

Л.М. ИСЯНОВ, Е.А. ВАСИЛЬЕВА

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОЧИСТКИ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ
И СБРОСОВ**

Часть 3

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2019

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Л.М. ИСЯНОВ, Е.А. ВАСИЛЬЕВА

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОЧИСТКИ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ
И СБРОСОВ**

Часть 3

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2019

УДК 628 (075)
ББК 38.93я7
И 919

Исянов Л.М., Васильева Е.А. Теоретические основы очистки и обезвреживания промышленных выбросов и сбросов: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2019. Часть 3. – 82 с.

В учебном пособии приведены классификация и свойства аэрозолей, основные механизмы выделения частиц из аэрозолей, общие сведения о негативном воздействии аэрозолей на окружающую среду и живые организмы. Формулы и зависимости, приведенные в настоящем пособии, могут быть использованы для обоснования выбора методов и аппаратов пылеулавливания, предварительной оценки их индивидуальной и комплексной эффективности, подбора вспомогательного оборудования.

Настоящее пособие предназначено для студентов бакалавриата и магистратуры по направлениям «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и «Техносферная безопасность», а также для слушателей в системе дополнительного профессионального образования.

Рецензенты: зав. кафедрой охраны окружающей среды и
 рационального использования природных ресурсов
 ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук О.А. Шанова;

 зам. ген. директора по производству НПФ «Кортекс»
 Б.С. Иоффе

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

© Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2019

© Исянов Л.М., Васильева Е.А., 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последние десятилетия всё более актуальными становятся вопросы охраны атмосферного воздуха. Рост городов, концентрирование и укрупнение промышленных предприятий, развитие топливно-энергетического комплекса, увеличение транспортных потоков и многие другие факторы способствуют загрязнению атмосферного воздуха газообразными веществами и аэрозолями. Реформирование системы нормирования негативного воздействия на окружающую среду и ужесточение отдельных нормативов вынуждает предприятия к модернизации систем очистки выбросов, внедрению наилучших доступных технологий газоочистки и пылеулавливания.

Теоретические основы пылеулавливания были подробно описаны в различных учебных и справочных изданиях ещё в 70 – 90-е гг. прошлого столетия. В основу настоящего учебного пособия положены фундаментальные труды профессора кафедры «Охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов» ВШТЭ СПбГУПТД Л.М. Исянова и профессора, заслуженного изобретателя РФ А.Ю. Вальдберга, в которых впервые были подробно описаны и обоснованы теоретические аспекты разделения аэрозолей. Эти труды и по сей день остаются наиболее полными и достоверными собраниями сведений о свойствах взвешенных частиц и механизмах разделения аэрозолей, поэтому выдержки из них цитируются в новейших публикациях.

Между тем, урбанизация территорий и развитие технологий приводят к появлению новых задач. В последние годы всё чаще поднимаются проблемы идентификации и выделения из выбросов ультрадисперсных частиц пыли, повышения энергоэффективности пылеулавливания, рекуперации веществ. Публикации на эти темы разрознены и обычно присутствуют только на сайтах и в каталогах фирм-изготовителей пылеулавливающего оборудования, что затрудняет процесс освоения информации студентами. Настоящее учебное пособие позволит отчасти решить обозначенную проблему.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АЭРОЗОЛЕЙ

1.1. Классификация аэрозолей

К аэрозолям относятся двухфазные системы с газообразной дисперсионной средой и с дисперсной фазой, состоящей из мелких твердых или жидких частиц.

В зависимости от природы аэрозоли подразделяют на естественные и искусственные.

Естественные аэрозоли образуются под воздействием природных явлений, например, при вулканической активности, при ветровой эрозии почвы, при атмосферных явлениях.

Искусственные аэрозоли образуются в результате хозяйственной деятельности общества. Важное место среди искусственных аэрозолей занимают промышленные аэрозоли. Промышленные аэрозоли образуются в производственных процессах и являются нежелательными продуктами производственной деятельности, оказывающими неблагоприятное влияние на окружающую среду и здоровье населения.

Размеры твердых или жидких частиц, взвешенных в газообразной среде, могут находиться в диапазоне от 0,01 до 500 мкм. Частицы размером менее 2,5 мкм относят к группе особо опасных для здоровья мелкодисперсных аэрозолей [1, 2].

С точки зрения механизма образования, промышленные аэрозоли можно разделить на четыре класса: дымы, пыли, туманы и смешанные аэрозоли.

Краткая характеристика каждого класса приведена в табл.1.1.

Таблица 1.1

Краткая характеристика классов промышленных аэрозолей

Класс аэрозоля	Агрегатное состояние частиц	Механизм образования частиц	Степень дисперсности частиц	Диапазон изменения размеров частиц (d_q), мкм
Дымы	Твердые	Конденсационный	Ультрадисперсные	$0,01 \leq d_q \leq 0,1$
			Мелкодисперсные	$0,1 < d_q \leq 5$

Класс аэрозоля	Агрегатное состояние частиц	Механизм образования частиц	Степень дисперсности частиц	Диапазон изменения размеров частиц (d_q), мкм
Пыли	Твердые	Диспергационный	Ультрадисперсные	$0,01 \leq d_q \leq 0,1$
			Мелкодисперсные	$0,1 < d_q \leq 10$
			Грубодисперсные	$10 < d_q \leq 500$
Туманы	Жидкие	Конденсационный	Ультрадисперсные	$0,05 \leq d_q \leq 0,1$
		Диспергационный	Мелкодисперсные	$0,1 < d_q \leq 5$
			Грубодисперсные	$30 \leq d_q \leq 1000$
Смешанные	Твердые или жидкие	В зависимости от сочетания классов аэрозолей: пыли + дымы; дымы + туманы; пыли + туманы		

Дымы – это аэрозоли, образующиеся в результате высокотемпературных процессов, сопровождающихся испарением (возгонкой) частиц вещества с последующей конденсацией его паров при охлаждении на ядрах конденсации, а также в результате химических и физических реакций. В результате указанных процессов образуется дисперсная фаза – очень мелкие твердые частицы сферической или иной правильной формы. С образованием дымов связаны, например, такие отрасли промышленности, как энергетика и металлургия (сжигание твердого и жидкого топлива, выплавка чугуна, стали, цветных металлов и др.).

Пыли – это наиболее широко распространенный класс промышленных аэрозолей, которые образуются в результате диспергирования твердых материалов в газообразной среде. Пыли образуются в процессах сушки, обжига твердых и порошкообразных материалов и топлива, а также при их измельчении, классификации, дозировании, погрузке, транспортировке и т.п. Большинство пылей весьма полидисперсны, т.е. характеризуются широким диапазоном размеров частиц. Форма частиц в пылях обычно неправильная, соответствующая обломкам твердых тел.

Туманы – это аэрозоли, образующиеся в результате конденсации паров веществ в газообразной среде или при диспергировании жидкостей

в газообразной среде. Капельки жидкости в туманах могут содержать растворенные вещества и суспендированные твердые частицы. Как видно по табл.1.1, степень дисперсности и диапазон изменения размеров частиц, зависят от механизма образования тумана. С образованием туманов связаны различные технологические процессы в химической, целлюлозно-бумажной, медицинской и других отраслях промышленности, например, окраска изделий, травление деталей и др.

Смешанные аэрозоли состоят из совокупности жидких и твердых частиц или из твердых частиц различного происхождения, диспергированных в газообразной среде. Эта особенность смешанных аэрозолей должна учитываться при выборе наиболее эффективного механизма извлечения частиц различного агрегатного состояния и дисперсности из газообразной среды.

В технической литературе процессы, связанные с выделением твердых или жидких частиц из газообразной среды, называются «пылеулавливанием». Следует учитывать, что понятие «пылеулавливание» охватывает все случаи улавливания частиц, относящихся к каждому из четырех рассмотренных классов промышленных аэрозолей [1].

1.2. Дисперсный состав аэрозолей

Под дисперсным составом аэрозолей понимают характеристику распределения частиц по размерам. Распределение частиц по размерам может быть задано двумя способами: по количеству частиц (счетное распределение) или по массе частиц (массовое распределение).

При выборе способа пылеулавливания и оценке эффективности пылеулавливателей наиболее широкое применение нашел второй способ, так как предельно допустимые концентрации (ПДК) взвешенных веществ в воздухе выражаются преимущественно массой частиц на единицу объема воздуха.

Дисперсный состав аэрозолей определяется экспериментально. В результате анализа сначала находят распределение частиц в определенных

диапазонах их размеров, которые называются фракциями. Фракция характеризует процентное содержание или относительную долю частиц, размер которых находится в определенном интервале значений, принятых в качестве нижнего и верхнего пределов. Пример записи фракций (мкм): $0 \div 2$; $2 \div 6$; $6 \div 10$; $10 \div 20$; $20 \div 40$; $40 \div 60$; $60 \div 100$ и т.д.

Пофракционный дисперсный состав аэрозолей представляет собой дифференциальную характеристику частиц по размерам, которая может быть задана, например, в следующем виде:

$$D(d_q) = \varphi(d_q) dd_q, \quad (1.1)$$

где d_q – размер частиц, мкм.

Причем $\int_0^{\infty} \varphi(d_q) dd_q = 1$, т.е. сумма долей и процентного содержания всех фракций составляет единицу или 100 %.

Более удобной с практической точки зрения является интегральная характеристика дисперсного состава аэрозолей. Интегральные характеристики обозначаются обычно с использованием терминологии, принятой в ситовом анализе пыли. Доля частиц, прошедших через отверстия в сите, называется «проходом» ($D(d_q)$), а доля частиц, оставшихся на сите, – «остатком» ($R(d_q)$).

По аналогии с ситовым анализом, для любого диапазона размеров частиц справедливо выражение:

$$D(d_q) + R(d_q) = 100 \%, \quad (1.2)$$

где $D(d_q)$ – процентное содержание частиц с размерами меньше d_q , %;

$R(d_q)$ – процентное содержание частиц с размерами больше d_q , %.

Для выражения дисперсного состава аэрозолей применяют табличную и графическую формы записи.

Пример записи дисперсного состава аэрозолей в табличной форме приведен в табл.1.2 [1].

Таблица 1.2

Дисперсный состав аэрозолей (пример)

Размеры частиц по фракциям, мкм	Средний размер частиц во фракции, d_m , мкм	Дифференциальное распределение, Δ , %	Интегральное распределение	
			$R(d_q)$, %	$D(d_q)$, %
> 80	-	0,5	0,5	99,5
80÷63	71,5	1,0	1,5	98,5
63÷40	51,5	5,0	6,5	93,5
40÷25	32,5	8,5	15,0	85,0
25÷16	20,5	13,0	28,0	72,0
16÷10	13,0	12,0	40,0	60,0
10÷6,3	8,15	11,0	51,0	49,0
6,3÷4,0	5,15	15,0	66,0	34,0
4,0÷2,5	3,25	12,0	78,0	22,0
2,5÷1,6	2,05	4,5	82,5	17,5
1,6÷1,0	1,3	5,0	87,5	12,5
1,0÷0,0	0,5	12,5	100,0	0,0

Распределение частиц по размерам при $d_q \geq 40$ мкм определяется обычно ситовым анализом, для проведения которого частицы должны быть предварительно осаждены, а в диапазоне от 0 до 40 мкм – другими методами (табл. 1.3). Исходя из этого различают ситовую и подситовую области размеров частиц. Для техники пылеулавливания главное значение имеют доля частиц в подситовой области, т.е. частиц размером $d_q < 40$ мкм, и распределение частиц по размерам внутри этой области.

Таблица 1.3

Некоторые экспериментальные методы определения размеров частиц [3]

Название метода дисперсионного анализа	Диапазон измеряемых размеров частиц
Мокрый ситовой анализ	5÷40 мкм
Седиментационный анализ в гравитационном поле	1÷100 мкм
Седиментационный анализ в центробежном поле	5 нм ÷ 10 мкм
Оптическая микроскопия	1÷100 мкм
Электронная просвечивающая микроскопия	5 нм ÷ 5 мкм
Электронная сканирующая микроскопия	5 нм ÷ 5 мкм
Методы, основанные на светорассеянии	5÷100 нм
Кондуктометрия (счетчик Коултера)	0,2 ÷ 800 мкм

Дифференциальная и интегральные кривые, построенные по данным табл. 1.2, приведены на рис. 1.1. и 1.2.

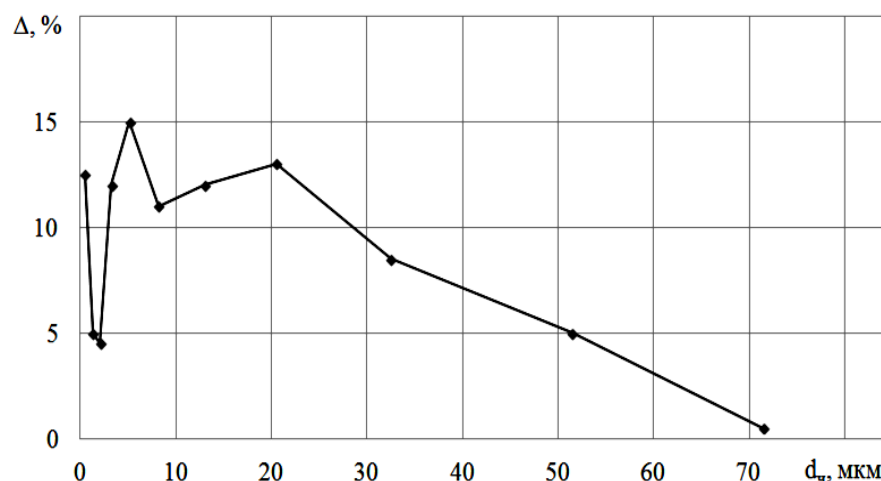


Рис. 1.1. Дифференциальная характеристика дисперсного состава частиц

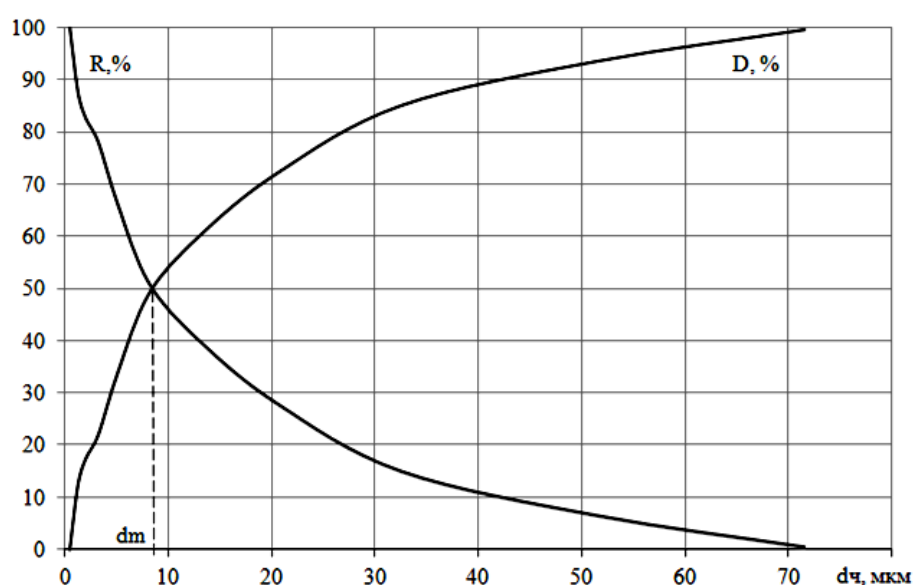


Рис. 1.2. Интегральные характеристики дисперсного состава частиц

На рис. 1.1 видно, что максимальную долю в распределении составляют частицы с размером более 6 мкм. Эта величина называется модельный размер или мода (*moda*) и обозначается d_{moda} .

Мода — положение максимума дифференциальной кривой распределения, или наиболее вероятный размер частиц.

На рис. 1.2 видно, что кривые, характеризующие зависимости $D(d_q) = f(d_q)$ и $R(d_q) = f(d_q)$ пересекаются в точке, в которой $R(d_q) = D(d_q) = 50\%$. Эта величина называется медианным размером или медианой и обозначается d_m . По рис. 1.2 можно определить, что в данном случае $d_m = 6,2$ мкм.

Медиана – это точка на дифференциальной кривой распределения, слева и справа от которой находится по 50 % распределения.

Более удобно характеризовать дисперсный состав аэрозолей не в виде полного распределения, а в виде среднего размера частиц, поэтому в аэрозольной технике наибольшее распространение получил медианный размер частиц.

Поскольку через одну точку, т.е. при одном и том же значении d_m , может быть проведено множество кривых, то возникает необходимость задать, кроме медианного размера частиц, еще одну величину – угловой коэффициент кривой или стандартное отклонение. Для этого наиболее целесообразно подобрать такие масштабы осей ординат и абсцисс, чтобы дисперсный состав характеризовался прямой линией.

Установлено, что большинство промышленных аэрозолей подчиняется логарифмически нормальному закону распределения частиц по размерам. Для аэрозолей, подчиняющихся логарифмически нормальному закону распределения частиц по размерам, функции $D(d_q)$ и $R(d_q)$ называются нормированными функциями нормального распределения, изменяющимися от 0 до 100 % и от 100 % до 0.

Выражение для $D(d_q)$, аналитически представляется в следующем виде:

$$D(d_q) = \frac{100}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_q} \int_{-\infty}^{\lg d_q} \exp \left[-\frac{\lg^2 \left(\frac{d_q}{d_m} \right)}{2 \lg^2 \sigma_q} \right] d \lg d_q, \quad (1.3)$$

где σ_q – стандартное или среднее квадратичное отклонение в функции данного распределения;

$\lg(d_q/d_m)$ – логарифм отношения текущего размера частиц к медианному для данного распределения размеру.

Принимаем величину $t = \lg(d_q/d_m)/\lg \sigma_q$ и производим подстановку величины t в формулу (1.3):

$$D(d_q) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp \left[-\left(\frac{t}{2} \right)^2 \right] dt. \quad (1.4)$$

Формула (1.4) позволяет при соответствующих вычислениях применять табулирование значения интеграла вероятности для построения по оси ординат вероятностного масштаба.

Интегральные кривые для аэрозолей, подчиняющихся логарифмически нормальному закону распределения, строят в вероятностно-логарифмической системе координат, где они приобретают вид прямых линий. Для этого по оси абсцисс откладывают логарифмы размеров частиц (но обозначают их как значения размеров d_q), а по оси ординат откладываются значения t (но проставляют значения функции $D(d_q)$ или $R(d_q)$) [1].

На рис.1.3 построена графическая характеристика дисперсного состава в вероятностно-логарифмической координатной сетке по данным табл.1.2.

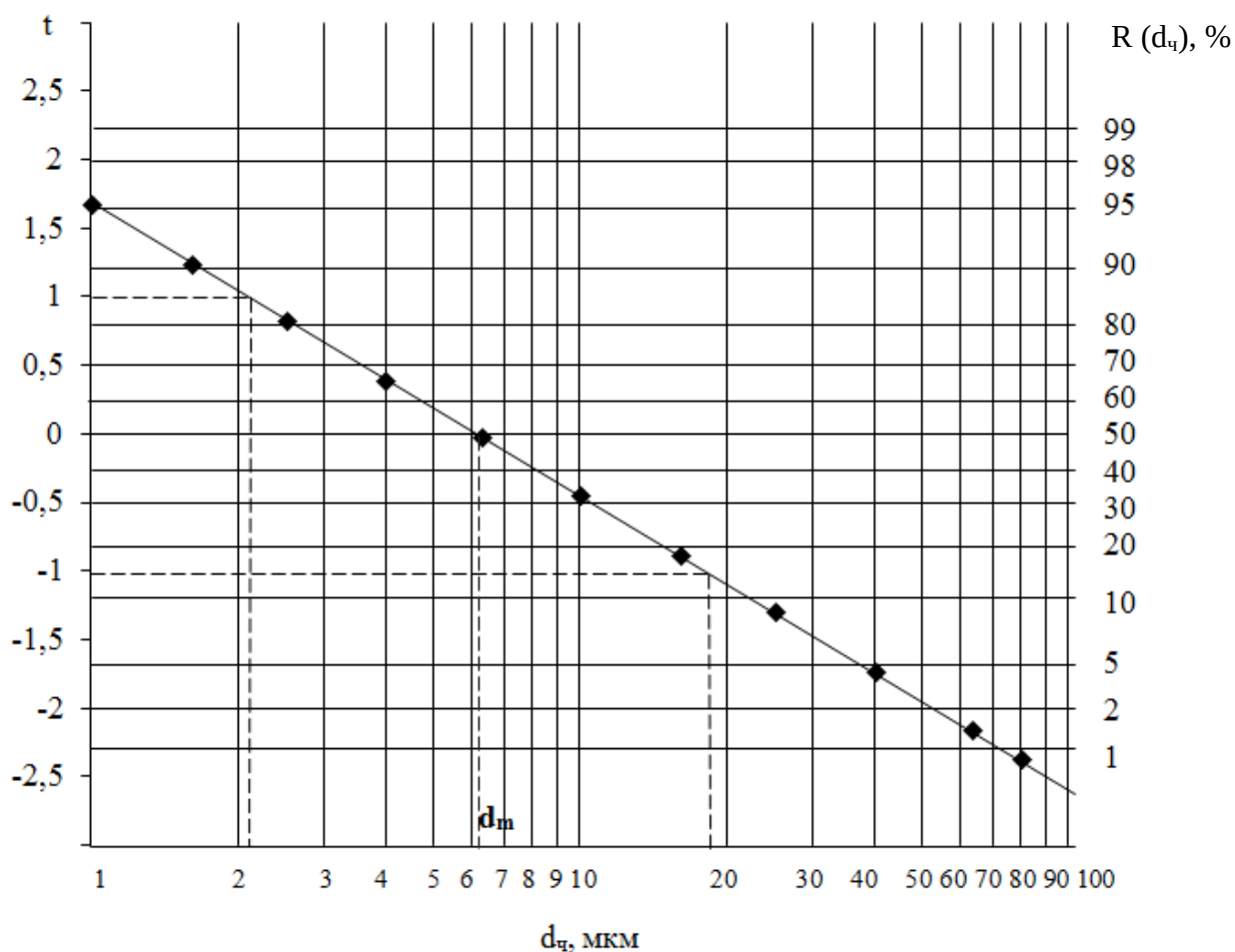


Рис. 1.3. Дисперсный состав частиц в вероятностно-логарифмической координатной сетке

Для построения шкалы функции $R(d_q)$ использована широко распространенная таблица интеграла вероятности, в которой приведены

значения $R(d_q)$ для произвольно выбранных значений аргумента t . Отметим также, что на рис.1.3 шкала t построена в равномерном масштабе. Среднее значение $t = 0$ и соответствует значению $R(d_q) = 50 \%$.

Из таблицы для интеграла вероятности следует, что при $t = (+1)$ $R(d_q) = 84,1 \%$, а при $t = (-1)$ $R(d_q) = 15,9 \%$. Тогда справедливо будет выражение

$$\lg \sigma_q = \lg d_{84,1} - \lg d_m = \lg d_m - \lg d_{15,9} \text{ или} \\ \sigma_q = \frac{d_{84,1}}{d_m} = \frac{d_m}{d_{15,9}} \quad (1.5)$$

где $d_{84,1}$ и $d_{15,9}$ – абсциссы точек, ординаты которых имеют значение 84,1 % и 15,9 %.

Для данного случая $d_{84,1} = 2,1$ мкм, а $d_{15,9} = 18,0$ мкм [1].

Таким образом, для аэрозолей, подчиняющихся логарифмически нормальному закону распределения, дисперсный состав может быть задан всего двумя величинам d_m и σ_q .

Отметим также, что чем больше величина стандартного отклонения при неизменном медианном размере частиц, тем выше содержание мелких, наиболее трудно улавливаемых фракций частиц, и наоборот.

Для получения воспроизводимых результатов анализа дисперсного состава промышленных аэрозолей предпочтение следует отдавать таким методам его определения, которые не требуют предварительного (до проведения анализа) осаждения дисперсной фазы.

До сих пор наиболее доступным и эффективным является метод с использованием струйных сепараторов (импакторов). Принцип действия импактора основан на инерционном осаждении взвешенных частиц на плоскую поверхность в результате резкого изменения направления движения аэрозоля.

Проба аэрозоля отбирается в импактор из общего потока и протягивается с помощью побудителя расхода через несколько последовательно установленных в одном корпусе сопел с расположенными

напротив них ступенями осаждения – плоскими подложками, заполненными специально подобранным материалом или смазкой.

Эффективность каждой ступени осаждения принято характеризовать значением d_{50} , т.е. размером частиц, осаждаемых с эффективностью 50 %. Для этого импакторы после их изготовления подвергаются индивидуальной калибровке на монодисперсных порошках, размеры частиц которых уже известны.

В результате отбора пробы аэрозоля через импактор путем взвешивания определяют привес на каждой ступени осаждения, а затем – процентное содержание доли осаждения частиц по формуле

$$\Delta_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^n q_i} 100, \%, \quad (1.6)$$

где $\sum_{i=1}^n q_i$ – суммарная масса частиц, осажденных на всех ступенях осаждения;

i – номер ступени осаждения;

n – число ступеней осаждения.

Результаты расчетов по формуле (1.6) приводят затем в виде, аналогичном табл. 1.2. Затем, используя значения d_{50i} , строят характеристику дисперсного состава в вероятностно-логарифмической координатной сетке и определяют d_m и σ_g .

Импакторы позволяют определить распределение частиц по размерам внутри области от 0 до 10 мкм, т.е. применимы для мелкодисперсных и ультрадисперсных частиц.

1.3. Свойства взвешенных частиц

Выбор пылеулавливающих аппаратов в значительной степени зависит от физико-химических свойств осаждаемых в них частиц, которые влияют на надежность работы аппарата. Эти свойства определяются, главным образом, химическим составом частиц и пылеобразующим процессом [1].

1.3.1. Плотность частиц

Различают истинную, кажущуюся и насыпную плотности [4].

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

Кажущаяся плотность частицы представляет собой отношение ее массы к занимаемому частицей объему, включая объем пор и газовых включений.

Гладкие монолитные, а также первичные (только образовавшиеся) частицы имеют кажущуюся плотность, практически совпадающую с истинной. Подобное совпадение характерно и для жидких аэрозольных частиц (капель). Снижение кажущейся плотности по отношению к истинной наблюдается у пылей, склонных к коагуляции или спеканию первичных частиц, например, у сажи, оксидов металлов. В некоторых случаях, например, у частиц сажи, кажущаяся плотность меньше истинной более чем в десять раз.

Пыль может состоять из частиц как одинаковой, так и различной плотности. К первому виду относятся, например, кварцевая, корундовая пыли, химические чистые соли; ко второму – летучая зола, в крупных фракциях которой имеются несгоревшие частицы топлива, а в мелких – повышенное количество солей кальция и щелочных металлов.

В отдельных случаях плотности различных по крупности частиц одной и той же пыли могут отличаться весьма существенно. В тех случаях, когда это различие превышает 5000 кг/м^3 , рекомендуется рассматривать плотность частиц в зависимости от их размера, т.е. в виде функции

$$\rho_c = f(d_c), \text{ кг/м}^3. \quad (1.7)$$

При выборе и расчетах эффективности пылеуловителей необходимы данные о кажущейся плотности, так как именно этот параметр оказывает существенное влияние на характер поведения частиц в газовом потоке при воздействии различных механизмов осаждения.

Существующие методы определения кажущейся плотности позволяют получать на практике ее усредненное значение, учитывающее совокупность

частиц, присутствующих в отобранной для анализа пробе [4].

Насыпная плотность определяется отношением массы свеженасыпанных твердых частиц к занимаемому ими объему. Таким образом, насыпная плотность учитывает воздушные прослойки между частицами и обычно меньше истинной и кажущейся плотностей.

Насыпная плотность необходима для определения объема, который занимает пыль в бункерах, а также периодичности выгрузки пыли из бункеров. При слёживании пыли насыпная плотность увеличивается в $1,2 \div 1,6$ раза.

1.3.2. Адгезия и аутогезия частиц

Адгезия характеризует прочность сцепления частиц с различными макроскопическими поверхностями. Адгезионные свойства могут проявиться в монослое частиц, осевших на какой-либо поверхности, например, на электродах в электрофильтрах и т.п.

Аутогезия определяет прочность сцепления частиц между собой [5].

Прилипание частиц к поверхности или друг к другу происходит за счет действия различных сил: сил Ван-дер-Ваальса, сил когезионного взаимодействия, сил электростатического взаимодействия, капиллярных сил и силы трения (механического зацепления).

Силы Ван-дер-Ваальса – это молекулярные силы, в основе которых лежит взаимодействие положительно заряженных ядер и отрицательно заряженных электронов. Они могут проявиться еще до непосредственного соприкосновения частиц, но величина их резко падает с увеличением расстояния между поверхностями взаимодействующих тел. При увеличении зазора между поверхностями до нескольких десятков микрон можно пренебречь.

Силы когезионного взаимодействия – силы сцепления между молекулами, приводящие к образованию единого тела. Природа когезионных сил та же, что и межмолекулярных сил внутри частиц. Для возникновения когезионных сил необходимо внешнее усилие, вызывающее деформацию

частиц и возникновение вновь образованных «свежих» поверхностей. Когезионные силы действуют также при образовании «мостиков» твердых веществ между частицами. Эти мостики образуются в результате спекания, кристаллизации и других физико-химических превращений в зоне контакта. Величина когезионного взаимодействия больше ван-дер-ваальсова и составляет $0,01 \div 100$ мкм.

Силы электростатического взаимодействия подразделяются на кулоновские, определяющие взаимодействие при наличии избыточных зарядов на частицах, и электрические, обусловленные разностью потенциалов соприкасающихся тел. Подобные силы могут возникнуть непреднамеренно, например, при трении частиц о поверхность. Две непроводящие частицы с зарядами противоположного знака направляются навстречу друг другу. Однако подобное взаимодействие возможно при чрезвычайно близком расположении частиц, зазор между ними должен составлять примерно половину диаметра частиц. В электрофильтрах эти силы создаются преднамеренно, чтобы направить взвешенные частицы к поверхности осадительных электродов.

Численное значение кулоновских сил находится в промежутке между величинами ван-дер-ваальсовых и когезионных сил. Электрические силы по величине соответствуют ван-дер-ваальсовым.

Капиллярные силы возникают в присутствии жидкости между двумя частицами или между частицей и поверхностью тела благодаря поверхностному натяжению жидкости. При частичном заполнении жидкостью пор между частицами сыпучий материал испытывает действие капиллярного давления, которое стремится удержать частицы вместе. Величина капиллярных сил близка к величине сил когезии. Капиллярные силы способствуют образованию отложений в пылеулавливающих установках в случае осаждения в них влажной пыли.

Силы механического зацепления за счет трения характерны для частиц неправильной формы. Это явление наблюдается, в основном, в сыпучих материалах (порошках), испытывающих внешнюю нагрузку.

Согласно теории, предложенной Б.В. Дерягиным [6], сила адгезии, действующая между частицей диаметром d_q и макроскопической поверхностью

$$F_{ad} = 2\pi \cdot \sigma \cdot d_q, \text{ Н}, \quad (1.8)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе твердого тела и окружающей среды, Н/м.

Из формулы (1.8) следует, что сила адгезии пропорциональна размеру частицы в первой степени (d_q), тогда как сила, направленная на отрыв частицы, например, сила тяжести или сила инерции, пропорциональна размеру частицы в третьей степени (d_q^3). Отсюда следует, что с уменьшением размера частиц сила отрыва уменьшается в большей степени, чем сила адгезии, и что мелкие частицы оторвать от поверхности труднее, чем крупные.

Формула (1.8) не учитывает влияния на величину силы адгезии капиллярных и электрических сил.

Силу аутогезии в общем виде можно рассматривать, как сумму двух сил

$$F_{ay} = F_p + F_{np}, \text{ Н}, \quad (1.9)$$

где F_p – равновесная сила, Н;

F_{np} – неравновесная сила, Н [7].

Равновесная сила определяется ван-дер-ваальсовыми и кулоновскими взаимодействиями и возникает до соприкосновения частиц между собой. Она достигает максимального значения при их непосредственном контакте и зависит от свойств контактирующих тел.

Неравновесная сила вызывается капиллярными, электрическими силами, силами когезии и механического зацепления и возникает в результате контакта частиц между собой.

В зависимости от природы сил, вызывающих аутогезию, различают несколько видов контакта между частицами. Контакты за счет воздействия ван-дер-ваальсовых и электрических сил получили название коагуляционных.

При действии когезионных сил на площади в одну или несколько атомных ячеек, возникающие контакты называются точечными, а при действии этих сил на площади, соответствующей значительному числу ячеек, – когезионными.

В случае образования между частицами мостиков из твердого вещества возникают фазовые контакты. Если эти мостики образовались в результате кристаллизации, их иногда называют кристаллизационными.

Аутогезия в значительной степени определяется температурой и влажностью окружающей среды. Температура влияет на упругопластические свойства частиц и образование адсорбционных слоев, которые, в свою очередь, зависят от величины молекулярных сил. Влажность среды определяет количество воды в зоне контактов и влияет на величину электрических сил. При наличии влаги может происходить растворение материала частиц с образованием мостиков фазового контакта. Возникновение твердых мостиков фазового контакта между частицами возможно в результате протекания химических реакций, которые также активируются в условиях повышенной температуры и влажности.

Прочность индивидуальных контактов между частицами может быть увеличена за счет воздействия внешней силы – силы поджима частиц друг к другу. В результате подобного сближения частиц увеличиваются молекулярные силы и площадь контакта между частицами. Упрочнение контактов при поджиме характерно в большей степени для пластичных частиц и в меньшей степени – для упругих и твердых частиц.

Зависимость прочности контактов от действия различных сил в этом случае можно представить в виде

$$F_{ay} = B(F_{II} + F_{ay0})^h, \quad (1.10)$$

где F_{Π} – сила поджима, Н;

F_{ay0} – сила аутогезии без учета воздействия внешних сил, Н;

B и h – коэффициенты, определяемые экспериментально.

При обычных условиях $F_{ay0} \ll F_{\Pi}$, и поэтому можно считать, что

$$F_{\Pi} + F_{ay0} \approx F_{\Pi}.$$

Если сила поджима отсутствует, то частицы прижимаются друг к другу только под действием сил аутогезии. Тогда справедливо выражение

$$F_{ay} = B \frac{h}{1-h}. \quad (1.11)$$

По уравнению (1.11) определяется некоторая начальная величина силы аутогезии для данного материала, а коэффициент h показывает изменение аутогезии в зависимости от условий формирования контакта. Сила аутогезии играет важную роль при оценке таких процессов, как коагуляция, осаждение и вторичный унос взвешенных частиц [7].

В процессе пылеулавливания после достижения взвешенными частицами поверхности осаждения происходит их закрепление на этой поверхности с последующим удалением (смыванием, стряхиванием, выгрузкой) пылевого слоя. Роль адгезионных сил проявляется лишь на стадии начального напыления, когда частицы осаждаются на чистую поверхность. В этот момент возникают адгезионные силы между твердой поверхностью и монослоем частиц, непосредственно контактирующим с ней. После образования монослоя закрепление вновь осаждающихся частиц обуславливается силами аутогезии. Стадия начального запыления имеет существенное значение только для волокнистых нерегенерируемых фильтров, работающих при малых концентрациях взвешенных частиц. Обычно в промышленности стадия начального запыления проходит очень быстро и только на новых осадительных поверхностях. Монослой удерживается на осадительной поверхности очень прочно, и традиционными способами регенерации удалить его практически невозможно. Более того, в подавляющем большинстве технологических процессов это нежелательно.

От величины сил аутогезии зависит толщина прочных трудноразрушаемых отложений пыли на внутренних поверхностях аппаратов и газоходов.

На практике аутогезионные свойства частиц чаще определяются термином «слипаемость». Повышенная слипаемость частиц пыли может привести к частичному или полному забиванию пылеулавливающих аппаратов улавливаемым продуктом. Поэтому для многих пылеулавливателей и выгрузных устройств установлены определенные границы применимости в зависимости от слипаемости улавливаемой пыли. Для установления таких границ обычно используется условное разделение пылей по степени слипаемости на четыре группы:

- сильнослипающиеся (влажная цементная пыль; клинкерная пыль; гипсовая и алебастровая пыли; нитрофоска; двойной суперфосфат; волокнистые пыли (асбест, хлопок, шерсть); пыль с максимальным размером частиц 10 мкм);
- среднеслипающиеся (летучая зола без недожога; торфяная зола и пыль; влажная магнезитовая пыль; металлическая пыль; колчеданы; оксиды свинца, цинка, олова; сухой цемент; сажа; «сухое» молоко; мучная пыль; опилки; пыль с максимальным размером частиц 25 мкм);
- слабослипающиеся (летучая зола, с недожогом более 30 %; коксовая пыль; магнезитовая сухая пыль; сланцевая зола; апатитовая сухая пыль; доменная пыль; колошниковая пыль);
- неслипающиеся (сухая шлаковая пыль; кварцевая пыль - песок сухой; сухая глина).

Считается, что степень слипаемости влажной пыли возрастает, и пыль перемещается на один класс вверх по приведенной выше классификации. Слипaeмость возрастает и с уменьшением размера частиц.

Слипaeмость пыли влияет на выбор конструктивных особенностей пылеуловителей, направляющего механизма в элементах батарейных циклонов, способа регенерации в тканевых фильтрах и электрофильтрах. При

улавливании сильнослипающихся пылей рекомендуется бункеры аппаратов оборудовать специальными ворошителями.

1.3.3. Сыпучесть и угол естественного откоса

Со слипаемостью тесно связана другая характеристика пыли – ее сыпучесть. Сыпучесть характеризует подвижность частиц относительно друг друга и их способность перемещаться под действием внешней силы. Этот параметр играет важную роль в операциях, связанных с уловленной пылью. Сыпучесть порошкообразных материалов зависит от размера частиц, их влажности, степени уплотнения и оценивается по углу естественного откоса пыли в свеженасыпанном состоянии. Сыпучесть характеризует поведение пыли в бункерах пылеулавливающих установок; от нее, в частности, зависят крутизна стенок бункеров и диаметры выпускных отверстий.

На практике различают статический и динамический углы естественного откоса.

Статический угол естественного откоса характеризует угол наклона поверхности материала, образующийся в результате обрушения слоя частиц при удалении подпорной стенки. Поэтому статический угол естественного откоса иногда называют углом обрушения (рис. 1.4).

Динамический угол естественного откоса определяется измерением угла, под которым располагается наружная поверхность зернистого материала при падении частиц на плоскость (см. рис. 1.4). Динамический угол естественного откоса всегда меньше статического [1].

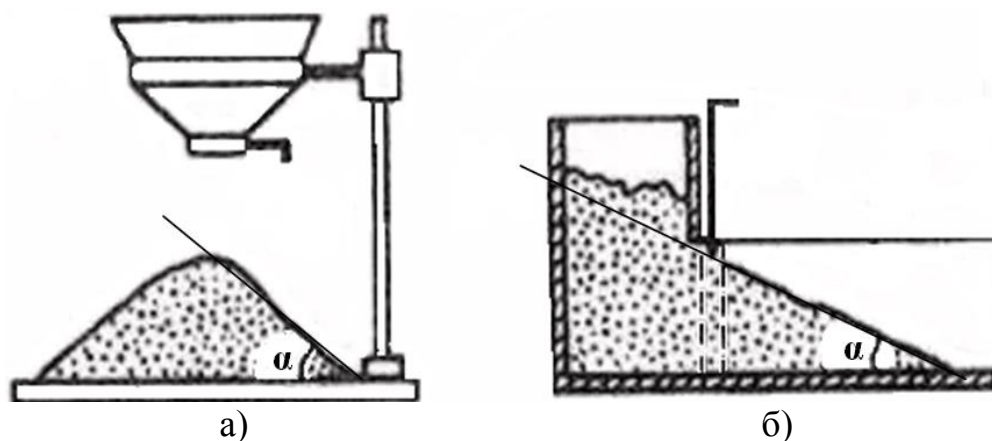


Рис. 1.4. Углы естественного откоса пыли:

а – динамический; б – статический; α – угол естественного откоса

1.3.4. Абразивность частиц

Абразивность пыли характеризует интенсивность изнашивания металла при одинаковых скоростях газов и концентрациях частиц пыли. Частицы, имеющие острые грани, при прочих равных условиях, разрушают стенки металлических газоходов более чем в 10 раз быстрее, чем частицы шарообразной формы.

Абразивность улавливаемой пыли учитывается при выборе скорости движения запыленных газовых потоков в элементах пылеулавливающих установок, толщины стенок аппаратов и газоходов, а также при выборе материала их внутренних покрытий.

В первом приближении, абразивный износ пропорционален запыленности, времени воздействия и скорости газового потока, возведенной в третью степень. На основании экспериментальных исследований была предложена формула для оценки глубины износа поверхности металла при абразивном воздействии пыли [7]:

$$h = \frac{\varepsilon \cdot z \cdot \omega_r^3 \cdot \tau \cdot k_{аб}}{g}, \text{ м}, \quad (1.12)$$

где ε – вероятность попадания частиц на изнашиваемую поверхность;

z – концентрация пыли (запыленность), кг/м^3 ;

ω_r – скорость газового потока, м/с ;

τ – время воздействия частиц на изнашиваемую поверхность, с ;

$k_{аб}$ – коэффициент абразивности пыли для определенного материала поверхности, $\text{м}^2/\text{кг}$;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2 .

Вероятность попадания частиц на изнашиваемую поверхность для случая движения пылегазового потока по изогнутому колену (отводу) лежит в пределах $0,5 \div 1,0$.

Коэффициент абразивности пыли зависит от химического состава пыли, твердости, формы, плотности и размеров частиц и в каждом конкретном случае определяется экспериментально. Зная величину $k_{аб}$ и задаваясь

вероятностью попадания частиц, можно оценить продолжительность работы аппарата до величины допустимого (предельного) абразивного износа его стенок. Для этого формула (1.12) решается относительно времени воздействия:

$$\tau = \frac{h_{\text{пр}} g}{\varepsilon \cdot Z \cdot \omega_r^3 \cdot k_{\text{аб}}}, \text{ с.} \quad (1.13)$$

Износ стенок пылеуловителей зависит также от угла удара (атаки), под которым частицы воздействуют на поверхность. В зависимости от угла атаки (α) выделяются два различных механизма износа. Первый происходит при нанесении по поверхности более или менее перпендикулярных ударов, причиной второго является трение частиц о поверхность. Износ за счет трения достигает максимума при угле атаки около 30° и практически прекращается при $75 < \alpha < 85^\circ$. Износ за счет удара максимален при угле удара 90° , он более интенсивен для твердых металлов, чем для мягких. Для одних и тех же металлов, при идентичности по составу и характеру движения пылегазового потока, интенсивность обоих видов износа будет зависеть исключительно от угла атаки, причем эта зависимость более резко проявится в случае износа за счет трения.

Установлено, что при больших значениях угла атаки износ связан с постепенной деформацией материала стенки пылеуловителя, в то время как при его малых значениях происходят микроскопические срезы поверхности. Это обстоятельство объясняет, почему наибольшим сопротивлением износу при больших значениях угла атаки обладают относительно мягкие и ковкие металлы, а при малых значениях — твердые и хрупкие. Частицы, ударяющиеся о мягкий, ковкий металл под углом, близким к 90° , деформируют его на некоторую глубину, постепенно ослабляя свое воздействие по мере продвижения вглубь металла. При воздействии под большим углом атаки множества частиц на твердые металлы на их поверхности образуются микротрещины, которые постепенно множатся и расширяются.

В случае малых значений угла атаки очень твердые металлы обладают высоким сопротивлением износу, так как взвешенные частицы оказываются не в состоянии пронизать их поверхность. Эрозия в этом случае происходит только тогда, когда частицы значительно тверже, чем материал стенок пылеуловителя. Износ возрастает более или менее линейно с увеличением размера частиц, так как с увеличением массы растет энергия удара [7].

Абразивный износ особенно проявляется при очистке газов в сухих пылеуловителях, например, в циклонах.

1.3.5. Смачиваемость частиц

Способность к смачиванию определяется явлением поверхностного натяжения жидкости, под которым понимается сила, обуславливающая сокращение поверхности жидкости на границе раздела фаз. Эта сила направлена тангенциально к поверхности жидкости и представляет собой отношение усилия, с которым поверхностная пленка действует на ограничивающий ее контур, к длине этого контура. В случае однокомпонентной жидкости эта сила численно равна энергии, необходимой для дробления жидкости.

Все молекулы жидкости взаимодействуют с молекулами твердого тела сильнее, чем между собой, жидкость растекается по поверхности твердого тела, смачивая его. В противном случае смачивания не происходит, жидкость собирается на поверхности в каплю. Соотношение сил поверхностного натяжения на разграничивающих поверхностях определяет способность тел к смачиванию. На рис. 1.5. приведена схема смачивания водой частиц прямоугольной формы.

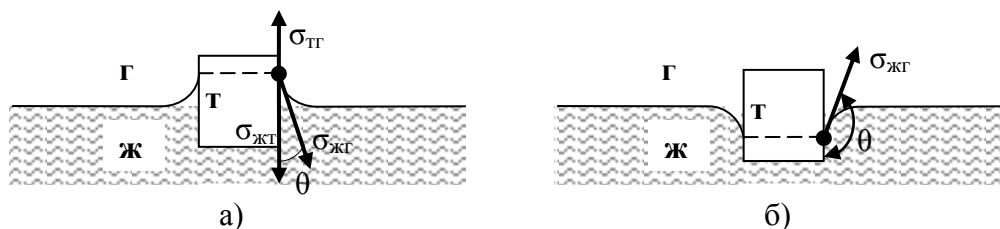


Рис. 1.5. Схема смачивания частиц при их погружении в воду:
а – смачивающиеся частицы; б – несмачивающиеся частицы;
г – газообразная среда; ж – жидкость; т – твердая частица

Периметр смачивания частиц (пунктирная линия на рис. 1.5) является границей взаимодействия трех сред: воды, воздуха и твердого тела. Эти среды имеют разграничивающие их поверхности: поверхность жидкость-воздух с поверхностным натяжением $\sigma_{жг}$; поверхность воздух-твердое тело с поверхностным натяжением $\sigma_{тг}$ и поверхность жидкость-твердое тело с поверхностным натяжением $\sigma_{жт}$. Таким образом, на единицу длины периметра смачивания действуют три силы, направленные по касательной к соответствующей поверхности раздела и перпендикулярно к периметру смачивания: силы $\sigma_{жт}$ и $\sigma_{тг}$ действуют в плоскости поверхности твердого тела, а сила $\sigma_{жг}$ направлена под углом θ , называемым углом смачивания или краевым углом. Если пренебречь силой тяжести и подъемной силой воды, то при образовании равновесного угла θ все три силы должны уравниваться. Условие равновесия сил выражается уравнением Юнга.

$$\sigma_{тг} = \sigma_{жт} + \sigma_{жг} * \cos \theta. \quad (1.14)$$

Из уравнения (1.14) следует, что

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{тг} - \sigma_{жт}}{\sigma_{жг}}. \quad (1.15)$$

Величина $\cos \theta$ может изменяться от 1 до (-1), а угол θ - от 0 до 180°. Значения $\theta > 90^\circ$ соответствуют случаю, когда частицы смачиваются плохо. Полного несмачивания, когда $\theta = 180^\circ$, практически не наблюдается, так как между жидкостью и твердым телом всегда действуют силы притяжения. Несмачивающиеся (гидрофобные) частицы поддерживаются на поверхности воды силами поверхностного натяжения, вертикальная составляющая которых суммируется к подъемной силе (рис. 1.5б). Если сумма этих трех сил превышает силу тяжести, частица остается на поверхности воды. При $\theta > 90^\circ$ сферическая частица всплывает настолько, что ее экватор располагается выше уровня воды. С уменьшением размеров сферических частиц сила тяжести уменьшается пропорционально d_q^3 , а вертикальная составляющая сил поверхностного натяжения – пропорционально d_q . Благодаря этому

определенные фракции мелкодисперсных гидрофобных пылей будут оставаться на поверхности воды.

Смачивающиеся (гидрофильные) частицы втягиваются в воду силой поверхностного натяжения, действующей на границе раздела фаз: воздух-вода (рис.1.5а). Если плотность частицы больше плотности воды, к этой силе прибавляется сила тяжести, и частица погружается в воду. Если плотность частицы меньше плотности воды, вертикальная составляющая сил поверхностного натяжения уменьшается на подъемную силу воды, и их соотношение определяет поведение частицы.

По характеру смачивания все твердые тела разделяют на три основные группы:

1. Гидрофильные материалы – материалы, которые хорошо смачиваются водой: кальций, кварц, большинство силикатов и окисленных минералов, галогениды щелочных металлов. Например, краевой угол θ у кварца и стекла – 0° , у пирита – 30° .

2. Гидрофобные материалы – материалы, которые плохо смачиваются водой: графит, уголь, сера. Краевой угол θ у графита – 60° , у талька – 70° , у серы – 80° .

3. Абсолютно гидрофобные тела. К ним относятся: парафин, тефлон, битумы. Краевой угол θ у парафина – 105° .

Практикой установлено, что способность твердых тел к смачиванию уменьшается с увеличением их дисперсности. Даже такой исключительно гидрофильный материал, как кварц, после дробления становится трудносмачиваемым. Частицы размером меньше 10 мкм, и особенно меньше 5 мкм, считаются несмачиваемыми независимо от их состава.

Гидрофобность смачиваемых частиц может возникнуть при покрытии их масляной пленкой. В этом случае их масса уравнивается не силами поверхностного натяжения, а силой давления воды, равной массе вытесненного объема жидкости. Силы же поверхностного натяжения слоя

молекул углеводов (масла) препятствуют затеканию воды на поверхность плавающих тел.

Гидрофобными иногда становятся частицы гидрофильных материалов из-за образования на поверхности частиц электрического заряда, одноименного с зарядом на поверхности воды, а также вследствие адсорбции на поверхности частиц слоя молекул воздуха, препятствующих их смачиванию.

Способностью плавать в полупогруженном состоянии обладают все достаточно мелкие частицы с выпуклым контуром (цилиндрические, шарообразные), в том числе смачивающиеся, если только краевой угол не равен нулю. Повышенной плавучестью обладают и хлопьевидные агрегаты (волокна).

Смачиваемость частиц играет важную роль в мокром пылеулавливании, влияет на гидропылеудаление из бункеров пылеуловителей, а также определяет пригодность мокрых способов пылеподавления и уборки запыленных помещений.

Поскольку в промышленности для мокрой очистки газов от взвешенных частиц применяется практически только вода, представляет интерес рассмотрение возможных способов уменьшения поверхностного натяжения воды на границе с частицей, т.е. увеличения смачиваемости частиц водой. Теоретически это может быть достигнуто тремя способами: нагревом воды, диспергированием мельчайших частиц в воду, добавлением смачивателей (поверхностно-активных веществ – ПАВ).

Использование нагретой воды на практике целесообразно только при обработке горючих газов и при условии ее рециркуляции. Но и в этом случае температура воды не должна превышать 60 °С, что позволит снизить величину поверхностного натяжения воды только на 10^{-2} Н/м (при начальной температуре 20 °С).

Диспергирование твердых частиц в воду может способствовать уменьшению поверхностного натяжения на границе жидкости и воздуха,

если частицы чрезвычайно малы (микронные или субмикронные). Однако этот способ снижения поверхностного натяжения неприменим в очистке промышленных выбросов.

Оптимальным способом снижения поверхностного натяжения воды является добавление в нее ПАВ. Однако при контакте воды, содержащей ПАВ, с запыленным газовым потоком возможно образование пены, что может значительно осложнить как эксплуатацию мокрых пылеуловителей, как и последующую обработку отходящей из аппаратов воды. Поэтому обычно ПАВ применяются в сочетании с пеногасителями.

1.3.6. Гигроскопичность и растворимость частиц

Гигроскопичность характеризует способность частиц поглощать влагу из воздуха, а *растворимость* – их способность при контакте с жидкостью образовывать растворы. Эти свойства частиц определяются их химическим составом, размером, формой и степенью развитости поверхности частиц, а также физическим и химическим сродством молекул растворителя и растворяемого вещества.

Во влажной газообразной среде на поверхности частиц, растворимых в воде, образуется насыщенный водный раствор вещества, из которого они состоят. Если парциальное давление паров воды над этим раствором меньше парциального давления паров воды в окружающем газе, пары воды из газа будут поглощаться веществом.

Для не растворимых в воде веществ процесс поглощения влаги первоначально происходит благодаря адсорбции молекул воды поверхностью частиц, после чего дополнительное поглощение влаги осуществляется под действием капиллярных сил и диффузии. В обоих случаях поглощение влаги продолжается до установления равенства парциальных давлений паров воды над пылью и в окружающем ее газе.

Гигроскопичность и растворимость частиц способствуют их улавливанию в аппаратах мокрой очистки. Эффективность использования гигроскопичности и растворимости частиц для их осаждения возрастает с

увеличением влагосодержания запыленного газового потока. В этом случае постепенная конденсация паров растворителя на частице может привести к ее полному растворению, причем на первой стадии процесса будет наблюдаться растворение твердого вещества в капле до полного исчезновения твердой фазы, а на второй – уменьшение концентрации растворяемого вещества в капле за счет продолжающейся концентрации в ней паров растворителя.

Каждой относительной влажности газа соответствует определенное содержание влаги в сыпучем материале, называемое равновесной влажностью сыпучего материала. Равновесие между относительной влажностью воздуха и влажностью материала описывается характерными для каждого вещества изотермами сорбции. Анализ этих изотерм позволяет предсказать поведение улавливаемой пыли в аппаратах, бункерах, пылевыгрузных устройствах при различной относительной влажности газового потока.

Содержание влаги в пыли характеризуется влагосодержанием или влажностью. Влагосодержание – это отношение массы влаги в пыли к массе абсолютно сухой пыли. Влажность определяется отношением массы влаги в пыли к общей массе влажной пыли.

Влага в пыли может удерживаться на поверхности частиц благодаря адсорбционным связям, а также заполнять поры и капилляры при непосредственном контакте с ней воды. В последнем случае свободная влага может перемещаться в порах материала в виде жидкости или пара. Эта влага, удерживаемая на поверхности, в порах и капиллярах, получила название гигроскопической и может быть удалена сушкой материала [1].

1.3.7. Электрические свойства частиц

Взвешенные частицы могут иметь положительный или отрицательный заряд или быть электронейтральными. Знак заряда частиц зависит от механизма их образования, химического состава, а также свойств веществ и поверхностей, с которыми они соприкасаются.

В процессе образования частицы могут заряжаться в результате передачи электронов трущимися поверхностями, а также вследствие передачи электронов при отрыве частиц друг от друга при диспергировании. В большинстве случаев неметаллические взвешенные частицы в естественных условиях заряжаются положительно, а металлические – отрицательно. Соли и оксиды заряжаются в зависимости от их химического состава, например, положительно заряжаются NaCl ; CaCl_2 ; а отрицательно – CaCO_3 ; Al_2O_3 ; Fe_2O_3 ; MgCO_3 . При распылении воды крупные капли заряжаются положительно, а мелкие – отрицательно. Частицы конденсационных аэрозолей, полученных при умеренных температурах, как правило, не заряжены. На взвешенных частицах, образующихся при горении или в дуговом разряде, наблюдаются большие заряды. Естественный электрический заряд взвешенных частиц носит название *трибозаряда*.

В промышленных газах число положительно заряженных частиц, получивших естественные электрические заряды, может быть равно числу отрицательно заряженных, что, как правило, наблюдается у аэрозолей, содержащих весьма мелкие частицы с однородным химическим составом. В ряде случаев в аэрозолях преобладают частицы, несущие заряд одного знака; встречаются униполярные аэрозоли, в которых все частицы имеют заряд одного знака.

Электрические заряды можно сообщать взвешенным частицам и искусственно, например, воздействием на газы различных ионизаторов, использованием коронного заряда, созданием контакта с заряженными телами. Заряд частиц с течением времени может меняться в связи с их агрегированием, но, главным образом, благодаря захвату газовых ионов.

Электрический заряд частиц оказывает значительное влияние на их поведение в газоходах и воздуховодах, эффективность их улавливания в газоочистных аппаратах, на взрывоопасность, аутогезионные свойства, сыпучесть. Например, поверхностная плотность заряда частиц из диэлектрических материалов может быть выше $3 \cdot 10^{-9}$ Кл/см², что превышает

пробивное сопротивления воздуха. В этом случае происходит искровой разряд, который может привести к воспламенению аэрозоля. Кроме того, в бункерах электрофильтров свежееуловленная пыль, сохраняя электрический заряд одного знака, имеет угол естественного откоса, близкий к нулю, т.е. ведет себя почти как жидкость, а через несколько часов, после потери частицами электрического заряда, угол естественного откоса становится близким к 50° , достигая в отдельных случаях 90° .

Существенное значение при определении возможной величины электрического заряда частицы принадлежит параметру, получившему название «*диэлектрическая проницаемость*».

Для различных сред величина диэлектрической проницаемости рассчитывается по формуле

$$\epsilon_{\text{ср}} = \epsilon \cdot \epsilon_0, \text{ Ф/м}, \quad (1.16)$$

где ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемости (в вакууме), Ф/м,
 $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз диэлектрическая проницаемость данной среды больше, чем в вакууме.

Относительная диэлектрическая проницаемость для газов мало отличается от единицы и может быть рассчитана из соотношения

$$\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} = K_\epsilon \rho_{\text{ср}}, \quad (1.17)$$

где K_ϵ - константа, определяемая средой, $\text{м}^3/\text{кг}$;

$\rho_{\text{ср}}$ – плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В случае воздуха $K_\epsilon = 1,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$.

В условиях, характерных для работы электрофильтров, величина относительной диэлектрической проницаемости для газовой среды может быть принята равной 1. Плотность твердых и жидких частиц мало зависит от изменения температуры и давления, поэтому их относительная диэлектрическая проницаемость в условиях работы электрофильтров будет

определяться исключительно химическим составом частиц. Например, для сырой резины относительная диэлектрическая проницаемость составляет $2,0 \div 3,5$, для частиц золы – 3, для оксидов металлов – $12 \div 18$, а для капель воды – 81. Относительная диэлектрическая проницаемость агрегированной частицы, состоящей из разных веществ, будет определяться ее составляющими. Необходимо отметить, что относительная диэлектрическая проницаемость воды значительно больше, чем у твердых частиц, поэтому с увеличением влажности частиц их относительная диэлектрическая проницаемость будет резко возрастать.

Эффективность работы установок электрической очистки выбросов зависит от электрической проводимости пыли.

Электрическая проводимость пыли характеризуется величиной *удельного электрического сопротивления* (УЭС) слоя пыли – сопротивлению прохождения электрического тока через куб пыли со стороной, равной 1 м.

По величине УЭС пыли обычно разделяют на три группы (табл. 1.4).

Таблица 1.4

Классификация пылей по электрической проводимости

Название группы пылей	УЭС, Ом·м
Хорошо проводящая	$<10^4$
Средней проводимости	$10^4 - 10^{10}$
Высокоомная	$>10^{10}$

Хорошо проводящие частицы пыли при соприкосновении с осадительным электродом почти мгновенно отдают свой заряд, перезаряжаются и, отталкиваясь от электрода, возвращаются в газовой поток. В газовом потоке частицы вновь заряжаются и опять направляются к осадительным электродам. Таким образом, хорошо проводящие частицы совершают скачкообразные перемещения по мере продвижения газового потока через электрофильтр. Для того чтобы задержать частицы на поверхности осадительных электродов, применяют специальные конструкции электродов, например, карманные, желобчатые.

Пыли второй группы хорошо улавливаются в электрофильтре, так как при осаждении на электроде разрядка частиц происходит не сразу, а в течение определенного времени, необходимого для накопления слоя.

Улавливание высокоомной пыли в процессе электрической очистки газов представляет большие трудности. Частицы подобной пыли при осаждении на электроде образуют пористый изолирующий слой. При повышении некоторого критического значения напряжённости электрического поля происходит электрический пробой пористого слоя с образованием тонкого канала, заполненного положительными ионами. Этот канал выполняет роль острия, на котором возникает мощный обратный коронный разряд, действующий навстречу основному, что приводит к резкому снижению эффективности электрофильтра.

На величину УЭС пыли влияют характеристики газового потока (температура, влажность, химический состав) и характеристики частиц (дисперсность, форма, химический состав, структура слоя).

На рис. 1.6 приведена зависимость скорости осаждения частиц от УЭС улавливаемой пыли, которое, в свою очередь, зависит от температуры очищенных газов. На рис. 1.7 приведены зависимости УЭС некоторых пылей от температуры при постоянной влажности. По приведенным данным видно, что, изменяя температуру очищаемых газов, можно снизить УЭС улавливаемой электрофильтром пыли и тем самым повысить эффективность работы электрофильтра.

Электропроводность частиц подразделяется на поверхностную и объёмную. Поверхностная электропроводность, при которой электрические заряды передаются по поверхностным оболочкам окружающим частицам, зависит от свойств поверхности частиц. Объёмная электропроводность, т.е. движение электрических зарядов внутри частиц, зависит от их состава и температуры, а также от компактности частиц, их размеров, формы и других факторов.

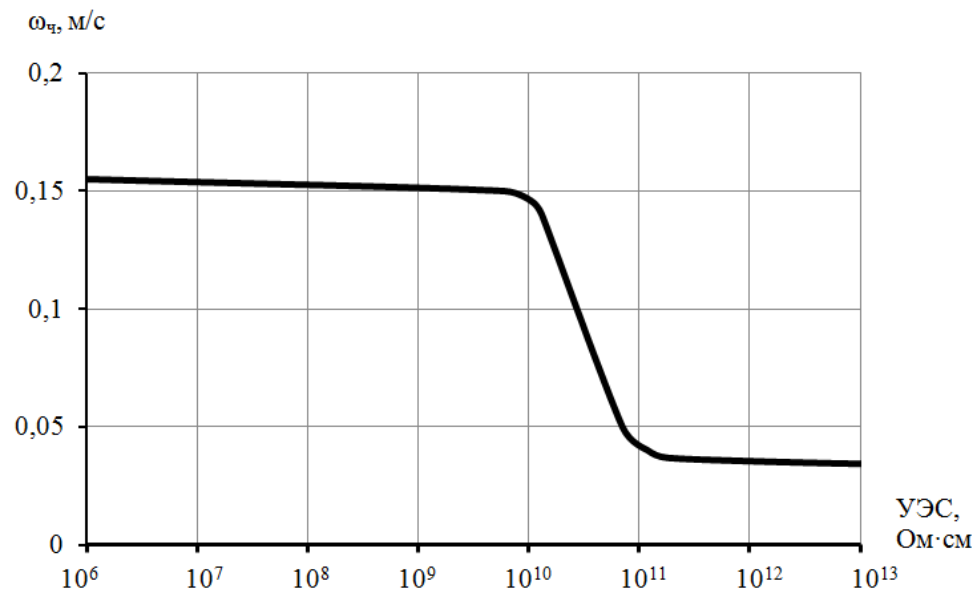


Рис.1.6. Зависимость скорости осаждения частиц в электрофилт্রে от величины УЭС

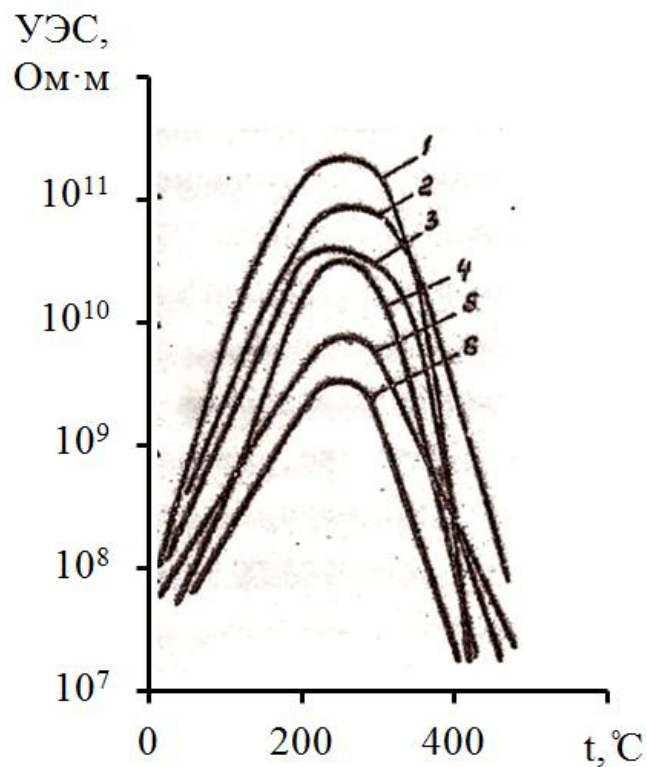


Рис.1.7. Зависимость УЭС пыли от температуры газов при постоянной влажности: 1— магнезитовая пыль; 2 — и 6 — цементная пыль; 3 — зола подмосковного угля; 4 — доломитовая пыль; 5 — пыль катализатора

Подобный подход к электропроводности частиц позволяет объяснить зависимость УЭС от температуры (см. рис. 1.7). При низких температурах (левая часть кривых) частицы адсорбируют из газов (воздуха) значительное количество паров воды или других жидкостей и поэтому имеют

сравнительно низкое электрическое сопротивление. По мере нагревания материала адсорбированная влага испаряется, и его сопротивление возрастает. Дальнейшее повышение температуры приводит к уменьшению электрического сопротивления, благодаря тепловому возбуждению электронов в частицах. Таким образом, данная кривая отражает два существенно отличающихся вида электропроводности частиц: поверхностную – при более низких температурах и объёмную – при высоких температурах. Снизить величину УЭС можно за счёт ввода в газовый поток кондиционирующих реагентов, в качестве которых выступают водяные пары и различные химические соединения.

На рис. 1.8 приведена зависимость УЭС пыли от влажности очищаемых газов. Снижение УЭС пыли в этом случае происходит за счет увеличения поверхностной электропроводности частиц из-за образования на их поверхности плёнки из молекул воды.

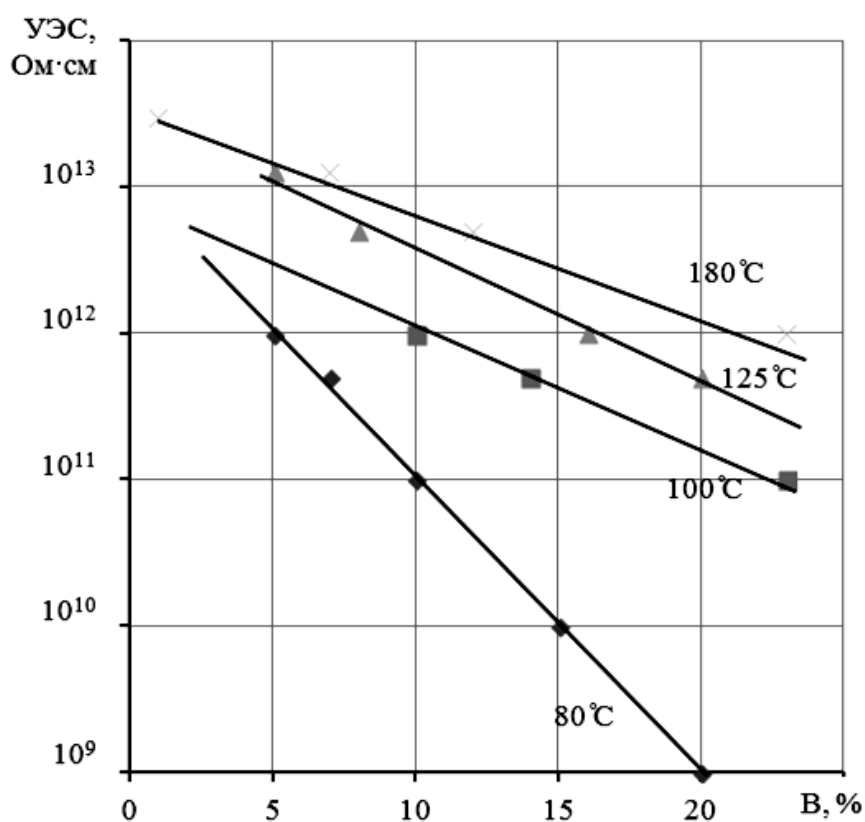


Рис.1.8. Зависимость УЭС пыли от влажности газов и температуры (на примере золы угля)

Влажностно-температурное кондиционирование нашло применение в системах электрической очистки газов, образующихся при сжигании в котельных установках углей с большим содержанием золы.

Среди кондиционирующих реагентов, которые могут быть с успехом применены в различных условиях на практике: сульфаминовая кислота, бисульфит аммония, сульфат аммония, серная кислота, хлорид и сульфат натрия, хлорид кальция, аммиак.

Действие реагентов химического кондиционирования газов усиливается с повышением влажности газов и понижением их температуры. Поэтому водяные пары называют реагентами первичного кондиционирования, а химические вещества – реагентами вторичного кондиционирования. Поверхностная электропроводность частиц во всех случаях обуславливается наличием пленок адсорбционной влаги, реагенты вторичного кондиционирования связывают поверхность частиц с плёнками влаги. Этим объясняется эффективность реагентов химического кондиционирования при весьма малой их концентрации в очищаемых газах [1].

1.3.8. Возгораемость и взрывоопасность аэрозолей

Многие виды пылей из-за сильно развитой поверхности частиц способны гореть, воспламеняться, образовывать с воздухом взрывоопасные смеси даже в тех случаях, когда исходный материал, из которого получена пыль, является не горючим.

Пожаровзрывоопасность веществ и материалов – совокупность свойств, характеризующих их способность к возникновению и распространению горения. Горение – экзотермическая реакция, протекающая в условиях ее прогрессивного самоускорения. Следствием горения, в зависимости от его скорости и условий протекания, могут быть пожар (диффузионное горение) или взрыв (дефлаграционное горение предварительно перемешанной смеси горючего с окислителем).

По горючести вещества и материалы подразделяют на три группы:

1) негорючие – вещества и материалы, не способные к горению в воздухе;

2) трудногорючие – вещества и материалы, способные гореть в воздухе при воздействии источника зажигания, но не способные самостоятельно гореть после его удаления;

3) горючие – вещества и материалы, способные самовозгораться, а также возгораться при воздействии источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления [8].

Воспламенение (возгорание) – это возникновение горения. В основе воспламенения и горения лежит взаимодействие пыли (порошков) с окислителями. Материалы воспламеняются в результате экзотермических процессов, например, при взаимодействии некоторых металлов с азотом (с образованием нитридов) и с углеродосодержащими газами (с образованием карбидов). Ускорение химического превращения, приводящее к воспламенению, происходит при разогреве реагирующих веществ теплотой реакции (тепловое воспламенение). При этом первоначально химическая система разогревается благодаря притоку тепла извне или в результате выделения тепла в самой системе.

Интенсивность и продолжительность горения пыли могут быть различными. Плотные массы пыли горят более медленно, а рыхлые, особенно мелкая пыль, обычно быстро возгораются во всем объёме.

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

Как видно по классификации веществ и материалов, различают два вида воспламенения: самовоспламенение и вынужденное воспламенение (зажигание). При зажигании условия для воспламенения создаются лишь в очень ограниченном объеме аэрозоля или порошка с помощью какого-либо

источника тепла: нагретого тела, электрической искры, пламени и др. Вблизи такого источника возникает пламя, распространяющееся в системе. Наибольшая температура горючего вещества, при которой вещество выделяет горючие пары или газы с такой скоростью, что после воспламенения их от внешнего источника зажигания вещество устойчиво горит, получило название *температуры воспламенения*.

При самовоспламенении происходит резкое увеличение скорости экзотермической реакции во всем объеме вещества, приводящее к его самовозгоранию. Наименьшая температура, при которой происходит самовозгорание, получила название *температуры самовоспламенения*.

В зависимости от температуры самовоспламенения, вещества делят на две группы. У первой группы веществ и, соответственно, их пылей температура воспламенения выше температуры окружающей среды, и они способны воспламеняться только в результате предварительного подвода тепла. У веществ второй группы температура самовоспламенения ниже температуры среды, и они могут воспламеняться без нагрева. Естественно, что вторая группа веществ и их пылей представляет наибольшую пожарную опасность.

Температура самовоспламенения аэрозолей значительно выше, чем порошков, образующихся при осаждении аэрозольных частиц, поскольку массовая концентрация взвешенных частиц обычно невелика, и скорость выделения тепла при реакции окисления может превысить скорость теплоотдачи только при высоких температурах среды.

Самовозгорающиеся вещества и их порошки делят на три группы:

1. Вещества, самовозгорающиеся при воздействии на них воздуха. К этим веществам относятся бурые и каменные угли, древесный уголь, фрезерный торф, сажа, опилки, сульфиды железа, цинковая и алюминиевая пыли, желтый фосфор, порошок эбонита. Причиной самовозгорания этих веществ является способность к окислению с выделением тепла при низких температурах.

2. Вещества, самовозгорающиеся при действии на них воды. В эту группу входят калий, натрий, карбиды кальция и щелочных металлов, фосфористые кальций и натрий, негашёная известь, гидросульфит натрия. Большая часть этих веществ при взаимодействии с водой выделяют водород и значительное количество тепла, в результате чего водород самовоспламеняется и горит вместе с метаном.

3. Вещества, самовозгорающиеся при смешивании друг с другом. В эту группу входят различные окислители. Например, азотная кислота, разлагаясь, выделяет кислород и может вызвать самовозгорание смолы, льна и других органических веществ.

Пыль, взвешенная в воздухе, может воспламеняться только при определенных концентрациях. Различают нижний и верхний пределы воспламенения. Диапазон концентраций пыли между пределами воспламенения, называют *диапазоном воспламенения*. Если аэрозоль горит в неограниченном пространстве, процесс протекает, как правило, без повышения давления; если же взвешенные частицы горят в замкнутом объёме, повышение давления может быть значительным. С уменьшением размера частиц, т.е. с увеличением удельной поверхности твердой фазы, растёт интенсивность выделения тепла.

Минимальная концентрация пыли в аэрозоле, при которой возможно распространение по твердой фазе пламени от источника зажигания, называется *нижним концентрационным пределом воспламенения*.

Температурой вспышки называется самая низкая температура горючего материала, при которой в условиях испытаний над его поверхностью образуется смесь паров и газов с воздухом, способная вспыхивать от источника зажигания, но скорость образования смеси еще недостаточна для последующего горения.

Наибольшую опасность представляет свойство многих пылей образовывать с воздухом взрывоопасные смеси. Первичный взрыв возникает при небольших скоплениях пыли вблизи источника воспламенения.

Взрывная волна и вибрация от первичного взрыва достаточно часто сопровождаются подъемом в воздух большой массы частиц, осевших в относительном отдалении от места первичного взрыва, что вызывает взрыв значительно большей силы.

Концентрации аэрозольных частиц, соответствующие нижним концентрационным пределам взрыва, обычно настолько значительны, что возможны только в технологическом оборудовании, пылеуловителях, газоходах, пневмотранспорте. В производственных помещениях достижение взрывоопасных концентраций взвешенных частиц возможно лишь при аварийных ситуациях. Наиболее взрывоопасные аэрозоли имеют нижний предел взрываемости до 15 г/м^3 . К ним относятся аэрозоли сахара, торфа, эбонита, серы, канифоли. Следующую группу взрывоопасных аэрозолей составляют взвешенные системы с нижним пределом взрываемости от 16 до 65 г/м^3 . К ним относятся аэрозоли алюминия, сланцев, мучная пыль, крахмал.

На взрывоопасность аэрозолей оказывает существенное влияние дисперсность аэрозольных частиц. Если размер частиц велик, взрыв становится невозможным. При исследовании взрывов угольной пыли установлена почти линейная зависимость давления в месте взрыва от удельной поверхности пыли. Кроме того, результаты исследований показывают, что некоторые ультрадисперсные аэрозоли имеют нижний концентрационный предел распространения пламени на 70 % больше, а скорость нарастания давления на 50 % больше по сравнению с грубодисперсными [9].

Взрывоопасность аэрозолей зависит также от наличия в них инертных (невоспламеняющихся) частиц, влажности и выделения горючих газов. Инертные частицы снижают взрываемость аэрозоля благодаря тому, что часть подводимого тепла расходуется на их нагрев. Результатом этого является снижение температуры аэрозоля. Влажность влияет аналогично инертным добавкам, причем влага поглощает в 5 раз больше тепла, чем

инертные частицы. Кроме того, влажность способствует слипанию мелких частиц, в результате чего уменьшается общая площадь поверхности пыли.

Выделение летучих горючих газов повышает взрывоопасность пылей. Например, установлено, что пыли каменных углей с содержанием летучих газов менее 10 % не являются взрывоопасными. По этой причине пыли антрацита и древесного угля не способны взрываться.

Максимальные взрывоопасные концентрации взвешенных в воздухе частиц соответствует условиям, когда взрыв становится невозможным. Они получили название *верхнего предела взрываемости (воспламенения)*. Верхние пределы взрываемости при рассмотрении вопросов пылеулавливания практического значения не имеют [4].

Чем больше содержание кислорода в газовой смеси, тем вероятнее взрыв и больше его сила; при содержании кислорода менее 16 % аэрозоль не взрывается.

Необходимо отметить, что показатели пожароопасности и взрывоопасности не являются константами вещества, а зависят от реальных условий: скорости отвода тепла, состава газопылевой смеси, подвода окислителя и др. Поэтому экспериментальные методы, применяемые для определения этих показателей, позволяют получить достаточно условные приближенные данные [7].

1.4. Негативное воздействие аэрозолей на человека и окружающую среду

Вещества, загрязняющие атмосферный воздух, могут оказывать на человека как специфическое, так и общетоксическое воздействие.

Для оценки степени токсичности воздействия применяют следующие показатели: *среднесмертельная концентрация* (LC_{50}) – летальная концентрация, вызывающая при вдыхании гибель 50 % подопытных животных и *пороговая концентрация* (C_{min}) – наименьшая концентрация, вызывающая тот или иной отрицательный эффект при однократном воздействии на животных. Степень опасности вещества характеризует параметр, называемый зоной однократного воздействия:

$$LC_{50}/C_{\min}=Z. \quad (1.18)$$

Вещества, загрязняющие атмосферный воздух, разделены на четыре класса опасности:

- 1-й класс – чрезвычайно опасные;
- 2-й класс – высокоопасные;
- 3-й класс – умеренно опасные;
- 4-й класс – малоопасные.

Загрязняющие атмосферный воздух вещества могут оказывать на население резорбтивное или рефлекторное вредное воздействие, которые являются лимитирующими показателями вредности.

Рефлекторное воздействие – реакция со стороны рецепторов верхних дыхательных путей: ощущение запаха, раздражение слизистых оболочек, задержка дыхания и т.п.

Резорбтивное воздействие – это возможность развития общетоксических, гонадотоксических, эмбриотоксических, мутагенных, канцерогенных и других эффектов, возникновение которых зависит не только от концентрации вещества в воздухе, но и от длительности ингаляции.

С учетом лимитирующих показателей воздействия и классов опасности загрязняющих атмосферный воздух веществ установлены их предельно допустимые концентрации.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) загрязняющего вещества в атмосферном воздухе населенных мест – концентрация, не оказывающая в течение всей жизни прямого или косвенного неблагоприятного действия на настоящее или будущие поколения, не снижающая работоспособности человека, не ухудшающая его самочувствия и санитарно-бытовых условий жизни. Нормативы ПДК имеют законодательный статус и приведены в соответствующей литературе [10].

На содержание загрязняющих веществ устанавливается два типа ПДК: в воздухе рабочей зоны производственных помещений и в атмосферном воздухе населенных пунктов (селитебной зоне).

ПДК в воздухе рабочей зоны ($ПДК_{p.з.}$) – концентрация, которая при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 ч (или другой продолжительности, но не более 41 ч в неделю) в течение всего рабочего стажа не может вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследования, в процессе работы или в отдельные сроки жизни настоящего и последующего поколений.

ПДК в атмосферном воздухе селитебной зоны ($ПДК_{a.с.}$) – максимальная концентрация примеси в атмосфере, отнесенная к среднему времени осреднения, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни человека не оказывает на него вредного влияния, включая отдаленные последствия, и на окружающую среду в целом.

Нормативы ПДК на аэрозоли в атмосферном воздухе населённых мест подразделяют на максимальные разовые ($ПДК_{м.р.}$) и среднесуточные ($ПДК_{с.с.}$). Первый из нормативов определяет допустимую величину кратковременного воздействия на человека, второй – допустимую величину длительного воздействия. Поскольку рефлекторные эффекты возникают при кратковременном воздействии веществ, данный вид воздействия лежит в основе установления максимальных разовых ПДК (20÷30 мин). С целью предупреждения развития резорбтивного действия устанавливается среднесуточная ПДК (как максимальная 24-часовая и/или как средняя за длительный период – год и более).

Значения ПДК и лимитирующие воздействия для некоторых взвешенных частиц в атмосферном воздухе населённых пунктов приведены в табл. 1.5 [10].

Таблица 1.5

Предельно допустимые концентрации некоторых твердых и жидких частиц
в атмосферном воздухе населенных пунктов

Наименование вещества	№ CAS	Формула	Величина ПДК, мг/м ³		Лимитирующий показатель вредности	Класс опасности
			м.р	с.с		
Белково-витаминный концентрат (по белку)			-	0,001	рез.	2

Наименование вещества	№ CAS	Формула	Величина ПДК, мг/м ³		Лимитирующий показатель вредности	Класс опасности
			м.р	с.с		
диВанадий пентоксид (пыль)	1314-62-1	O ₅ V ₂	-	0,002	рез.	1
Взвешенные вещества ¹			0,5	0,15	рез.	3
Взвешенные частицы размером 10 мкм (PM 10) ²	-	-	0,3	0,06	рез.	-
Взвешенные частицы размером 2,5 мкм (PM 2,5) ³	-	-	0,16	0,035	рез.	-
Мазутная зола теплоэлектростанций (в пересчете на ванадий)			-	0,002	рез.	2
Зола сланцевая			0,3	0,1	рез.	3
Угольная зола теплоэлектростанций ⁴ (с содержанием окиси кальция 35-40 %, дисперсностью до 3 мкм и ниже не менее 97 %)			0,05	0,02	рез.	2
диЖелезо триоксид, железо оксид (в пересчете на железо)	1309-37-1	Fe ₂ O ₃ , FeO	-	0,04	рез.	3
Марганец и его соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид)			0,01	0,001	рез.	2
Медь оксид (в пересчете на медь)	1317-38-0	CuO	-	0,002	рез.	2
Пыль асбестосодержащая (с содержанием хризотиласбеста до 10 %) (по асбесту)			-	0,06 волокон в мл воздуха	рез.	1
Пыль выбросов табачных фабрик (с содержанием никотина до 2,7 %) (в пересчете на никотин)			0,0008	0,0004	рефл.-рез.	4
Пыль зерновая (по массе)			0,5	0,15	рез.	3
Пыль каинита			0,5	0,1	рез.	3
Пыль калимагнезии			0,5	0,15	рез.	3
Пыль крахмала	9005-25-8	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	0,5	0,15	рез.	4
Пыль мучная			1	0,4	рез.	4
Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния в %:						
- более 70 (динас и др.)			0,15	0,05	рез.	3

Наименование вещества	№ CAS	Формула	Величина ПДК, мг/м ³		Лимитирующий показатель вредности	Класс опасности
			м.р	с.с		
- 70-20 (шамот, цемент, пыль цементного производства - глина, глинистый сланец, доменный шлак, песок, клинкер, зола, кремнезем и др.)			0,3	0,1	рез.	3
- менее 20 (доломит, пыль цементного производства - известняк, мел, огарки, сырьевая смесь, пыль вращающихся печей, боксит и др.)			0,5	0,15	рез.	3
Пыль полиметаллическая свинцово-цинкового производства (с содержанием свинца до 1 %)			-	0,0001	рез.	1
Пыль хлопковая			0,2	0,05	рез.	3

Примечания:

¹ Недифференцированная по составу пыль (аэрозоль), содержащаяся в воздухе населенных пунктов. ПДК взвешенных веществ не распространяется на аэрозоли органических и неорганических соединений (металлов, их солей, пластмасс, биологических, лекарственных препаратов и др.), для которых устанавливаются соответствующие ПДК.

² Для РМ 10 установлена предельно допустимая среднегодовая концентрация – 0,04 мг/м³.

³ Для РМ 2,5 установлена предельно допустимая среднегодовая концентрация – 0,025 мг/м³.

⁴ На примере углей Канско-Ачинского месторождения.

Названия индивидуальных веществ в графе 1 приведены, где это возможно, в соответствии с правилами Международного союза теоретической и прикладной химии, ИЮПАК (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC). Также в графе 2 табл. 1.5 указаны регистрационные номера Chemical Abstract Service (CAS) для облегчения идентификации веществ. В графе 3 приведены формулы веществ.

В табл. 1.5 в отдельную группу выделена мелкодисперсная пыль РМ 2,5 вне зависимости от её химического состава. В отличие от более крупных частиц, РМ 2,5 легко проникают сквозь биологические барьеры и поэтому представляют наибольшую угрозу здоровью. К РМ 2,5 относятся мельчайшие частицы сажи, асфальта, резины, минеральных солей, оксиды тяжелых

металлов. Кроме того, мелкодисперсные частицы сажи в атмосферном воздухе ведут себя, как сорбенты. Например, при работе двигателей внутреннего сгорания полициклические ароматические углеводороды с большим молекулярным весом сорбируются на частицах сажи, что значительно повышает её токсичность. Важно также отметить, что частицы РМ 2,5 имеют очень низкую скорость осаждения. Совокупность вышеперечисленных факторов приводит к хронической интоксикации населения городов [2].

Если на территории населенного пункта существует еще несколько источников загрязнения атмосферы аэрозолями, помимо рассматриваемого, этими источниками создается фоновое загрязнение атмосферного воздуха. В этом случае должно соблюдаться условие [11]

$$C + C_{\phi} \leq \text{ПДК}, \text{ мг/м}^3. \quad (1.19)$$

2. СОПРОТИВЛЕНИЕ ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДЫ ДВИЖЕНИЮ ЧАСТИЦ

Для отделения частиц от газообразной среды необходимо преодолеть сопротивление газового потока. Поэтому необходимо уметь рассчитывать величину силы сопротивления газообразной среды выделению из потока взвешенных частиц.

Поскольку к промышленным аэрозолям относятся системы, в которых возможный диапазон изменения размера взвешенных частиц составляет более четырёх порядков, то величину силы сопротивления газообразной среды движению частиц приходится описывать несколькими формулами.

К наиболее общему случаю для выражения силы сопротивления газообразной среды движению частиц относится формула Стокса, которая получена как частный случай из уравнения Навье-Стокса.

Формула Стокса справедлива при размерах взвешенных частиц в диапазоне $1 \leq d_q \leq 70$ мкм и значениях критерия Рейнольдса для частицы $Re_q \leq 0,5$ и имеет вид

$$F_c = 3 \cdot \pi \cdot \mu_z \cdot d_q \cdot \omega_q, \text{ Н}, \quad (2.1)$$

где F_c – сила сопротивления, действующая на частицу при ее движении, Н;

μ_z – динамическая вязкость газа, Па·с;

d_q – размер частицы, м;

ω_q – скорость движения частицы, м/с.

Причем критерий Рейнольдса для частицы вычисляется по формуле

$$Re_q = \frac{\omega_q \cdot d_q \cdot \rho_z}{\mu_z}, \quad (2.2)$$

где ρ_z – плотность газа, кг/м³.

В формуле (2.1) сила сопротивления прямо пропорциональна размеру частиц и скорости газового потока. При этом чрезвычайно малое значение критерия Рейнольдса объясняется весьма малыми значениями определяющего размера частиц. Действительно, для $d_q = 1 \cdot 10^{-6}$ м = 1 мкм при $\omega_q = 1$ м/с, $\mu_z = 17,0 \cdot 10^{-6}$ Па·с и $\rho_z = 1$ кг/м³ величина $Re_q = 0,06$.

Для области размеров частиц $0,2 \leq d_q < 2$ мкм формула (2.1) принимает вид

$$F_c = \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu_g \cdot d_q \cdot \omega_q}{C_k}, \text{ Н}, \quad (2.3)$$

где $C_k \geq 1$ – поправка Кенингема – Милликена, учитывающая повышение подвижности частиц, размер которых сравним со средней длиной пробега газовых молекул.

Поправка C_k рассчитывается по формуле

$$C_k = 1 + \frac{2l_i}{d_q} (1,257 + 0,4 \cdot e^{-1,1 \cdot \frac{d_q}{2l_i}}), \quad (2.4)$$

где l_i – средняя длина пробега молекул газа, м.

В табл. 2.1 приведены значения поправок C_k в соответствии с уравнением (2.4) для воздуха при нормальных условиях [1].

Таблица 2.1

Значения поправки Кенингема-Милликена для некоторых размеров частиц

d_q , мкм	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	10,0
C_k	90,0	24,5	7,9	2,9	1,57	1,16	1,03	1,0

Формула (2.3) широко применяется при расчете силы сопротивления частиц, относящихся по классификации аэрозолей к дымам.

Для области значений критерия Рейнольдса $0,5 < Re_q \leq 3,0$ формула Стокса применяется с поправкой, предложенной Осеевым

$$F_c = \frac{3 \cdot \pi \cdot \mu_g \cdot d_q \cdot \omega_q}{1 + \frac{3}{16} Re_q}, \text{ Н}, \quad (2.5)$$

где $(1 + \frac{3}{16} Re_q)$ – поправка Осеева.

При значении $Re_q > 3,0$ сила сопротивления среды движению частиц рассчитывается по формуле Ньютона (пример для условно шарообразной частицы)

$$F_c = \Psi_q \cdot S_q \cdot P_\partial = \Psi_q \cdot \frac{\pi \cdot d_q^2}{4} \cdot \frac{\rho_g \cdot \omega_q^2}{2}, \text{ Н}, \quad (2.6)$$

где Ψ_q – безразмерная величина, называемая коэффициентом лобового сопротивления частицы;

S_q – наибольшая площадь поперечного сечения частицы, м²;

P_d – динамический напор (давление) газообразной среды, Па.

Коэффициент Ψ_q зависит от величины критерия Рейнольдса. Эта зависимость приведена на рис. 2.1.

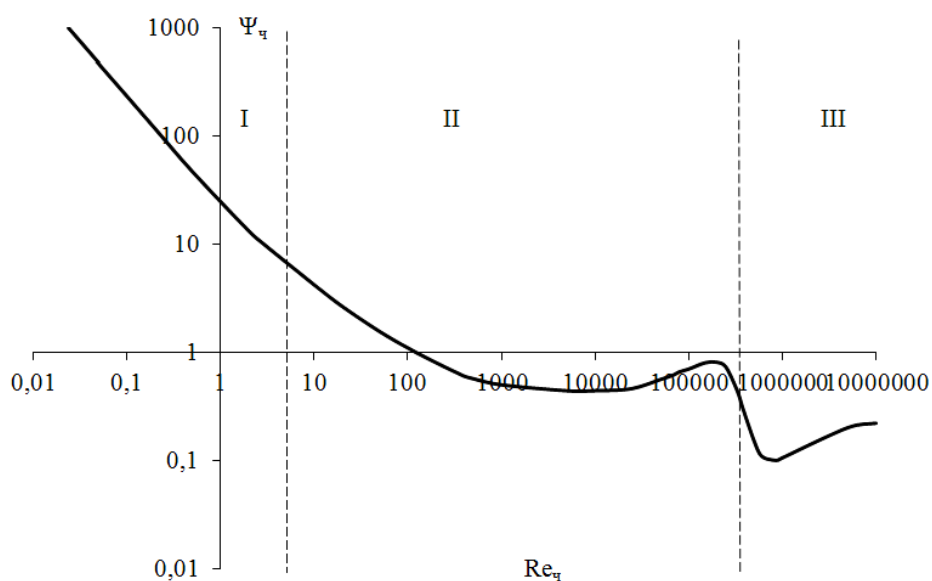


Рис. 2.1. Зависимость коэффициента лобового сопротивления шарообразной частицы от критерия Рейнольдса:

I – область действия закона Стокса; II – стандартная кривая; III – область действия формулы Ньютона

Приравнявая правые части выражений (2.1) и (2.6) получаем формулу для расчета коэффициента лобового сопротивления в области прямолинейности формулы Стокса:

$$\Psi_q = \frac{24 \cdot \mu_z}{\rho_z \cdot d_q \cdot \omega_q} = \frac{24}{Re_q}. \quad (2.7)$$

При значении критерия Рейнольдса $3 < Re_q \leq 400$ величина коэффициента лобового сопротивления рассчитывается по полуэмпирической формуле Клячко

$$\Psi_q = \frac{24}{Re_q} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re_q}}. \quad (2.8)$$

Для турбулентного режима движения частиц $Re_q > 500$ и коэффициент лобового сопротивления можно принимать постоянным, равным 0,44 (формула Ньютона). Для переходного режима помимо формулы (2.8), предложены и другие выражения.

Так, при значениях $2 < Re_q < 500$ рекомендуется формула

$$\Psi_q = \frac{18,5}{Re_q^{0,6}}, \quad (2.9)$$

а для интервала значений $100 < Re_q < 1000$

$$\Psi_q = \frac{55}{Re_q}. \quad (2.10)$$

Для частиц, отличных по форме от шарообразных, вводится понятие динамического коэффициента формы (α), определяемого по выражению

$$\alpha = \frac{d_{q\varnothing}^2}{d_q^2}, \quad (2.11)$$

где $d_{q\varnothing}$ – эквивалентный диаметр частицы, равный диаметру шара, объем которого равен объему данной частицы, м.

В этом случае формула (2.7) принимает вид

$$\Psi_q \cdot \alpha = \frac{24 \cdot \mu_z}{\rho_z \cdot d_{q\varnothing} \cdot \omega_q}. \quad (2.12)$$

Ниже в табл. 2.2 приведены значения динамического коэффициента для частиц различной формы.

Таблица 2.2

Динамический коэффициент для частиц различной формы

Форма частицы	Динамический коэффициент, α
Шаровая	1,0
Округленная с неровной поверхностью	2,4
Продолговатая	3,0
Пластичная	5,0
Для смешанных тел	2,9

Рассмотренные выше зависимости относятся к редко встречающемуся случаю равномерного прямолинейного движения частиц. Поэтому при технических расчетах, связанных с неравномерным движением частиц, приходится прибегать к допущениям. При неравномерном прямолинейном движении частиц для значений критерия Рейнольдса, не превышающих 10^3 , можно без большой ошибки принять, что сопротивление среды не зависит от ускорения. При малых значениях Re_q формула Стокса сохраняет свое значение и для криволинейных потоков, например, в случае вращения газа в центробежных пылеуловителях [1].

3. ВЫДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ИЗ АЭРОЗОЛЯ

Процесс выделения взвешенных частиц из аэрозоля в литературе обычно называется осаждением. Принцип работы любого пылеулавливающего аппарата основан на использовании одного или нескольких механизмов осаждения.

3.1. Основные механизмы осаждения

Гравитационное осаждение (седиментация) – вертикальное оседание частиц под действием силы тяжести.

Инерционное осаждение – оседание частиц на препятствии. Происходит в случае, когда масса или скорость движения частицы настолько велики, что она не может следовать вместе с газом по линии тока, огибающей препятствие, а, стремясь по инерции продолжить своё движение, сталкивается с препятствием и осаждается на нём.

Разновидностью инерционного осаждения является *осаждение под действием центробежной силы*, благодаря которой при криволинейном движении аэрозоля частица отбрасывается на поверхность осаждения.

Зацепление (эффект касания) – это механизм осаждения, при котором расстояние от частицы, движущейся с газовым потоком, до обтекаемого тела равно или меньше её радиуса.

Диффузионное осаждение – механизм, характерный для мелких частиц, которые испытывают непрерывное воздействие молекул газа, находящихся в броуновском движении. В результате этого воздействия возможно осаждение частиц на поверхности обтекаемых тел или стенках аппарата.

Электрическое осаждение – это разделение аэрозолей за счет ионизации газовых молекул электрическим разрядом и заряда ими взвешенных частиц с последующим осаждением частиц на электродах. Электрическое осаждение возможно и при взаимодействии частиц с каплями (пузырьками), причем электрические заряды могут быть подведены к частицам, к орошающей жидкости, или одновременно к частицам и жидкости. Электрическое осаждение частиц может происходить и при прохождении аэрозоля через

фильтрующие перегородки. И в этом случае заряд может быть подведен к частицам, к поверхности осаждения или к обоим элементам одновременно.

Помимо указанных выше основных механизмов осаждения, используемых в промышленной практике, можно перечислить и ряд других: термофорез, диффузиофорез, воздействие магнитного поля, турбулентных пульсаций, радиометрических сил, работающего катализатора и др.

Влияние того или иного механизма на осаждение частиц определяется целым рядом факторов, и в первую очередь, размером частиц. Обычно при расчете промышленных пылеулавливающих аппаратов используются методы теории подобия. Согласно этой теории, эффективность осаждения частиц за счет определенного механизма их осаждения может быть качественно охарактеризована соответствующим безразмерным параметром, а общая эффективность улавливания частиц в аппарате является функцией этих параметров и критерия Рейнольдса, определяющего характер движения газовой среды

$$\eta = \psi(Re; G; Stk; W; R; D; K_E), \quad (3.1)$$

где G , Stk , W , R , D , K_E – безразмерные параметры осаждения частиц за счет эффектов седиментации, инерции при прямолинейном и криволинейном движениях, касания, диффузии и электрических сил [1].

3.2. Гравитационное осаждение частиц

В аппаратах, использующих гравитационный механизм пылеулавливания, осаждение взвешенных частиц происходит под действием силы тяжести. При падении взвешенная частица испытывает сопротивление среды. В общем виде конечная скорость частицы достигается при установлении равенства между силой сопротивления среды и силой тяжести, которая определяется по формуле

$$F_g = m_{\text{ч}} \cdot g, \quad (3.2)$$

где $m_{\text{ч}}$ – масса частицы, кг;

g – ускорение силы тяжести, Н/кг.

Тогда формула для определения конечной скорости частицы в области действия закона Стокса с учетом формулы (2.1) примет вид

$$\omega_{\text{ч}} = \frac{F_g}{3\pi \cdot \mu_{\text{с}} \cdot d_{\text{ч}}} \quad (3.3)$$

При гравитационном осаждении шарообразной частицы

$$F_g = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3 \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}})}{6} \cdot g. \quad (3.4)$$

Тогда скорость осаждения в области действия закона Стокса

$$\omega_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \cdot g}{18\mu_{\text{с}}} \quad (3.5)$$

Поскольку плотность газа значительно меньше плотности частицы, значением плотности газа в формуле можно пренебречь. Тогда формула для расчета величины скорости осаждения примет следующий вид

$$\omega_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \cdot \rho_{\text{ч}} \cdot g}{18\mu_{\text{с}}} = \tau_p \cdot g. \quad (3.6)$$

где τ_p – время релаксации частиц, с.

Из формулы (3.6) следует, что скорость осаждения взвешенных частиц в пылеулавливающих аппаратах, использующих действие силы тяжести, прямо пропорциональна квадрату диаметра частицы.

В табл. 3.1 приводятся скорости падения частиц плотностью 1000 кг/м³ в неподвижном воздухе под действием силы тяжести.

Таблица 3.1

Скорости гравитационного осаждения частиц различного размера

Диаметр частицы, мкм	100	10	1
Скорость падения, м/с	0,3	0,003	0,0003

Скорость свободного падения частиц стоксовского диаметра в неподвижном воздухе называется *скоростью витания* и может быть определена по номограмме, приведенной на рис.3.1.

Безразмерный параметр гравитационного осаждения (G) представляет собой отношение силы тяжести к силе сопротивления среды и (в области

действия закона Стокса) может быть выражен отношением скорости осаждения частиц и скорости газового потока по формуле (3.7).

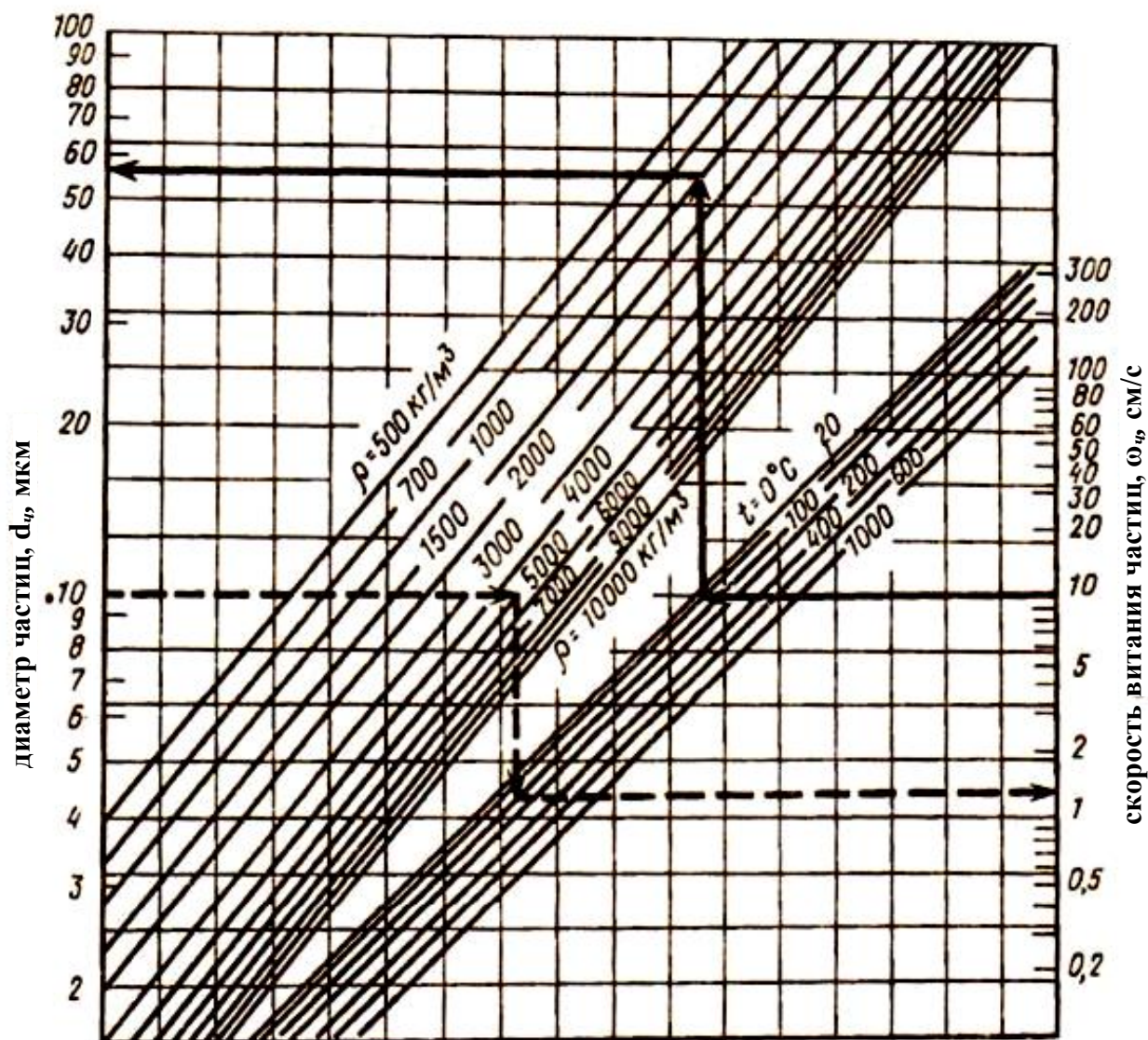


Рис. 3.1. Номограмма для определения скорости витания в воздухе частиц пыли размерами 2÷100 мкм

$$G = \frac{F_g}{F_c} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}} g}{18 \mu_{\text{г}} \omega_{\text{г}}} = \frac{\omega_{\text{ч}}}{\omega_{\text{г}}}, \quad (3.7)$$

где $\omega_{\text{г}}$ - скорость газового потока, м/с.

Уравнение (3.7) может быть представлено также в виде отношения двух критериев

$$G = Stk / Fr, \quad (3.8)$$

где Stk – критерий Стокса;

Fr – критерий Фруда.

$$Stk = \frac{d_q^2 \cdot \rho_q \cdot \omega_r}{18 \cdot \mu_r \cdot l}; \quad (3.9)$$

$$Fr = \frac{\omega_r^2}{g \cdot l}, \quad (3.10)$$

где l – линейный параметр, определяющий поверхность осаждения (например, диаметр волокна фильтровального материала), м [1, 12].

С учетом формулы (3.8) эффективность осаждения частиц под действием гравитационных сил в подобных геометрических системах может быть выражена в виде критериальной зависимости

$$\eta_G = f\left(Re, \frac{Stk}{Fr}\right). \quad (3.11)$$

Гравитационный механизм осаждения частиц пыли из горизонтально направленного потока играет наиболее существенную роль в пылеосадительных камерах. Продолжительность прохождения газовым потоком пылеосадительной камеры при равномерном распределении потока по ее сечению составляет

$$\tau = \frac{V_{an}}{Q_z} = \frac{L \cdot B \cdot H}{Q_z}, \text{ с}, \quad (3.12)$$

где V_{an} – объем аппарата, м³;

Q_z – объемный расход газов, м³/с;

L, B, H – длина, ширина и высота пылеосадительной камеры соответственно, м.

За это же время под действием силы тяжести частица проходит путь

$$h = \omega_q \cdot \tau, \text{ м}. \quad (3.13)$$

Фракционная эффективность пылеосадительных камер определяется по формуле

$$\eta = \frac{h}{H} = \frac{\omega_q \cdot L \cdot B}{Q_z} = \frac{\omega_q \cdot L}{\omega_r \cdot H}. \quad (3.14)$$

Если путь частицы до момента осаждения больше или равен высоте камеры, все частицы, имеющие такую же или большую скорость осаждения, будут уловлены в камере. Поэтому при расчете эффективности

пылеосадительных камер существенное значение имеет определение величины скорости осаждения.

Маленькие частицы практически мгновенно достигают конечной скорости осаждения, которая может быть рассчитана по формуле (3.5). Если же частицы достаточно крупные, то расчет их пути осаждения проводится в две стадии: сначала определяется путь, который должна пройти частица до достижения конечной скорости осаждения, а затем расстояние, которое она пройдет в оставшееся время с этой скоростью [13].

При применимости закона Стокса минимальный размер частиц, которые могут быть осаждены в пылеосадительной камере, может быть определен по формуле

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{18 \cdot Q_z \cdot \mu_z}{(\rho_q - \rho_z) \cdot g \cdot B \cdot L}}, \text{ м.} \quad (3.15)$$

3.3. Инерционное осаждение частиц из прямолинейных потоков

При обтекании твердого тела или капли жидкости (препятствия) запыленным потоком частицы, вследствие большой инерции, продолжают двигаться, практически не изменяя траектории, и осаждаются на поверхности препятствия (рис. 3.2). Такой механизм осаждения называется *инерционным*. Эффективность инерционного осаждения определяется долей частиц, извлеченных из потока при обтекании ими препятствия.

Траектория движения частицы в газовом потоке может быть описана уравнением

$$\rho_q \cdot V_q \frac{d\bar{\omega}_q}{d\tau} = \rho_z \cdot V_z \frac{d\bar{\omega}_z}{d\tau} + F_c, \quad (3.16)$$

где V_q – объём частицы, м³;

τ – время движения частицы, с;

$\bar{\omega}_q$ и $\bar{\omega}_z$ – векторы скорости частицы и газового потока в месте нахождения частицы соответственно, м/с.

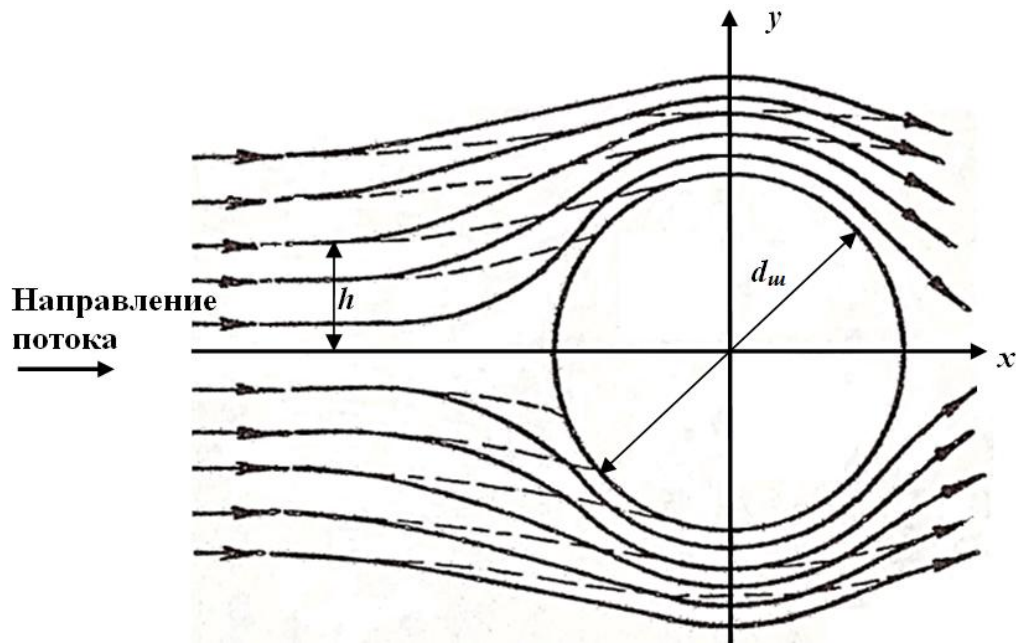


Рис. 3.2. Осаждение частиц на шарообразном препятствии:
 ———— — движение газов; - - - - - — движение частиц;
 h — расстояние между траекторией движения частицы и центром
 препятствия, $d_{ш}$ — диаметр шарообразного препятствия

Если газовый поток движется ламинарно, а частица настолько мала, что для расчета силы сопротивления среды применим закон Стокса (включая поправку Кенингема-Милликена), уравнение (3.16) можно записать в следующем виде:

$$\rho_q \cdot V_q \frac{d^2 \bar{r}_q}{d\tau^2} = \frac{3\pi d_q \mu_z}{C_K} \cdot \left(\bar{\omega}_z - \frac{d\bar{r}}{d\tau} \right), \quad (3.17)$$

где $\bar{r}_q$ — радиус-вектор частицы, м.

Уравнение (3.17) удобно привести к безразмерному виду, введя следующие обозначения:

$\bar{A} = \frac{\bar{r}_q}{A}$ — безразмерная координата частицы, где A — характерный размер обтекаемого тела (например, радиус шара или цилиндра), м;

$\bar{\omega}_0 = \frac{\bar{\omega}_z}{\omega_\infty}$ — безразмерная скорость газов, где ω_∞ — скорость газов вдали от обтекаемого тела, м/с;

$\tau_0 = \frac{\omega_\infty}{A} \tau$ — безразмерное время [1].

Тогда после соответствующих подстановок и упрощений получим

$$2Stk \frac{d^2 \bar{A}}{d\tau_0^2} + \frac{d\bar{A}}{d\tau_0} = \bar{\omega}_0. \quad (3.18)$$

Критерий Стокса численно равен отношению расстояния, проходимого частицей с начальной скоростью при отсутствии внешних сил до остановки, к характерному размеру обтекаемого тела, например, диаметру шара или цилиндра.

Если движение частицы осуществляется в области, где закон Стокса неприменим, необходимо ввести поправку, учитывающую отношение истинной силы сопротивления к стоксовому сопротивлению. Тогда формула (3.18) принимает вид:

$$\frac{48Stk \cdot d^2 \bar{A}}{\zeta_q Re_q \cdot d\tau_0^2} + \frac{d\bar{A}}{d\tau_0} = \bar{\omega}_0. \quad (3.19)$$

Критерий Стокса является единственным критерием подобия инерционного осаждения. Это означает, что уравнение (3.18) применимо к геометрически подобным системам с одинаковым значением критерия Рейнольдса.

Из уравнения (3.18) следует, что частица с бесконечно малой массой (при $Stk \approx 0$) будет точно следовать по линии тока газообразной среды, не соприкасаясь с поверхностью обтекаемого тела. Существует минимальное, так называемое критическое, значение критерия Стокса ($Stk_{кр}$), при котором инерция частицы оказывается достаточной, чтобы преодолеть увлечение её газовым потоком и достичь поверхности препятствия. Таким образом, захват частицы обтекаемым телом возникает при условии: $Stk > Stk_{кр}$.

Следует отметить, что теория инерционного осаждения рассматривает осаждение частиц на фронтальной поверхности обтекаемого тела и не учитывает их осаждение на задней поверхности тела, которое может происходить за счет турбулентных пульсаций газового потока. Это явление является существенным при улавливании субмикронных частиц пыли. Поэтому даже при $Stk < Stk_{кр}$ эффективность осаждения не равна нулю [12].

По рис. 3.2 легко проследить влияние критерия Рейнольдса на инерционное осаждение. При ламинарном течении потока ($Re < 2$)

эффективность осаждения не будет зависеть от этого критерия, поскольку можно пренебречь существованием пограничного слоя вокруг обтекаемого тела (вязкое обтекание). С увеличением значения критерия Рейнольдса (т.е. при переходе к турбулентному режиму потока) на поверхности препятствия образуется пограничный слой, толщина которого уменьшается по мере роста критерия. При значениях больше критического ($Re > 500$) линии тока сильнее изгибаются (потенциальное обтекание) и обтекают препятствие на более близком от него расстоянии, и эффективность осаждения выше при том же значении критерия Стокса.

В области $Stk \geq 0,1$ при потенциальном обтекании коэффициент осаждения на шаре может быть определен по эмпирической формуле [1]:

$$\eta_{Stk} = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,35)^2}. \quad (3.20)$$

Расчеты показывают, что величина критерия Стокса вблизи точки набегания потока при потенциальном обтекании шарообразного препятствия составляет $1/24$, а для цилиндрического препятствия – $1/16$.

На рис. 3.3 и 3.4 приведены теоретические и экспериментальные зависимости эффективности осаждения частиц при потенциальном обтекании препятствий различной формы. Данные, приведенные на рис. 3.3 и 3.4, могут быть использованы при практических расчетах эффективности пылеулавливающих установок, в которых осаждение осуществляется на телах шарообразной формы (например, на капле), телах цилиндрической формы (например, волокнах фильтра) и др. Если тела расположены не очень тесно, заметного искажения потока не происходит. При тесном расположении обтекаемых тел эффективность может увеличиваться по сравнению с теоретической величиной для одиночного тела, что объясняется более близким прохождением линий токов.

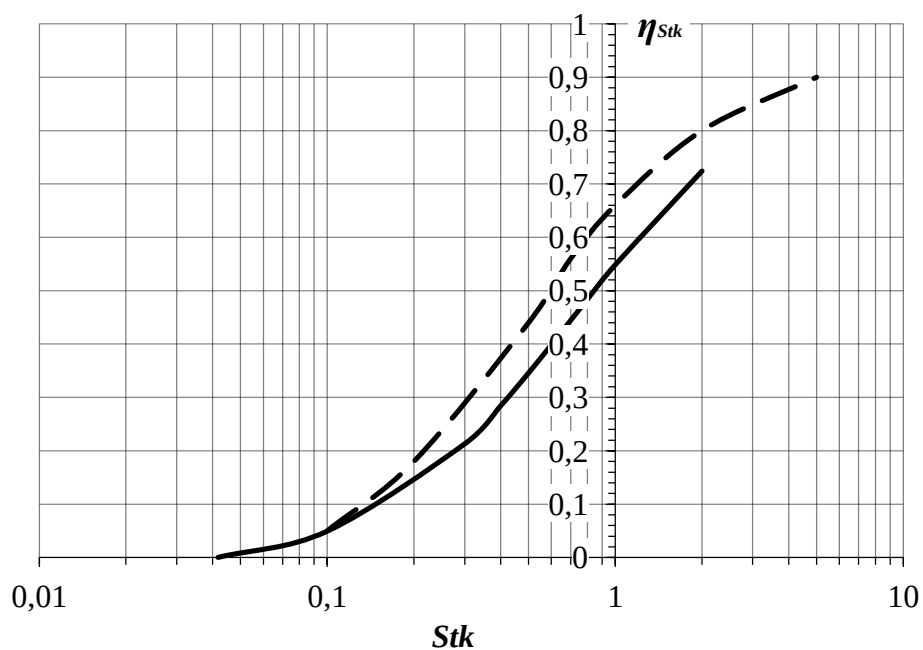


Рис. 3.3. Инерционное осаждение частиц на шаре при потенциальном обтекании:

——— - по экспериментальным данным;
 - - - - - по теоретическим данным

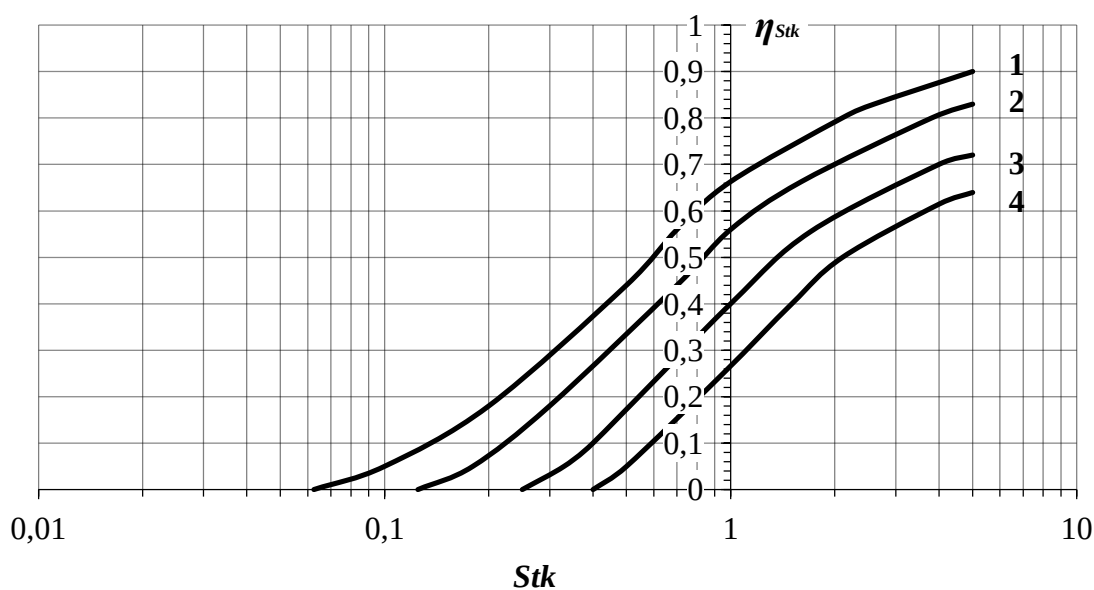


Рис. 3.4. Зависимость эффективности инерционного осаждения частиц от формы обтекаемого тела:

1 – шар; 2 – цилиндр; 3 – диск; 4 – пластина [14]

Таким образом, эффективность инерционного осаждения взвешенных частиц может быть выражена в виде критериальной зависимости

$$\eta_{Stk} = f(Re_T, Stk). \quad (3.21)$$

Инерционный механизм осаждения частиц применяется в сухих механических пылеуловителях. Принцип действия инерционных пылеуловителей заключается в изменении направления движения газового потока или установлении на пути его движения препятствий (перегородок, осадителей). Инерционный механизм осаждения является определяющим и для большинства мокрых пылеуловителей, играет существенную роль в процессе фильтрационной очистки [1, 4, 12].

3.4. Осаждение частиц под действием центробежной силы

Инерционный механизм разделения аэрозолей широко используется в технике пылеулавливания посредством искривления движения газового потока (например, организации движения аэрозоля по спирали).

Траектория движения частицы в криволинейном потоке в области применимости закона Стокса может быть описана уравнением

$$\frac{d\bar{\omega}_q}{d\tau} = \frac{3\pi d_q \mu_z}{\rho_q V_q C_K} (\bar{\omega}_z - \bar{\omega}_q) = -\frac{3\pi d_q \mu_z}{\rho_q V_q C_K} \bar{\omega}_{oz}, \quad (3.22)$$

где $\bar{\omega}_{oz}$ – относительная скорость движения частицы, м/с.

Если рассматривать движение частицы в подвижной системе координат (рис.3.5), ускорение частицы определяется динамической теоремой Кориолиса. В этом случае можем записать [15]

$$\rho_q V_q \frac{d\bar{\omega}_{oz}}{d\tau} + \rho_q V_q \bar{\omega} (\bar{\omega} \cdot \bar{R}) + \rho_q V_q \left(\frac{d\bar{\omega}}{d\tau} \cdot \bar{R} \right) + 2\rho_q V_q (\bar{\omega} \cdot \bar{\omega}_{oz}) = -3\pi d_q \mu_z \bar{\omega}_{oz}, \quad (3.23)$$

где $\bar{\omega}$ – вектор угловой скорости вращения газового потока, м/с;

$\bar{R}$ – вектор радиуса вращения газового потока, м.

Каждое из слагаемых в левой части уравнения (3.23) представляет собой компонент силы, с которой частица действует на воздушный поток, стремящийся искривить траекторию частицы и изменить ее скорость. В правой части уравнения представлена аэродинамическая сила, действием которой объясняется указанный эффект, т.е. внешняя сила. Если принять, что при заходе газового потока на поворот скорости его отдельных слоев изменяются в соответствии с законом площадей, то по сравнению с начальной скоростью, скорость периферийных слоев уменьшается, а

центральных – увеличивается. Предполагается, что перестройка потока происходит мгновенно, в то время как скорость частиц, равная до этого скорости потока, изменяется медленно.

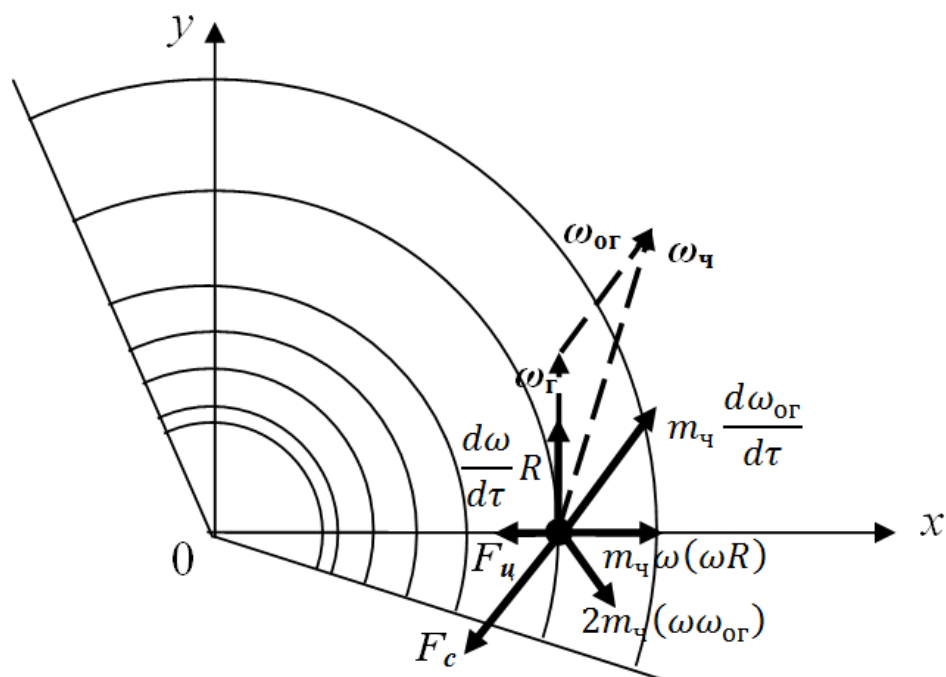


Рис. 3.5. Схема сил взаимодействия частицы и среды в криволинейном потоке

Второй член уравнения (3.23) представляет собой центробежную силу, направленную по радиусу закругленного потока. При исследованиях инерционной сепарации чаще всего учитывается только эта составляющая силы инерции. В этом случае уравнение движения частицы записывается в виде

$$\rho_q V_q \omega^2 R = 3\pi d_q \mu_z \omega_{oz}. \quad (3.24)$$

Подобное упрощение в некоторых случаях может привести к существенным погрешностям в расчетах.

Вектор, представленный третьим членом уравнения, выражает реакцию частицы, переходящей в более замедленные слои, на тормозящее влияние среды.

Четвертый член представляет собой силу Кориолиса (сила инерции во вращающейся системе). В рассматриваемом случае она направлена также к периферии газового потока.

Очевидно, что расчет сепарационного движения частицы с помощью уравнения (3.23) достаточно сложен. Более простой и достаточно надежный метод расчета инерционного осаждения частиц при криволинейном движении газового потока связан с использованием уравнения (3.24). Если переписать его в виде

$$F_{ц} = \frac{m_{ч} \omega_{\theta}^2}{R}, \quad (3.25)$$

где $F_{ц}$ – центробежная сила, развиваемая при вращении газового потока, Н;

$m_{ч}$ – масса частицы, кг;

ω_{θ} – скорость вращения газового потока вокруг неподвижной оси, м/с;

R – радиус вращения газового потока, м.

Таким образом, скорость осаждения частицы при криволинейном движении может быть рассчитана по формуле

$$\omega_{ц} = \frac{d_{ч}^2 \rho_{ч}}{18 \mu_{\theta}} \cdot \frac{\omega_{\theta}^2}{R} = \tau_p \cdot \frac{\omega_{\theta}^2}{R}. \quad (3.26)$$

Из выражения (3.26) следует, что скорость осаждения взвешенных частиц в центробежных пылеуловителях прямо пропорциональна квадрату диаметра частиц, а скорость центробежного осаждения в разы выше скорости гравитационного осаждения.

Если по аналогии с вышерассмотренным гравитационным осаждением выразить параметр центробежного осаждения как отношение центробежной силы, действующей на шаровую частицу, к силе сопротивления среды, то получим

$$\omega = \frac{F_{ц}}{F_c} = \frac{d_{ч}^2 \rho_{ч}}{18 \mu_{\theta}} \frac{\omega_{\theta}^2}{R}. \quad (3.27)$$

Таким образом, в правой части уравнения (3.27) получается критерий Стокса (Stk_{ω}). Это позволяет выразить эффективность осаждения частиц под действием центробежной силы в критериальном виде

$$\eta_{\omega} = f(Re, Stk_{\omega}). \quad (3.28)$$

Инерционное центробежное осаждение взвешенных частиц широко применяется в технике пылеулавливания, прежде всего, в циклонных пылеуловителях. Этот же механизм осаждения используется в вихревых аппаратах, центробежных динамических пылеуловителях, а также в центробежных скрубберах [1].

3.5. Зацепление (эффект касания)

Размер частиц имеет важное значение при захвате частиц за счет касания частицей поверхности обтекаемого тела. Эффект касания характеризуется соотношением диаметров частицы и препятствия. При потенциальном обтекании шара, когда это отношение настолько мало, что можно пренебречь инерционными эффектами, эффективность зацепления составляет [16]

$$\eta_{ш} = \left(1 + \left(\frac{d_q}{d_T}\right)^2\right) - \frac{1}{1 + \frac{d_q}{d_T}} \approx 3 \frac{d_q}{d_T}, \quad (3.29)$$

где d_q – диаметр частицы, м;

d_T – диаметр обтекаемого тела, м.

В этом же случае для цилиндра верно соотношение

$$\eta_{цил} = \left(1 + \frac{d_q}{d_T}\right) - \frac{1}{1 + \frac{d_q}{d_T}} \approx 2 \frac{d_q}{d_T}. \quad (3.30)$$

Для другого предельного случая, когда за счет большого значения инерционных эффектов траектории оседающих частиц прямолинейны, выведены следующие соотношения:

для шара

$$\eta_{ш} \approx 2 \frac{d_q}{d_T}, \quad (3.31)$$

для цилиндра

$$\eta_{цил} \approx \frac{d_q}{d_T}. \quad (3.32)$$

На рис. 3.6 приведена схема осаждения частиц в результате действия механизма зацепления.

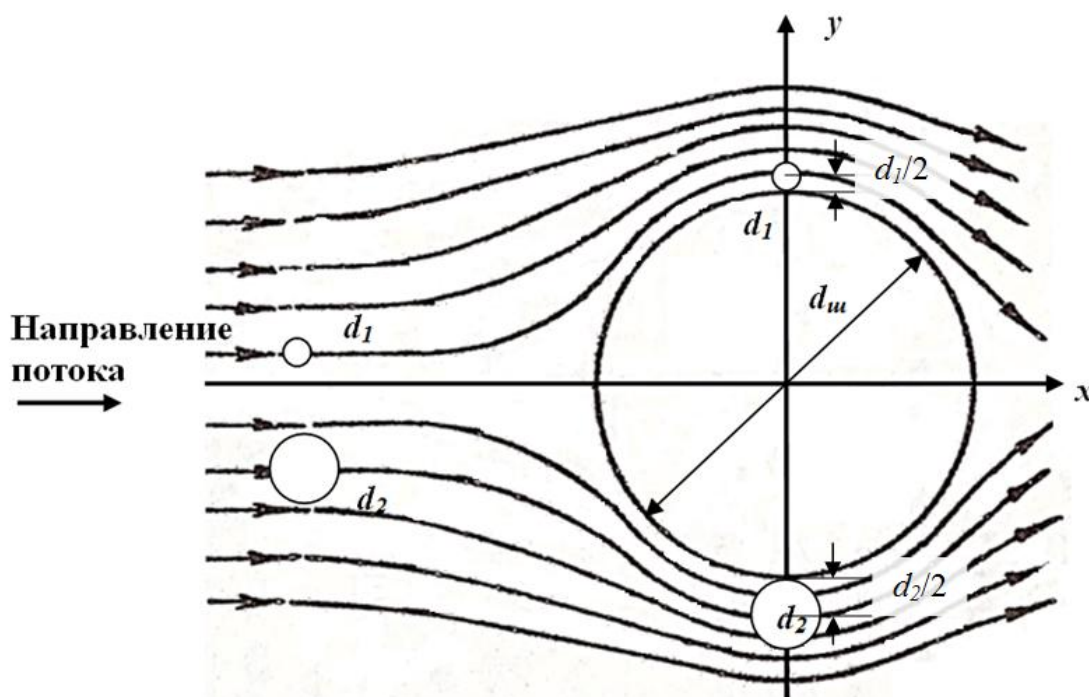


Рис. 3.6. Схема улавливания частиц посредством механизма зацепления

Приближенное значение эффективности зацепления при вязком обтекании цилиндра может быть получено по формуле

$$\eta_u = 2\sqrt{Re_r} \left(\frac{d_u}{d_r} \right)^2. \quad (3.33)$$

Из приведенных уравнений следует, что эффект зацепления становится значительным при осаждении частиц на препятствиях с малым диаметром. Кроме того, осаждение частиц за счет эффекта зацепления не зависит от скорости газов, но в значительной степени определяется режимом течения газового потока.

Эффективность осаждения при зацеплении может быть представлена в критериальном виде:

$$\eta_z = f(Stk, Stk/Re). \quad (3.34)$$

Эффект касания играет наиболее существенную роль при осаждении частиц в фильтрах.

3.6. Диффузионное осаждение

Частицы малых размеров подвержены воздействию броуновского (теплового) движения молекул. Перемещение частиц в этом случае

описывается уравнением Эйнштейна [1, 15], согласно которому средний квадрат смещения частицы составляет

$$\bar{\Delta x}^2 = 2D_q T_z, \quad (3.35)$$

где D_q — коэффициент диффузии частицы, характеризующий интенсивность броуновского движения, м²/с;

T_z — температура газа, К.

При справедливости закона Стокса, когда размер частиц больше среднего пути пробега молекул, коэффициент диффузии можно выразить по формуле

$$D_q = \frac{C_k K_\delta T_z}{3\pi\mu_z d_q}, \quad (3.36)$$

где K_δ — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Если размер частиц меньше среднего пути пробега молекул, коэффициент диффузии может быть рассчитан по уравнению, предложенному Лангмюром [17]:

$$D_q = \frac{4K_\delta T_z}{3\pi d_q^2 p_z} \cdot \sqrt{\frac{8R_z T_z}{\pi\mu_z}}, \quad (3.37)$$

где p_z — абсолютное давление газов, Па;

R_z — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль · К).

Коэффициент диффузии входит в безразмерный комплекс, характеризующий отношение сил внутреннего трения к диффузионным силам — критерий Шмидта:

$$Sc = \frac{\mu_z}{\rho_z \cdot D_q} = \frac{\nu_z}{D_q}, \quad (3.38)$$

где ν_z — кинематическая вязкость газа, м²/с.

Другим критерием, характеризующим диффузионное осаждение, является критерий Пекле — отношение конвективных сил к диффузионным силам:

$$Pe = Re_T \cdot Sc = \frac{\omega_z \cdot \rho_z \cdot l}{\mu_z} \cdot \frac{\mu_z}{\rho_z \cdot D_q} = \frac{\omega_z \cdot l}{D_q}, \quad (3.39)$$

где l – определяющий линейный параметр обтекаемого тела, м.

Величина, обратная критерию Пекле ($1/Pe$), является параметром диффузионного осаждения. В табл. 3.2 приведены значения коэффициента диффузии частиц, рассчитанные по формуле (3.36) для воздуха при нормальных условиях, и значения критерия Шмидта.

Таблица 3.2

Значения коэффициента диффузии в области действия закона Стокса

Размер частиц, мкм	Коэффициент диффузии, м ² /с	Критерий Шмидта
10	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$6,4 \cdot 10^6$
1	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$5,6 \cdot 10^5$
0,1	$6,1 \cdot 10^{-10}$	$2,5 \cdot 10^4$

Как видно по табл. 3.2, коэффициент диффузии резко увеличивается с уменьшением размера частиц. При этом скорость диффузии мала по сравнению со скоростью диффузии молекул газов, поскольку коэффициент диффузии частиц на несколько порядков меньше коэффициента диффузии молекул газов.

Оценка эффективности диффузионного осаждения частиц может быть определена двумя способами. В основе первого лежит расчет эффективности осаждения частиц за счет диффузии на осадителе из слоя газового потока определенной толщины за время, в течение которого поток перемещается от точки 1 до точки 2 (рис.3.7) [16]. Второй подход базируется на расчете скорости диффузионного массопереноса через пограничный слой за период времени, в течение которого объем газа, из которого происходит диффузия частиц к поверхности осаждения, находится достаточно близко от нее [1].

Первый способ предложил Лангмюр. Он рассчитал толщину эффективного слоя газа, из которого происходит диффузионное осаждение:

$$x = \sqrt{4D_q \frac{\tau}{\pi}}, \text{ м}, \quad (3.40)$$

где τ – время перемещения потока из точки 1 в точку 2, с.

Как видно на рис. 3.7, условный элемент объема газа эффективной толщиной x в течение времени τ преодолевает расстояние от точки 1 до точки

2, выбранных на пересечениях, образующих угол 60° с набегающим и уходящим потоком по отношению к препятствию круглого сечения. В точке $0'$ эффективная толщина слоя газа составляет x_0 .

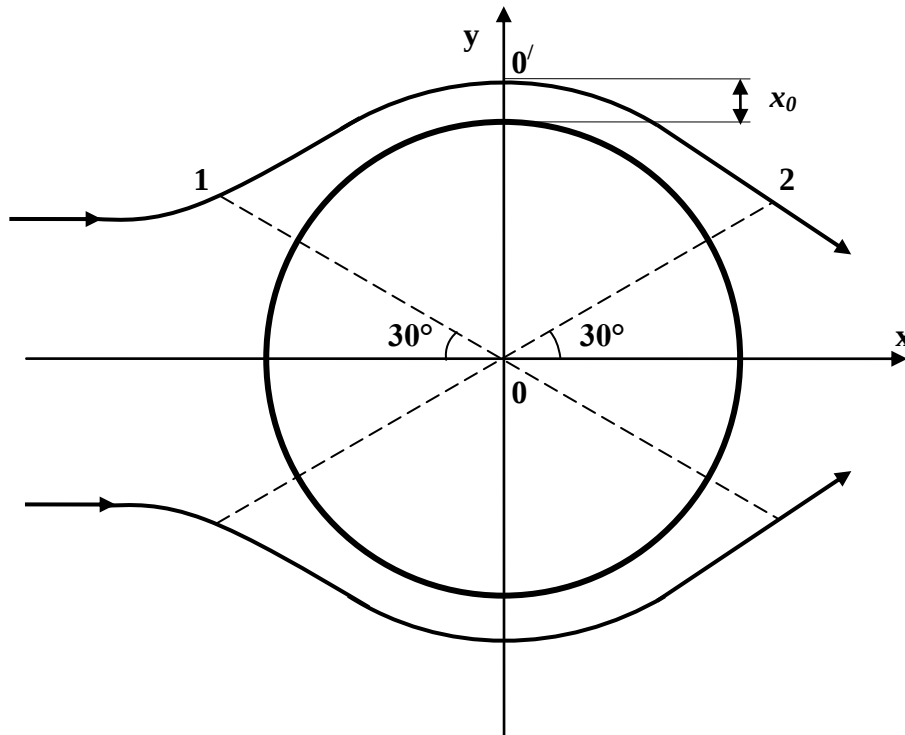


Рис 3.7. Диффузионное осаждение аэрозольных частиц на цилиндре

На основании поэтапного интегрирования уравнения для вязкого течения вокруг цилиндра было получено выражение

$$x = 1,12 \cdot x_0, \text{ м.} \quad (3.41)$$

Время, за которое элемент потока пройдет указанное расстояние

$$\tau = \frac{0,278 \cdot d_T^2 \cdot (2,002 - \ln Re_T)}{\omega_0 \cdot x_0}, \text{ с,} \quad (3.42)$$

где ω_0 — скорость газового потока в слое, характеризуемом толщиной x_0 , м/с.

После подстановки значений времени и расстояния в уравнение (3.40) и последующих преобразований можно получить параметр диффузии

$$A = \frac{2x_0}{d_T}. \quad (3.43)$$

Эффективность диффузионного осаждения частиц, согласно Лангмюру, рассчитывается по формуле

$$\eta_D = \frac{(1 + A)\ln(1 + A) - \frac{A(2 + A)}{2(1 + A)}}{2,002 - \ln Re_T}. \quad (3.44)$$

Для расчета эффективности диффузионного осаждения также применяют формулы, описывающие процессы массопереноса или теплопереноса. Так, в случае шара, предложена формула [18]

$$\eta_D = \frac{4}{Pe} (2 + 0,557 \sqrt{Re_T \cdot Sc^{3/8}}), \quad (3.45)$$

а в случае цилиндра

$$\eta_D = \frac{\pi}{Pe} \left(\frac{1}{\pi} + 0,55 \sqrt[3]{Re_T \cdot Sc} \right), \quad (3.46)$$

которая действительна при $0,1 < Re_T < 10000$ и $Sc < 100$.

Согласно вышеперечисленным зависимостям, эффективность диффузионного осаждения обратно пропорциональна размеру частиц и скорости газового потока, т.е. в случае разделения ультра- и мелкодисперсных аэрозолей. Этот механизм осаждения более всего проявляется в процессе фильтрационного разделения аэрозолей.

3.7. Осаждение частиц под действием электрических сил

Для осуществления процесса выделения частиц из газового потока под действием электрических сил необходима предварительная электрическая зарядка частиц, либо осадительной поверхности, либо разносменная зарядка и частиц и осадительной поверхности.

Электрическая зарядка частиц может быть осуществлена тремя путями: в процессе образования аэрозоля, за счет диффузии свободных ионов и при коронном разряде. При применении первых двух способов число частиц, получивших положительный и отрицательный заряды, приблизительно одинаково. Коронный разряд, наоборот, приводит к однополюсной зарядке частиц.

Коронный разряд возникает в неоднородном электрическом поле, например, между резко изогнутой поверхностью, такой как тонкая проволока, и поверхностью цилиндра или пластинами (рис. 3.8). В этом

случае (в отличие от однородного электрического поля) удастся создать так называемую “корону” без искрового перекрытия.

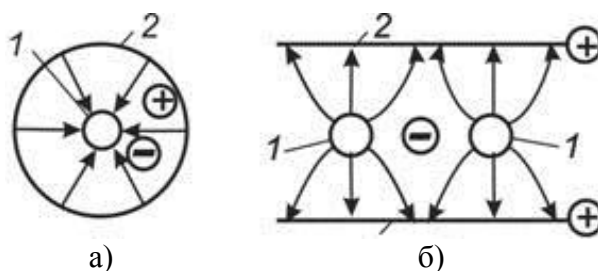


Рис. 3.8. Схема возникновения коронного разряда в неоднородном электрическом поле:

а – цилиндрическая осадительная поверхность; б – пластинчатые осадительные поверхности;

1 – коронирующие электроды; 2 – осадительные электроды

Так как корона переменного тока вызывает колебательные движения заряженных частиц, а корона постоянного тока обеспечивает их движение в сторону осадительной поверхности, для целей пылеулавливания необходим постоянный ток. Отрицательная корона более устойчива, чем положительная, и не приводит к возникновению искрового пробоя при более низких значениях напряжения, поэтому именно ее обычно используют в пылеулавливании. Отрицательная корона, однако, приводит к образованию более высоких концентраций озона, в связи с чем она не используется в установках кондиционирования воздуха.

Ионизационные процессы при коронном заряде сосредоточены в узкой области, где напряженность поля наибольшая, т. е. вблизи коронирующего электрода. Во внешней области коронного разряда ионизационные процессы отсутствуют, так как напряженность поля там недостаточна. Если во внешней области коронного разряда, занимающей преобладающую часть пространства между электродами, находятся твердые или жидкие частицы, то ионы из объемного заряда, осаждаясь на поверхности частиц, сообщают им избыточный электрический заряд.

На рис. 3.9 показаны три периода ионизации газов в межэлектродном промежутке.

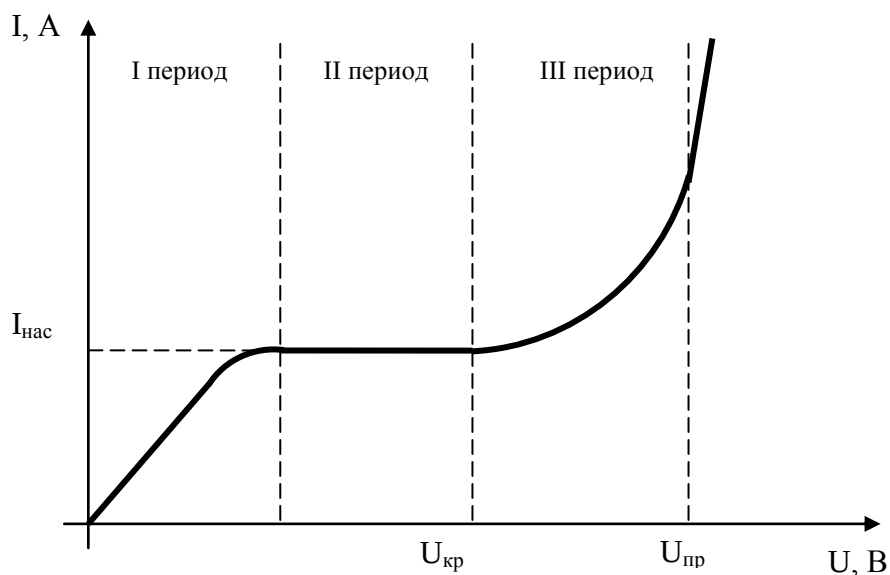


Рис. 3.9. Периоды ионизации газа в межэлектродном пространстве

В первом периоде ионизации сила тока возрастает почти пропорционально росту напряжения, т.е. в соответствии с законом Ома. В конце первого периода рост силы тока замедляется. Максимальную силу тока, которая может быть достигнута при данной интенсивности ионизации газов называют током насыщения ($I_{\text{нас}}$).

Второй период ионизации характеризуется постоянством силы тока при росте напряжения. В конце периода в межэлектродном промежутке резко возрастает количество зарядов (электронов), в пространстве возле коронирующего электрода вся область заполняется зарядами, причем их скорость движения настолько возрастает, что ионы сталкиваются с нейтральными молекулами газа, возбуждают их и стимулируют распадаться на ионы. Ударная ионизация приводит в движение ионы и электроны, которые ускоряются и ионизируют новые молекулы газа. Этот процесс концентрируется в пространстве вблизи коронирующих электродов, где напряженность электрического поля максимальна, что приводит к возникновению коронного разряда. Напряжение, при котором возникает коронный разряд, называется критическим ($U_{\text{кр}}$) и обычно составляет 10÷20 кВ.

В третьем периоде снова наблюдается увеличение силы тока с ростом напряжения, при этом увеличивается частота и продолжительность разрядов между электродами. Сперва разряды носят искровой характер, но в конце периода переходят в дуговые. Этот процесс происходит при достижении напряжением пробойного значения ($U_{пр}$). При этом резко возрастает сила тока, что является крайне нежелательным явлением.

Таким образом, рабочее напряжение ионизации воздуха должно находиться в диапазоне от критического до пробойного значения [14].

Физический механизм зарядки частиц заключается в том, что ионы, перемещаясь к поверхности частицы под действием электрического поля и в результате процесса диффузии, захватываются частицей за счет сил зеркального отображения ионов в поверхности частиц. С увеличением размера частиц уменьшается величина градиента концентрации ионов у их поверхности, следовательно, уменьшается вклад процесса диффузии в зарядку, и возрастает роль движения ионов под действием поля.

Таким образом, зарядка частиц при коронном разряде осуществляется по двум механизмам: под воздействием электрического поля (частицы бомбардируются ионами, движущимися в направлении силовых линий поля) и за счет диффузии ионов. Первый механизм доминирует при размере частиц более 0,5 мкм, а второй – при размерах частиц менее 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2÷0,5 мкм эффективны оба механизма, причем минимальная скорость зарядки наблюдается для частиц размером около 0,3 мкм [1].

Предельная величина заряда, приобретаемого под действием электрического поля, проводимой частицей сферической формы, может быть рассчитана по формуле

$$q = 3\pi d_q^2 \varepsilon_0 E, \text{ Кл}, \quad (3.47)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость (в вакууме), Ф/м;

E – напряженность электрического поля коронного разряда, В/м.

Предельная величина заряда, приобретаемого непроводящей частицей, рассчитывается по формуле

$$q = 3\pi d_q^2 \varepsilon_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} E, \text{ Кл}, \quad (3.48)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

При диффузионном механизме зарядки величина заряда находится по выражению

$$q_D = \frac{2\pi d_q K_\phi T_\varepsilon \varepsilon_0}{e} \left(1 + d_q \sqrt{\frac{2\pi}{m_u K_\phi T_\varepsilon} n_u e^2 \tau} \right), \text{ Кл}, \quad (3.49)$$

где e – величина заряда электрона, Кл ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

n_u — концентрация ионов коронного разряда, ионы/м³;

m_u — масса иона, кг.

Для обычно встречающихся на практике условий ($T_\varepsilon = 420 \div 670$ К и $n_u = 10^{14}$ ионов/м³) уравнение (3.49) можно значительно упростить

$$q_D \approx 10^8 d_q e, \text{ Кл}. \quad (3.50)$$

Таким образом, максимальная величина заряда частиц размером более 0,5 мкм, пропорциональна квадрату диаметра частиц, а частиц размером меньше 0,2 мкм – диаметру частицы.

При определении предельного заряда для диэлектрических частиц обычно принимают, что избыточный заряд распределен по поверхности частицы равномерно, т. е. как на проводнике. Такое допущение справедливо, поскольку неравномерное распределение заряда по поверхности приводит к вращению частицы и выравниванию заряда. С учетом этого предположения для расчета кинетики зарядки диэлектрических сферических частиц справедлива формула

$$q_\tau = 3\pi d_q^2 \varepsilon_0 \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} E \frac{e \cdot n_u \cdot k_u \cdot \tau}{4\varepsilon_0 + e \cdot n_u \cdot k_u \cdot \tau}, \text{ Кл}, \quad (3.51)$$

где k_u – подвижность ионов, м²/(В·с).

Результаты расчета заряда по формуле (3.51) при типичном для полей коронного разряда значении концентрации ионов приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты расчета заряда частицы при различной продолжительности
воздействия электрического поля

Время нахождения частицы в поле коронного разряда, с	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Заряд частицы относительно предельного значения заряда, %	8	45	90

Для ультра- и мелкодисперсных частиц поток ионов на частицу определяется градиентом концентрации ионов вблизи частицы, так как на некотором расстоянии от частицы концентрация ионов равна концентрации, определяемой коронным разрядом, а непосредственно у поверхности она равна нулю. Нулевая концентрация ионов у поверхности частицы обусловлена тем, что из-за действия у поверхности сил зеркального отображения частица поглощает все ионы. Отталкивающее поле избыточного заряда противодействует процессу диффузии.

Из условия неразрывности потока ионов, направленного к частице, с учетом граничных условий получено следующее выражение для расчета потока ионов [19]:

$$\Phi = \frac{k_u \cdot n_u \cdot q}{\varepsilon_0 \cdot \left(e^{\frac{k_u \cdot q}{2\pi \varepsilon_0 d_q D_q}} - 1 \right)}, \text{ с}^{-1}. \quad (3.52)$$

Поскольку изменение заряда частицы проходит за счет потока ионов, то

$$\frac{dq}{d\tau} = e \cdot \Phi. \quad (3.53)$$

При интегрировании последнего уравнения получим

$$\tau = \frac{\varepsilon_0}{e \cdot k_u \cdot n_u} \left(E \frac{k_u \cdot q}{D_q \cdot 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_q} - K_9 - \ln \frac{k_u \cdot q}{D_q \cdot 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_q} \right), \text{ с}, \quad (3.54)$$

где $E \frac{k_u \cdot q}{D_q \cdot 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_q}$ – интегральная показательная функция;

K_9 – постоянная Эйлера, равная 0,577.

На рис. 3.10 представлена графическая зависимость, основанная на формуле (3.54), которой удобно пользоваться для анализа зависимости заряда

от времени. Формула (3.54) показывает, что в случае чисто диффузионного механизма зарядки заряд частицы пропорционален ее радиусу. Из графика на рис. 3.10 следует, что заряд частицы непрерывно растет, хотя темпы роста уменьшается во времени. Предельное значение заряда отсутствует.

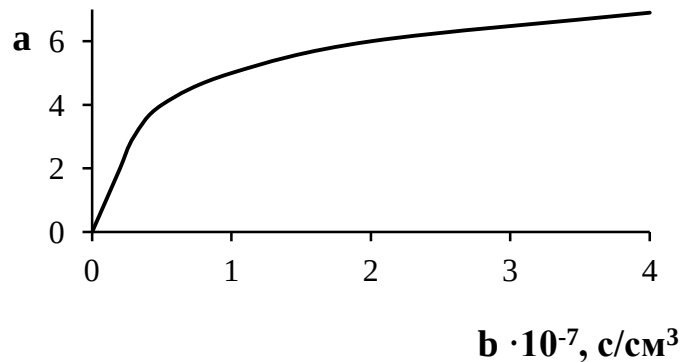


Рис. 3.10. Зависимость заряда частицы от времени:

$$a = \frac{k_u \cdot q}{D_q \cdot 2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_q}; b = n_{\text{и}} \cdot \tau, \text{ с/см}^3$$

Электрическая сила, действующая на заряженную частицу в электрическом поле, определяется по формуле

$$F_E = q \cdot E, \text{ Н.} \quad (3.55)$$

В области действия закона Стокса можно рассчитать, приравнивая кулоновскую силу к стоксовой силе сопротивления среды, скорость осаждения заряженных частиц

$$\omega_q = \frac{q \cdot E \cdot C_k}{3\pi\mu_z d_q}, \text{ м/с.} \quad (3.56)$$

Эффективность электрического осаждения частиц может быть определена теоретически, если принять ряд допущений: считать концентрацию частиц в межэлектродном пространстве постоянной; считать скорость дрейфа частицы постоянной; считать пыль монодисперсной, а вторичный унос – нулевым. В этом случае эффективность электрического разделения можно выразить формулой

$$\eta_{\text{э}} = 1 - e^{-\omega_q \cdot f}, \quad (3.57)$$

где f – удельная площадь поверхности осаждения, $\text{м}^2/(\text{м}^3/\text{с})$.

На методе электрического осаждения частиц основана работа электрофильтров. Электрические силы могут оказывать влияние на

осаждение частиц и в мокрых пылеуловителях. В этом случае наблюдается действие следующих электрических сил [1, 12]:

- 1) кулоновская сила притяжения или отталкивания между заряженными частицами и осадительным телом (например, каплей жидкости);
- 2) сила индукции между зарядом на осадительном теле и противоположным по знаку индуцированным зарядом на частице;
- 3) сила индукции между зарядом на частице и индуцированным зарядом на осадительной поверхности;
- 4) сила взаимодействия между заряженной частицей и другими частицами, заряженными униполярно;
- 5) сила взаимодействия между заряженными частицами и заряженным коллектором орошения, индуцирование заряда на котором осуществляется другими частицами с противоположным зарядом.

Расчеты и эксперименты показали, что наибольшая эффективность осаждения при воздействии электростатических сил в мокрых пылеулавливателях достигается, когда заряжены и частицы, и капли, велико время пребывания частиц в пылеуловителе, а также низка относительная скорость между частицами и каплями.

Электрическое осаждение может происходить также в результате взаимодействия зарядов, возникающих на волокнах фильтра, с нейтральными частицами. Заряженное волокно создает вокруг себя неоднородное электрическое поле. Частицы поляризуются этим полем и притягиваются к поверхности волокон. Эффективность осаждения в этом случае рассчитывается по формуле [12]

$$\eta_{\Phi} = \frac{E_{\phi}^2 d_{\phi}^2 \epsilon_0}{3\omega_c \mu_c d_{\phi}}, \quad (3.58)$$

где E_{ϕ} — напряженность электрического поля на поверхности волокон, В/м;

d_{ϕ} — диаметр волокон, м.

Электрические заряды на волокнах в большинстве случаев нестабильны и быстро исчезают вследствие проводимости волокон и под влиянием влажности.

Электрические силы при осаждении частиц на волокна становятся важным фактором при осаждении частиц субмикронных размеров. В фильтрах с незаряженными волокнами эффективность осаждения может быть повышена за счет предварительной зарядки частиц в коронном ионизаторе [12].

3.8. Суммарная эффективность улавливания частиц под воздействием различных механизмов осаждения

Обычно пылеулавливание осуществляется под воздействием нескольких механизмов осаждения одновременно.

Для расчета суммарного воздействия трех механизмов осаждения (инерции, зацепления и диффузии) было предложено следующее уравнение [1]:

$$\eta = 6Sc^{-2/3} \cdot Re^{-\frac{1}{2}} + 3 \left(\frac{d_u}{d_r} \right) \cdot \sqrt{Re}. \quad (3.59)$$

Формула (3.59) позволяет получить результаты сопоставимые с экспериментальными данными.

Поскольку отдельные механизмы осаждения взаимосвязаны, общую эффективность нельзя представить в виде суммы эффективностей осаждения по каждому механизму. Приблизительно оценить суммарную эффективность осаждения можно при допущении, что частицы, не уловленные в результате действия одного из механизмов, будут осаждены за счет действия других. Общая эффективность осаждения в этом случае может быть описана уравнением вида

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{stk}) \cdot (1 - \eta_G) \cdot (1 - \eta_z) \dots \quad (3.60)$$

Если известно, что один или два механизма являются преобладающими в конкретном случае разделения аэрозолей, то следует рассчитывать эффективность осаждения по наиболее вероятным механизмам. Остальные

механизмы в этом случае будут играть второстепенную роль, и ими можно пренебречь.

В этом случае, когда улавливание взвешенных частиц происходит в несколько последовательных стадий, общая эффективность рассчитывается по формуле

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot (1 - \eta_3) \dots, \quad (3.61)$$

где η_1, η_2, η_3 – эффективности улавливания взвешенных частиц, соответственно, на первой, второй и третьей стадиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Яламов Ю.И. Теоретические основы охраны атмосферного воздуха от загрязнения промышленными аэрозолями: учеб. пособие / СПбГТУРП. – СПб., 1993. - 253 с.
2. Орлов Р.В., Стреляева А.Б., Барикаева Н.С. Оценка взвешенных частиц PM10 и PM2.5 в атмосферном воздухе жилых зон // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2013. - № 12 (134). — С. 39-41.
3. Роул А. Основные принципы анализа размеров частиц: техническая аннотация. - Воркестершир.: Malvern Instruments Limited, 2009. - 12 с.
4. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ. ред. А.А. Русанова. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
5. Зимон А.Д., Андрианов Е.И. Аутогезия сыпучих материалов. - М.: Металлургия, 1978. - 288 с.
6. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. Адгезия. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. - 244 с.
7. Коузов П.А., Скрябина Л.Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. - Л.: Химия, 1983. – 143 с.
8. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – Введ. 1991-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 38 с.
9. Клевлеев В.М., Минаев Д.С., Алифференкова М.А. Пожаровзрывоопасность взвешенной ультрадисперсной пыли // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2009. - № 12. - С. 11-13.
10. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 22.12.2017 г. № 165 «Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений»

[Электронный ресурс] // Консорциум Кодекс. URL: <http://docs.cntd.ru/document/556185926/> (дата обращения: 27.03.2019).

11. Федеральный закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ (с изм. и доп. от 29.07.2018 г.) «Об охране атмосферного воздуха» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22971/ (дата обращения: 27.03.2019).

12. Вальдберг А.Ю., Александров В.П. Фильтры для очистки промышленных газов: учеб. пособие. – М.: МГУИЭ, 2009. – 204 с.

13. Ухов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков В.И. и др. Очистка промышленных газов от пыли. - М.: Химия, 1981. – 392 с.

14. Исянов Л.М., Григорьев Л.Н., Левин А.В. и др. Теоретические основы охраны окружающей среды (Охрана атмосферного воздуха): учеб. пособие / ЛТИЦБП. - Л., 1991. - 75 с.

15. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1981. - 296 с.

16. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.

17. Langmuir I. Report on Smokes and Filters // U.S. OSRD. – 1942. – № 865.

18. Страус В. Промышленная очистка газов. – М.: Химия, 1981. – 616 с.

19. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекан Г.З. и др. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. – М.: Энергия, 1974. – 480 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АЭРОЗОЛЕЙ	4
1.1. Классификация аэрозолей.....	4
1.2. Дисперсный состав аэрозолей.....	6
1.3. Свойства взвешенных частиц.....	13
1.3.1. Плотность частиц	13
1.3.2. Адгезия и аутогезия частиц.....	15
1.3.3. Сыпучесть и угол естественного откоса	21
1.3.4. Абразивность частиц.....	22
1.3.5. Смачиваемость частиц	24
1.3.6. Гигроскопичность и растворимость частиц	28
1.3.7. Электрические свойства частиц.....	29
1.3.8. Возгораемость и взрывоопасность аэрозолей	36
1.4. Негативное воздействие аэрозолей на человека и окружающую среду	41
2. СОПРОТИВЛЕНИЕ ГАЗООБРАЗНОЙ СРЕДЫ ДВИЖЕНИЮ ЧАСТИЦ ...	47
3. ВЫДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ИЗ АЭРОЗОЛЯ.....	51
3.1. Основные механизмы осаждения.....	51
3.2. Гравитационное осаждение частиц	52
3.3. Инерционное осаждение частиц из прямолинейных потоков.....	56
3.4. Осаждение частиц под действием центробежной силы	61
3.5. Зацепление (эффект касания)	64
3.6. Диффузионное осаждение	65
3.7. Осаждение частиц под действием электрических сил	69
3.8. Суммарная эффективность улавливания частиц под воздействием различных механизмов осаждения	77
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	79

Учебное издание

Исянов Лев Менделевич

Васильева Елена Александровна

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЧИСТКИ
И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ
И СБРОСОВ

Часть 3

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.П. Новикова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2019 г., поз.92

Подписано к печати 09.07.19. Формат 60х84/16. Бумага тип № 1.
Печать офсетная. 5,25 печ.л.; 5,25 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.
Изд. № 92. Цена «С». Заказ №з

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.