

Л.В. Чекалов, Ю.И. Санаев



**Свойства промышленных пылей
и
эффективность электрофильтров**

*Семибратово
«Кондор – Эко»
2019*

Л.В. Чекалов, Ю.И. Санаев

Свойства промышленных пылей и эффективность электрофильтров

Для правильной разработки, проектирования, выбора типоразмера и изготовления, установок электрогазоочистки, правильной пуско-наладки и эксплуатации электрофильтров (ЭФ) необходимо учитывать свойства улавливаемой пыли.

В брошюре изложены основные свойства промышленных пылей, учитываемые при разработке и проектировании установок электрогазоочистки, выборе типоразмера, изготовлении, пуско-наладке и эксплуатации ЭФ.

Большое внимание уделено анализу работы электрофильтров при высокой концентрации мелкодисперсной фазы.

Дан анализ влияния электромагнитного поля на осаждение в ЭФ взвешенных немагнитных и магнитных частиц.

*Редактор Д.В. Боровков
Компьютерная верстка Д.В. Боровков*

Семибратово
© « Кондор - Эко», 2019

Содержание

1. Удельное электрическое сопротивление пыли осевшей на осадительных и коронирующих электродах.....	4
2. Дисперсность улавливаемой пыли.....	5
2.1. Влияние дисперсной фазы на эффективность ЭФ.....	9
2.2. Анализ работы электрофильтров при высокой концентрации мелкодисперсной фазы.....	17
3. Удельная поверхность частиц.....	24
4. Плотность частиц.....	25
5. Адгезия, аутогезия, (слипаемость) пыли. Угол естественного откоса.....	26
6. Очистка электродов ЭФ от пыли.....	29
7. Содержание недожега в золе.....	30
8. Удельная поверхность частиц.....	31
9. Абразивность.....	31
10. Гигроскопичность.....	33
11. Смачиваемость.....	33
12. Морфологические свойства пыли.....	34
13. Пожаро-взрыво безопасность частиц пыли.....	36
14. Химический состав пыли.....	42
15. Коагуляция взвешенных частиц.....	43
16. Трибозаряд частиц.....	45
17. Влияние электромагнитного поля на осаждение взвешенных немагнитных и магнитных частиц.....	45
18. Об электрической очистке выхлопных газов тепловых двигателей.....	55
19. Диффузиофорез.....	57
20. Термофорез.....	57
21. Процессы, способствующие осаждению частиц.....	57
22. Рекомбинация заряженных частиц.....	58
23. Способы сжигания топлива.....	58
24. Литература.....	59

1. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) пыли на осадительных и коронирующих электродах электрофильтров (ЭФ)

УЭС – один из важнейших параметров пыли, оказывающий влияние на эффективность работы электрофильтра (ЭФ). Этому параметру посвящена отдельная наша брошюра, где рассмотрено влияние основных факторов на УЭС и степень очистки газов. В ней предложены методы повышения эффективности ЭФ [1] с учетом УЭС и принципиально новый способ измерения УЭС, заключающийся в измерении УЭС непосредственно в полях ЭФ. Поэтому здесь влияние УЭС слоя пыли на электродах ЭФ специально не рассматривается. Дополнительно отметим здесь об измерении УЭС, приведенном в Атласе Л.Я. Скрыбиной. В этом Атласе приведены значения УЭС для проб пыли (золы) при различных температурах. Пробы пыли из многопольных ЭФ отбирались из каждого бункера и смешивались в соотношении, пропорциональном эффективности пылеулавливания каждым полем. Измерения производились на измерительной ячейке, выполненной в виде двух соосных цилиндрических электродов, расстояние между которыми составляло 2,5 мм. Это расстояние фиксировалось с помощью изоляционной шайбы из фторопласта. В ячейку насыпался слой пыли с последующим уплотнением нагрузкой 100 Па. Измерительная ячейка помещалась в камеру, с электрическим подогревом. На электроды подавалось напряжение постоянного тока. Величина тока I измерялась гальванометром.

$$\rho = R \cdot S / L = R \cdot S / I \cdot L, \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

где: S – площадь электрода, м^2 ;

L – расстояние между электродами, м .

Для золы, содержащей более 15 % недожега, приводилось УЭС минеральной части, полученной также прокаливанием золы при 550°C . (В этих случаях УЭС золы было на 1...3 порядка выше).

Эти уникальные обширные данные по величине проб пыли, отобранных из бункеров ЭФ, представляют безусловный практический интерес и широко используются при выборе, наладке и эксплуатации ЭФ. Других подобных данных в настоящее время нет. Таким образом, применительно к многопольным ЭФ, приведенные в Атласе данные представляют характеристику усредненного значения УЭС проб пыли, уловленной на осадительных и коронирующих электродах и отрянутой в бункера полей.

В соответствии с известными современными данными УЭС пыли (золы) по полям ЭФ может отличаться на величину до двух порядков. Известно также, что на электродах ЭФ имеется неотряхиваемый слой пыли, который вносит изменения в величину УЭС. Кроме того, упаковка (плотность) слоя пыли на электродах зависит от свойств пыли и условий ее осаждения в электрическом поле ЭФ. На величину УЭС влияние оказывает величина напряжения, при котором происходит работа данного поля. УЭС пыли

изменяется при отклонениях режима работы технологического агрегата. Наконец, УЭС пыли в различных местах одного поля отличается из-за различного дисперсного состава, температуры по высоте электродов поля, толщине слоя и другие. Таким образом, для получения уточненного значения УЭС пыли конкретного поля, особенно при введении этого параметра в автоматическую систему регулирования работы ЭФ, необходимо постоянное непрерывное измерение УЭС непосредственно в конкретном поле ЭФ.

Кондиционирование газов перед ЭФ целесообразно в тех случаях, когда удельное электрическое сопротивление улавливаемой пыли превышает примерно $0,5 \cdot 10^9$ Ом·м.

В качестве химических кондиционирующих реагентов могут применяться вода, серный ангидрид, водные растворы H_2SO_4 , $(NH_4)SO_4$ и др. соединения серы.

Применение аммиака в качестве кондиционирующего реагента возможно только в тех случаях, когда в газах и золе отсутствует HCl. Во всех случаях кондиционирование газов, поступающих в ЭФ, требует дополнительного, нередко довольно сложного и дорогого оборудования.

Наиболее целесообразным является организация питания ЭФ с использованием данных по УЭС пыли для каждого поля.

2. Дисперсность улавливаемой пыли

Дисперсная фаза может состоять из частиц одинакового размера, но, как правило, промышленные газы содержат частицы различного размера. В зависимости от размера частицы разделяют на фракции (интервалы с нижним и верхним пределом размера). Обычно размер частиц выражается в микронах. Размеры некоторых частиц имеют следующую величину (мкм):

Атмосферная пыль.....	0,97
Табачный дым.....	0,015 – 0,001
Зола от сжигания пылевидного угля.....	5 - 15
Цементная пыль	
в размольных мельницах.....	7 – 10
из газов клинкерообжигательных печей.....	0,8 – 6,0

Существует целый ряд способов характеристики дисперсного состава пылей. Академик А.Н. Колмогоров показал, что дисперсный состав большинства измельченных материалов подчиняется логарифмически нормальному закону. При этом интегральные графики распределения пыли в вероятностно-логарифмической сетке в большинстве случаев изображаются прямой (или близкой к прямой) линией. Дисперсный состав пыли в процессах

пылеулавливания характеризуется преимущественно медианным диаметром частиц d_{50} и стандартным отклонением размера частиц σ .

d_{50} – медианный размер частиц, при котором масса всех частиц в пробе мельче или крупнее d_{50} составляет 50%.

σ – стандартное отклонение.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i^2 - d_{50}^2)}{n-1}},$$

где: n - число проб.

Важное свойство логарифмически-нормального распределения частиц по размерам тот факт, что, если подобный вид распределения получен относительно размера частиц, то он сохраняется и для распределения частиц по массе, причем величина $\lg \sigma$ остается без изменения.

Для пылей, распределение частиц по размерам, в которых подчиняется логарифмически-нормальному закону, применяется стандартная величина отклонения:

$$\sigma = \frac{d_{84}}{d_{50}} = \frac{d_{50}}{d_{16}},$$

где: d_{16} и d_{84} – диаметры частиц, при которых масса всех частиц менее d_{16} и d_{84} составляет соответственно 16 % и 84 % от массы частиц данной пробы. Влияние размера частиц на степень очистки газов в ЭФ сказывается в первую очередь через величину их электрического заряда, который определяет (при данной напряженности электрического поля) скорость их дрейфа в направлении к осадительному электроду.

Дисперсность пыли может задаваться фракционным составом, т.е. долями общей массы аэрозоля, размеры частиц которых находятся в определенном интервале значений, принятых в качестве верхнего и нижнего пределов (см. таблицу 1).

Таблица 1.

Пример задания дисперсного состава пыли

Размеры частицы пыли d , на границах фракций, мкм	<5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-60	60-80	>80
Распределение общей массы частиц пыли по фракциям, Φ_i , %	13	21	32	14	7	4	6	3
Массовая доля частиц пыли для фракций менее заданного размера, $m(d)$, %	13	34	66	80	87	91	97	100

В общем случае размеры частиц промышленных аэрозолей (пыли) формируются под действием множества факторов, влияние каждого из которых не может быть точно учтено. В подобных случаях вступают в действие законы теории вероятности и математической статистики, а именно размер частицы (ее эквивалентный d_s или седиментационный d_c диаметры) рассматривается как случайная величина. Тогда дисперсионные свойства пыли удобно описывать вероятностной функцией распределения $m(d_s)$ массы частиц аэрозоля по его размерам d_s . Принято, что для аэрозольных частиц промышленной пыли и порошкообразных материалов наиболее характерен закон логарифмически нормального распределения (ЛНР). Для описания ЛНР, в практических целях удобно пользоваться логарифмической вероятностной координатной сеткой, которая характеризуется тем, что: по оси абсцисс откладывается $lg(d)$ (для наглядности, на вероятностной координатной сетке проставляются сами значения диаметров частиц d); по оси ординат откладываются значения величины x , (на вероятностной координатной сетке проставляются значения функции $\Phi(x) = m(d)$, т.е. значения нормальной функции распределения от величины x). Вычерченный на такой сетке график ЛНР изобразится прямой линией, поскольку зависимость x от $lg(d)$ является линейной. Угловой коэффициент $tg\alpha$ этой прямой равен $tg\alpha = 1/lg\sigma$, здесь α - угол наклона между прямой и положительным направлением оси абсцисс. Таким образом:

- более дисперсный порошкообразный материал (пыль, аэрозоль) обладает большим значение дисперсии σ и соответственно меньшим углом наклона прямой α ;

- чем ближе к вертикали линия распределения на логарифмически вероятностной координатной сетке, тем менее порошкообразный материал (пыль, аэрозоль) дисперсный и более однороден по своим размерам;

- более измельченному материалу соответствует меньший медианный диаметр d_{50} частицы и более высокое расположение на логарифмически вероятностной координатной сетке.

Стандартное (среднеквадратическое) отклонение логарифмов диаметров частиц можно определить как:

$$lg\sigma = (lgd - lgd_{50})/x \quad ,$$

тогда при $x = \pm 1$:

$$lg\sigma = \pm (lgd - lgd_{50}) \quad ,$$

или, для $x = +1$ из табулированной функции нормального распределения Гаусса следует, что $F_0 = 0,841$, или

$$lg\sigma = lgd_{84,1} - lgd_{50} = lg\left(\frac{d_{84,1}}{d_{50}}\right) \quad .$$

Аналогично, для $x = -1$ следует, что $F_0 = 0,159$ или

$$\lg \sigma = \lg d_{50} - \lg d_{15,9} = \lg \left(\frac{d_{50}}{d_{15,9}} \right) .$$

Отсюда видно, что среднеквадратическое отклонение можно определить:

$$\lg \sigma = \lg \left(\frac{d_{84,1}}{d_{50}} \right) = \lg \left(\frac{d_{50}}{d_{15,9}} \right) ,$$

или

$$\sigma = d_{84,1} / d_{50} = d_{50} / d_{15,9}$$

Из вышеизложенного следует, что для порошкообразных материалов (пылей) и аэрозолей, подчиняющихся ЛНР, достаточно указать *два параметра* для получения представления о дисперсном (фракционном) составе:

во-первых, значение *медианного диаметра* d_{50} ;

во-вторых, значение *среднего логарифмического отклонения* σ , т.е. параметра, который характеризует наклон прямой ЛНР на логарифмически вероятностной координатной сетке.

Обычно эти параметры устанавливаются опытным путем и принимаются в качестве исходных величин при проектировании газоочистного оборудования. Все эти рассуждения, применяются в основном для твердых порошкообразных материалов (аэрозолей, пыли), которые по ГОСТ 12.2.043 – 80 подразделяют на пять классификационных зон.

На рис. 1 приведена логарифмическая вероятностная сетка, на которой линиями выделены границы зон пяти классификационных групп пыли:

I - очень крупнодисперсная пыль (уголь);

II - крупнодисперсная пыль (например, мелкий песок для строительных работ по ГОСТ 8736 – 77);

III - среднедисперсная пыль (например, цемент);

IV - мелкодисперсная пыль (например, взвешенная атмосферная пыль);

V - очень мелкодисперсная пыль.

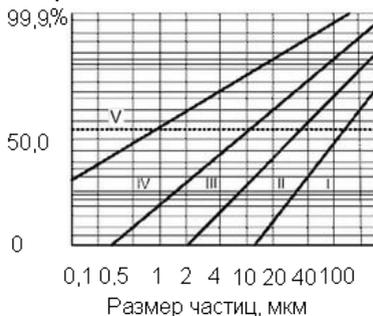


Рис. 1. Классификационные группы пыли по размеру частиц

Для определения классификационной группы заданной пыли на номограмму наносят точки, соответствующие содержанию каждой фракции пыли. Полученные точки соединяют прямыми линиями. Положение образованной прямой или ломаной линии в той или иной зоне номограммы, обозначенной римскими цифрами I – V, указывает на принадлежность заданной пыли к соответствующей классификационной группе.

2.1. Влияние дисперсной фазы на эффективность ЭФ

Качественное влияние содержания дисперсной фазы на степень очистки газов электрофильтром можно изобразить зависимостью приведенной на рис. 2.

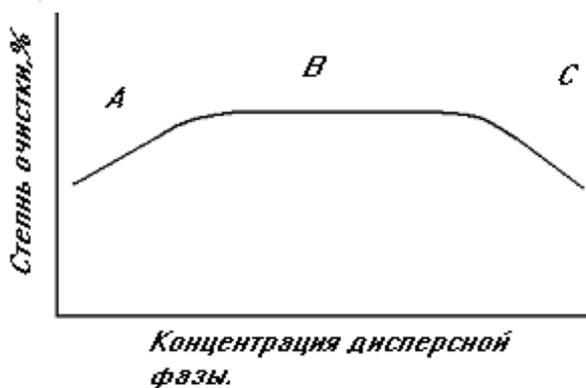


Рис.2 Характер зависимости степени очистки газов в ЭФ от концентрации дисперсной фазы.

Величина степени очистки газов ЭФ определяется для заданных технологических условий типоразмером выбранного аппарата. При умеренной концентрации дисперсной фазы примерно в диапазоне 5-10...40-90 г/м³ степень очистки может быть представлена прямолинейным участком «В» на рис. 2.

При малой концентрации дисперсной фазы степень очистки характеризуется участком «А». Здесь снижение степени очистки обусловлено тем, что в большинстве технологических процессов малые концентрации пыли содержат частицы малого размера.

В случае высокой концентрации дисперсной фазы (участок «С»), снижение степени очистки газов обусловлено запирающим действием

объемного заряда пылевых частиц. При этом основная часть носителей заряда осаждается на пылевых частицах.

Простейшую теоретическую зависимость скорости дрейфа частиц в электрофилт্রে от их размера можно проиллюстрировать с помощью формулы, показывающей, что скорость дрейфа пропорциональна радиусу частиц r :

$$\omega_n = 0,118 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{E^2 \cdot \delta}{\mu} \cdot r \quad , \text{ м/с} \quad (1)$$

где: $E^2 = E_3 \cdot E_o$,

E_3 - напряженность поля зарядки частицы, В/м;

E_o - напряженность поля, где частица осаждается, В/м;

μ - динамическая вязкость газа.

$\mu = 0,181 \cdot 10^{-10}$ н·с/м² при очистке воздуха с температурой 20 °С.

Эта формула применима для частиц размером 2...50 мкм и при показателе диэлектрических свойств частицы $\delta = 2$.

$$\delta = 1 + 2 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \quad ,$$

где: ε – относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

Для частиц радиусом 0,05–1 мкм при расчете скорости дрейфа берется поправка Каннингема:

$$\omega' = \omega_n \left(1 - A \cdot \frac{S_m}{r} \right) \quad ,$$

где: $A = 0,81 \dots 1,63$

S_m – средний путь свободного пробега молекулы, для газов $S_m = 10^{-7}$ м.

Таблица 2

Скорость движения заряженных частиц в электрическом поле коронного разряда

Радиус частицы, мкм	Скорость движения ω_n , м/с при		
	Е=1,5 кВ/см	Е=3,0 кВ/см	Е=3,3 кВ/см
0,2	0,012	0,025	0,032
0,5	0,013	0,030	0,055
1,0	0,015	0,060	0,11
5,0	0,0715	0,30	0,55
10,0	0,15	0,6	1,1

Из таблицы 2. следует, что расчетная скорость движения частиц радиусом 1 мкм и более 1 мкм прямо пропорциональна их размеру, а частиц радиусом

менее 1 мкм мало зависит от их размера и изменяется с изменением напряженности поля.

Очевидно, что увеличение содержания мелких частиц будет снижать степень очистки газов. Следует отметить, что практически в промышленных ЭФ скорость дрейфа при напряженности электрического поля около 3,3 кВ/см составляет от 0,03 до 0,15 м/с, что значительно ниже скоростей движения частиц, рассчитанных в таблице 1. Такое расхождение можно объяснить следующими причинами: несовершенство расчетной формулы (1) не позволяет учитывать вторичный унос частиц пыли при встряхивании и осаждении пыли, проскок частиц через неактивные и полуактивные зоны, обратную корону при улавливании пыли с УЭС более $5 \cdot 10^9$ Ом·м, запираение коронного разряда дисперсной фазой и др. Фактически процессы в ЭФ значительно сложнее.

В зоне В (рис.2) из-за осаждения частиц их концентрация в межэлектродном промежутке уменьшается. Это приводит к частичному отпиранию тока короны и медленной подзарядке частиц таким образом, что плотность объемного заряда частиц остается близкой к запирающей.

Начало зоны С соответствует условиям, когда заряд частиц начинает приближаться к предельному значению $q_{пр}$. Выполненные расчеты [1] показывают, что начало отпирания коронного разряда несколько опережает выход заряда на предельное значение. Это означает, что возможно существование ионного тока, хотя заряд не достиг еще предельной величины. Причиной этого является неравномерное распределение плотности ионного тока в межэлектродном промежутке и флуктуации в заряде частиц. Некоторый рост заряда происходит и после частичного отпирания коронного разряда вплоть до величины тока, приближающегося к $I_{макс}$ (при отсутствии влияния дисперсной фазы). Это явление связано также с изменением распределения объемного заряда в процессе отпирания коронного разряда. Ранее в предшествующих работах это обстоятельство не принималось во внимание.

При дальнейшем осаждении частиц в ЭФ их концентрация падает, происходит полное отпирание коронного разряда, ток стремится к предельной величине, а заряд частиц – к предельному значению.

Приближенный теоретический анализ запираения коронного разряда на основе допущения Дейча-Попкова свидетельствует, что влияние дисперсной фазы на характеристику коронного разряда определяется параметром D:

$$D = \frac{\rho_q \cdot h^2}{\epsilon_0 \cdot U},$$

где: ρ_q - УЭС частицы,

h – межэлектродное расстояние,

ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость частицы,

U – напряжение в межэлектродном промежутке.

Степень недозаряда частиц ξ будет представлять собой:

$$\xi = \frac{q}{(q_{\text{пред. уд}} + q_{\text{пред. диф}})},$$

Запирающее значение параметра D определяется при подстановке в формулу запирающего значения плотности заряда частиц. Полученные значения для $D_{\text{зан}}$ в системах электродов «Коаксиальные цилиндры», «Ряд проводов между плоскостями», позволяют рассчитать распределения поля.

Для системы «Ряд проводов между плоскостями»:

$$D_{\text{зан}} = 2,5 \cdot (1,37 - 0,12) \cdot \left(1 - \frac{e^{-0,4 \cdot \pi \cdot h}}{d}\right) \cdot \frac{U^* - 1}{U^*},$$

где: $U = U/U_0$.

Центральным моментом в разработке методики расчета степени очистки газов с учетом запирающего коронарного разряда в ЭФ является определение степени недозарядки частиц ξ .

С точки зрения расчета степени очистки газов ЭФ разбивается на две условные части: в первой имеется запирающее коронарное разряда, во второй – влияние дисперсной фазы отсутствует. Рассматривается первый участок.

При запирающем коронарном разряде заряд частиц $q_{\text{зан}}$ близок к величине определяемой по $D_{\text{зан}}$. Однако из-за различия условий зарядки в различных частях разрядного промежутка ЭФ и уменьшения скорости зарядки вблизи порога запирающего текущего значения $q_{\text{тек}}$ оказывается меньше. Степень недозарядки определяется как:

$$\xi = q_{\text{тек}} / q_{\text{пред}},$$

где: $q_{\text{пред}}$ - предельный заряд при отсутствии влияния дисперсной фазы,

$$q_{\text{тек}} = K_0 q_{\text{зан}},$$

$q_{\text{зан}}$ - значения заряда частиц, при котором происходит запирающее коронарное разряда,

$$K_0 - \text{коэффициент} < 1.$$

Из сопоставления экспериментальных и расчетных значений степени очистки $K_0 = 0,8$. Учитывая, что расчет ЭФ при наличии запирающего коронарного разряда производится по участкам, степень очистки на каждом участке невелика, и поэтому нормативной методикой расчета пользоваться нельзя. Предложено использовать традиционную форму записи уравнения Дейча-Попкова. Влияние факторов, действующих в реальном электрофилт্রে, таких как подзарядка частиц у коронирующего электрода, неравномерность распределения скорости газа и концентрации частиц, вторичного уноса, неактивных зон, учитывается с помощью соответствующих коэффициентов. Полидисперсный характер частиц пыли отражается на основании параметров логнормального распределения (среднего размера и дисперсии) различными

величинами среднего, среднего квадратичного и среднего кубического радиуса частиц.

Для оценки значений напряженности в электрофильтрах общепромышленного значения, которые соответствуют максимуму произведения максимального и среднего во времени значений напряжения, использовались многочисленные экспериментальные данные из соответствующих литературных источников. Они были обобщены и сопоставлены с полуэмпирическими формулами.

Предложенная методика расчета степени очистки газов на участке запыряния коронного разряда, заключается в том, что длина электрофильтра разбивается на элементы небольшой длины, в пределах которых степень недозарядки ξ принимается постоянной.

$$\xi_k = (0,8 \cdot D_{зап}) / D_{пред.к} ,$$

где: $D_{зап}$ определяется по (8),

$D_{пред.к}$ - предельный запирающий параметр k – того участка.

Значение концентрации частиц в начале k -того участка рассчитывается по начальной концентрации и убыли концентрации частиц на предшествующих участках:

$$\rho_{ч.пред.к} = N_k \cdot \rho_{пред}$$

Степень очистки газов и, соответственно, уменьшение концентрации частиц на рассматриваемом участке рассчитывается по формуле Дейча-Попкова с учетом недозарядки частиц.

Предложенная приближенная методика нуждается в экспериментальной проверке. К сожалению, данных об измерениях степени очистки газов в промышленных условиях при наличии запиряния коронного разряда очень мало. Наиболее подходящими являются случаи очистки ЭФ газов мартеновских печей при продувке ванны кислородом. Запыленность газа перед электрофильтром при продувке возрастает до 5-12 г/м³, уменьшается размер частиц ($d_{cp}=0,7-1,2$ мкм), снижается влажность газа.

Показано, что нарушением в работе электрофильтров в этих условиях является запиряние коронного разряда.

В качестве первого случая для анализа было выбрано применение электрофильтра ДГПН -55-3 на Череповецком металлургическом заводе для очистки газов за 600-тонной одноканальной мартеновской печью.

Между печью и электрофильтром был установлен котел-утилизатор КУ-100, который обеспечивал стабильное снижение температуры газа перед электрофильтром до 240-260°C. Исследование системы газоочистки проводилось при продувке ванны кислородом от 3 до 6 тыс. м³/час.

Вторая серия расчетных случаев связана с применением для очистки газов после мартеновских печей ЭФ типа ПГДС. ЭФ ПГДС (пластинчатый, горизонтальный, дымовой, с С-образными осадительными электродами) имеет

ленточно-игольчатые электроды (шаг между иглами 80 мм при высоте игл 12 мм), содержит три поля длиной 2,5 м каждое. Расстояние между осями осадительных электродов составляет 275 мм.

Схема газоочистки (Орско-Халиловский металлургический комбинат) включала между мартеновской печью и ЭФ регенератор, котел-утилизатор типа КУ-100 и скруббер.

Выделено три режима работы ЭФ ПГДС, отличающиеся количеством кислорода, подаваемого в ванну для продувки, и, соответственно, входной запыленностью и дисперсным составом.

Таблица 3

Параметры режимов ЭФ

Тип ЭФ	Индекс режима	D_{50}	$Z_{вх}$ г/м ³	Скорость газа, м/с	$Z_{вых}$ мг/м ³	$\eta_{экс}$	$\eta_{р.б/з}$	η_p
ДГПН-55-3	Б	1,32	5,3	1,4	150	0,968	0,983	0,967
ПГДС-70-3	A ₁	0,95	2,55	1,3	46,4	0,982	0,990	0,988
	A ₂	1,10	2,58	1,32	28,2	0,988	0,990	0,988
	A ₃	1,15	4,3	1,31	52,8	0,988	0,992	0,987

В результате расчета степени очистки газов по участкам в соответствии с предлагаемой методикой определены суммарные значения для различных ЭФ в различных режимах (см. табл. 3). Запирание коронного разряда приводит к существенной недозарядке частиц в начальной части ЭФ ($\xi = 0,35$ и менее). Особенно сильно влияние дисперсной фазы сказывается на проскоке частиц.

Из таблицы 3 следует, что рассчитанные значения степени очистки совпадают полностью с экспериментальными данными.

В случае наиболее сильного влияния дисперсной фазы (режим Б) степень очистки меняется от 0,983 до 0,967, проскок частиц возрастает в два раза. Относительно небольшие изменения степени очистки определяются тем, что зона запирания коронного разряда ограничивается первым полем, а второе и третье поля работают в обычном режиме.

При определении показателей только для первого поля получаются более существенные изменения. Например, для первого поля ЭФ ДГПН (режим С) изменение степени очистки за счет запирания коронного разряда составляет от 0,743 до 0,51.

Учитывая особые условия очистки газов и то, что запирание коронного разряда встречается часто при улавливании мелкодисперсных капель в химической промышленности, в качестве объекта были выбраны трубчатые мокрые ЭФ типа ЭТМ, устанавливаемые в очистном отделении производства

серной кислоты Череповецкого ОАО «Аммофос». Концентрация частиц на входе составила $2,9 \text{ г/м}^3$ при среднем геометрическом размере частиц $0,96 \text{ мкм}$.

Методика расчета степени очистки газов с учетом влияния дисперсной фазы была переработана применительно к трубчатым ЭФ. Скорректированы некоторые формы и коэффициенты. Трубчатый электрофильтр более чувствителен к приближенному характеру оценки влияния дисперсной фазы, так как в нем отсутствуют неактивные зоны и вторичный унос.

Расчет электрофильтра ЭТМ при улавливании капель серной кислоты выполнен по участкам, скорость потока составляла $1,0 \text{ м/с}$, электрофильтр работал в режиме периодических пробоев ($U_{\text{ср}}=43\text{кВ}$, $U_{\text{макс}}=50 \text{ кВ}$). Расчетная величина степени очистки $\eta_{\text{расч}}=0,96$ практически совпадает с экспериментальной $\eta_{\text{экс}}=0,962$, что еще раз свидетельствует о правомерности предложенной методики расчета степени очистки газа в электрофильтрах с учетом влияния высокой концентрации дисперсной фазы. Без учета влияния дисперсной фазы расчетная степень очистки в данных условиях составляет $0,976$.

Интересно отметить, что степень недозарядки частиц в начальной части поля электрофильтра составляет $0,5$, что приводит к такому же уменьшению скорости дрейфа частиц.

Запирающее действие дисперсной фазы охватывает около 40% длины ЭФ. Почти полностью ионный ток замыкается через вторую половину длины ЭФ (рис.3).

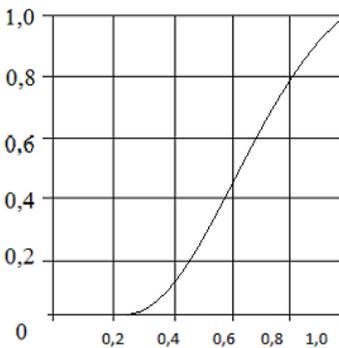


Рис.3. Распределение относительной плотности тока по длине ЭФ ЭТМ.

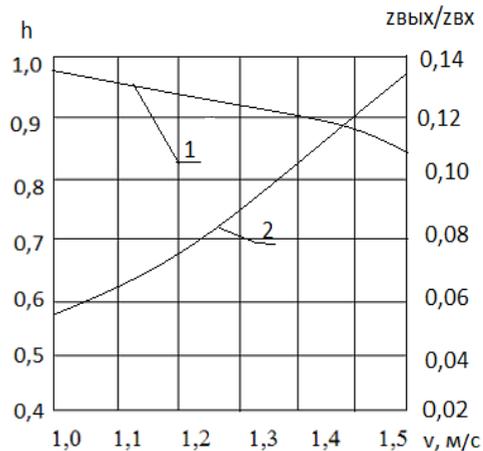


Рис. 4. Зависимость степени очистки плотности тока по длине ЭФ ЭТМ (1) и проскока тумана кислоты(2) от скорости газа в ЭФ

Существенным параметром, влияющим на степень очистки η и проскок частиц $(1-\eta)$, является скорость газа V_g , что иллюстрирует рис.4. Для электрофильтров, работающих при сильном влиянии дисперсной фазы, характерна более сильная зависимость от скорости потока, чем для электрофильтров, работающих при малой концентрации частиц. С ростом скорости потока газа степень очистки уменьшается, а проскок растет.

Таким образом для ЭФ, работающих при высокой концентрации дисперсной фазы, для учета запираания коронного разряда и ухудшения осаждения частиц разработана методика расчета степени очистки газа от частиц, предложен способ определения недозарядки частиц. Правомерность методики подтверждена сопоставлением с экспериментальными значениями степени очистки для ЭФ ДГПН и ПГДС, улавливающих пыли мартеновских печей, и электрофильтров типа ЭТМ, улавливающих капли серной кислоты.

Анализ расчетных материалов показал:

- из-за влияния дисперсной фазы скорость дрейфа частиц может снижаться в 2 и более раз по сравнению с аналогичными значениями при малой концентрации;
- плотность тока из-за влияния высокой концентрации по длине ЭФ распределяется крайне неравномерно. В начальной части ЭФ плотность тока близка к нулю;
- из-за влияния дисперсной фазы имеет место более резкое возрастание уноса с ростом скорости потока. Отличие условий, в которых существует коронный разряд при наличии дисперсной фазы в промежутке, заключается в том, что частицы пыли заряжаются и, таким образом, суммарный объемный заряд состоит из заряда не только ионов, но и заряда частиц пыли.

Величина суммарного объемного заряда сохраняется примерно на одном уровне, так как его значение, как и при отсутствии дисперсной фазы, определяется условием равенства напряженности у коронирующего электрода начальной напряженности E_0 . Неизменность суммарного объемного заряда в межэлектродном промежутке можно объяснить следующим образом. В результате действия поля суммарного объемного заряда напряженность у коронирующего электрода уменьшается от величины высокого электростатического заряда до величины начальной напряженности E_0 . При возрастании суммарного объемного заряда, возрастает и его ограничивающее действие и напряженность у коронирующего электрода становится ниже начальной. Как следствие, интенсивность ионизационных процессов уменьшится. Это приведет к уменьшению объемного заряда в промежутке. Таким образом, стабильность объемного заряда обеспечивается как бы действием сильной обратной связи.

При высокой концентрации мелкодисперсной фазы плотность объемного заряда частиц становится соизмеримой, а часто и превышает плотность объемного заряда ионов при сохранении суммарного значения на одном уровне.

2.2. Анализ работы электрофильтров при высокой концентрации мелкодисперсной фазы

Отличие условий, в которых существует коронный разряд при наличии дисперсной фазы в промежутке, заключается в том, что частицы заряжаются и, таким образом, суммарный объемный заряд состоит из заряда не только ионов, но и частиц. Суммарный объемный заряд сохраняется примерно на одном уровне, так как его значение, как и при отсутствии дисперсной фазы, определяется условием равенства напряженности E у коронирующего электрода начальной напряженности E_0 . Обычно имеющее место некоторое изменение связано с изменением характера распределения суммарной плотности объемного заряда по промежутку. Пояснить утверждение о неизменности суммарного объемного заряда в промежутке можно следующим образом. В результате действия поля суммарного объемного заряда напряженность у коронирующего электрода уменьшается от высокого электростатического значения до величины начальной напряженности E . Если суммарный объемный заряд возрастает, то возрастает и его ограничивающее действие и напряженность у коронирующего электрода станет ниже начальной. Как следствие, интенсивность ионизационных процессов уменьшится, и это приведет к уменьшению суммарного объемного заряда в промежутке. Таким образом, стабильность объемного заряда обеспечивается как бы действием сильной обратной связи. При высокой концентрации мелкодисперсной фазы плотность объемного заряда частиц становится соизмеримой, а часто и превышает плотность объемного заряда ионов при сохранении суммарного значения на одном уровне. Уравнения коронного разряда при наличии дисперсной фазы имеют вид:

$$\operatorname{div} \vec{E} = (\rho_u + \rho_c) / \epsilon_0$$

$$\operatorname{div} (\vec{I}_u + \vec{I}_c) = 0$$

где: \vec{E} - напряженность поля,

ρ_u - плотность объемного заряда ионов,

ρ_c - плотность объемного заряда частиц,

\vec{I}_u - плотность тока ионов

$$\vec{I}_u = k \cdot \rho_u \cdot \vec{E} \quad ,$$

k - подвижность ионов,

\vec{I}_c - плотность тока частиц

$$\bar{I}_q = N \cdot q \cdot B \cdot \bar{E} \quad ,$$

N - концентрация частиц,

q - заряд частиц,

B - механическая подвижность частиц,

\bar{E} - напряженность поля.

Из-за того, что подвижность ионов много больше подвижности пылевых частиц, т.е. $k \gg q \cdot B$, ток определяется ионной составляющей. Таким образом, уменьшение объемного заряда ионов при наличии дисперсной фазы приводит к уменьшению суммарной плотности тока коронного разряда. Это явление получило название «запирания коронного разряда».

Рассмотрим запирание коронного разряда в трубчатом ЭФ. Допустим, что из-за большой концентрации частиц объемный заряд частиц становится таким большим, что ионной составляющей можно пренебречь. Обозначим соответствующую плотность объемного заряда частиц через $\rho_{зан}$. Эти условия соответствуют полному запиранию коронного заряда.

В ЗАО «Кондор-Эко» предложена [2] электродная система ЭФ, в которой напряжение зажигания коронного разряда снижено на воздухе до 10 кВ. При этом предложено конструктивное решение для сохранения этого положения при длительной эксплуатации ЭФ. При такой электродной системе происходит расширение области эффективной работы ЭФ при улавливании мелкодисперсных частиц. Это необходимо, например, при улавливании в ЭФ возгонов в сталеплавильных печах и мартенах, туманов серной кислоты и др., где на первых полях при улавливании мелких частиц с диаметром менее 5 мкм и имеющих соответствующую развитую поверхность. Это приводит к эффекту запирания коронного разряда объемным зарядом мелких частиц в межэлектродном промежутке.

Та часть электрофильтра, или хотя бы первого поля, где коронный разряд отсутствует (заперт), частицы плохо улавливаются, в итоге эффективность всего ЭФ снижена. Применение предлагаемой новой электродной системы создает условия, где коронный разряд существует в зоне, где он при обычной электродной системе заперт, позволяет увеличить эффективность работы всего ЭФ.

В энергетике при улавливании не высокоомной золы и при отсутствии обратной короны ликвидация частичного запирания коронного разряда, проявляющегося в снижении токов короны первых полей, однозначно увеличивает эффективность существующих ЭФ.

Кроме того, при снижении напряжения зажигания коронного разряда увеличивается величина перенапряжения (между пробивным напряжением и напряжением зажигания короны) $U_{пр} - U_0$ и, соответственно, диапазон регулирования напряжения на ЭФ. Схема управления агрегатом питания позволяет осуществить «отработку» агрегатами питания (реагирование) на каждый искровой пробой в электрофильтре. Вместе с тем, новая схема позволяет управлять тиристорным регулятором напряжения таким образом,

что длительность импульса тока на выходе агрегата не будет зависеть от величины напряжения на ЭФ. Напряжение на ЭФ будет пульсирующим. В момент протекания тока при зарядке геометрической емкости ЭФ напряжение на электродах ЭФ будет расти. После окончания протекания тока напряжение будет снижаться. Напряжение на ЭФ будет снижаться после того как ток агрегата питания становится равен нулю. В момент, когда напряжение на ЭФ будет равно амплитудному значению, ток агрегата будет равен току коронного разряда. Далее ток коронного разряда будет уменьшать заряд геометрической емкости ЭФ, заряд будет уходить в межэлектродный промежуток. Ток в межэлектродном промежутке будет пульсирующим. При снижении напряжения на ЭФ до величины U_0 ток короны будет уменьшаться до нуля. В итоге в промежутке будет пульсирующий объемный заряд. Теория показывает, что чем круче передний фронт пульсации объемного заряда, тем больше увеличение мгновенной напряженности в заданной точке межэлектродного промежутка. Задний фронт пульсации объемного заряда уменьшает мгновенную напряженность в межэлектродном промежутке ЭФ, но предельный заряд частиц в ЭФ определяется максимальной величиной мгновенной напряженности в точке, где находится частица. Следовательно, при питании импульсным током в промежутке ЭФ создается пульсирующий объемный заряд, фронт которого увеличивает мгновенную напряженность в промежутке. Частицы получают большой предельный заряд и эффективность очистки ЭФ возрастает.

Ранее было показано, что новые системы управления позволяют отрабатывать на каждую отдельную искру в ЭФ. Следовательно, при пуске ЭФ, когда вначале нет обратной короны, агрегат питания увеличивает напряжение и ток ЭФ до первого пробоя в ЭФ.

Известно, что при достижении некоторого напряжения и тока в ЭФ при наличии высокоомного слоя на осадительном электроде, может происходить пробой. Такой ЭФ при времени пребывания частиц в активной зоне до 18-20 секунд эффективно улавливает золу от сжигания экибастузских углей и обеспечивает выходную запыленность 100 мг/м^3 , а для невысокоомной золы (пыли) - менее 50 мг/м^3 .

Кроме того, и в энергетике и в др. отраслях при улавливании не очень мелких частиц на входе, на последних полях ЭФ, степень очистки последнего поля может быть в полтора – два раза ниже, чем степень очистки первого поля. Решающими факторами, влияющими на резкое снижение эффективности последних полей являются снижение размера частиц, увеличение их УЭС и другие, в том числе неизученные параметры очищаемого пылегазового потока.

При скоростях газов в активной зоне электрофильтра, превышающих 1 м/с , улавливание крупных частиц происходит преимущественно на первых полях и может сопровождаться эрозией слоя, что снижает степень очистки газов.

Экспериментально установлено, что унос пыли при осаждении приводит к уменьшению общей степени очистки газов ЭФ в том случае, если 90 - 95 % пыли на входе крупнее, чем 20–30 мкм. Влияние уноса при этом можно оценить с помощью коэффициента k_1 в числителе формулы Дэйча:

$$k_1 = 0,51 \cdot \left(\frac{L_i \cdot \omega}{H_0 \cdot V} \right)^{-0,65} \quad (2)$$

При величинах k_1 больших 3,15 эрозией слоя можно пренебречь [3]. На размер частиц в электрофилт্রে при сжигании пылевидного угля оказывает влияние тонина помола. Предварительная ступень очистки газов, установленная перед ЭФ, изменяет не только концентрацию, но и дисперсный состав частиц, поступающих в ЭФ.

Анализ дисперсного состава пыли, улавливаемой в промышленных электрофилтрах, при отборе проб методом фильтрации на входе и выходе или из бункеров показывает экспоненциальное изменение размеров улавливаемых частиц по длине активной зоны.

Так, например, при улавливании в ЭФ экибастузского и львовско-волинского углей изменение дисперсного состава по длине активной зоны может быть аппроксимировано экспоненциальными зависимостями [3]. Получение подобных зависимостей подтверждает закономерное экспоненциальное изменение распределения размера уловленных частиц по длине активной зоны промышленных ЭФ, что должно учитываться при их расчетах, проектировании, и эксплуатации.

Таблица 4

Некоторые характеристики распространенных производственных пылей

Вид производства	Источник пыли	Вид пыли	d_{50} мкм	σ	ρ_n кг/м ³	ρ_n кг/м ³	S м ²	α	УЭС Ом·м	Z г/м ³
ТЭС	Топки котлов	Летучая зола	15...20	2,2...3,5	2100-2700	760	4900	65 70	10 ⁷ -10 ¹²	7-70
Предприятия строительных материалов	Печи, сушильные барабаны, мельницы	Пыль цемента, извести	4...15	2...2,6	2800	800	6000	65 70	10 ⁷ -10 ¹²	40
Предприятия металлургии	Домны, печи электро-дуговые	Возгоны	3	3	4000	760	16000	45	10 ⁸	1-40
Малые котельные	Котлы	Летучая зола	40	3,5	2500	900	2400	60	10 ⁹	20-40

ρ_n - плотность монолита кг/м³,

ρ_n - плотность насыпная кг/м³,
 α - угол естественного откоса.

В качестве примера рассмотрим изменение дисперсного состава золы уловленной в бункерах трехпольного ЭФ Ладыжинской ГРЭС.

Экспериментальные данные: $d_{50 \text{ вход}} = 23$ мкм, $d_{50 \text{ выход}} = 8,0$ мкм, а длина ЭФ составляет 3 x 3,84 м. Относительная длина средины полей составит: 0,166; 0,5; 0,833

Выполним расчеты по формуле:

$$d_{50F(L)} = d_{50 \text{ вх}} \cdot 1,1 \cdot e^{\left(-\frac{1,1 \cdot L_i}{L}\right)} \quad (3)$$

Таблица 5

Расчетный размер частиц (d_{50} , мкм) в середине полей ЭФ

Относительное расстояние от входа в ЭФ	0	0,166	0,5	0,833	1
$d_{50} = 23$	23	21,1	14,5	10,1	8,4

Возможность прогнозировать величину дисперсного состава улавливаемых частиц пыли по длине ЭФ представляет безусловный интерес. Это может позволить более эффективно использовать свойства улавливаемой пыли, например, при ее утилизации учитывающей свойства пыли при изменении дисперсного состава частиц.

Рязанская ГРЭС Экспериментальные данные:

1-е поле	2-е поле	3-е поле
$d_{50} = 35$	$d_{50} = 19$	$d_{50} = 16$
$\sigma = 2,7$	$\sigma = 2,5$	$\sigma = 2,4$

Таблица 5а

Расчетный размер частиц (d_{50} , мкм) в середине полей ЭФ

Относительное расстояние от входа в ЭФ	0	0,167	0,5	0,833	1
$d_{50} = 41$	41	35,0	18,5	9,0	-

Удовлетворительное совпадение (кроме третьего поля Рязанской ГРЭС) расчетных и экспериментальных данных позволяет предположить правомерность экспоненциального распределения дисперсного состава по длине ЭФ для электрофильтров ГРЭС, работающих на угле. Можно предположить, что для ЭФ, работающих в других отраслях промышленности экспоненциальный характер изменения дисперсного состава по длине ЭФ сохранится, а коэффициенты в формуле (3) могут быть уточнены.

Представляет интерес рассмотрение величины степени очистки газов по полям электрофильтра. Для примера рассмотрим опытный ЭФ ЭГЗ-3-177

Ладыжинской ГРЭС, на котором были проведены довольно подробные электрические и пыле-газовые измерения. Степень очистки газов в ЭФ 98,1; Длина полей 3,84 м; скорость газов в активной зоне – 1,64 м. Межэлектродное расстояние – 0,3 м. Скорость газов в активной зоне ЭФ – 1,64 м/с.

Рассчитав размеры частиц для середины полей ЭФ по формуле:

$$d_{50F(L)} = d_{50ex} \cdot 1,1 \cdot e^{\left(-\frac{1,1 \cdot L_i}{L}\right)},$$

получим следующие величины:

$$d_{50\ 1n} = 21,1 \text{ мкм};$$

$$d_{50\ 2n} = 14,5 \text{ мкм};$$

$$d_{50\ 3n} = 10,1 \text{ мкм}.$$

Определим скорость дрейфа для найденных диаметров по формуле (3) и степень очистки газов формуле Дэйча. Видно, что степень очистки газов по полям существенно отличается между собой $\eta_{1n} = 0,86$; $\eta_{2n} = 0,733$; $\eta_{3n} = 0,5$.

Общая степень очистки газов составит:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{1n}) \cdot (1 - \eta_{2n}) \cdot (1 - \eta_{3n}) = 0,981.$$

Снижение эффективности улавливания пыли по полям электрофильтра зависит от целого ряда причин, среди которых в первую очередь уменьшение размера частиц и увеличение удельного электрического сопротивления пыли. Кроме того, могут быть и другие причины, связанные с избирательным улавливанием частиц предыдущими полями.

Зависимость скорости дрейфа частиц от их размера можно охарактеризовать с помощью рис. 5. В диапазоне размеров частиц примерно 1-50 мкм скорость дрейфа изменяется линейно при изменении размера частиц.

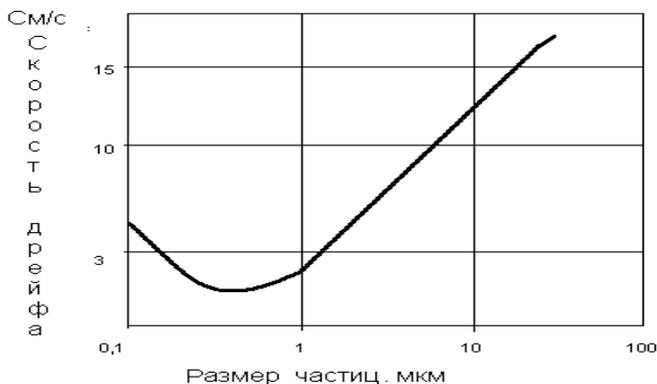


Рис.5 Качественная зависимости скорости дрейфа частиц от их дисперсного состава

Характер влияния дисперсного состава – размера частиц d_{50} и среднеквадратичного их отклонения их размера σ можно проиллюстрировать с

помощью зависимостей, приведенных на Рис.5 и 6. А влияние их на степень очистки газов в ЭФ можно рассчитать по формуле:

$$\eta = 1 - e^{-f_{\sigma} \cdot K_{d50} \cdot K_{\sigma}}$$

где: f_{σ} – базовый параметр Дэйча для исследуемого ЭФ

Коэффициенты K_{d50} и K_{σ} при изменении относительного размера частиц и изменении среднеквадратичного отклонения их размера следует подставить в числитель показателя экспоненты в формуле Дэйча для учета их влияния на степень очистки газа электрофильтром. Приведенные на Рис.6 и 7 зависимости построены для некоторых конкретных условий с целью иллюстрации характера влияния этих параметров. Для каждого отдельного случая эти зависимости будут иметь другие значения.

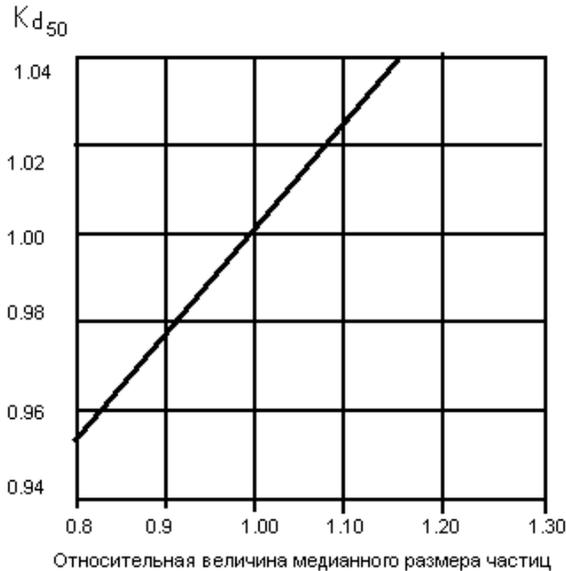


Рис. 6 Характер зависимости величины коэффициента K_{d50} от относительной величины медианного размера частиц.

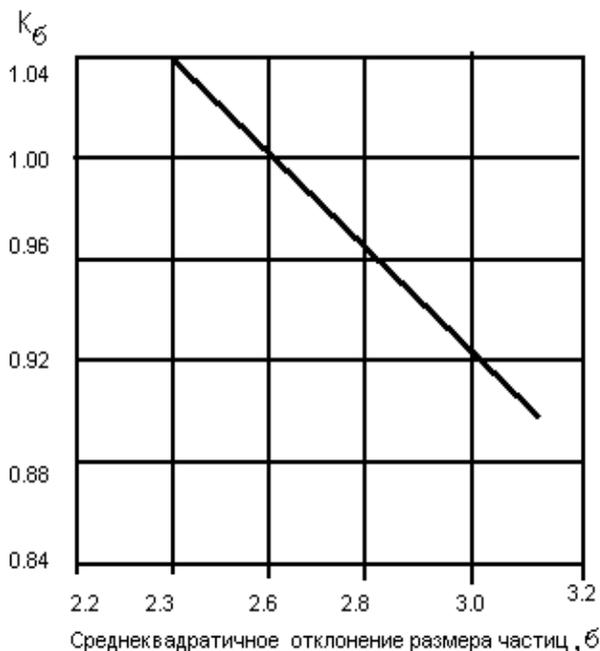


Рис. 7 Характер зависимости величины K_c от среднеквадратичного отклонения размера частиц.

Представляет практический интерес улавливание однозонным электрофильтром мелких частиц из атмосферного воздуха. Этот интерес обусловлен в частности необходимостью очистки воздуха для работы парогазовых установок. Испытания, выполненные ЗАО «Кондор-Эко» показывают, что степень очистки воздуха лабораторного помещения малогабаритным электрофильтром довольно высока.

Таким образом, дисперсный состав частиц является наряду с УЭС важнейшим параметром, влияющим на эффективность улавливания частиц в ЭФ. Увеличение размера частиц (более крупный помол, коагуляция) позволяют повышать эффективность их улавливания.

3. Удельная поверхность частиц

Удельная поверхность частиц равна отношению их поверхности к их массе. Она определяется путем измерения воздухопроницаемости слоя пыли при атмосферном давлении прибором Т-3 [4, 7].

Промышленная пыль может состоять из частиц одинаковой и различной плотности. Например, кварцевая или корундовая пыли имеют одинаковую плотность содержащихся в них частиц. Летучая зола имеет не сгоревшие частицы в крупных фракциях, а в тонких фракциях – повышенное содержание солей кальция и щелочных металлов.

Определение удельной поверхности пыли основано на зависимости ее воздухопроницаемости от слоя пыли (пылевидного материала). Для измерения объема пробы используется мерный цилиндр (ГОСТ 1770-74). Массу пыли определяют на весах (ГОСТ 1949-74).

Значение удельной поверхности позволяет судить о дисперсности пыли. От удельной поверхности зависят многие свойства пыли и пылевидных материалов, например, прочность бетона, горение пылевидного топлива.

4. Плотность частиц

Важной физической характеристикой пыли является ее плотность. Ввиду сыпучего характера пыли определение ее плотности связано с некоторыми трудностями. Между отдельными частицами пыли образуются промежутки – интервалы. Кроме этого, в частицах пыли имеются также незаполненные материалом пыли пространства, которые называются порами.

Вес пыли характеризуют плотностью - это вес единицы непористой пыли, выражают в г/см³ (табл. 7), [26].

Таблица 7

Истинная плотность пыли некоторых веществ, г/см³

Асбестовая	2,8	Медная	6,8 - 8
Базальтовая	2,6 - 3	Доменная	3,2
Цементная	2,5 - 3,5	Известковая (сырая)	2,4 - 2,7
Графитовая	2,1 - 2,2	Известковая из обжиговых печей	2,8
Сланцевого порошка	2,8 - 8	Угольная	0,3 - 1,8
Шамотного	2,3 - 2,6	От газогенераторов	1,6
Древесная мука	1,6	От вращающихся цементных печей	2,4 - 2,8
Зола	1,5	Котельных (в среднем)	1,2 - 3
Брикетная	1,4 - 1,6	Железная руда	3,5 - 4,5
Зола котельных с содержанием горючих частей	5% 30 - 60%	Сажа	1,2
		Окиси свинца	~ 7
Коксовая	0,9 - 2	Окиси цинка	4,5
Содовая	2,2	Кремнеземный гель	1,5 - 2,8

Плотность - масса единицы объема, г/см^3 , кг/м^3 . Различают истинную, кажущуюся, насыпную плотность и насыпную плотность при встряхивании частиц пыли.

Истинная плотность твердой частицы есть отношение массы ее вещества к занимаемому ей объему за вычетом объема пор и газовых включений, которые могут быть внутри частицы.

Кажущаяся плотность частиц пыли - это масса единицы объема частиц, включая объем закрытых пор, после встряхивания в мерном сосуде путем вибрации.

Насыпную плотность в отличие от истинной, определяют с учетом воздушных зазоров между частицами неслежавшейся пыли. Насыпная плотность слежавшейся пыли оказывается в 1,2...1,5 раза больше, чем свеженасыпанной.

Насыпная плотность при встряхивании - масса единицы объема уловленной пыли достигаемая путем встряхивания в мерном сосуде с помощью вибрации. Величина насыпной плотности приводится в справочниках и используется для расчета объема бункеров.

5. Адгезия, аутогезия (слипаемость) пыли

Взаимодействие пылевых частиц с поверхностями называется адгезией. Взаимодействие пылевых частиц между собой называется *аутогезией*. Аутогенным воздействием вызывается образование конгломератов пыли. Обычно, когда речь идет о взаимодействии пылевых частиц между собой, явления аутогезии именуют слипаемостью. Устойчивая работа пылеулавливающего оборудования во многом зависит от слипаемости пыли. В качестве показателя слипаемости принимают прочность пылевого слоя на разрыв, Па. Считают, что для влажной пыли степень ее слипаемости должна быть увеличена на один уровень. Слипаетость возрастает с уменьшением размера частиц. Мелкие частицы в газовой среде прилипают к твердой поверхности за счет следующих сил:

- 1) Молекулярные силы.
- 2) Кулоновские силы между заряженными частицами, которые по величине могут превосходить молекулярные силы.
- 3) Силы двойного электрического слоя, образующегося в зоне контакта. Они обусловлены переходом ионов или электронов из одной зоны в другую (поверхностная ионизация) или ориентированием полярных молекул сопряженных фаз при их взаимодействии.
- 4) Капиллярные силы жидкости, если она конденсируется в зазоре между контактирующими телами.

Со слипаемостью связана другая характеристика пыли - сыпучесть, которая определяется величинами статического и динамического углов естественного откоса. От этих углов зависит выбор наклона стенок бункеров и диаметра пылевыгрузных отверстий.

Уловленная промышленная пыль относится к категории порошкообразных материалов, характерной особенностью которых является подвижность частиц относительно друг друга - способность перемещаться под действием внешней силы.

Сыпучесть порошковых материалов и уловленной пыли зависит от размера частиц, их влажности и степени уплотнения. Она характеризуется косвенными показателями, среди которых, наиболее распространенным и являются углы естественного откоса. Широкое распространение этого показателя в технике при определении наклона стенок бункеров, воронок, желобов, течек, а также вместимости транспортных средств и хранилищ для сыпучих материалов объясняется простотой и наглядностью его измерения.

Статический угол естественного откоса - угол наклона поверхности материала, образующийся в результате обрушения слоя частиц при удалении подпорной стенки.

Динамический угол естественного откоса – угол, под которым располагается наружная поверхность зернистого материала при падении частиц на плоскость.

Статический и динамический углы откоса измеряются между горизонтальной площадкой и образующей конуса при насыпании пыли.

Динамический угол откоса определяют с помощью прибора Меринга – Баранова. Прибор представляет собой прямой пространственный угол, образованный тремя плоскостями. На боковые стенки нанесены угловые шкалы. После насыпания пыли по этим шкалам определяется естественный угол откоса с точностью до двух градусов. [5,7]

Определение статического угла естественного откоса заключается в измерении угла, под которым располагается боковая поверхность сыпучего материала в результате его обрушения после удаления подпорной стенки.

Сыпучесть пыли также как ее слипаемость характеризует подвижность частиц пыли относительно друг друга и их способность перемещаться под действием внешней силы.

Сыпучесть и слипаемость зависит от размера частиц, их влажности, формы и степени уплотнения. Сыпучесть пыли оценивается по углу естественного откоса, который образует пыль в свеженасыпанном состоянии. Этой величиной во многом определяется поведение пыли в бункерах и течках пылеулавливающих установок, крутизну стенок которых принимают с ее учетом.

Недостатком в работе ЭФ может являться забивание узлов пылеудаления улавливаемым продуктом, обусловленным слипаемостью пыли. Для

исключения зависания пыли в бункерах устанавливают устройства вибростряхивания. При возможности скопления пыли на газораспределительной решетке устанавливают механизмы встряхивания. Для оценки слипаемости пыли используется прибор Е.И. Андрианова. Слипаяемость некоторых видов пыли представлена в таблице 8.

Таблица 8

Слипаяемость некоторых видов пыли.

Группа слипаемости, разрывная прочность по Е.А. Андрианову, Па	Наименование золы, пыли улавливаемых материалов
1. Неслипающаяся, $P \leq 60$	Шлаковая, глиноземная, доломитовая, шамотная
2. Слабослипающаяся $60 < P < 300$	Летучая зола с недожегом более 30%, при пылевидном сжигании каменных углей, летучая зола при слоевом сжигании любых углей, магнезитовая пыль (не сорбировавшая влаги), зола, доменная пыль (после первичных пылеосадителей), апатитовая сухая пыль, коксовая, доменная
3. Среднеслипающаяся	Летучая зола без недожега (зола подмосковных углей), торфяная зола, марганцитовая пыль (сорбировавшая влагу), пыль концентратов цветной металлургии и железного колчедана, пыль окиси цинка, свинца, олова (предварительно скоагулировавшаяся), влажная магнезитовая пыль, сухой цемент Цементная, торфяная, металлическая, мучная, пыль с максимальным размером частиц 25 мкм
4. Сильнослипающаяся	Цементная пыль, выпавшая в воздухе с большим влагосодержанием, гипсовая и алебасстовая пыль, пыль глины, каолина и мергелей (мелкая), огарквяя пыль при 500°C, мучная пыль, волокнистые пыли (асбест, хлопок, шерсть), пыль, содержащая крупные примеси (после отсеивания зерна и т.п.), зола антрацитового штыба с недожегом менее 25%, пыль с максимальной величиной частиц 10 мкм Цементная, гипсовая, волокнистые пыли (асбестовая, хлопковая, шерстяная); все пыли с частицами не более 10 мкм

Адгезия пыли в ЭФ имеет свои особенности. Процесс очистки газа от пыли в ЭФ включает зарядку частиц, движение их к осадительному электроду, адгезию на электроде и регенерацию исходной поверхности. Первые две стадии здесь не рассматриваются.

Дополнительная электрическая сила может быть отталкивающей при достаточно низких значениях УЭС пыли. При этом снизится адгезия, а следовательно, и эффективность улавливания пыли в электрофильтрах, если будет иметь место слишком быстрый разряд частиц в осевшем слое на осадительном электроде. Вредное влияние прилипшего слоя на работу ЭФ исчезает, когда сопротивление слоя превышает $10^3 \dots 10^4$ Ом·м.

С другой стороны, если УЭС пыли велико, то создается значительный местный градиент напряжения и может возникнуть обратная корона, которая приводит к локальному электрическому пробое прилипшего слоя, что вызывает снижение пробивного напряжения и выбросы частиц из слоя. В этом случае повысить эффективность улавливания пыли в ЭФ можно путем искусственного увлажнения очищаемого газа или, например, введением тумана серной кислоты при обычной температуре.

Как правило, адгезия частиц к поверхности в электрическом поле превышает адгезию при свободном оседании. Рост адгезии обусловлен силой зеркального отображения, величина которой определяется зарядом, получаемым частицами в поле коронного разряда ЭФ. Максимальный заряд частиц, находящихся в газе, зависит от напряженности поля, размеров и природы этих частиц.

Увеличение адгезии здесь может произойти по двум причинам.

Во-первых, за счет капиллярных сил при температуре конденсации SO_3 , т.е. при температуре на входе в электрофильтр, равной $145 - 170^\circ C$. При повышении температуры SO_3 испаряется и адгезия еще больше увеличивается.

Во-вторых, увеличение адгезии объясняется тем, что содержащаяся в отходящих газах SO_3 при повышенной температуре взаимодействует с окислами металлов, в результате чего частицы пыли укрупняются, повышается электропроводность слоя и увеличивается адгезия.

6. Очистка электродов ЭФ от пыли

Прилипшую пыль, в принципе, можно очистить механически, обдувом запыленной поверхности, обработкой ее скребками, применением вибрации и ударного действия, а также смыванием водой. Удаление прилипшего слоя обдувом поверхности практически мало целесообразно, так как для его осуществления необходимы большие скорости воздушного потока, а распыляемая пыль вновь может осесть на очищенную поверхность. Скребокный метод очистки электродов не нашел широкого распространения, так как для его осуществления необходима остановка электрофильтра.

Вибрационный метод, как и вообще все механические методы очистки осадительных электродов, носит пассивный характер в том смысле, что величина силы адгезии остается сравнительно большой и не меняется в

процессе очистки газов. Вибрационная очистка, хотя иногда применяется на практике, но не всегда обеспечивает требуемую очистку электродов. Так, при использовании вибраторов (частота 50 Гц при амплитуде колебания 1,2 мм) создается отрывающая сила 120 ед.г. Однако такая сила может обеспечить разрушение слоя пыли, например, шахтных печей, содержащих 50-60% частиц свинца и 10-15% цинка диаметром 0,8-1,5 мкм, лишь по аутогезионным связям, а монослой частиц остается на поверхности электрода. В зависимости от величины силы адгезии слоя частиц ускорение отрыва должно быть $10^2 \dots 10^3$ ед.г. Для удаления слабо прилипшей пыли ускорение отрыва может быть равно 2 ед. г [7].

Так, например, для удаления сажи уловленной в ЭФ после дизеля достаточно было слабой струи воздуха, в то время как удары по электроду только вызывали колебание слоя сажи не отряхивая его.

Известны случаи зарастания пылью коронирующих элементов электрофильтра при исправной работе механизмов встряхивания. В некоторых случаях зарастания коронирующих элементов удается избежать повышением температуры очищаемых газов.

7. Содержание недожога в золе

Унос из ЭФ содержит некоторую часть несгоревшего топлива. Влияние недожога в золе изучалось еще С.П. Жебровским в 40-х годах прошлого века. Было установлено, что при количестве недожога более 30% степень очистки газов от золы резко падает по причине плохого улавливания несгоревших частиц угля.

При улавливании золы лигнитов увеличение в золе недожога с 0,2 до 1,5% приводит к увеличению скорости дрейфа частиц на 20% по причине снижения УЭС слоя золы.

Содержание в золе частиц недожога влияет на степень очистки газов двояко. Несгоревшие частицы имеют низкое значение УЭС и создают электропроводящие цепочки в слое на осадительном электроде. При этом заряд, накопившийся на слое, начинает стекать, в результате ослабляется обратная корона, улучшается отряхиваемость пыли.

При осаждении большого количества крупных частиц недожога они быстро теряют свой заряд и происходит их повышенный унос в процессе осаждения и при встряхивании. Снижение скорости газов ниже 1,2 ...1м/с позволяет радикально снизить унос недожога.

Очевидно, что в каждом конкретном случае влияние недожога будет различным. Это влияние можно установить путем измерения выходной запыленности с помощью самопишущего пылемера при изменении количества недожога в золе, поступающей в электрофильтр. При отсутствии

автоматического пылемера требуется проведение длительных пылегазовых измерений входной и выходной запыленности.

Качественное влияние недожога можно определить путем измерения количества уловленной пыли по полям или измеряя время до начала снижения тока короны при отключении механизмов встряхивания коронирующих электродов при работе котла с различной величиной недожога.

8. Удельная поверхность частиц

Распространенные методы определения удельной поверхности измельченных материалов основаны на измерении воздухопроницаемости слоя материала при просасывании через него воздуха, а также на определении мономолекулярного слоя газа.

По удельной поверхности частиц S можно судить о ряде свойств частиц, в том числе и о их дисперсности. Такая характеристика удобна в практике пылеулавливания тем, что степень измельчения выражается одной величиной - среднее арифметическим значением диаметра частиц в пробе пыли - d_{cp} . Если допустить, что все частицы представляют из себя шарики, то $d_{cp} = 6/S$.

Показатель d_{cp} применяется в ряде случаев, в частности, для характеристики пылеугольного топлива.

9. Абразивность

Абразивность - способность пыли вызывать истирание стенок конструкций и аппаратов, с которыми соприкасается пылегазовый поток. Она зависит от твердости и плотности вещества, из которого образовалась пыль, размера частиц, их формы, массы и скорости потока.

Абразивность пыли учитывают при выборе скоростей запыленных потоков; материала и толщины стенок каналов для перемещения пылегазовых потоков и аппаратов для обеспыливания этих потоков. Износ элементов конструкции вследствие абразивности пыли возрастает по мере увеличения размера частиц до 90 ± 2 мкм, а затем по мере их дальнейшего увеличения износ уменьшается. Абразивный износ обусловлен царапающими и режущими свойствами твердых частиц, перемещающимися под действием сил по поверхности твердого тела. При этом происходит унос частиц материала с твердой поверхности. Различают абразивный износ трех типов - царапающий, истирающий и истирающий с ударными нагрузками.

Метод определения абразивности пыли основан на определении износа образца стали при воздействии потока частиц пыли. Время износа узла,

подвергающегося абразивному воздействию прямо пропорционально глубине износа и обратно пропорционально запыленности газового потока, кубу его скорости, коэффициенту абразивности, и вероятности удара части о препятствие. Коэффициент абразивности для разной легучей золы в зависимости от ее дисперсности, состава, формы частиц и других свойств лежит в пределах $(1...2) \cdot 10^{-11}$ м²/кг.

В ЭФ царапающему износу могут быть подвержены газораспределительные решетки на входе ЭФ. Оси в механизмах встряхивания подвержены истирающему износу. Бойки и наковальни механизмов встряхивания подвержены истирающему износу с ударными нагрузками. Для уменьшения износа применяются износостойкие материалы, например, износостойкие стали, легированные марганцем, имеющие высокую вязкость в сочетании со способностью к пластической деформации. [8]

Таблица 9

Коэффициенты абразивности золы некоторых видов топлива.

Вид топлива	Коэффициент абразивности золы $a \cdot 10^9$
Подмосковный уголь	5,4
Челябинский уголь	4,0
Кизеловский уголь	3,5
Богословский уголь	2,2
Волжские сланцы	3,0
Экибастузский уголь ¹	8,8
Куучекинский ¹	6,9
Черемховский уголь ¹	1,8

¹ Значения получены для частиц с размерами 90 ± 2 мкм.

Для оценки абразивных свойств пыли может использоваться коэффициент абразивности K_a , который определяют по формуле:

$$K_a = A \cdot \Delta G,$$

где: $A = 1,185 \cdot 10^{-5}$ м²/кг²,

ΔG - потеря массы образца, определяемая взвешиванием его до и после опыта, кг.

Данный метод применим для частиц имеющих коэффициент абразивности $K_a > 0,5 \cdot 10^{-12}$ м²/кг. [6]

При известном коэффициенте абразивности рассчитывается время абразивного износа элемента аппарата на заданную величину τ (ч) по следующей формуле:

$$\tau = \frac{h \cdot q}{3600 \cdot E \cdot C \cdot V^3 \cdot K_a},$$

где: h - линейный износ, м,

q - масса, кг,

E - коэффициент вероятности попадания частицы на изнашиваемую поверхность,

C - массовая концентрация абразива, кг/м³,

V - скорость газового потока, м/с.

Зная коэффициент абразивности пыли, выбирают соответствующие радиусы кривизны газоходов с пылью и пылеуловителей, а также определяют время абразивного износа элемента газоочистного аппарата на заданную глубину.

10. Гигроскопичность

Гигроскопичность пыли - способность частиц впитывать (адсорбировать) влагу из окружающей среды. Она зависит от состава, размера, формы и степени шероховатости частиц.

Для нерастворимых в воде частиц адсорбция протекает до наступления равенства давления над поверхностью частиц парциальному давлению паров воды в окружающем газе (равновесная влажность, φ_n %).

$$\varphi = \frac{(G_1 - G)}{G} \cdot 100,$$

где: G_1 - масса пыли в бюксе при достижении равновесия, г,

G - масса сухой пыли, г.

Поглощение влаги частицами пыли оказывает влияние на электропроводность, слипаемость, сыпучесть. Содержание влаги в пыли, выражается равновесной влажностью; по ней выбирается крутизна стенок бункеров и диаметры пылевыпускных отверстий.

11. Смачиваемость пыли

Смачиваемость частиц водой оказывает влияние на работу мокрых электрофильтров. Легко смачиваемая частица после соприкосновения с поверхностью воды погружается в нее. При соприкосновении плохо

смачиваемой частицы с поверхностью жидкости частица захватывается этой поверхностью и остается на ней.

Для определения смачиваемости частиц и оценки их поведения в системах газоочистки применяется метод пленочной флотации. В СФНИИОГАЗ разработано устройство для определения смачиваемости частиц. Устройство позволяет определять долю смоченных (утонувших) в дисциллированной воде частиц [6]. По смачиваемости, определенной методом пленочной флотации пыль классифицируется на три группы: плохо смачиваемая - от 0 до 30%, средне смачиваемая - от 30 до 80 %, хорошо смачиваемая - от 80 до 100%.

В тех случаях, когда поверхность жидкости будет в значительной мере покрыта частицами, очистка газов в мокрых аппаратах может ухудшиться из-за рикошета частиц.

12. Морфологические свойства пыли

Эти свойства включают описание частиц пыли: размеры и форму (учитываемые при проектировании и выборе ЭФ), цвет. Они определяются с помощью микроскопов в проходящем или в отраженном свете [9]. Тонкодисперсные препараты исследуются с помощью электронного микроскопа [10].

Таблица 10

Морфологическая характеристика промышленной пыли некоторых производств

Производство	Характеристика частиц пыли	Место отбора
Воркутинская ТЭЦ	В золе 30-40% частиц размером до 30 мкм. Большинство частиц – прозрачные сферы, $d_{50} = 24$ мкм, $\sigma = 2,02$	Из бункера ЭФ[6].
Красноярская ТЭЦ-1, котел БКЗ-320-140	Частицы золы крупнее 5 мкм, сферические, блестящие, бледно-розовые и желтоватые в проходящем свете и темно-коричневые пористые с размытой поверхностью. В общей массе цвет пыли серо-коричневый, $d_{50} = 22$ мкм, $\sigma = 2,35$.	Из бункера ЭФ[6].
Зола угля марки «сс»Троицкая ГРЭС, котел ЦК-39	Частицы в основном неправильной и игольчатой формы с включением сферических частиц размером до 10-15 мкм. Сферические частицы прозрачные, светлых тонов. В проходящем свете большинство частиц серого цвета, в отраженном свете – бесцветные. В общей массе цвет пыли – серый. $d_{50} = 17$ мкм, $\sigma = 3,2$, $S_{уд} = 3690$ см ² /г.	Отбор пробы из газохода на входе в ЭФ [6].

<p>Выплавка стали в электродуговой печи</p>	<p>Частицы в основной массе овальной и зернистой формы. Среди частиц > 15 мкм встречаются крупные пористые частицы черного цвета, а среди частиц < 2 мкм – частицы волокнистой и пластинчатой формы желтого, зеленовато-коричневого и желто-коричневого цвета. В общей массе цвет пыли темно-коричневый.</p>	<p>Бункер рукавного фильтра</p>
<p>Шахтная вагранка открытого типа литейного цеха</p>	<p>Частицы > 50 мкм черные, пористые, в отраженном свете с металлическим блеском. Частицы размером < 50 мкм в проходящем свете в основном темно-серые и коричневые, неправильной формы с острыми гранями. В общей массе цвет пыли коричневый.</p>	<p>-</p>
<p>Бессемеровский конвертер литейного цеха</p>	<p>Частицы пыли неправильной формы, при размере > 10 мкм с острыми гранями, при меньшем размере оплавлены. В общей массе цвет пыли черный.</p>	<p>Газоход конвертера</p>
<p>Печь спекания бокситной шихты алюминиевого завода</p>	<p>Частицы > 10 мкм кристаллической формы со сглаженными гранями. Частицы < 5 мкм волокнистой и пластинчатой формы, светлых тонов.</p>	<p>Газоход перед системой газоочистки</p>
<p>Печь кальцинации алюминиевого завода</p>	<p>Основная масса частиц имеет форму округленных зерен. Среди частиц < 5 мкм встречаются частицы пластинчатой формы. Цвет пыли белый.</p>	<p>Газоход перед системой газоочистки</p>
<p>Выплавка меди в конвертере</p>	<p>Пыль мелкодисперсная, большинство частиц волокнистой и ветвистой формы, образующие лучистые агрегаты. Цвет пыли белый.</p>	<p>Бункер электро-фильтра</p>
<p>Литейный двор металлургического завода</p>	<p>Большая часть частиц > 10 мкм имеют форму листочков, а частицы < 10 мкм – форму зерен. Крупные частицы в отраженном свете блестящие серые, частицы < 15 мкм коричневого цвета. В общей массе цвет пыли черный.</p>	<p>Сметы с металло-конструкций</p>
<p>Домна доменного цеха металлургического завода</p>	<p>Оплавленные частицы неправильной формы с развитой поверхностью. Большинство частиц в проходящем свете темных оттенков с блеском. Мелкие частицы (размером до 3 мкм) коричневого цвета с включением светлых частиц игольчатой и чешуйчатой формы. В общей массе цвет пыли черный.</p>	<p>Бункер рукавного фильтра</p>
<p>Мартеновская печь</p>	<p>Частицы с развитой поверхностью, зернистой и пластинчатой формы с включением мелких волокнистых частиц. Окраска большинства частиц > 10 мкм густо коричневая, почти непрозрачная. Более мелкие частицы в проходящем свете имеют окраску от желтовато-красной до коричневой. Пыль склонна к образованию агрегатов размером до 200 мкм.</p>	<p>Бункер электро-фильтра</p>

Вращающаяся печь обжига клинкера (мокрый способ производства цемента)	Частицы иглообразные, пластинчатые и в форме многогранников, склонны к агрегированию. В проходящем свете частицы имеют светлые тона. В общей массе цвет пыли бежевый.	Газоход перед электро-фильтром
То же (сухой способ производства цемента)	Частицы неправильной формы с оплавленными гранями. Мелкие частицы пластинчатой и волокнистой формы склонны к образованию агрегатов.	Газоход перед электро-фильтром
Обжиг колчедана печи печного отделения сернокислотного завода	Частицы с развитой поверхностью, зернистой формы с включением мелких (< 1–2 мкм) волокнистых частиц от серого до светло-коричневого цвета. Более крупные частицы густо-коричневые. Пыль склонна к образованию агрегатов.	Газоход перед электро-фильтром
Печь обжига магнезита	Частицы ветвистой, игольчатой формы; образуют крупные агрегаты в виде комков снега. В проходящем свете частицы бесцветны.	Бункер электро-фильтра
Пыль сушильного барабана апатито-нефелинового производства	Частицы чешуйчатой и мелкозернистой формы. В проходящем свете в основном бесцветные с включением красноватых и серо-черных частиц.	Бункер электро-фильтра

13. Пожаро-взрывобезопасность частиц пыли

Способность пыли взрываться является важным свойством. Пыль может взрываться тогда, когда она является воспламеняющейся, когда имеется достаточное количество кислорода (воздуха) или другого активного газа в месте взрыва и источник энергии, инициирующий взрыв (в виде движения, тепла или электрических явлений) [26].

Независимо от этого для возникновения взрыва необходимо, чтобы все эти факторы находились в известном соотношении друг к другу. Это отношение меняется в зависимости от степени измельчения пыли. Энергия, необходимая для возникновения взрыва, должна превысить определенное минимальное свое значение.

Пылевые частицы можно считать такими гигантскими молекулами, и тогда пылевое облако является некоторого рода макроскопической системой газа. Однако есть принципиальные различия между взрывом пылевых частиц и газовых молекул, которые усложняют явления взрыва пыли. При взрыве пыли начало его в одной частице не локализовано, так как это имеет место при взрыве газов. Взрыв не является также результатом столкновений пылевых частиц. Последующие пылевые частицы эффективно поглощают тепло, чего нет у молекул газа.

Интенсивность взрыва зависит от очень многих факторов, например, от состава пыли и величины ее частиц, температуры, образования продуктов сгорания.

Температура воспламенения пылевого облака строго обусловлена концентрацией пылевых частиц. Для каждой температуры существует верхняя и нижняя границы опасной концентрации с точки зрения взрываемости. Это ясно видно из Рис.8



Рис. 8 Зависимость взрывной концентрации от температуры воспламенения.

Чем мельче частицы пыли, тем меньшая концентрация их может вызвать взрыв. Согласно Мельду [27], границы взрываемости зависят от следующих причин:

- а) от большой дисперсности пылевых частиц; при размерах пылевых частиц выше определенной величины взрыв невозможен; даже если пылевые частицы таких размеров состоят из горючих материалов, они все же действуют тормозяще на ход взрыва;
- б) от формы пылевых частиц; воспламенение происходит тем легче, чем больше отношение поверхности к весу частицы; отсюда следует, что частицы сферической формы воспламеняются труднее, чем частицы неправильной формы;
- в) от количества тепла, необходимого для испарения содержащейся в пыли воды; чем меньше потребного для испарения содержащейся в пыли воды; чем меньше потребное количество этого тепла, тем легче происходит воспламенение;
- г) от содержания золы в пыли; чем больше это содержание, тем труднее происходят воспламенение и взрыв;

д) от окисления пылевых частиц, которое связано с верхней и нижней границами взрываемости (в зависимости от концентрации пыли); нижняя граница концентрации, необходимая для переноса воспламенения от одной пылевой частицы на другую, зависит от минимального расстояния между частицами пыли, верхняя – от минимального количества кислорода, необходимого для протекания взрыва Гек [28] подразделяет по взрывоопасности пыли на два класса:

класс I – сухие пыли с небольшим содержанием золы, которые при уносе в воздух легко воспламеняются и пламя распространяется уже при источнике тепла с низкой температурой. При сильном завихрении с определенной концентрацией мельчайших частиц они могут сами воспламеняться и образовать пламя, развивающее температуру и давление, достаточные для вызова взрыва. К этому классу Гук относит виды пыли по степени ее взрывоопасности (начиная от более опасных): древесная, пробковая, сахарная, из синтетических смол, мучная, солодовая, из твердой резины, крахмальная, декстриновая, кожаная (синтетической и натуральной кожи),растительных волокон, серная, удобрений (натуральных и синтетических);

класс II – пыли с большим золосодержанием, которые в нормальных условиях не воспламеняются, а будучи унесены в воздух воспламеняются только при действии на них в течении длительного периода времени источника тепла с высокой температурой. При сильном завихрении и после превышения минимальной концентрации наиболее мелкие пылевые частицы могут еще воспламениться, создавая иницирующее пламя, которое может привести к пожару, но при этом слишком низкое давление делает невозможным образование взрыва. К пыли этого рода относят целлулоидную, цинковую, пыль некоторых синтетических смол, янтарную, сажу, некоторые мыльные порошки, некоторые лакокрасочные пыли, пыль какао.

Вещество воспламеняется в том случае, если скорость поступления тепла от реакции (обычно при окислении воздуха) больше, чем потеря тепла. Следовательно, возможность воспламенения зависит не только от свойств вещества, но и от состояния, в котором оно находится, и от окружающих условий. Любая оценка воспламеняемости (например, температуры вспышки) имеет только относительное значение. Необходимо напомнить, что аэрозольные частицы, улавливаемые фильтром, весьма тонкодисперсны и это увеличивает их воспламеняемость. Слой пыли, накопившийся в фильтре, имеет большую площадь поверхности, подвергаемую воздействию воздушного потока, проходящего через фильтр. Пылевые частицы в слое могут воспламеняться значительно легче, чем при обычных испытаниях, хотя некоторые материалы, легко окисляющиеся, могут полностью окислиться в воздушном потоке до поступления в фильтры.

Большинство опубликованных данных о воспламеняемости пылей относится к взрывам пыли в воздухе. Аэродисперсные системы аналогично взрывоопасным смесям газов характеризуются предельными значениями концентрации и температуры, ниже которых воспламенения не происходит. Для большинства воспламеняющихся промышленных пылей нижний предел концентрации составляет 20 – 40 г/м³. Это чрезвычайно высокая концентрация, и в системах высокоэффективной фильтрации такие условия непосредственно перед фильтрами не должны быть. Если же в технологических процессах такие концентрации могут образоваться, то необходимо у мест их возникновения установить пылеуловители (циклоны или скрубберы) чтобы снизить концентрацию пыли перед поступлением воздуха в фильтр. В таблице 11 приведены типичные значения температуры воспламенения для некоторых технологических пылей.

Таблица 11

Температура воспламенения некоторых технологических пылей.

Технологическая пыль	Температура воспламенения, °С	Технологическая пыль	Температура воспламенения, °С
Уголь	610	Сера	260
Зерновой крахмал	470	Порошок урана	комнатная темп.
Алюминий	645	Гидрид урана	То же
Магний	520	Порошок циркония	То же
Ацетатцеллюлоза	420	Порошок плутония	То же

Оценка воспламеняемости, более подходящая для условий, наблюдающихся в фильтрах, может быть сделана двумя методами: путем определения температуры, при которой наблюдается скачок в скорости увеличения температуры при непрерывном медленном нагреве материала, или путем определения скорости увеличения температуры при заданной температуре.

Испытание на саморазогревание

Одной из причин возгорания является самовозгорание, при котором внутри системы возникает тепла больше, чем из нее отводится. Если тепло остается в системе, то скорость реакции увеличивается, и тепловыделение происходит быстрее. При таких испытаниях 1 г образца помещают в испытательную трубку с термопарой, а испытательную трубку – в сосуд

Дьюара, а затем в ванну, термостатированную при температуре 80°C. Температура отмечается в течение 4ч и любое ее повышение фиксируется.

Такие испытания особенно пригодны для смешанных пылей, когда составляющие ингредиенты могут оказаться несовместимыми.

Влияние пылевидных смесей

Рассматривая воспламеняемость пылевидных материалов, необходимо помнить, что помимо основных технологических частиц в воздушном потоке содержатся частицы посторонних материалов, которые самым различным образом могут влиять на способность осадка к воспламенению. Так например:

- 1) частицы других материалов могут быть более горючими, чем основная пыль;
- 2) разбавление относительно инертной пылью может уменьшить воспламеняемость основной технологической пыли;
- 3) может наблюдаться явление несовместимости основной технологической пыли с примесными частицами или с фильтрующим материалом.

Межгосударственный стандарт РФ в системе пожаровзрывобезопасности труда ГОСТ12.1.041-83 (с изменениями, утвержденными в 1989 и 1991гг.) распространяется на технологическое оборудование и технологические процессы, в которых присутствуют горючие пыли и устанавливает общие требования к обеспечению их пожаровзрывобезопасности.

Пожаровзрывобезопасность производственных процессов, в которых присутствуют горючие пыли должна обеспечиваться требованиями ГОСТ 12.1.041-83, ГОСТ12.1.010-76, норм и правил, утвержденных Госстроем СССР, ГУПО МВД СССР и Госпрома надзором СССР.

К показателям пожаровзрывобезопасности горючих пылей по ГОСТ относят горючие пыли, находящиеся во взвешенном состоянии в газовой среде, имеющие следующие показатели пожаровзрывобезопасности:

- нижний концентрационный предел распространения пламени (воспламенения) (НКПР);
- минимальная энергия зажигания (W_{min});
- максимальное давление взрыва (P_{max});
- скорость нарастания давления при взрыве (dP/dt);
- минимальное взрывобезопасное содержание кислорода (МВСК).

Горючие пыли, находящиеся в осевшем состоянии в газовой среде, характеризуются следующими показателями пожаровзрывобезопасности:

- температура самовоспламенения (t_{cv});
- температура самовозгорания;
- температура тления;

- температурными условиями теплового самовозгорания;
- минимальной энергией зажигания (W_{\min});
- способностью взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами.

1. Пожарная безопасность и взрывобезопасность оборудования и технологических процессов при наличии в них горючих пылей в соответствии с ГОСТ 12.1.041-83 достигается:

- исключением образования внутри аппаратов и оборудования горючей среды;
- исполнением, применением и режимом эксплуатации аппаратов и оборудования;
- обеспечением не более допустимых величин: температуры и количества горючей , пыли, концентрации кислорода или другого окислителя в пылегазовой смеси;
- обеспечением необходимой концентрации флегматизатора в воздухе;
- применением устройств аварийного сброса давления;
- применением оборудования, рассчитанного на давление взрыва;
- применением средств пожаротушения и взрывоподавления;
- надежностью системы контроля, управления и противоаварийной защиты производственного процесса.

2. Снижение опасных концентраций горючей пыли должно достигаться устройством отсосов из мест ее образования и скопления.

3. Исключение образования внутри аппаратов и оборудования горючей среды достигается применением твердых и газообразных флегматизаторов горения.

В качестве твердых флегматизаторов горения должны применяться негорючие порошки, добавление которых к горючей пыли делает общую смесь негорючей.

В качестве газообразных флегматизаторов должны применяться азот, двуокись углерода (диоксид углерода) или другие инертные газы.

Для оборудования, работающего при атмосферном давлении и использующего в качестве газовой фазы воздух нормального состава, количество добавляемого флегматизатора, необходимое для создания негорючей смеси; определяют по ГОСТ 12.1.044-89.

4. Исполнение, применение и режим эксплуатации аппаратов и оборудования – по ГОСТ 12.1.018-93.

5. Допустимая безопасная температура нагрева поверхностей аппаратов и оборудования составляет 80% от температуры самонагрева горючих пылей, склонных к самовозгоранию, и 80% от температуры самовоспламенения пылей, не склонных к самовозгоранию.

6. Расчет аппаратов и оборудования на взрывоустойчивость следует производить по максимальному давлению взрыва горючих пылей.

7. Опасные факторы пожаровзрывоопасности, перечень мер предотвращения пожаровзрывоопасности и перечень мер пожаровзрывозащиты аппаратов химической технологии, в которых присутствуют горючие пыли, приведены в приложении 2 ГОСТа 12.1.004-9. Достаточность выбранных мер должна быть подтверждена испытаниями по ГОСТ 12.1.004-91и ГОСТ 12.1.010-76.

К основным факторам пожароопасности электрофильтров, в которых присутствуют горючие пыли относят:

- наличие взрывоопасной концентрации пыли в аппарате;
- искры межэлектродного искрового разряда, возникающие между электродами;
- поступление воздуха с повышенной влажностью, сильном охлаждении и конденсации паров из воздуха, для исключения прилипания самовозгорающейся пыли к стенкам;
- образование «мостиков» во время падения комков пыли;
- плохой центровкой электродов, приводящей к искрению;
- искры тления, загоревшиеся в верхнем потоке частиц;
- самовозгорание при неполном опорожнении бункеров от пыли.

ГОСТ 12.041-83 применительно к электрофильтрам, в которых улавливаются горючие пыли, предусматривает перечень мер для предотвращения пожара и взрыва. К таким мерам в частности относятся размещение электрофильтров в изолированных помещениях, теплоизоляция аппарата с целью воспрепятствовать конденсации паров и прилипанию пыли к стенкам (для пылей, склонных к самовозгоранию).

14. Химический состав пыли

Химический состав любой пыли, улавливаемой в ЭФ, большое влияние оказывает на УЭС слоя на электродах и, как следствие, на степень очистки газов. Это влияние рассмотрено в брошюре «Удельное электрическое сопротивление (УЭС) пыли в электрофильтрах. АО "Кондор–Эко"»[2]. Большой интерес представляет рассмотрение химических свойств золы – остатка, получаемого при прокаливании навески топлива в присутствии кислорода при 800°С. Известно, что основная часть всех видов золы – стекло. Кристаллическая фаза состоит из кварца, магнетита, гематита (магнитные минералы), и силикатов кальция. Характеристики проб золы, полученной в лабораторных условиях, несколько отличаются от летучей золы и шлака, образующихся в котлах из-за более высокой температуры, других условий сгорания и разделения золы котлов на шлак и летучую золу. В топках с жидким шлакоудалением отличие золы от лабораторных образцов существенное.

Процентное содержание золы в рабочем топливе обозначают A^p , а в сухой массе топлива - A^c . Связь между этими величинами следующая:

$$A^p = A^c \cdot (100 - W_p) / 100 ,$$

где: W_p - влажность рабочего топлива, %.

Для сравнительной оценки топлива используют понятие приведенная зольность A^{np} , %, МДж/кг,

$$A^{np} = A_p / Q^p ,$$

где: Q^p - низшая теплота сгорания рабочего топлива.

В различных типах золы ТЭС содержание Fe_2O_3 -12...20%, SiO_2 -37...63%, Al_2O_3 -9...37%, CaO - 2...32%. Растения, из которых образовывались угольные пласты, поглощали некоторые элементы избирательно. Поэтому содержание некоторых элементов в земной коре и в золе может резко отличаться.

Таблица 12

Содержание некоторых микропримесей в земной коре и в золе угля [6]

Элемент	Среднее содержание в земной коре, г/т	Среднее содержание в некоторых богатых золах, г/т	Коэффициент обогащения
Бор	3,0	600	200
Германий	7,0	500	70
Мышьяк	5,0	500	100
Уран	2,0	400	200
Бериллий	5,0	300	60
Молибден	15,0	200	13
Свинец	16,0	100	6
Цинк	40,0	200	5
Серебро	0,1	2	20
Скандий	5,0	60	12

15. Коагуляция взвешенных частиц

В связи с тем, что эффективность ЭФ зависит от размера улавливаемых частиц, мелкие частицы улавливаются с меньшей эффективностью. Коагуляция частиц приводит к повышению степени очистки газов. Различают следующие виды коагуляции взвешенных в газе частиц [11]:

- тепловую, градиентную, кинематическую, акустическую, электрическую,

- диффузиофорез (использование эффекта конденсации),
- термофорез (использование температурного градиента).

Известны устройства звуковой и электрической коагуляции [11,12], однако в настоящее время их применение в промышленных ЭФ не распространено.

Звуковая коагуляция аэрозолей

При воздействии звуковых и ультразвуковых волн взвешенные в газе частицы могут укрупняться. Устройства предварительной акустической коагуляции установленные перед циклонными аппаратами позволяют снизить выбросы в 2...3 раза. На отдельных опытных установках выбросы пыли были снижены до 6...15 раз [11]. На двухпольном лабораторном ЭФ в СФНИИОГАЗ применение звуковой коагуляции позволило снизить выбросы в два раза.

При кратковременном воздействии звуковых волн с частотой 400...800 Гц при интенсивности 140...150 дБ степень улавливания в осадительной камере увеличилась с 10...15 до 50...60% [12].

Электрическая коагуляция аэрозолей

Коагулирующее действие ЭФ проявляется обычно при улавливании частиц пыли с низким УЭС, которые быстро отдают свой заряд осадительному электроду и затем снова возвращаются в газовый поток. При совместном действии электрических сил и газового потока движение частиц вдоль электрода носит скачкообразный характер. При этом создаются условия для столкновения частиц, имеющих противоположный электрический заряд.

При очистке частиц с высоким значением УЭС, (более $5 \cdot 10^9$ Ом м) вызывающих обратную корону происходит выброс из слоя на осадительном электроде положительных ионов и положительно заряженных частиц.

В результате этого увеличивается столкновение частиц с противоположными зарядами и происходит их агломерация.

Известны два варианта коагуляции частиц с помощью электрофильтров-коагуляторов[17]. В одном случае создают два пылегазовых потока с противоположно-заряженными частицами и затем объединяют эти потоки. В другом случае осуществляют питание электрофильтра-коагулятора переменным током высокого напряжения низкой (20...30Гц) частоты, обеспечивая разноименный заряд частиц при высокой скорости газа. Далее газы смешивают. (для зарядки частицы достаточно 0,1...0,15 с.) Поэтому электрофильтры – коагуляторы должны иметь малые габариты. Практического

применения при улавливании промышленных пылей в отечественной практике электрофильтры – коагуляторы не нашли.

Применение звуковой коагуляции аэрозолей позволяет повышать эффективность их осаждения. В настоящее время для выяснения экономической целесообразности применения акустической коагуляции, вероятно, требуется проведение экспериментов на промышленных ЭФ.

16. Трибозаряд частиц

В аэрозольных системах всегда имеются частицы обеих полярностей. Однако, обычно в них преобладают заряды какой-нибудь одной полярности. Кроме того, небольшая доля частиц нейтральна. Пыли, состоящие из CaCO_3 , MgCO_3 , CaO , MgO , Al_2O_3 , FeO_3 , Na_2CO_3 преимущественно заряжены отрицательно. SiO_2 , NaCl , частицы серы, угля имеют положительный трибозаряд. Величина трибозаряда обычно не превышает 1..2% от максимальной величины заряда. При увлажнении газов увеличивается число нейтральных частиц. На изолированных поверхностях благодаря действию трибозаряда частиц может накопиться значительный электрический заряд, который может привести к образованию искр и вызывать довольно сильные болевые ощущения при касании к заряженным поверхностям. В связи с тем, что в электрофильтрах, как правило, частица приобретает электрический заряд за доли секунды, влияние трибозаряда считается незначительным и в расчетах ЭФ не учитывается.

17. Влияние электромагнитного поля на осаждение взвешенных немагнитных и магнитных частиц

Твердая немагнитная частица, имеющая электрический заряд, при движении в газе поступившая в магнитное поле подвержена действию силы, направленной под прямым углом и в направлении ее движения. В результате частица будет вращаться вокруг оси, проходящей через частицу и параллельной магнитному полю. Благодаря этому частица описывает спираль.[13,14]

Сущность такого аппарата заключается в том, что в нем применен новый принцип улавливания, использующий электростатическое и электромагнитное поля. Исследование принципа действия этого аппарата, названного электродинамическим фильтром (ЭДФ), в 2012 г. показали принципиальную возможность его использования для стационарных и транспортных тепловых двигателей в связи с его малыми габаритами.

Вновь разработанный ЭДФ [21] позволил улавливать практически всю сажу и токсичные компоненты в жидкой фазе (при температуре ниже точки росы), при этом скорость дрейфа частиц в новом аппарате превышала таковую для обычных электрофильтров в несколько раз.

Отличие ЭДФ состоит в том, что осадительные электроды выполнены из изолирующего материала, снабженного заземленной токопроводящей обмоткой, расположенной на осадительном электроде, со стороны противоположной коронирующему электроду. На рис.9 показана схема ЭДФ,

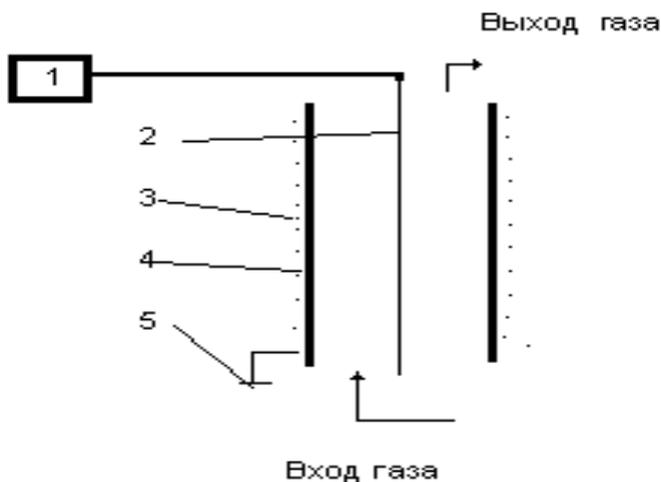


Рис.9 Схема электродинамического ЭФ

- где:
- 1 - источник высокого напряжения,
 - 2 - коронирующий элемент,
 - 3 - осадительный электрод,
 - 4 - токопроводящая обмотка,
 - 5 - заземление.

Электрическое питание ЭДФ осуществляется от высоковольтного источника - 1 и подается на коронирующий электрод - 2. Коронирующий электрод расположен внутри цилиндрического осадительного электрода - 3, выполненного из изолирующего материала и снабженного токопроводящей обмоткой - 4, расположенной снаружи осадительного электрода. При работе запыленный газ поступает на вход ЭДФ. Под действием электростатического и электромагнитного полей происходит улавливание заряженных в поле коронного разряда частиц, содержащихся в газе, путем осаждения их на внутреннюю изолирующую поверхность осадительного электрода. При этом благодаря одновременному воздействию на движущиеся заряженные частицы

электростатического и электромагнитного полей происходит повышение скорости дрейфа частиц. В результате появляется возможность работы электрофильтра с повышенной скоростью и большей степенью очистки газов. Это позволяет сократить габариты ЭДФ. Кроме того, в ЭДФ ток короны расходуется практически только на зарядку частиц и почти не поступает на осадительный электрод, т.к. он представляет собой изолятор. Это позволяет резко сократить расход электроэнергии в ЭДФ по сравнению с электростатическим ЭФ, в котором большая часть тока короны поступает на заземленные металлические электроды. Газ, очищенный от содержащихся в нем твердых, жидких и газообразных примесей поступает на выход ЭДФ.

Электрическое питание ЭДФ осуществляется от энергетической установки теплового двигателя через высоковольтный преобразователь. Потребляемая мощность при этом находится на уровне мощности стандартной катушки зажигания автомобиля. Габариты экспериментального ЭДФ не превышают габаритов глушителя автомобиля. На Рис. 10 показан стеклянный осадительный электрод с осевшими на нем частицами.



Рис 10. Осаждение частиц сажи внутри стеклянного осадительного электрода

Выполненные на ЭДФ предварительные эксперименты позволили установить ряд особенностей его работы:

- в ЭДФ улавливаются твердые и жидкие частицы из выхлопных газов автомобильных карбюраторных двигателей ВАЗ и дизельного двигателя автомобиля ГАЗ.
- при сжигании природного газа несгоревшие частицы и влага успешно улавливаются при температурах ниже точки росы.
- при увеличении частоты питающего напряжения эффективность очистки газов повышается.

При использовании высокочастотного знакопеременного питания было получено эффективное осаждение частиц табачного дыма на высокоомную стеклянную трубку.

При установке на высокой стороне высоковольтного выпрямителя осаждение пыли ухудшалось.

При движении магнитной частицы в магнитном поле происходит ее улавливание. При этом может создаваться фильтрующий слой, состоящий из магнитных и немагнитных частиц. [20]

Движение элементарных частиц в вакууме в различных полях хорошо изучено и описано математически. Однако движение пылевой немагнитной частицы, которое наблюдалось экспериментально в пересекающихся электрическом и магнитном полях трубчатого электрофильтра здесь излагается впервые.

Ниже теоретически описан процесс движения немагнитной частицы в пересекающихся электрическом и магнитном полях трубчатого электрофильтра [15]. Рассмотрена возможность запирания коронного разряда под действием магнитного поля. Очевидно, что решение задачи снижения выбросов пыли в окружающую среду лежит в области усовершенствования существующего, а также разработки и внедрении нового газоочистного оборудования [1]. Широкое распространение получил электрический способ очистки газов от пыли в силу высокой эффективности, при этом ресурс усовершенствования оборудования данного типа далеко не исчерпан.

Был рассмотрен [1,26] процесс движения немагнитной частицы на примере трубчатого электрофильтра (электродная система коаксиальные цилиндры) в межэлектродном промежутке которого, создано магнитное поле напряженностью \vec{H} , вектор которой направлен вдоль цилиндров (параллельно коронирующему электроду) (рисунок 11). На рисунке 11:

D_c - внутренний диаметр осадительного электрода (далее о.э.);

d_0 - внешний диаметр коронирующего электрода (далее к.э.);

$(D_0-d_0)/2$ - межэлектродное расстояние;

\vec{E} - вектор напряженности электрического поля;

$m_1 \cdot \vec{V}_1$ - масса и вектор скорости частицы вышедшей из чехла коронного разряда в межэлектродный промежуток.

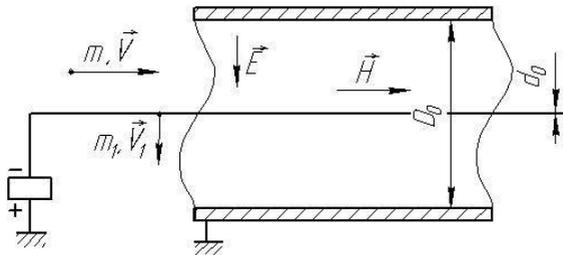


Рис. 11 Схема устройства.

При подаче отрицательного потенциала на к.э. в системе к.э.- о.э. коаксиального цилиндра, при напряжении U выше напряжения зажигания коронного разряда U_0 с к.э. в межэлектродный промежуток из чехла коронного разряда поступают отрицательно заряженные ионы и электроны [2].

Немагнитная частица массой m движется с потоком газа со скоростью V внутри трубчатого фильтра по направлению, обозначенного на рисунке 11. Под действием электрического поля электродной системы частица массой m за малый период времени достигает практически максимального заряда q , определяемого напряженностью электрического поля E в точке зарядки. И тогда на частицу действует сила:

$$\vec{F}_{эл.ст} = q \cdot \vec{E}$$

Вектор действия силы электрического поля противоположен по направлению с вектором напряженности электрического поля. Электрическое поле в виде поля коронного разряда используется на практике для выделения немагнитных частиц из потока газа и осаждения их на осадительных электродах.

В зоне действия напряженности магнитного поля H на немагнитную частицу массой m (в вакууме или достаточно разреженном газе), имеющую заряд q и движущуюся со скоростью V действует сила магнитного поля [3]:

$$\vec{F}_{магн} = q \cdot [\vec{V} \times \vec{H}]$$

Полная сила, действующая на движущуюся частицу при наличии магнитного и электрического полей:

$$\vec{F}_{\Sigma} = \vec{F}_{эл.ст} + \vec{F}_{магн} = q \cdot (\vec{E} + [\vec{V} \times \vec{H}]) ,$$

Траектория движения частицы в электрическом поле, если не учитывать движение частицы с потоком газа, описывается уравнением:

$$V_x = V_{0x} + \frac{q}{m} \cdot E_x \cdot t ,$$

а полная скорость:

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2$$

Это уравнение описывает движение заряда по параболе (рисунок 12).

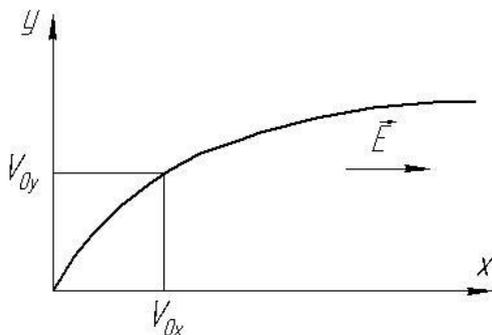


Рис.12 Траектория движения заряженной частицы в электрическом поле напряженностью \vec{E} .

Влияние ускорения свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ по сравнению с ускорением, полученным в электрическом поле:

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \cdot \vec{E} = 1,76 \cdot 10^{10} \text{ м/с}^2,$$

при $|E| = 0,1 \text{ В/м}$ очень мало и его можно не учитывать, при рассмотрении движения электронов в электрическом поле [4].

Заряд сферической частицы, приобретенный в поле коронного разряда:

$$q_{сф} = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \delta \cdot r_{сф}^2 \cdot E_n,$$

где: $r_{сф}$ - радиус сферы,

E_n - напряженность поля в точке зарядки частицы,

ϵ_0 - электрическая постоянная,

δ - показатель диэлектрических свойств частицы.

Сила электрического поля, действующая на частицу:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Максимальное действие силы, когда направление действия силы совпадает с направлением движения частицы:

$$|F| = m \cdot |a| = m \cdot \frac{m}{q} \cdot E = \frac{m^2}{q} \cdot E$$

В постоянном магнитном поле на движущуюся со скоростью V заряженную частицу действует сила, которая обладает механическим действием на частицу с мощностью:

$$P_{мех} = \vec{F}_{магн} \cdot \vec{V} = q \cdot [\vec{V} \times \vec{H}] \cdot \vec{V} = 0$$

Выражение равно 0, т.к. векторы $[\vec{V} \times \vec{H}]$ и \vec{V} взаимно перпендикулярны.

Таким образом, механические работы по перемещению частицы в постоянном магнитном поле не совершаются, значит, кинетическая энергия не изменяется.

Скорость частицы можно представить в виде суммы:

$$\vec{V} = \vec{V}_{\parallel} + \vec{V}_{\perp} \quad ,$$

равнение движения заряженной частицы в вакууме принимает вид:

$$q \vec{V} \times \vec{H} = q \vec{V}_{\parallel} \times \vec{H} + q \vec{V}_{\perp} \times \vec{H} = m \frac{d\vec{V}_{\parallel}}{dt} + m \frac{d\vec{V}_{\perp}}{dt}$$

Тогда как векторы \vec{V}_{\parallel} и \vec{H} параллельны, то их векторное произведение равно 0, тогда:

$$q \vec{V}_{\perp} \times \vec{H} = m \cdot \frac{d\vec{V}_{\parallel}}{dt} + m \cdot \frac{d\vec{V}_{\perp}}{dt} \quad ,$$

это возможно, если

$$m \cdot \frac{d\vec{V}_{\parallel}}{dt} = 0 \quad , \text{ следовательно } \frac{d\vec{V}_{\parallel}}{dt} = 0 \quad , \quad \vec{V}_{\parallel} = const \quad .$$

Таким образом, магнитное поле не оказывает влияние на параллельную составляющую скорости \vec{V}_{\parallel} , а уравнение движения имеет вид:

$$q \vec{V}_{\perp} \times \vec{H} = m \cdot \frac{d\vec{V}_{\perp}}{dt} \quad ,$$

Учитывая, что векторы \vec{V}_{\perp} и \vec{H} перпендикулярны, то

$$|\vec{F}| = q \cdot V_{\perp} \cdot H \quad |\vec{F}| = q V_{\perp} H \quad .$$

Известно, что если сила действует перпендикулярно скорости движения частицы, то будет возникать вращение по окружности радиусом R с постоянной скоростью V_{\perp} , а сила действующая параллельно скорости будет ее увеличивать и окружность перейдет в спираль. Радиус этой окружности определяется уравнением:

$$\frac{V_{\perp}^2}{R} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q \cdot \vec{V}_{\perp} \times \vec{H}}{R} \quad , \text{ т.е.}$$

$$R = \frac{m \cdot V_{\perp}}{q \cdot H}$$

Частота вращения частицы $\omega = \frac{V_{\perp}}{R} = \frac{qH}{m}$, при этом R будет увеличиваться с каждым оборотом.

Величина скорости потока газа и пыли относительно не велика, а скорости перемещения зарядов из чехла короны будут значительными и влияние магнитного поля будет существенным.

Движение частицы в совместном электрическом и магнитном поле состоит из дрейфа со скоростью $\vec{V}_{\text{де}}$, определенной напряженностью электрического поля

\vec{E} , и движения по окружности со скоростью $V_{\perp H}$, определенной напряженностью магнитного поля \vec{H} . Знак заряда определяет направление действия силы \vec{F} , если заряд отрицательный, то сила действует в направлении вектора \vec{H} , если заряд положительный, то против вектора \vec{H} .

При отрицательном напряжении на коронирующем электроде выше U_0 , в промежутке между цилиндрами из чехла коронного разряда поступают электроны и отрицательно заряженные ионы по траектории 1 или 2 (рис. 13).

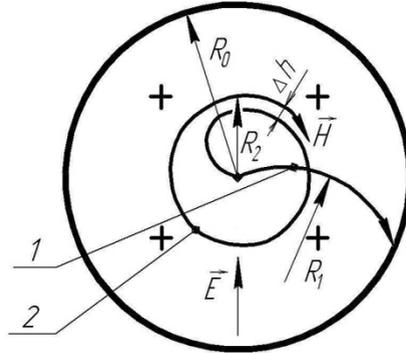


Рис. 13 Траектории движения электронов и отрицательно заряженных ионов.

Уравнение движения имеет вид:

$$m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{V} \times \vec{H}$$

В нашем допущении электрическое поле не влияет на магнитное и наоборот. Механическое перемещение заряженной частицы вызвано электрическим полем, а вращательное движение вызвано магнитным полем.

На малом промежутке Δh , который соответствует одному периоду T обращения частицы в проекции спирали:

$$m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} = q \cdot \vec{E} \quad ;$$

$$m \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \approx q \cdot E \quad ;$$

$$\Delta t = T = \frac{m \cdot \Delta V}{q \cdot E}$$

В тоже время

$$T = \frac{1}{\omega} = \frac{m}{q \cdot H} \quad , \text{ тогда перемещение частицы за период } T:$$

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{q \cdot t}{m} = \frac{\Delta V \cdot q \cdot H}{m}$$

Траектория 1 будет получена, когда создано магнитное поле напряженностью \vec{H} и электрическое поле напряженностью \vec{E} :

$$R_1 = \frac{m_1 \cdot \vec{V}_1}{q_1 \cdot H_1}$$

Если масса движущейся частицы будет много больше массы иона, то влияние магнитного поля на траекторию ее движения будет незначительным и радиус $R_1 \gg R_0$. В этом случае траектория движения частицы будет определяться действием электрического поля.

Если масса и заряд движущейся частицы соизмеримы с массой и зарядом иона, то радиус траектории движения частицы может быть меньше R_0 , например траектория движения R_2 .

Данное явление представляет интерес при улавливании газообразных веществ в электрофильтрах, поскольку увеличение времени контакта молекул газа загрязнителя с ионами и электронами двигающимися по спирали в межэлектродном пространстве будет способствовать повышению эффективности аппарата.

Формулы верны в вакууме, а в газе, где обычно технологически применяется коронный разряд для электрофильтров, движение частицы встречает сопротивление из-за столкновения между заряженными частицами и столкновения заряженных частиц с нейтральными (не заряженными), что уменьшает энергию рассматриваемой частицы и ее скорость.

Возможен случай существования магнитного поля напряженностью \vec{H} , когда большинство электронов и ионов будут двигаться с гирорадиусом меньшим, чем расстояние между коронирующим и осадительным электродами трубчатого электрофильтра R_0 .

При движении частицы по гирорадиусу R_2 , потеря ее энергии будет возмещаться энергией магнитного и электрического полей, и траектория стабилизируется по окружности вокруг коронирующего электрода.

Таким образом, объемный заряд, образованный под действием электрического поля, и существующий при токе коронного разряда в электрофильтре за счет переноса заряда через промежутки между электродами под действием электрического поля напряженностью \vec{E} , изменится.

Объемный заряд в межэлектродном промежутке будет расти, и на осадительный электрод будет поступать незначительная часть заряженных частиц, ток электрофильтра будет практически равен нулю. Следовательно, потребление электроэнергии электрофильтром может стремиться к нулю за счет запаривания коронного разряда.

При достижении плотности объемного заряда $\rho = \rho_{\text{зан}}$, когда электрическое поле объемного заряда снизило напряженность у коронирующего электрода,

происходит запираание коронного разряда, но не мелкодисперсной фазой, а объемным зарядом, созданным под воздействием магнитного поля в межэлектродном промежутке.

При поступлении частиц во входную часть электрофильтра будет происходить их быстрая зарядка до предельного заряда $q_{пред}$ под действием электрического и магнитного полей. Далее частицы будут выноситься из входной части электрофильтра и продолжать движение при отсутствии магнитного поля. Это уменьшит величину объемного заряда ρ до величины меньше $\rho_{зап}$, возникнет коронный разряд, в межэлектродный промежуток поступит порция зарядов, которые компенсируют расход объемного заряда на зарядку ранее поступивших на вход нейтральных частиц. Концентрация зарядов в поле коронного разряда при полном запираании без дисперсной фазы, всегда больше чем при запираании дисперсной фазой.

При увеличении концентрации зарядов, когда запираание коронного разряда происходит объемным зарядом ионов и электронов, должен быть достигнут больший предельный заряд частиц, который попадает в этот объемный заряд, созданный с помощью магнитного поля в электрофильтре. Как было показано ранее, на осаждение частиц пыли действует только электрическая сила, поэтому скорость осаждения:

$$\vec{V}_{ос} = \vec{V}_n + K_E \cdot \vec{F}_{эл} ,$$

где: \vec{V}_n - скорость потока,

$K_E \cdot \vec{F}_{эл}$ - скорость движения частицы к осадительному электроду под действием электрического поля.

Сила $\vec{F}_{эл}$ - пропорциональна заряду частиц. Если предельный заряд, который получает частица в совместном электрическом и магнитном полях выше, то выше и скорость осаждения этой частицы, выше эффективная скорость дрейфа и, соответственно, выше и степень очистки газа электрофильтром.

$$\eta = 1 - e^{-\frac{\omega L}{V_n H_0}} ,$$

где: L - активная длина электрофильтра,

V_n - скорость потока газа,

H_0 - межэлектродное расстояние.

Согласно вышесказанного, в электрофильтре при совместном действии электрического и магнитного полей может существовать режим, когда потребление мощности на коронный разряд существенно снижается, а предельный заряд получаемый частицами выше, соответственно выше и степень очистки газа электрофильтром.

18. Об электрической очистке выхлопных газов тепловых двигателей

По сообщению академика В.И.Кашина промышленность РФ ежегодно выбрасывает в атмосферу 20 миллионов тонн опасных химических веществ, 17 миллионов тонн добавляют выхлопные газы [22,23].

Инерционные аппараты (жалюзийные аппараты, циклоны, дымососы – пылеуловители) отличаются простотой конструкции и надежностью, однако они практически не улавливают мелкую самую вредную пыль.

Аппараты фильтрации улавливают частицы на поверхности и в объеме пористых сред. Они обладают высокой эффективностью. Фильтрующий материал имеет высокое гидравлическое сопротивление, его необходимо периодически заменять.

Мокрые газоочистные аппараты могут улавливать пыль, капли жидкости и газообразные составляющие. Уловленные мокрым аппаратом компоненты переводятся из одной среды в другую и требуют дополнительной очистки жидкости.

Электрические аппараты отличаются универсальностью. Они улавливают частицы любых размеров. Срок службы составляет десятки лет.

Процессы, происходящие в электрофильтре, довольно сложны. Они находятся на стыке многих наук: электростатика, электродинамика, аэродинамика, гидравлика, механика аэрозолей и целый ряд других. Конструкции электрофильтров постоянно совершенствуются. В настоящее время степень очистки в новых электрофильтрах может достигать 99,9 % и более. При работе электрофильтра выделяется озон, являющийся сильным окислителем. Это создает предпосылки для очистки газов от вредных газовых компонентов [24].

В самом первом приближении функционирование электрофильтра можно охарактеризовать как зарядку и осаждение частиц в электрическом поле коронного разряда.

В настоящее время количество электрофильтров в различных отраслях РФ составляет примерно 5 тысяч штук. Большинство из них устарели. Степень очистки находится на уровне 95 %. Кардинальным решением обеспечения требуемых норм выбросов из электрофильтров является установка современных аппаратов. К сожалению, это непосильная нагрузка для современного бизнеса. Однако существующие научные разработки позволяют обслуживающему персоналу без существенных затрат в несколько раз снизить выбросы в атмосферу из устаревших электрофильтров. К сожалению, в настоящее время уровень эксплуатации электрофильтров остается низким, особенно в тех случаях, когда электрофильтр не предназначен для улавливания ценного сырья, а используется только для санитарной очистки.

Повышение квалификации персонала, эксплуатирующего электрофильтры (путем организации технической учебы), и соответствующая оплата их труда – радикальный путь снижения выбросов из электрофильтров.

Электрофильтры позволяют также эффективно очищать выхлопные газы тепловых двигателей. Так специальный электрофильтр, разработанный впервые в СССР для очистки выхлопных газов дизеля обеспечил эффективность по взвешенным частицам (сажа, пыль, капли жидкости) не менее 98-99 %, Кроме того, достигнуто снижение содержания окиси углерода на 30-40 %, диоксида азота, диоксида серы, и суммарных углеводородов на 70-80 % [24].

Электрофильтры также успешно могут очищать выхлопные газы автомобилей. При этом габарит электрофильтра соизмерим с габаритом глушителя. Потребление электроэнергии – на уровне автомобильной катушки зажигания, а стоимость даже экспериментального образца существенно ниже стоимости каталитического очистителя.

Устройство для очистки выхлопных газов автомобиля состоит из источника высокого напряжения, преобразователя напряжения 1, трансформатора, например, на базе автомобильной катушки зажигания 2, выпрямителя 3 и электрофильтра 4 с осадительными электродами 5 и коронирующими электродами 6. Электрофильтр устанавливается в тракт выхлопных газов.

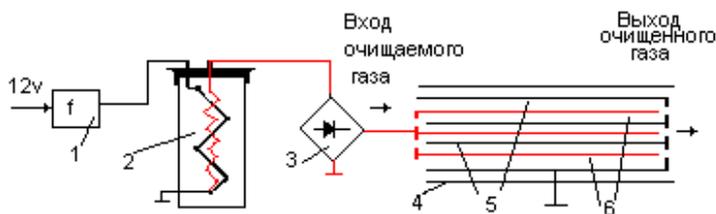


Рис.14 Схема очистки выхлопных газов автомобиля.

Применение таких электрофильтров в автомобилях позволит существенно изменить экологическую обстановку в крупных городах.

При серийном выпуске электрофильтров для автомобилей затраты на их приобретение и установку невелики. Они вполне по силам владельцам автомобилей.

Таким образом, существующие 17 миллионов тонн выбросов автомобилей могут быть снижены в несколько раз с минимальными затратами.

Значительное распространение в промышленности получило конденсационное улавливание частиц пыли при охлаждении газов предварительно насыщенными водяными парами в контактных теплообменниках (мокрых пылеуловителях).

19. Диффузиофорез

Диффузиофорез - движение частиц, вызванное градиентом концентрации компонентов газовой смеси при отсутствии внешнего электрического поля. Диффузиофорез можно характеризовать как электрофорез, но движущая сила в нем не градиент электрического потенциала, а градиент концентрации взвешенных веществ вдоль потока.

20. Термофорез

Термофорез – отталкивание частиц нагретыми телами. Это отталкивание вызвано силами, действующими со стороны газообразной фазы на находящиеся в ней неравномерно нагретые частицы аэрозоля. Механизм этих сил также существенно зависит от величины отношения размера частицы к средней длине свободного пробега газовых молекул. Практическое использование явления термофореза до настоящего времени, в основном, ограничивалось исследованием аэрозолей (термопреципитация). Было установлено, что термопреципитация может играть существенную роль при улавливании частиц из горячих газов в случае прохождения последних через холодные насадки.

Явление термофореза приводит в технике и к отрицательным последствиям. Так твердые частицы, оседающие из горячих газов на холодных стенках котлов и теплообменников, образуют слои с низкой теплопроводностью, что значительно снижает коэффициент теплопередачи.

21. Процессы, способствующие осаждению частиц

Процессы, способствующие осаждению частиц:

- эффект конденсации при осаждении взвешенных частиц (диффузиофорез);
- температурный градиент (термофорез);
- турбулентность газового потока.

На базе использования конденсационного эффекта было разработано несколько видов конденсационных пылеуловителей, в которых в качестве поверхностей осаждения применены охлаждаемые с внешней стороны стенки коллекторов [11].

22. Рекомбинация заряженных частиц

Среди отрицательно заряженных частиц в межэлектродном промежутке ЭФ всегда имеется некоторое количество частиц, имеющих положительный заряд. При рекомбинации количество отрицательных частиц уменьшается. В межполюсном промежутке ЭФ, несмотря на небольшое время пребывания аэрозоля (порядка до одной секунды), происходят изменения, приводящие к снижению количества улавливаемой пыли в начале последующего поля. При этом, как показали эксперименты на лабораторном ЭФ распределение количества уловленной пыли начинает отклоняться от экспоненциального в меньшую сторону. Качественное распределение пыли, уловленной на осадительных электродах показано на Рис .15.

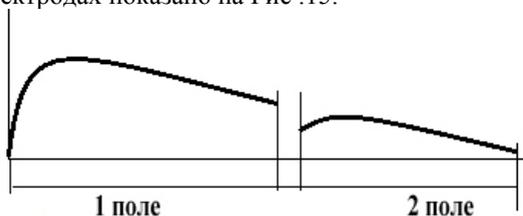


Рис.15 Качественное распределение пыли, уловленной на осадительных электродах

Такое распределение пыли также было предсказано Г.З. Мирзабекяном.

Основную роль в снижении количества улавливаемой пыли, вероятно, играет рекомбинация (взаимное притяжение и нейтрализация) противоположно заряженных частиц пыли. С этой точки зрения уменьшение межполюсного расстояния должно приводить к увеличению улавливания пыли в начале последующих полей.

23. Способ сжигания топлива

На ТЭС, как правило, имеются возможности улучшения улавливания летучей золы за счет изменения режима работы котла:

- уменьшение присосов воздуха;
- изменение тонкости помола угля;
- корректировка величины механического недожега.

Влияние изменения двух первых параметров на степень очистки газов может быть предварительно рассчитано путем использования гарантийных (корректировочных) зависимостей.

Литература

1. Чекалов Л.В. Научные основы создания электрогазоочистного оборудования нового поколения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М., МЭИ, 2007:
2. Санаев Ю.И., Чекалов Л.В. «Удельное электрическое сопротивление (УЭС) пыли в электрофильтрах. АО «Кондор –Эко», Семибратово, 2016.
3. Санаев Ю.И. Экспериментальное исследование уноса пыли в электрофильтрах и разработка методов его снижения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 1978.
4. Лунёв В.Д. Порошковая металлургия. 1975, №1, С.27.
5. Скрябина Л.Я., Коузов П.А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. Л., Химия, Ленинградское отделение, 1983.
6. Русанов А.А. (Под редакцией) Справочник по пыле-и золоулавливанию. М., Энергоатом, издат. 1983.
7. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельчённых материалов. Л-д., «Химия», 1987. С.213.
8. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Л-д., «Химия», 1982).
9. Градус Л.Я. Руководство по дисперсному анализу методом микроскопии. М., Химия, 1979. Тонкодисперсные препараты исследуются с помощью электронного микроскопа.
10. Скрябина Л.Я. Атлас промышленных пылей . М., Химнефтемаш, 1980.
11. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Подготовка промышленных газов к очистке. М., «Химия», 1975.
12. Банит Ф.Г. Мальгин А.Д. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов. М., Стройиздат, 1979, С.351.
13. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., АН СССР, 1955, С.325.
14. Фейнман Р., Лейтон М., Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. т.5.
15. Чекалов Л.В., Смирнов Д.Е. Электричество и магнетизм. «Мир», М., 2016. Процесс движения немагнитной частицы в пересекающихся электрическом и магнитном полях электрофильтра.
16. Володин Н.И., Смирнов Д.Е., Сугак А. В. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2009. Т. 52. Вып. 12. С. 105-107;
17. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М., Химия, 1967. С.344;
18. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики, т.П. М., Наука, 1972. С.368;
19. Бортник И.М., Белогловский А.А., Верецагин И.П. и др. Электрофизические основы техники высоких напряжений. М., Издательский дом МЭИ, 2010. С.703;
20. Измоденов Ю.А. Патент СССР №683780).
21. Чекалов Л.В., Санаев Ю.И. Патент РФ 2506129

22. *Кашин В.И.* Газета «Правда». Информационный бюллетень ЦККПРФ, Август 2011
23. *Санаев Ю.И.* Охрана воздушного бассейна с помощью электрофильтров.// Биосфера, 2011. т.3.№4.
24. *Мутушев М.А., Санаев Ю.И.* Снижение токсичности отработавших газов дизелей с помощью электрофильтров.//Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2004. №2,
25. *Санаев Ю.И.* Повышение эффективности электрофильтров с использованием их рабочих характеристик. //Химическое и нефтегазовое машиностроение . 2015.№8, С.33-35.
26. *Зайончковский Я.* Обеспыливание в промышленности. Перевод с польского Р.Е. Мельцера. Издательство литература по строительству. М. 1969.
27. *Meldau R. Handbuch der Staubtechnik, t.1.VDI-Verlag.Dusseldorf, 1952.*
28. *Geck W. Zundfahinge Industriestaube. VDI-Verlag.Dusseldorf,1954.*