее гидравлическое сопротивление скруббера Вентури (ΔP), Па:

$$\Delta P = K_т - P_ж \cdot m,$$

где m – удельный расход на орошение, принимают равным 0,0012 м^3/м^3;

$K_т$ – суммарная энергия соприкосновения:

$$K_т = \sqrt[x]{\frac{ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)}{B}}.$$

Определяется плотность газа на входе в трубу Вентури при рабочих условиях (ρ_1), кг/м^3:

$$\rho_1 = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (101{,}3 - P_1)}{(273 + t_1) \cdot 101{,}3}.$$

Затем определяется объемный расход газа, поступающего в трубу Вентури при рабочих условиях (V_1), м^3/ч:

$$V_1 = V_0 \cdot \frac{\rho_0}{\rho_1}.$$

Далее определяется расход орошающей воды ($M_ж$), кг/ч:

$$M_ж = V_1 \cdot m.$$

Определяется температура газов на выходе из скруббера Вентури (t_2), °С:

$$t_2 = (0{,}133 - 0{,}041 \cdot m) \cdot t_1 + 35.$$

Выполняется расчет по определению плотности газов на выходе из скруббера Вентури (ρ_2), кг/м^3:

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot (101{,}3 - P_1 - \Delta P)}{(273 + t_2) \cdot 101{,}3}.$$

Определяется объемный расход газа на выходе из трубы Вентури (V_2), м^3/ч:

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

Далее переходят к расчету параметров циклона-каплеуловителя – диаметр ($D_ц$), м:

$$D_ц = 1{,}13 \cdot \sqrt{\frac{V_2}{\omega_ц}},$$

где $\omega_ц$ – скорость газа в циклоне-каплеуловителе равная 2,5 м/с.

Определяем высоту циклона-каплеуловителя (Н), м:

$$H = 2{,}5 \cdot D_ц.$$

Далее следует рассчитать гидравлическое сопротивление циклона-каплеуловителя ($\Delta P_ц$), Па:

$$\Delta P_ц = \xi_ц \cdot \frac{\omega_ц^2 \cdot \rho_2}{2},$$

где $\xi_ц$ – коэффициент сопротивления циклона-каплеуловителя (для прямоточного циклона составляет 30–33).

Определяем гидравлическое сопротивление трубы Вентури ($\Delta P_т$), Па:

$$\Delta P_т = \Delta P - \Delta P_ц .$$

Затем определяется коэффициент сопротивления, обусловленный вводом орошающей жидкости, для нормализованной трубы Вентури ($\xi_ж$):

$$\xi_ж = 0{,}63 \cdot \xi_с \cdot \left(\frac{M_ж}{M_г} \cdot \frac{\rho_г}{\rho_ж}\right)^{-0{,}3},$$

где $\xi_с$ – коэффициент сопротивления сухой трубы ($\xi_с$ = 0,12-0,15);

$M_г$ – массовый расход газа, кг/ч:

$$M_г = V_0 \cdot \rho_0 .$$

Определяется необходимая скорость газов в горловине трубы Вентури (ω_2), м/ч:

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_т}{\xi_с \cdot \rho_2 + \xi_ж \cdot \rho_ж \cdot m}},$$

где $\rho_ж$ – плотность орошающей жидкости (для воды 1000 кг/м^3).

Рассчитаем конструктивные параметры трубы Вентури. Определим диаметр горловины трубы Вентури (*d*) и ее длину (l), м:

$$d = \sqrt{\frac{V_0}{900 \cdot \pi \cdot \omega_2}}$$

$$l = 1{,}25 \cdot d .$$

Далее определяют диаметры входного сечения конфузора ($d_к$) и выходного диффузора ($d_д$); рассчитываются следующим образом, м:

$$d_к = 1{,}12 \cdot \sqrt{\frac{V_2}{\omega_к}},$$

$$d_д = 1{,}12 \cdot \sqrt{\frac{V_2}{\omega_д}},$$

где $\omega_к$, $\omega_д$ – скорости газа на входе в конфузор и на выходе из диффузора соответственно; $\omega_к = 15$ (м/с), $\omega_д = 20$ (м/с).

Рассчитывают диаметр форсунки распылительной, м:

$$d_ф = \sqrt{\frac{4 \cdot \varepsilon \cdot \rho_ж \cdot M_ж}{n_ф \cdot 2 \cdot \pi \cdot P}},$$

где ε – коэффициент расхода жидкости; $\varepsilon = 0{,}73$;
$\rho_ж$ – плотность жидкости; $\rho_ж = 1000$ кг/м^3;
P – давление жидкости перед форсункой, P = 150 000 Па;
$n_ф$ – число форсунок, определяют по формуле:

$$n_ф = \frac{d_к}{0{,}2}.$$

Далее следует определить параметры – длину конфузора ($l_к$) и дифузора ($l_д$), м:

$$l_к = 1.5 \cdot d_к,$$
$$l_д = 0.5 \cdot d_д.$$

Затем рассчитывают диаметр сепаратора ($d_с$), м:

$$d_с = 1{,}12 \cdot \sqrt{\frac{V_0 \cdot (1 + m)}{\omega_с}},$$

где $\omega_с$ – скорость смеси, принять равной $\omega_с = 1{,}5$ (м/с).

Далее следует сделать вывод по выполненному расчету.

Таким образом, представленный в методическом пособии материал, сочетающий доступное к пониманию описание конструкции и устройства аппаратов очистки с их расчетами, позволяет понять и глубже изучить особенности, достоинства и эффективность каждого из приведенных аппаратов очистки.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о принципе работы и эффективности очистки пылеосадительных камер. Какие виды их конструкций существуют, и в чем их отличие?

2. Какие достоинства и недостатки у циклонных аппаратов? Какие виды циклонов применяются при очистке промышленных газов от пылей?

3. Что такое батарейные циклоны, и в каких случаях их применяют? Какие существуют условия для компоновки циклонов, и какая компоновка бывает?

4. Достоинства и недостатки вихревых пылеуловителей. В чем их отличие от аппаратов циклонного типа?

5. Что из себя представляет рукавный фильтр? Каков принцип его работы?

6. Что такое рукав фильтра? Какие ткани для рукава используются? Как выполняют продувку рукавов?

7. Каким образом происходит очистка от пылей в электрофильтрах? Виды конструкций электрофильтров?

8. Преимущества и недостатки электрофильтров перед рукавными фильтрами?

9. Как осуществляется очистка в скруббере Вентури? Из каких конструктивных элементов состоит скруббер Вентури?

10. Преимущества и недостатки скрубберов Вентури перед аппаратами сухой очистки?

Список использованной литературы

1. Ветошкин А.Г. Инженерная защита атмосферы от вредных выбросов / А.Г. Ветошкин. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 316 с.

2. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. Справочник. Том 2. / А.С. Тимонин. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – 1030 с.

3. Родионов А.И. Техника защиты окружающей среды / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочешников. – М.: Химия, 1989. – 512 с.

4. Швыдкий В.С. Очистка газов / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Физические свойства сухого воздуха при 101,3 кПа (760 мм рт. ст.)

Температура, °С	Плотность, ρ, кг/м^3	Удельная теплоемкость, *c*, кДж/ (кг·К)	Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	Динамическая вязкость, $\mu \cdot 10^{-6}$, Па·с
0	1,293	1,005	2,44	17,2
10	1,247	1,005	2,51	17,6
20	1,205	1,005	2,59	18,1
30	1,165	1,005	2,67	18,6
40	1,128	1,005	2,76	19,1
50	1,093	1,005	2,83	19,6
60	1,060	1,005	2,90	20,1
70	1,029	1,009	2,96	20,6
80	1,000	1,009	3,05	21,1
90	0,972	1,009	3,13	21,5
100	0,946	1,009	3,21	21,9
120	0,898	1,009	3,34	21,9
140	0,854	1,013	3,49	23,7
160	0,815	1,017	3,64	24,5
180	0,779	1,022	3,78	25,3
200	0,746	1,026	3,93	26,0
300	0,615	1,047	4,60	29,7
400	0,524	1,068	5,21	33,0
500	0,456	1,093	5,74	36,2

Таблица П2

Коэффициенты местных сопротивлений ε_0 циклонов и оптимальные скорости движения воздуха ω_0

Марка циклона	Скорость движения воздуха, ω_0, м/с	Значение ε_0 циклонов				
		С выбросом в атмосферу		С улиткой на выхлопной трубе		При групповой установке
		$\varepsilon_ц$	ε_0	$\varepsilon_ц$	ε_0	$\varepsilon_ц$
ЦН-11	3,5	250	6,1	235	5,2	215
ЦН-15	3,5	163	7,8	150	6,7	140
ЦН-15у	3,5	170	8,2	158	7,5	148
ЦН-24	4,5	80	10,9	73	12,5	70
СДК-ЦН-33	2	600	20,3	500	31,3	-
СК-ЦН-34	1,7	1150	24,9	-	30,3	-
СК-ЦН34м	2	2000	-	-	30,3	-
СИОТ	12	-	6,0	-	4,2	-
ЛИОТ	14	-	4,2	-	3,7	-
ВЦНИИОТ	15	-	10,5	-	10,4	-

Таблица П3

Поправочный коэффициент K_1

Диаметр циклона, мм	Значение коэффициента K_1 для циклонов марок		
	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН34м, СИОТ, ЛИОТ, ВЦНИИОТ
150	0,94	0,85	1
200	0,95	0,90	1
300	0,96	0,93	1
450	0,99	1	1
500	1	1	1
> 500	1	1	1

Таблица П4

Поправочный коэффициент K_2

Марка циклона	Значения коэффициента K_2 при запыленности воздуха, г/м^3					
	0	10	20	40	80	120
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,9	0,87
ЦН-15	1	0,93	0,93	0,91	0,9	0,87
ЦН-15у	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,9	0,87
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,78	0,78	0,77	0,76
СК-ЦН-34	1	0,98	0,95	0,93	0,91	0,91
СК-ЦН34м	1	0,99	0,96	0,95	0,92	0,92
СИОТ, ЛИОТ, ВЦНИИОТ	1	1	1	1	1	1

Таблица П5

Технические характеристики рукавных фильтров

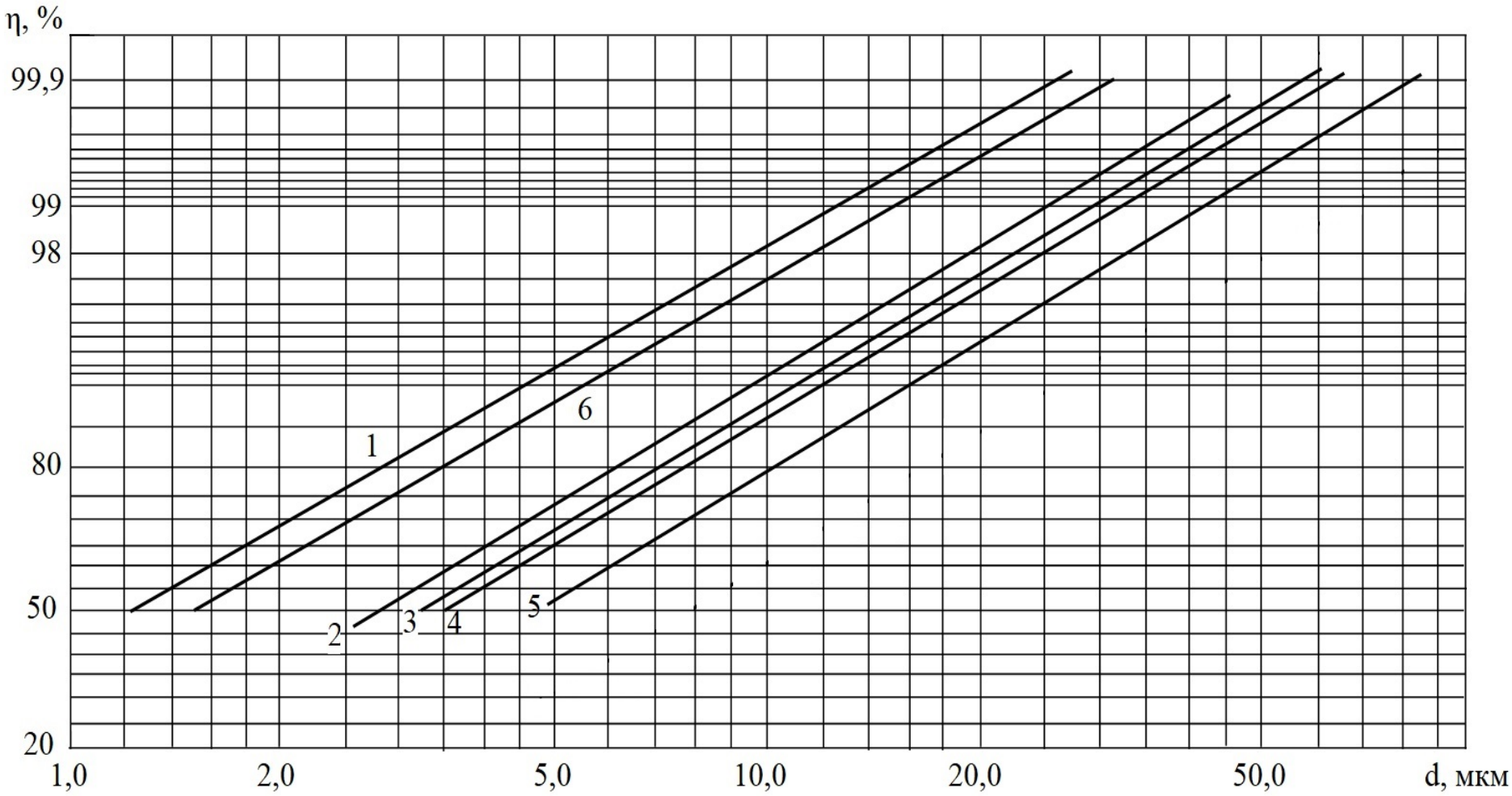
Марка фильтра	Площадь фильтровальной поверхности, м^2	Количество секций, шт.	Количество рукавов в секции, шт.
ФВВ-45	45	3	18
ФВВ-60	60	4	
ФВВ-90	90	6	
ФТНС-4	12	1	4
ФТНС-8	24	2	
ФТНС-12	36	3	
ФРКИ-30	30	1	36
ФРКИ-60	60	2	

ФРКИ-90	90	3	
ФРКИ-180	180	4	
ФРКИ-360	360	8	
ФРКДИ-550	550	6	
ФРКДИ-720	720	8	
ФРКДИ-1100	1100	12	
ФРО-2400	2400	12	42
ФРО-6000	6000	12	54
ФРО-20300	20300	10	216
ФРУI-5	5	1	14
ФРУII-10	10	2	
ФРУII-15	15		
ФРУIII-22,5	22,5	3	
ФРУIII-30	30		
ФРУIV-40	40	4	
ФРУIV-50	50		

Таблица П6

Технические характеристики электрофильтров типа ЭГА

Марка и типоразмер электрофильтра	Площадь активного сечения, м^2	Общая площадь осаждения, м^2	Габариты, м		
			длина	ширина	высота
ЭГА1-10-4-4-2	11	430	9,26	4,84	10,41
ЭГА1-10-4-6-2		645	11,28		11,41
ЭГА1-10-4-6-3		967	17,28		11,41
ЭГА1-10-4-6-2	16,5	635	9,26	4,89	12,41
ЭГА1-10-4-6-3		952	13,44		
ЭГА1-10-6-6-2		952	11,28		13,41
ЭГА1-10-6-6-3		1430	17,28		
ЭГА1-14-7,5-4-3	28,7	1656	13,44	6,15	13,91
ЭГА1-14-7,5-4-4		2210	17,62		
ЭГА1-14-7,5-6-2		1656	11,82		14,91
ЭГА1-14-7,5-6-3		2485	17,28		
УГМ-2-3,5	3,5	160	7,2	3,65	8,305
УГМ-2-7	7	320		4,5	9,43
ЭСГ-15-3	15	825	14,9	5,1	13,254
УВ2х10	21,6	1200	5,755	6,69	20,15
УВ3х10	32,4	1800		9,69	
УВ1х16	16	900		5,19	
УВ2х16	32	1800		9,69	
УВ2х24	48	2640	8,15	9,69	21,7
УВ3х24	72	3960		14,19	
УГТ1-40-3	40	2660	14,11	5,1	13,254
ЭГТ2-3-2,5-60	60	4343	12,6	10,64	17,86
ЭГТ2-3-2,5-60		5790	16,6		



1 – СК-ЦН-34; 2 – ЦН-11; 3 – ЦН-15; 4 – ЦН-15у; 5 – ЦН-24; 6 – СДК-ЦН-33

Рис. П1. Фракционная эффективность очистки циклонов

Амельченко М.О., Строганов В.Ф.

РАСЧЕТ АППАРАТОВ ПЫЛЕОЧИСТКИ

Учебно-методическое пособие к проведению практических занятий
по дисциплине «Процессы и аппараты защиты окружающей среды»
для студентов очной формы обучения
направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность»