

УДК 553/521 (575.2) (04)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДРЕЙФА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЕ

А.В. Токарев – канд. физ.-мат. наук, доцент

В.А. Юданов – инженер

In the article experimental data of the drift speed of dust particles in a field of corona discharge gaseous dynamic electrostatic precipitator is presented. Calculation has shown, that this speed is in 4–9 times greater than the drift speed of charged particles in classical electrostatic precipitator.

Введение. Возрастающее засорение окружающей среды пылью и аэрозолем газовых выбросов негативно отражается на здоровье людей и всего живого. Традиционные подходы для совершенствования классических электрофильтров, которые существуют уже более 100 лет и являются основными очистными сооружениями газовых выбросов крупных энергетических, металлургических и других объектов, в значительной степени себя уже исчерпали. Продолжающиеся мелкие усовершенствования электрофильтров радикально проблему не решают, и даже сложилось убеждение, что экономически приемлемая очистка пылегазовых выбросов на 100% является принципиально невыполнимой задачей.

Исследования показали [1], что электрофильтрация газа в малых разрядных промежутках (менее 6 см) сопровождается включением качественно другого механизма очистки газа по сравнению с обычной электростатикой, которая работает в классических электрофильтрах. Совместно с электростатическим механизмом эффективно начинает работать газодинамический. При этом длина электрофильтра относительно классических электрофильтров сокращается на два порядка, а степень улавливания пыли достигает 99% на длине электрофильтра порядка 7–10 см.

Эксперимент. Исследование особенностей электрофильтрации газа в малых разряд-

ных промежутках проводились на электрофильтре коаксиальной конструкции длиной 220 мм и диаметрами осадительного электрода 36, 51 и 57,5 мм. В качестве коронирующего электрода использовался нихромовый провод диаметром 0,2 мм. Напряжение питания в экспериментах составляло 9,5–17 кВ. Детальное описание методики экспериментов приведено в работе [1].

Экспериментальные зависимости степени улавливания η от длины L газодинамического электрофильтра (ГДЭ) существенно отличаются от вычисленных по теории для классических электрофильтров (рис. 1). При этом чем меньше размер частиц, тем сильнее происходит расхождение между теорией и экспериментом. Для объяснения этого необходимо решить обратную задачу и по экспериментальным данным о степени очистки газа вычислить реальное значение скорости дрейфа заряженных пылевых частиц в ГДЭ.

Расчет. Для анализа работы ГДЭ воспользуемся уравнением Дейча, применяемого для расчета степени улавливания пыли η или КПД цилиндрического электрофильтра [2]:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{\omega 2L}{Rv}}, \quad (1)$$

где R – радиус трубчатого осадительного электрода; ω – скорость дрейфа заряженных частиц к поверхности трубы; L – длина трубы; v – скорость газового потока.

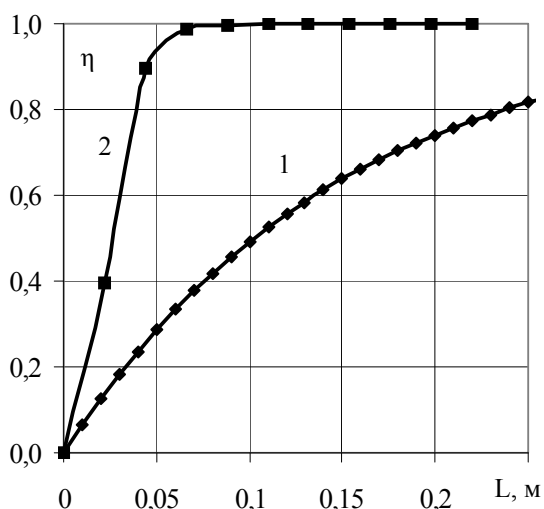


Рис. 1. Зависимость степени улавливания η угольной золы ТЭЦ г. Бишкек от длины электрофильтра L : 1 – классический, 2 – газодинамический электрофильтры.

Скорость дрейфа частиц определяется из уравнения [3]:

$$\omega = \frac{0,0118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2}{\mu_v} r, \quad (2)$$

в котором: E – средняя напряженность электрического поля; r – радиус частиц; μ_v – вязкость воздуха.

Опыт показывает, что реальные скорости дрейфа частиц в электрическом поле электрофильтра примерно вдвое меньше рассчитанных теоретически. Поэтому при расчете скорости дрейфа для каждого размера частиц вычисленное значение уменьшают вдвое.

Для расчета напряженности электрического поля используется уравнение [4]:

$$E = \sqrt{\frac{J}{\pi \epsilon_0 k}}, \quad (3)$$

где J – ионный ток на единицу длины коронирующего провода; k – подвижность ионов; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Первоначально предполагалось, что классическая теория электрофильтрации для ГДЭ не применима. Ведь в ГДЭ за период времени порядка 0,035–0,05 с степень очистки газа мо-

жет достигать 99%, когда газ,двигающийся со скоростью 2 м/с, успевает пройти расстояние всего 7–10 см. Предполагалось, что за такое короткое время пылинки еще не успеют приобрести стационарный заряд.

Например, согласно [4], в классическом электрофильтре период зарядки частиц до выхода на заряд, равный всего 91% от максимального, достигает 0,2 с при токе 135 мкА/м или 1 с при токе 43 мкА/м коронирующего провода. При этом диаметр осадительного электрода составлял 9,25 см, диаметр коронирующего электрода – 0,8 мм, напряжение – 40 кВ. Значит, увеличение тока в $n_i = 135/43 = 3,14$ раза сопровождается сокращением периода зарядки в $n_i = 1/0,2 = 5$ раз. Теперь оценим, во сколько раз сокращение периода зарядки превосходит кратность увеличения силы тока.

$$N = n_t / n_i = 5 / 3,14 = 1,59 \text{ раза.}$$

В ГДЭ при диаметре осадительного электрода 5,1 см удельные токи достигают 1900 мкА/м, что в $n_{ГДЭ} = 1900/135 = 14$ раз больше, чем в классическом электрофильтре. Значит, следует ожидать сокращения периода зарядки в ГДЭ относительно периода зарядки в классическом электрофильтре в $n = N n_{ГДЭ} = 1,59 \cdot 14 = 22,26$ раза.

Таким образом, приблизительная оценка периода зарядки частиц пыли в ГДЭ до выхода на 91% от максимально возможного дает значение $T = 0,2/22,26 = 0,009$ с, что в 4–5 раз меньше периода осаждения пыли в ГДЭ до степени очистки равной 99%. Значит, периодом зарядки частиц до выхода на стационарный уровень заряда можно пренебречь и использовать классическую теорию электрофильтрации.

При анализе уравнения (1) можно сделать вывод, что единственной переменной величиной, которая должна отличаться от такой же переменной величины у классического электрофильтра и может повлиять на скорость осаждения пыли в ГДЭ, должна быть скорость дрейфа заряженных частиц к поверхности трубы ω . Поэтому введем понятие “газодинамическая скорость дрейфа”.

$$\omega^* = G\omega, \quad (4)$$

где G – газодинамический коэффициент скорости дрейфа.

Обычную скорость дрейфа заряженных частиц ω , которая до сих пор применялась для

описания движения заряженных частиц в классических электрофильтрах, для отличия от газодинамической скорости дрейфа ω^* будем называть “электростатической скоростью дрейфа”.

После подстановки газодинамической скорости дрейфа ω^* по уравнению (4) в уравнение Дейча (1) методом последовательных приближений выбирается такая величина коэффициента G , при которой вычисленное значение степени улавливания $\eta_{\text{выч}}$ на данной длине электрофильтра L совпадет с экспериментальным зарегистрированным значением $\eta_{\text{эксп}}$.

Результаты. Обработка экспериментальных данных показала, что газодинамический коэффициент скорости дрейфа G является величиной переменной. Он зависит от расстояния от входа в электрофильтр L и прикладываемого напряжения U (рис. 2). В качестве примера на этом рисунке рассмотрен электрофильтр с диаметром 36 мм. Для других диаметров электрофильтров 51 и 57,5 мм, на которых проводились эксперименты, получают аналогичные зависимости.

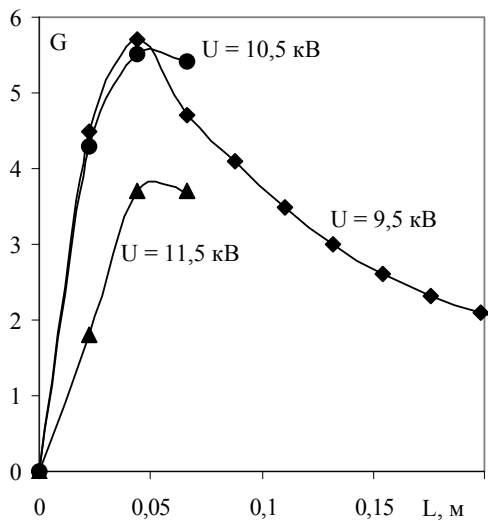


Рис. 2. Зависимость газодинамического коэффициента скорости дрейфа G от длины электрофильтра L и прикладываемого напряжения U .

Увеличение коэффициента G по длине электрофильтра L можно объяснить тем, что на входе в электрофильтр под действием электрического ветра формируется тороидальный

газодинамический вихрь, который постепенно, по мере продвижения пыли внутрь фильтра, разгоняет эту пыль до некоторой скорости. Например, при 9,5 кВ, когда коронный разряд только возникает и сила тока еще относительно слаба (750 мкА/м), на всей длине газодинамического электрофильтра длиной 0,22 м происходит улавливание пыли только на 94%. В этом эксперименте нет максимального улавливания пыли, зато можно проследить, что газодинамический коэффициент скорости дрейфа достигает максимума и далее снижается. Можно предположить, что газодинамический вихрь наиболее эффективно работает только вблизи входа в электрофильтр, а в более далеких от входа областях вообще отсутствует. Тогда снижение коэффициента G после его выхода на максимум объясняется процессами диссипации энергии газа, прошедшего через газодинамический вихрь.

Интересным является тот факт, что при напряжении 9,5 кВ, когда коронный разряд только зажигается и потому скорость электрического ветра еще не может быть большой, газодинамический коэффициент скорости дрейфа G достигает максимального значения, а при более высоких напряжениях его величина снижается. Вероятно, чем выше напряжение и интенсивнее работает электрический ветер, тем более интенсивно начинает проявляться турбулентное движение, которое направленное движение газа в газодинамическом вихре превращает в хаотичное. Поэтому и снижается величина коэффициента G .

При напряжениях 10,5 и 11,5 кВ после перехода через максимум наблюдается тенденция к снижению коэффициента G . Этот же эффект наблюдается и на других диаметрах осадительного электрода. Однако проследить, как меняется этот коэффициент на расстояниях, превышающих 0,066 м, невозможно, поскольку на этом расстоянии степень очистки газа уже достигает 99% и более и на еще больших расстояниях практически не остается пыли, являющейся индикатором скорости дрейфа.

Исследование влияния диаметра осадительного электрода d на газодинамический коэффициент скорости дрейфа частиц G (рис. 3) показало, что при любом из исследованных

диаметров наблюдается тенденция снижения коэффициента G при увеличении прикладываемого напряжения, что объясняется увеличением турбулентности потока. Хотя при больших диаметрах осадительного электрода эта зависимость проявляет себя слабее, чем при малом диаметре.

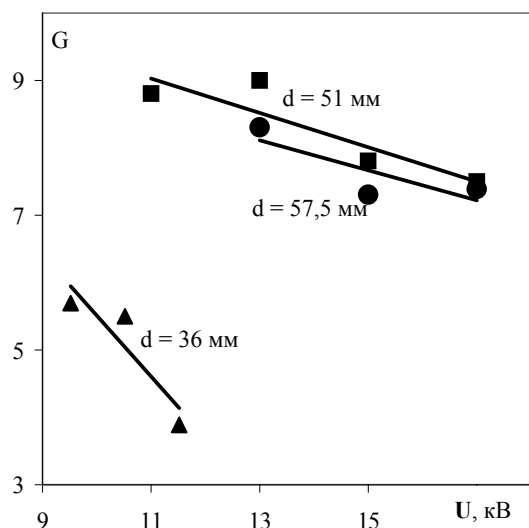


Рис. 3. Зависимость газодинамического коэффициента скорости дрейфа G от прикладываемого напряжения U и диаметра осадительного электрода d .

Кроме того, выяснилось, что при диаметре 51 мм наблюдается максимальное значение газодинамического коэффициента скорости дрейфа $G = 9$, а при меньшем (36 мм) и большем диаметрах (57,5 мм) это значение ниже. К тому же на диаметре 51 мм разряд устойчиво существует в более широкой области изменения напряжения. Все это говорит о том, что наиболее благоприятные условия для возникновения газодинамического вихря создаются при диаметре осадительного электрода порядка 51 мм.

Сравнение экспериментальных данных по степени улавливания пыли η в электрофильтрах разного диаметра также показывает, что при диаметре осадительного электрода, равном 51 мм, происходит наиболее эффективная очистка. Вероятно, при диаметрах осадитель-

ных электродов меньших, чем 51 мм, силы трения газодинамического вихря о стенку трубы создают большие гидродинамические потери энергии этого вихря. При диаметрах несколько больших 51 мм вихрь все больше начинает замыкаться вдали от стенки трубы и перенос пыли на стенку с помощью этого вихря ослабляется, а при еще большем увеличении диаметра и вовсе прекращается. Таким образом, увеличение диаметра осадительного электрода приводит к плавному переходу от газодинамического электрофильтра к классическому электростатическому электрофильтру.

Зная величину коэффициента G можно вычислить газодинамическую скорость дрейфа ω^* по формуле (4). На рис. 4, чтобы его не перегружать избыточной информацией, диаметры осадительных электродов указаны только для газодинамической скорости дрейфа. Кривые электростатической скорости дрейфа располагаются по рисунку ниже при тех же напряжениях. На рис. 4 видно, что газодинамическая скорость дрейфа существенно (согласно рис. 3 в 4–9 раз) превосходит электростатическую скорость дрейфа. Кроме того, при одинаковых напряжениях на осадительных электродах меньшего диаметра наблюдаются более высокие скорости дрейфа частиц, что объясняется более высокой напряженностью электрического поля у электродов меньшего диаметра.

Установлено, что газодинамическая скорость дрейфа, например, для электрода диаметром 51 мм в 3 раза возрастает с ростом напряжения (рис. 4). При этом возникает вопрос: почему согласно рис. 3 газодинамический коэффициент скорости дрейфа G с ростом напряжения снижается, а газодинамическая скорость дрейфа ω^* , согласно рис. 4, возрастает? Это объясняется тем, что обе величины и газодинамическая скорость дрейфа ω^* , и электростатическая скорость дрейфа ω с ростом напряжения увеличиваются. Однако газодинамическая скорость дрейфа ω^* возрастает более высокими темпами, и потому отношение этих скоростей при вычислении дают снижение величины коэффициента G с ростом напряжения.

Вероятно, экспериментально найденная скорость газодинамического дрейфа частиц ω^* должна быть близка к скорости электрическо-

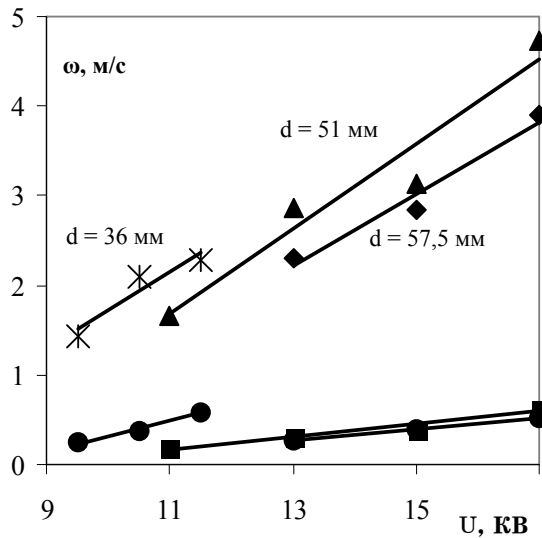


Рис. 4. Зависимость газодинамической (верхние кривые) и электростатической (нижние кривые) скорости дрейфа частиц от напряжения U и диаметра d осадительного электрода.

го ветра в ГДЭ. В действительности, чем крупнее частица, тем сильнее ее скорость отстает от скорости электрического ветра, и только для очень мелких частиц субмикрон-

ных размеров, для которых сила Стокса является достаточно большой, можно утверждать, что их скорость совпадает со скоростью электрического ветра. Поскольку эксперименты проводились на реальной угольной пыли ТЭЦ г. Бишкек, которая включает в себя частицы разных размеров, то можно говорить лишь о средней скорости дрейфа всех частиц пыли.

Процессы, способствующие более быстрому осаждению пыли, чем в классических электрофильтрах приведены на рис. 5. Эксперименты показали, что без диэлектрической трубки коронный разряд с коронирующего электрода зажигается еще внутри диэлектрической вставки и по мере приближения к осадительному электроду постепенно увеличивает свою интенсивность. При этом скорость электрического ветра с коронирующего электрода постепенно увеличивается от нуля до максимума. Установка диэлектрической трубки увеличивает напряженность электрического поля, так как место выхода коронирующего провода из диэлектрической трубки эквивалентно превращению коронирующего провода в коронирующее острие. При этом длина, на которой осаждается пыль в ГДЭ, сокращается на десятки процентов.

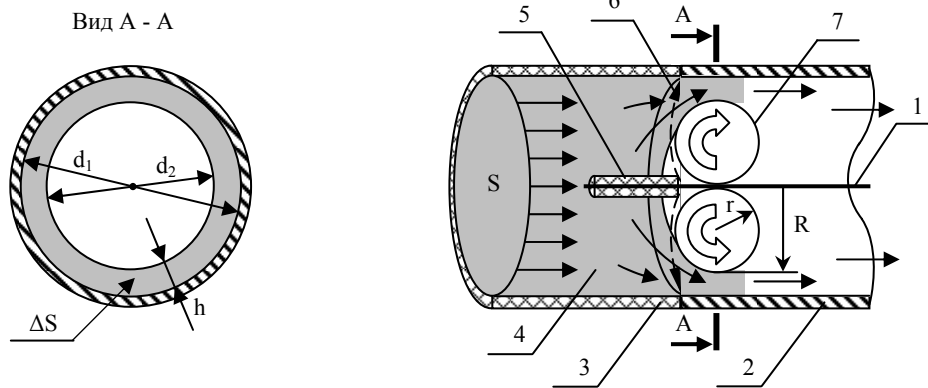


Рис. 5. Переход пылегазового течения в виде сплошного цилиндра в течение в виде толстостенной трубы на входе в ГДЭ: 1 – коронирующий электрод; 2 – осадительный электрод; 3 – диэлектрическая вставка, служащая для крепления коронирующего провода (конструкция крепления не изображена); 4 – пылегазовый поток, направление которого указывают сплошные стрелки; 5 – диэлектрическая трубка, закрывающая коронирующий провод; 6 – наиболее интенсивное направление движения электрического ветра, которое изображается пунктирной стрелкой; 7 – тороидальный газодинамический вихрь, направление вращения которого изображается белой стрелкой.

Кроме того, место стыка осадительного электрода и диэлектрической вставки также является местом усиления неоднородности электрического поля. При этом конец диэлектрической трубки лежит в плоскости стыка диэлектрической вставки и осадительного электрода. Поэтому электрический ветер наиболее интенсивно начинает развиваться на входе в ГДЭ и, как следствие, возникает тороидальное газодинамическое течение, или для краткости газодинамический вихрь. Этот вихрь, сокращает сечение для прохода газа (см. рис. 5) и, раздвигая набегающий пылегазовый поток, превращает его из течения в виде сплошного цилиндра сечением $S = \pi d_1^2/4$ в течение в виде толстостенной “трубы” сечением $\Delta S = \pi(d_1^2 - d_2^2)/4$, (5) где d_1 и d_2 – соответственно диаметр осадительного электрода и диаметр стенки пылегазовой “трубы”. Оценим толщину “стенок” этой пылегазовой “трубы”.

Поскольку при диаметре осадительного электрода 51 мм и напряжении 17 кВ максимальная скорость дрейфа в ГДЭ достигает $\omega^* = 4,7$ м/с, то примем эту скорость как нижнее значение скорости электрического ветра. Входящий пылегазовый поток имел скорость $\omega_0 = 2$ м/с. Таким образом, газодинамический вихрь ускоряет входящий пылегазовый поток с помощью электрического ветра от 2 до 4,7 м/с и проталкивает его через сечение меньшей площади. Запишем уравнение неразрывности для газового потока:

$$S_0 \omega_0 = \Delta S \omega^*, \quad (6)$$

из (6) следует, что

$$\Delta S = S_0 \omega_0 / \omega^* = \pi d_1^2 \omega_0 / \omega^*. \quad (7)$$

Приравняем (5) и (7) и после элементарных преобразований получим:

$$d_2 = d_1(1 - \omega_0 / \omega^*)^{0,5}. \quad (8)$$

После подстановки в (8) численных значений получаем, что внутренний диаметр “стенок” пылегазовой “трубы” будет равен $d_2 = 38,6$ мм. При этом толщина “стенок” этой “трубы”

$$h = (d_1 - d_2)/2 = (51 - 38,6)/2 = 6,2 \text{ мм.}$$

Это то расстояние, на котором оказываются самые удаленные от осадительного электрода частички пыли после прохода газодинамического вихря. В действительности скорость электрического ветра больше средней

газодинамической скорости дрейфа ω^* . Поэтому реальная величина h еще меньше.

Тороидальное газодинамическое течение характеризуется двумя радиусами. Большой радиус вдвое меньше диаметра стенок пылегазовой трубы и равен:

$$R = 38,6 / 2 = 19,8 \text{ мм,}$$

а меньший радиус еще примерно вдвое меньше, т.е. он равен

$$r = 19,8 / 2 = 9,9 \text{ мм.}$$

(В действительности внутри тора тоже должно быть отверстие с некоторым радиусом. Однако в первом приближении мы этого не учитываем). По этому радиусу r вихрь разгоняет пыль до газодинамической скорости дрейфа $\omega^* = 4,7$ м/с. При этом частота вращения газодинамического вихря равна:

$$\nu = \omega^* / (2\pi r) = 4,7 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,0099) = 75,5 \text{ Гц.}$$

Отсюда можно вычислить центробежное ускорение, которое испытывают пылинки, попадая в этот вихрь:

$$a = \omega^{*2} / r = 4,7^2 / 0,0099 = 2,253 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2.$$

Это очень большое ускорение, которое в 23 000 раз больше ускорения свободного падения. Пылевые частицы практически не могут проникнуть внутрь этого вихря против центробежных сил. Поэтому нет ничего удивительного в том, что с маленького расстояния $h = 6,2$ мм заряженная пыль легко осаждается электростатически и под действием центробежных сил от газодинамического вихря. Эксперименты показывают, что пылегазовый поток при проходе каждого 0,6 – 1 диаметра осадительного электрода, увеличивает степень очистки газа на порядок, что позволяет легко получить любую желаемую степень очистки.

Выводы

1. В ГДЭ период зарядки частиц пыли до выхода на уровень 91% от максимально возможного завершается за период времени порядка 0,009 с, что в 4 – 5 раз меньше полного периода осаждения пыли. Поэтому в первом приближении периодом нестационарного значения заряда на пылинках можно пренебречь и рассчитывать ГДЭ по теории для стационарного заряда, применяемой для классических электрофильтров.

2. Найдено теоретическое объяснение работы газодинамического электрофильтра, которое состоит в том, что в малых разрядных

промежутках, порядка 6 см и менее за счет электрического ветра образуется газодинамический вихрь, который увеличивает скорость дрейфа заряженных частиц в 4 – 9 раз по сравнению со скоростью дрейфа в классических электрофильтрах. При этом газодинамическая скорость дрейфа заряженных частиц ω^* достигает значения 1,4 – 4,7 м/с. Такая же или еще большая скорость должна быть у электрического ветра в ГДЭ. За счет такой высокой скорости, несмотря на турбулентное перемешивание запыленного газа степень очистки газа в 99% достигается на расстояниях порядка 7 – 10 см за период времени 0,035 – 0,05 с.

3. Диаметр осадительного электрода, порядка 51 мм близок к оптимальному для ГДЭ. При диаметрах несколько меньших, чем 51 мм, газодинамическая скорость дрейфа ω^* снижается за счет силы трения газодинамического вихря о стенку трубы, где создаются повышенные гидродинамические потери энергии этого вихря. При диаметрах несколько больших 51 мм газодинамическая скорость дрейфа ω^* снижается за счет того, что вихрь начинает замыкаться вдали от стенки трубы и перенос пыли на стенку с помощью этого вихря ослабляется или может даже вовсе прекратиться.

4. Пылегазовый поток на входе в ГДЭ превращается из сплошного цилиндрического

течения в течение в виде толстостенной “трубы” толщина “стенок” которой составляет порядка 6 мм при диаметре осадительного электрода 51 мм и напряжении на коронирующем проводе 17 кВ. При этих параметрах за счет электрического ветра со скоростью порядка 4,7 м/с образуется газодинамический вихрь с радиусом тороидального вращения порядка 10 мм и частотой вращения порядка 75 Гц. Возникающие при этом центробежные силы в 23000 раз превосходят ускорение свободного падения. Поэтому под действием центробежных и электростатических сил пыль легко осаждается и при проходе каждого 0,6 – 1 диаметра осадительного электрода увеличивает степень очистки газа на порядок, что позволяет легко получить любую желаемую степень очистки.

Литература

1. Токарев А.В., Лелевкин В.М., Юданов В.А., Банышева А.А. Особенности электроочистки газа в малых разрядных промежутках // Вестн. КРСУ. – 2007. – Т. 7. – №8. – С. 107.
2. Deutsch W. // An. Phys. – 1922. – P. 68, 335.
3. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов К.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – С. 442.
4. Страус В. Промышленная очистка газов. – М.: Химия, 1981. – С. 442.