

# Очистка газов от пыли

## План

1. Классификация методов и аппаратов для очистки аэрозолей
2. Основные характеристики аппаратов для очистки аэрозолей

# Понятие обезвреживания выбросов

- Под обезвреживанием воздушно-газовых выбросов понимают отделение от газа аэрозольных примесей или превращение в безвредное состояние загрязняющих примесей.
- Процесс обеспыливания воздуха в общем виде включает следующие основные этапы:
  - предотвращение распространения «исходной» аэродисперсной системы в воздухе рабочей зоны и увеличения устойчивости этой системы в направлении строго ограниченной заранее выделенной области (процесс пылеулавливания);
  - разрушение пылевого аэрозоля, заключающегося в выделении пыли из воздуха (процесс пылеочистки);
  - дальнейшее снижение устойчивости пылевого аэрозоля, сохранившегося после реализации предыдущих этапов, заключающееся в интенсификации распространения оставшихся в воздухе пылевых частиц и аэрации дисперсной среды в приземном слое атмосферы (процесс рассеивания пыли).

# Понятие обезвреживания выбросов

- На каждом этапе предусматривается введение искусственных аэродисперсных систем или организация направленных внешних силовых полей.
- Процесс обеспыливания включает три элемента: пылеулавливание (ПУ), пылеочистку (ПО) и рассеивание пыли (РП).
- Каждый элемент системы можно реализовать различными методами (аэродинамическим, гидродинамическим, электромагнитным, теплофизическим, механическим и др.), которые определяются характером направленных внешних воздействий на пылевой аэрозоль.
- Любой метод может быть осуществлен различными способами (орошением, пеной, паром, туманом и др.), а способ — техническими средствами.
- Основным элементом систем пылеочистки является аппарат очистки воздуха от пыли.
- Среди исходных данных для выбора способов, технических средств и параметров пылеулавливания наиболее важным являются технологические и пылеаэродинамические.

# Способы обеспыливания

- Наиболее полная классификация аппаратов основывается на использовании способов обеспыливания:
- физические способы включают: механический (аэродинамический, гидродинамический, фильтрационный), электрический, магнитный, акустический, оптический, ионизирующий, термический;
- химический;
- физико-химический;
- биохимический (физико-биохимический);
- Каждый из указанных способов имеет определенную область применения и широту использования.
- В своей основе они базируются на одном (или нескольких) из следующих процессов обеспыливания: осаждения, коагуляции, удаления, обеззараживания, сжигания и улавливания.

# Классификация методов пылеулавливания

- Для обезвреживания аэрозолей (пылей и туманов) используют сухие, мокрые и электрические методы.
- В основе сухих методов лежат гравитационные, инерционные, центробежные механизмы осаждения или фильтрационные механизмы.
- При использовании мокрых методов очистка газовых выбросов осуществляется путем тесного взаимодействия между жидкостью и запыленным газом на поверхности газовых пузырей, капель или жидкой пленки.
- Электрическая очистка газов основана на ионизации молекул газа электрическим разрядом и электризации взвешенных в газе частиц.
- При обработке выбросов, содержащих твердые аэрозольные загрязнители, низких величин проскока (1...2% и менее) можно достичь, как правило, только двухступенчатой очисткой.

- В основу действия аппаратов для очистки аэрозольных выбросов положен определенный физический механизм.
- В улавливающих устройствах находят применение следующие способы отделения взвешенных частиц от взвешивающей среды, т. е. воздуха (газа):
  1. осаждение в гравитационном поле,
  2. осаждение под действием сил инерции,
  3. осаждение в центробежном поле, фильтрование,
  4. осаждение в электрическом поле,
  5. мокрая очистка и др.

# Основные механизмы пылеулавливания

- *Гравитационное осаждение.* Частицы аэрозолей осаждаются из потока загрязненного воздуха под действием силы тяжести. Для этого необходимо создать соответствующий режим движения загрязненного воздуха в аппарате с учетом размера частиц, их плотности и т. д.  
*Инерционное осаждение.* Инерционное осаждение основано на том, что частицы аэрозолей и взвешивающая среда ввиду значительной разности плотностей обладают различной инерцией. Аэрозольные частицы, двигаясь по инерции, отделяются от газовой среды.
- *Осаждение под действием центробежной силы.* Происходит при криволинейном движении загрязненного воздушногазового потока. Под действием возникающих центробежных сил аэрозольные частицы отбрасываются на периферию аппарата и осаждаются.

- *Эффект зацепления.* Частицы аэрозолей, взвешенные в воздушной (газовой) среде, задерживаются в узких извилистых каналах и порах при прохождении воздушно-газового потока через фильтровальные материалы.
- *Мокрая очистка.* Смачивание поверхности элементов аппаратов водой или другой жидкостью способствует задержанию аэрозольных частиц на данной поверхности.
- *Осаждение в электрическом поле.* Проходя электрическое поле, частицы аэрозолей получают заряд. Двигаясь к электродам противоположного знака, они осаждаются на них.

# Классификация пылеулавливающего оборудования

- Пылеулавливающее оборудование при всем его многообразии может быть классифицировано по ряду признаков: по назначению, по основному способу действия, по эффективности, по конструктивным особенностям.
- В соответствии с ГОСТ 12.2.043-89 «Оборудование пылеулавливающее. Классификация.» аппараты очистки в зависимости от размеров улавливаемых частиц и эффективности их улавливания разделены на пять классов (Таблица)

# Таблица 1

Класс аэрозоля	Размеры эффективно улавливаемых частиц, мк	Эффективность по массе пыли, при группе дисперсности пыли				
		I	II	III	IV	V
I	более 0,3-0,5	-	-	-	99,9-80	<80
II	Более 2	-	-	99,9-92	92-45	-
III	Более 4	“	99,9-99	99-80	“	“
IV	Более 8	>99,9	99-95			
V	Более 20	>99				

Примечание. Пределы эффективности соответствуют границам зон классификации групп пылей.

- Часто в зависимости от коэффициента очистки аппараты делят на две группы: грубой очистки и тонкого обеспыливания. Однако понятие грубой очистки и тонкого обеспыливания являются относительными в зависимости от вида производства и задач обеспыливания.
- По ГОСТ 12.2.043—89 все оборудование для санитарной очистки газов и воздуха от взвешенных дисперсных частиц подразделяется на две категории: аппараты сухой очистки и аппараты мокрой очистки.
- В свою очередь аппараты, использующие сухие методы очистки, по сущности происходящих в них физических явлений подразделяются на гравитационные, инерционные, фильтрационные и электрические.

Пылеулавливающее оборудование по принципу действия подразделяется на группы, по конструктивным особенностям на виды и действует по сухому (табл. 2.) и мокрому (табл. 3) способу

Группа оборудования	Вид оборудования	Область применения	
		воздушных фильтров	пылеуловителей
Гравитационное	Полое	-	+
	Полочное	-	+
Инерционные	Жалюзийное	-	+
	Циклонное	-	+
	Ротационное	-	+
Фильтрационное	Тканевое	-	+
	Волокнистое	+	—
	Зернистое	-	+
	Сетчатое	+	—
	Губчатое	+	—
Электрическое	Однозонное	-	+
	Двухзонное	+	+

# Группы и виды пылеулавливающего оборудования для улавливания пыли мокрым способом

Группа оборудования	Вид оборудования	Область применения	
		воздушных фильтров	пылеуловителей
Инерционное	Циклонное	-	+
	Ротационное	-	+
	Скрубберное	-	+
	Ударное	-	+
Фильтрационное	Сетчатое	+	-
	Пенное	-	+
Электрическое	Однозонное	-	+
	Двухзонное	+	+
Биологическое	Биофильтр	-	+

Примечание. Знак «+» означает применение; знак «-» означает неприменение.

# Системы пылеочистки

- Аппараты мокрой очистки подразделяются на инерционные, фильтрационные и электрические.
- Наиболее распространенным оборудованием для улавливания дисперсных частиц из воздушно-газовых потоков являются: сухие гравитационные и инерционные вихревые осадители, фильтры различных конструкций, мокрые пылеуловители, электрофильтры.
- В целом система очистки воздуха и газов может содержать оборудование нескольких типов, соединенное в последовательную цепочку по мере повышения эффективности пылеулавливания. Пылеулавливающее оборудование, в котором отделение пыли от воздушного потока осуществляется последовательно в несколько ступеней, отличающихся по принципу действия, конструктивным особенностям и способу очистки, относят к комбинированному пылеулавливающему оборудованию.

- В настоящее время используются различные методы и аппараты для улавливания аэрозольных примесей из воздуха. На практике для этого чаще всего применяют аппараты гравитационные, инерционные сухие и мокрые, фильтрующие в пористом слое и в электрическом поле.
- К основным представителям инерционных сухих пылеуловителей относят жалюзийные устройства, циклоны одиночные и групповые, мультициклоны, а мокрых - промыватели полые и насадочные, пенные, ударно-инерционного действия (струйные, импакторные, ротоклоны), скрубберы Вентури.

- Пористые фильтры различают по фильтрующему материалу (фильтры из волокнистых - тканых и нетканых, сыпучих материалов, уплотненных металлических и металло-керамических порошков, металлических и полимерных сеток), а затем - по конструкциям, типоразмерам и частным признакам.
- У электрофильтров основным разделительным признаком считается горизонтальное или вертикальное направление движения обрабатываемого потока.
- Выбор оборудования при формировании системы пылеулавливания зависит от конкретных требований производства и физико-механических и физико-химических свойств дисперсных частиц.

В основе оригинальной концепции классификации сепараторов взвешенных частиц, которая была предложена А.И. Пирумовым, лежит принцип разделения пылеуловителей на классы по размерам эффективно улавливаемых частиц (табл.4). Такая классификация оказывает существенную помощь при выборе средств пылеулавливания.

Класс сепаратора	I		II		III		IV		V
	Минимальный размер эффективно улавливаемых частиц, мкм	0,3		2		4		8	
Группа пыли по дисперсности	V	IV	IV	III	III	II	II	I	I
Медианный диаметр частиц, мкм	менее 1	1...10	1...10	10...40	10...40	40... 120	40.. 120	более	более

*	1							120	120
---	---	--	--	--	--	--	--	-----	-----

Максимальная степень очистки, %	80	80...99	45...92	92...99	80...99	99...99,9	95...99,9	более 99,9	более
---------------------------------	----	---------	---------	---------	---------	-----------	-----------	------------	-------

\*Примечание. Группа пыли и соответствующий размер частиц, которые могут быть уловлены

В табл. 5 приведены характеристики различных пылеуловителей.

Эти сведения значительно облегчают выбор подходящего оборудования для систем очистки воздушногазовых выбросов от

взвешенных частиц

Показатели	Пылеуловители					Фильтры	
	гравитационные	центробежные		мокрые		тканевые	электрические
		Н. напорные	С. напорные	Н. напорные	В. напорные		
Гидравлическое сопротивление	до 100	100 300	750 1250	750 150 0	500 0 125 00	750-1500	100-400
Характерный параметр	$w_x$	O		Stk		При $d_x < 0,3\text{мм}$ D; при $d_x > 0,3\text{мм}$ Stk	$K_E$
Зависимость эффективности улавливания: от размера частиц	$f(d_T^2)$					При $d_x < 0,3\text{мм}$ $f(cJ d_T)$ ; при $d_x > 0,3\text{мм}$ $f(d/c)$	$f(d \tau C,)$

туры	ти- чес- ки не явля- ется				не является	$d_x < 0,3 \text{ мм}$ $f(c_k T_e / \mu_e)$ ; при $d_x > 0,3 \text{ мм}$ $f(c_k / \mu_e)$	$f(c_k / \mu_e)$	
от концен- трации	не явля- ется	Определя- ется диа- метром ап- парата и свойствами пыли			Определяется системой во- доснабжения и возможными затратами энергии		определя- ется типом фильтра (обычно не более 20 г/м <sup>3</sup> )	предель- ная $c = \frac{n_e e \rho_s d_s}{12 \varepsilon_0 E}$
от влажно- сти	не является			Способству- ет росту эф- фективности		не является	Способст- вует росту эффектив- ности	
Ориентиро- вочный ми- нимальный размер час- тиц, улав- ливаемых с высокой эффектив- ностью, мкм	50- 40	40- 30	25-8	5-2	1-0,1	0,1	1,0-0,25	
Макси- мально до- пустимая температу- ра газа, °С	Определяется материалом, из ко- торого изготовлен аппарат					Определя- ется мате- риалом фильтрую- щей пере- городки (<220-250)	Определя- ется соста- вом газа и свойства- ми пыли	
Нижняя предельная температу- ра газа	Выше точки росы			Любая		Выше точки росы		
Стойкость к коррозии	Достаточно стойки			При наличии в газах ки- слот, щело-		Стойки при температуре, превышающей точку росы.		

				чей требуется антикоррозионная защита		
Взрыво- и огнеопасность	Незначительная			Минимальная	Большая	
Ориентировочная стоимость очистки по отношению к низконапорным циклонам	-	1,0-1,5	2,0-3,0	2,5	3,0-7,5	5,0-15,0

Обозначения:  $m_T$ ,  $d_T$  - масса, диаметр частицы;  $\omega$  - центробежный фактор осаждения;  $Stk = d_T^2 \rho_T v_z / (18\mu_z)$  - критерий Стокса;  $D$  - коэффициент диффузии;  $K_E$  - коэффициент напряженности;  $c$  - концентрация пыли;  $T_z$ ,  $\mu_z$ ,  $v_z$ ,  $\rho_z$  - абсолютная температура, динамическая вязкость, скорость, плотность газа;  $n_{и}$  - концентрация ионов в  $1 \text{ м}^3$ ;  $e$  - диэлектрическая постоянная;  $E$  - напряженность электрического поля.

# Основные характеристики аппаратов для очистки аэрозолей

- Процесс очистки газов от твердых и капельных примесей в различных аппаратах характеризуется несколькими параметрами, в том числе общей эффективностью очистки
  - $\eta = (C_{вх} - C_{вых}) / C_{вх}$ ;
- где  $C_{вх}$  и  $C_{вых}$  — массовые концентрации примесей в газе соответственно до и после пылеуловителя

# Общая эффективность

- Если очистка ведется в системе последовательно соединенных аппаратов, то общая эффективность очистки:  
где  $\eta_1, \eta_2, \eta_n$  — эффективность очистки 1-го, 2-го и n-го аппаратов

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

# Фракционная эффективность

- Фракционная эффективность очистки-улавливание определенной фракции в пылеуловителе,
- где  $C_{вх_i}$  и  $C_{вых_i}$  — массовые концентрации  $i$ -й фракции загрязнителя до и после пылеуловителя.

$$\eta_i = (C_{вх_i} - C_{вых_i}) / C_{вх_i}$$

# Коэффициент проскока

- Для оценки эффективности процесса очистки также используется коэффициент проскока  $K$  частиц через пылеуловитель:
- Коэффициент проскока и эффективность очистки связаны соотношением:
- $K = 1 - \eta$

$$K = C_{\text{ВЫХ}} / C_{\text{ВХ}}$$

# Медианная тонкость очистки

- При сравнительной оценке задерживающей способности пылеуловителей различных типов кроме общей и фракционной эффективности очистки используют понятие «медианной ***d*50** тонкости очистки». Она определяется размерами частиц, для которых эффективность осаждения в пылеуловителе составляет 0,50.

# Гидравлическое сопротивление

- Гидравлическое сопротивление пылеуловителей  $\Delta p$  определяют, как разность давлений газового потока на входе  $p_{вх}$  и выходе  $p_{вых}$  из аппарата. Величину  $\Delta p$  находят экспериментально или рассчитывают по формуле:
- где  $\rho$  и  $w$  — соответственно плотность и скорость газа в расчетном сечении аппарата;  $\zeta$  — коэффициент гидравлического сопротивления.
- Если в процессе очистки гидравлическое сопротивление пылеуловителя изменяется (обычно увеличивается), то необходимо регламентировать его начальное  $\Delta p_{нач}$  и конечное  $\Delta p_{кон}$  значения.
- При достижении  $\Delta p = \Delta p_{кон}$  процесс очистки нужно прекратить и провести регенерацию (очистку) пылеулавливающего устройства. Последнее обстоятельство имеет принципиальное значение для фильтров.

$$\Delta p = p_{вх} - p_{вых} = \zeta \rho w^2 / 2,$$

# Мощность привода

- Величина гидравлического сопротивления и объемный расход  $Q$  очищаемого газа определяют мощность  $N$  привода устройства для подачи газа к пылеуловителю:
- где  $k$  — коэффициент запаса мощности;  $\eta_m$  — КПД передачи мощности от электродвигателя к вентилятору;  $\eta_v$  — КПД вентилятора

$$N = k \Delta p Q / (\eta_m \eta_v),$$

# Характеристики пылеочистки

- Удельная пылеемкость пылеуловителя зависит от количества пыли, которое им удерживается за период непрерывной работы между двумя очередными регенерациями. Применительно к фильтрам удельную пылеемкость оценивают как массу осадка, приходящуюся на единицу площади рабочей поверхности фильтрующего элемента. Удельную пылеемкость используют в расчетах продолжительности работы фильтра между регенерациями.
- При описании процессов фильтрации используют скорость фильтрации  $\omega\phi$ , равную отношению объемного расхода фильтруемого газа к площади фильтрования,  $\omega\phi = Q/F\phi$ .

-

- Скорость фильтрации позволяет оценить удельную массовую пропускную способность фильтрующих материалов  $r\omega_f$ , где  $\rho$  — плотность фильтруемого газа. Для оценки скорости движения газа непосредственно в порах фильтроэлемента используют понятие скорость в порах  $\omega_p$ .
- При этом  $\omega_p = \omega_f/P$ , где  $P$  — пористость фильтроматериала.

- 

В процессах пылеулавливания весьма важны физико-химические характеристики пылей и туманов, а именно: дисперсный (фракционный) состав, плотность, адгезионные свойства, смачиваемость, электрическая заряженность частиц, удельное сопротивление слоев частиц и др. Для правильного выбора пылеулавливающего аппарата необходимы прежде всего сведения о дисперсном составе пылей и туманов.

## Основные характеристики аппаратов для очистки аэрозолей

- При оценке эффективности работы пылеуловителей принимают во внимание:
- общую эффективность обеспыливания, или количество пыли, задержанной в пылеуловителе, по отношению к количеству пыли, содержащейся в обеспыливаемом газе;
- фракционную эффективность, определяющую полноту улавливания частиц определенных размеров; ее выражают процентом отделенных в пылеуловителе частиц пыли определенных размеров;

- остаточное содержание пыли в газе при выходе его из пылеуловителя;
- распределение остатка пыли в газе по размеру частиц или скорости витания.
- Кроме того, существенным фактором для оценки эффективности пылеуловителей является расход потребляемой энергии, а при подборе того или иного типа пылеуловителя — частота распределения дисперсности фракций.

# Эффективность пылеулавливания

- *Степень очистки (коэффициент полезного действия)* выражается отношением количества уловленного материала к количеству материала, поступившего в газоочистительный аппарат с газовым потоком за определенный период времени. *Эффективность очистки*  $\eta$  определяют по формуле:

$$\eta = \frac{G'_a - G''_a}{G'_a} = \frac{V'_г c' - V''_г c''}{V'_г c'} = 1 - \frac{V''_г c''}{V'_г c'} = \frac{G'''_a}{V'_г c'}, \quad (9)$$

где  $G'_a$ ,  $G''_a$  - массовый расход частиц пыли, содержащейся в газах, соответственно поступающих и выходящих из аппаратов, кг/с;  $V'_г$ ,  $V''_г$  - объемный расход газов (при 0 оС и 101,3 кПа), соответственно, поступающих в аппарат и выходящих из аппаратов, м /с;  $c'$ ,  $c''$  - концентрация частиц в газах, соответственно, поступающих в аппарат и выходящих из аппарата, кг/м ;  $G'''_a$  - количество уловленной пыли, кг/с.

# Учет исправности(герметичности)

- Если объем в системе процессе очистки изменяется, например, за счет подсоса, то эффективность:

$$\eta = 1 - K_{\text{п}} c'' / c', \quad (10)$$

где  $K_{\text{п}}$  - коэффициент подсоса.

# Фракционная эффективность

- Известно, что эффективность очистки для частиц пыли разных размеров неодинакова. Так как лучше улавливается крупная пыль, то коэффициент очистки газов часто определяют по *фракционной эффективности* - степени очистки газов от частиц определенного размера:

- 

$$\eta_{\phi} = [\Phi' - \Phi''(1 - \eta)] / \Phi', \quad (11)$$

- где  $\Phi'$ ,  $\Phi''$  - содержание фракций в газах соответственно на входе и выходе аппарата, %.

- Зная фракционную степень очистки газов, можно определить общую эффективность аппарата:

$$\eta = \frac{\eta_{\phi_1} \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{\phi_2} \Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_{\phi_n} \Phi_n}{100}. \quad (12)$$

- Эффективность улавливания пыли может быть выражена в виде *коэффициента проскока* частиц (степени неполноты улавливания), который представляет собой отношение концентрации частиц за аппаратом к их концентрации перед ним. Его используют, когда надо оценить конечную запыленность или сравнить относительную запыленность газов на выходе из различных аппаратов.

$$K_{\text{пр}} = 1 - \eta. \quad (13)$$

Суммарную степень очистки газов  $\eta$ , достигаемую в нескольких последовательно установленных аппаратах, рассчитывают по формуле:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_n), \quad (13)$$

где  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  – степень очистки газов от пыли соответственно в первом, втором и  $n$ -ом аппарате.

# *Производительность*

- *Производительность* характеризуется количеством воздуха, которое очищается за 1 час. Аппараты, в которых воздух очищается при прохождении через фильтрующий слой, характеризуются удельной воздушной нагрузкой, т. е. количеством воздуха, которое проходит через 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности за 1 час.

# *Расход энергии*

- *Расход энергии* зависит в значительной мере от гидравлического сопротивления аппарата.
- В электрофильтрах электроэнергия расходуется в основном на создание электростатического поля.
- Расход электроэнергии при одноступенчатой очистке находится в пределах от 0,035 до 1,0 кВт-ч на 1000 м воздуха.

- Удельные затраты энергии на удаление дисперсных примесей возрастают пропорционально снижению концентрации взвешенных в потоке частиц, поскольку степень очистки в пылеулавливающих аппаратах практически не зависит от начальной концентрации загрязнителя. В дополнение к этому затраты растут и с уменьшением размеров частиц.
- В последние годы в качестве одного из показателей работы аппаратов очистки стали использовать энергетические затраты, расходуемые на конкретный процесс различными способами обеспыливания.
- В качестве показателя энергетического баланса по аналогии с коэффициентом полезного действия используют так называемый энергетический КПД: