

УДК 621.319.7.001

**Д.С. ПУСТОВОЙ**

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАРЯДКИ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ОЧИСТКЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ОТ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ**

#### *Постановка проблемы*

Повышенная опасность аэрозолей техногенного происхождения связана, прежде всего, с их мелкодисперсностью. В большинстве случаев размер частиц таких аэрозолей не превышает 5 мкм. Аэрозоли с содержанием частиц такого размера способны проникать в лимфатические узлы, кровяную систему, задерживаться в легких, засорять слизистые оболочки, являясь причиной многих заболеваний и нанося тем самым непоправимый вред здоровью человека. Поэтому удаление мелких частиц (размером менее 5 мкм) из отходящих от промышленного оборудования газовых потоков, является одной из самых важных задач в области борьбы с загрязнением воздуха.

#### *Выделение нерешенной проблемы*

В настоящее время, как правило, для улавливания аэрозолей из отходящих газов используется широкий класс газоочистного оборудования (циклоны, фильтры, пылеуловители, осадительные камеры и др.). Однако из-за низкой эффективности этого оборудования при улавливании мелкодисперсной пыли, необходимости замены или чистки фильтрующих элементов область его применения ограничена.

Решением проблемы удаления мелкодисперсной пыли (менее 5 мкм) из запыленного воздуха может стать коагуляция пыли с целью ее укрупнения и ускорения оседания.

#### *Краткий обзор публикаций*

Для повышения эффективности улавливания высокодисперсной пыли в инерционных средствах очистки применяется вынужденная коагуляция пыли с целью ее укрупнения и ускорения оседания [1]. Одним из видов такой коагуляции, является коагуляция частиц под действием специально направленного поля. Таким действием обладает электрическое поле.

Известно устройство для очистки воздуха, в котором для повышения эффективности улавливания мелкодисперсных аэрозолей применяется их предварительная коагуляция с использованием электрического и ударноструйного взаимодействия. Это устройство состоит из двух зарядных камер (положительного и отрицательного ионизаторов) с разделительными воздуховодами и ударноструйной камеры коагуляции [2].

Однако этому устройству присущи ряд недостатков, основной из которых заключается в накоплении пыли в зарядных камерах, что приводит к появлению обратной короны, электрическим пробоям, снижению эффективности зарядки частиц пыли и обуславливает необходимость в периодической очистке зарядных камер от накопленной пыли. Кроме того, наличие ударнотруйной камеры ввиду незначительности инерционного взаимодействия мелкодисперсных частиц пыли в сравнении с электростатическим, практически не влияет на эффективность их коагуляции, а приводит лишь к дополнительным энергетическим затратам на перемещение запыленного воздуха.

Другое устройство, реализующее коагуляцию мелкодисперсных частиц пыли, содержит трубопровод для подвода запыленного воздуха, разделитель потока, две взаимоизолированные зарядные камеры, смеситель и трубопровод для отвода запыленного воздуха с встроенным в него соленоидом для воздействия на заряженные частицы электромагнитным полем [3].

Этому устройству также присущ недостаток, связанный с накоплением пыли в зарядных камерах. Кроме того, наличие в устройстве соленоида для создания магнитного поля приводит только к дополнительным энергетическим затратам и не способствует повышению эффективности коагуляции, что объясняется незначительной величиной сил Лоренца, действующих на заряженные частицы в магнитном поле при небольших скоростях потока в сопоставлении с силами электростатического взаимодействия.

В связи с вышеуказанным, для повышения эффективности коагуляции мелкодисперсных частиц пыли за счет предотвращения осаждения пыли в зарядных камерах при одновременном снижении затрат на коагуляцию и очистку зарядных камер от пыли разработано устройство [4], в котором это достигается тем, что зарядка аэрозолей осуществляется в поле униполярного коронного разряда с питанием коронирующих электродов от источников высоковольтного униполярного импульсного напряжения с длительностью импульсов, обеспечивающей унос газовых ионов за пределы разрядного промежутка. При этом коронирующие электроды выполнены в виде металлической сетки с закрепленными на ней иглами, причем коронирующие электроды закреплены своим основанием на внутренней поверхности втулки, выполненной из изолирующего материала и закрепленной в стенке трубопровода.

Ввиду того, что электрическая энергия расходуется в основном на образование ионов и на зарядку мелкодисперсной фазы аэрозоля, а не на протекание ионных токов, то при таком режиме зарядки значительно снижается уровень энергопотребления устройства в сравнении с рассмотренными аналогами.

#### *Формулирование задачи*

Для теоретического обоснования электроионизационных способов очистки воздуха от высокодисперсной пыли необходимо подробное аналитическое описание связи между зарядами частиц и входными переменными: массой, размерами, формой и вещественным составом частиц, временем зарядки, влажно-

стью, температурой, давлением и химическим составом атмосферы, параметрами коронного разряда.

*Материалы и методы исследования*

Величина зарядов частиц, приобретаемых ими в поле коронного разряда, определяется двумя процессами – направленным движением ионов к частице под действием внешнего электрического поля (процесс ударной зарядки) и диффузией ионов к поверхности частицы. В зависимости от размеров частиц перечисленные процессы играют различную роль.

Выражение, описывающее процесс зарядки пыли в поле униполярного коронного разряда, имеет следующий вид [5]:

$$g = 4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E_0 \rho^2 \frac{\pi k e n_0 t}{4\pi\epsilon_0 + \pi k e n_0 t} + \rho \frac{4\pi\epsilon_0 k T}{e} A(n_0 t), \quad (1)$$

где  $E_0$  – напряженность внешнего электрического поля, В/м;  $\rho$  – эквивалентный радиус частицы, м;  $k$  – подвижность ионов, м<sup>2</sup>/В·с;  $e$  – заряд иона, Кл;  $n_0$  – концентрация ионов в невозмущенной среде, м<sup>-3</sup>;  $t$  – время зарядки, с;  $A(n_0 t)$  – временная функция, характеризующая скорость диффузионного процесса зарядки;  $T$  – период изменения величины заряда;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

Анализ выражения (1) показывает, что обеспечить различную интенсивность зарядки крупных и тонких фракций аэрозоля можно путем зарядки частиц пыли при различных уровнях напряженности электрического поля коронного разряда. Это возможно ввиду отличающегося характера зависимостей зарядов тонкой и грубой фракции от напряженности внешнего электрического поля  $E_0$ . Требуется обеспечить длительность процесса зарядки и концентрацию ионов в камере, достаточную для приобретения тонкой фракцией зарядов, близких к предельным. Заряды крупных частиц при этом могут быть существенно меньше от предельных, что исключает их осаждение и накопление в зарядной камере, а в последующем не оказывает влияния на процессы коагуляции мелкодисперсной фазы аэрозоля.

Из сказанного выше следует, что существует возможность обеспечить различную интенсивность зарядки крупных и тонких фракций аэрозоля путем зарядки аэрозоля в поле коронного разряда с периодическим изменением его напряженности от  $E_{0\max}$  до нуля.

В зарядных камерах типа "сетка – острие" особый интерес представляет вариант зарядки аэрозоля в поле импульсного униполярного коронного разряда с малой длительностью импульсов и большой их скважностью. Так как интенсивная зарядка крупной фазы может происходить только в моменты действия мощного внешнего электрического поля, то следует ожидать, что эта фаза в поле импульсного коронного разряда с малой длительностью и большой скважностью импульсов будет приобретать незначительные заряды и только в зоне ме-

жэлектродного пространства, где в момент действия импульса имеется высокая напряженность электрического поля. Тонкая фракция с  $\rho < 10^{-6}$  интенсивно может заряжаться как в моменты действия импульсов, так и при их отсутствии, как в междуэлектродном пространстве, так и за его пределами, при условии выноса ионов за пределы разрядного промежутка. Если обеспечить концентрацию ионов и время зарядки достаточными для приобретения мелкой фазой аэрозоля зарядов, близких к предельным, то при последующем смешивании воздушных потоков при взаимодействии мелких частиц с разнополярными зарядами будет протекать их интенсивная коагуляция.

Вопросы протекания процесса зарядки в поле импульсного коронного разряда с малой длительностью и большой скважностью импульсов не освещены в литературных источниках. Поэтому представляет интерес оценить величины зарядов, приобретаемых частицами в данном виде коронного разряда с целью определения возможности его применения в устройствах для коагуляции частиц аэрозоля.

Рассмотрим процессы, происходящие в поле импульсного коронного разряда в концентрических цилиндрах, для которых поле коронного разряда может быть достаточно строго рассчитано. К моменту окончания действия импульса ионизирующего напряжения, длительность которого достаточна для установления стационарного распределения носителей в междуэлектродном промежутке, напряженность поля в концентрическом цилиндре можно рассчитать по формуле [6]

$$E_r = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} + \left(E_0 \frac{p_0}{p}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $I$  – ток на единицу длины коронирующего электрода;  $p_0$  – радиус коронирующего электрода;  $p$  – координата точки междуэлектродного пространства;  $E_0$  – критическая напряженность, которую можно рассчитать из условия [7]

$$E_0 = \frac{U_0}{p_0 \ln \frac{R}{p_0}},$$

где  $U_0$  – величина напряжения зажигания короны, определяемая экспериментально по появлению первого толчка тока;  $R$  – радиус внешнего электрода.

Согласно выражение (2) определим концентрацию ионов в междуэлектродном пространстве

$$n_p = \frac{I}{2\pi r e k E_p} = \frac{I}{2\pi r e k \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} + \left(E_0 \frac{p_0}{p}\right)^2}}. \quad (3)$$

При высокой крутизне заднего фронта импульса ионизирующего напряжения приведенное распределение концентрации ионов сохраняется в межэлектродном пространстве в начальный момент паузы между импульсами. Напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве в отсутствие ионизирующего напряжения определяется суммарным зарядом ионов.

Поток вектора электрического смещения  $\Phi_e$  через замкнутую цилиндрическую поверхность радиусом  $r$  и длиной  $l$  в этом случае

$$\Phi_e = \tau_p l, \quad (4)$$

где  $\tau_p$  – линейная плотность зарядов.

Ввиду нелинейности зависимости концентрации ионов от радиуса  $p$

$$d\tau_p = n_p dS = n_p 2\pi r dp,$$

где  $n_p$  – объемная плотность зарядов.

Тогда

$$\tau_p = \int_{p_0}^p n_p 2\pi r dr = 2\pi \int_{p_0}^p n_p p dp .$$

С другой стороны,

$$\Phi_B = 2\pi d \epsilon_0 E'_p, \quad (5)$$

Решая совместно уравнения (4) и (5) с учетом зависимости (2) получаем

$$E'_p = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} + \left(E_0 \frac{r_0}{r}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} + E_0^2\right) \frac{p_0^2}{p^2}},$$

Так как в обычных условиях

$$\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} \ll E_0^2,$$

то можно записать

$$E'_p = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} + \left(E_0 \frac{p_0}{p}\right)^2} - E_0 \frac{p_0}{p}. \quad (6)$$

Значения  $n_p$  и  $E'_p$ , определяемые по формулам (3) и (6) являются начальными условиями при определении изменения концентрации ионов и напряженности поля в межэлектродном пространстве в момент паузы ионизирующего напряжения.

Кривые зависимостей  $n_p$  и  $E'_p$  от радиуса при различном значении напряжения  $U$  на коронирующем электроде приведены на рис. 1 и рис. 2. Величина напряжения зажигания короны  $U_0$  определялась экспериментально при появлении первого толчка тока для отрицательной короны. Размеры электродов  $r = 1$  мм,  $R = 150$  мм.

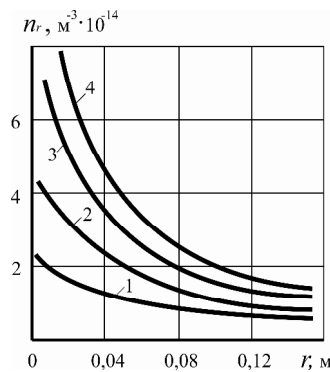


Рис. 1. Кривые концентрации ионов в поле коронного разряда в концентрических цилиндрах при  $U = 40$  кВ (1);  $U = 50$  кВ (2);  $U = 60$  кВ (3);  $U = 70$  кВ (4).

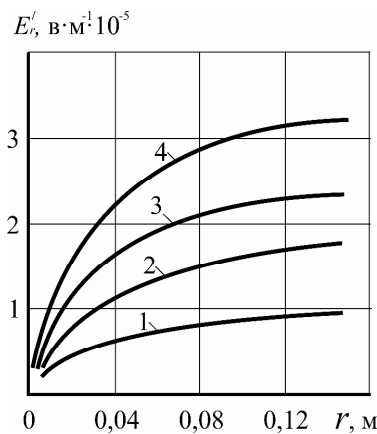


Рис. 2. Кривые напряженности электрического поля в концентрических цилиндрах в начальный момент паузы между ионизирующими импульсами при  $U = 40$  кВ (1);  $U = 50$  кВ (2);  $U = 60$  кВ (3);  $U = 70$  кВ (4)

Стекание ионов с межэлектродного пространства при отсутствии ионизирующего напряжения обуславливается воздействием на них поля электростатического рассеивания  $E'_r$ , а также процессов диффузии ионов к поверхностям

**Збагачення корисних копалин, 2015. – Вип. 61(102)**

электродов. Ввиду того, что  $r \ll R$ , то процессом диффузии ионов на поверхность внутреннего электрода можно пренебречь.

Поток ионов  $\Phi$  через цилиндрическую поверхность единичной длины радиусом  $r$  с учетом диффузии и сил электростатического рассеивания в этом случае

$$\Phi = 2\pi r \left( D \frac{\partial n_p}{\partial p} + n_p k E'_p \right). \quad (7)$$

Ввиду нестационарности потока ионов аналитического решения уравнения найти невозможно. Однако можно оценить составляющие потока ионов, обусловленные различными процессами.

Задача по определению потока частиц на внутреннюю поверхность бесконечно длинного цилиндра обусловленного их диффузией решена для случая [8]

$$n(r, 0) = n_0 \text{ при } r < R$$

$$n(R, t) = 0 \text{ при } t > 0$$

Здесь изменение средней концентрации ионов во времени (без учета сил электростатического рассеивания) описывается уравнением

$$n = 4n_0 \sum_{\gamma=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_{\gamma}^2} e^{-\frac{D\beta_{\gamma}^2 t}{R^2}}, \quad (8)$$

где  $\beta_1^2, \beta_2^2, \dots$  – квадраты нулей функции Бесселя первого рода нулевого порядка  $I_0(x)$ , имеющие значения  $\beta_1^2 = 5,784$ ;  $\beta_2^2 = 30,47$ ;  $\beta_3^2 = 74,89$ ;  $\beta_4^2 = 132,8$ .

Анализ выражения (8) показывает, что за время паузы между импульсами ионизирующего напряжения, равной 1 с при  $R = 0,15$  м отношение  $n/n_0 > 0,96$ . В случае неравномерного распределения концентрации ионов следует ожидать увеличение отношения  $n/n_0$  и поэтому с достаточной для практических целей точностью можно пренебречь составляющей потока ионов, обусловленной диффузионными процессами и искать решение уравнения (7) только с учетом движения ионов под действием сил электрического рассеивания.

Дивергенция вектора напряженности электрического поля сквозь замкнутую поверхность цилиндра радиусом  $R$  единичной длины

$$\text{Div } \overline{E'_p} = \frac{Nl}{2\pi R \epsilon_0} = \frac{e \int_0^p pn(p,t) dp}{R \epsilon_0},$$

где  $N$  – число ионов в объеме, ограниченном замкнутым пространством;  $n(p, t)$  – концентрация ионов в объеме (являющаяся функцией времени и координаты  $p$ ).

Ввиду того, что  $\bar{U} = k\bar{E}$ , можно записать

$$\text{Div}\bar{U} = \frac{ek}{R\epsilon_0} \int_{r_0}^R n(p, t) p dp.$$

С другой стороны

$$\text{Div}\bar{U} = -\frac{1}{n(p, t)} \frac{dn(p, t)}{dt}.$$

где  $n(R, t)$  – концентрация ионов при  $r = R$ .

Тогда уравнение для определения потока ионов на поверхность электрода примет вид

$$\frac{ek}{\epsilon_0 R} \int_{p_0}^R n(p, t) \cdot p dp = -\frac{1}{n(p, t)} \frac{dn(p, t)}{dt}. \quad (9)$$

Решение этого уравнения может быть получено для случая, когда концентрация ионов может быть представлена в виде произведения двух независимых переменных, описывающих ее изменение во времени и в пространстве

$$n(p, t) = u_t U_p. \quad (10)$$

После подстановки (9) имеем

$$\frac{ek}{\epsilon_0 R} u_t \int_{r_0}^R p U_p dp = -\frac{1}{u_t} \frac{du_t}{dt}.$$

Откуда

$$u_t = \frac{1}{\frac{ke}{\epsilon_0 R} t \int_{p_0}^R p U_p dp + C}.$$

Введем граничные условия



$$t = 0; u_t = 1; n(p, 0) = \frac{I}{2\pi r e k \sqrt{\frac{I}{2\pi \epsilon_0 k} + \left(\frac{E_0 p_0}{2}\right)^2}},$$

и при данных граничных условиях определим постоянную интегрирования и множитель при  $t$ .

При  $t = 0, C = 1$ , тогда

$$u_t = \frac{1}{\left[ \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{2\pi k I}{\epsilon_0} R^2 + (2E_0 p_0 \pi k)^2} - \sqrt{\frac{2\pi k I}{\epsilon_0} r_0^2 + (2E_0 p_0 \pi k)^2} \right] t + 1}.$$

Так как  $\frac{2\pi k I}{\epsilon_0} p_0^2 \ll (2\pi k E_0 p_0)^2$ , то можно записать

$$u_t = \frac{1}{1 + k \left[ \sqrt{\frac{I}{2\pi k \epsilon_0} + \left(\frac{E_0 p_0}{R^2}\right)^2} - \frac{E_0 p_0}{R} \right] t} = \frac{1}{1 + k \left( E_R - \frac{E_0 p_0}{R} \right) t} = \frac{1}{1 + k E'_R t},$$

где  $E_R$  – напряженность поля  $E_p$  при  $p = R$ ;  $E'_R$  – напряженность поля  $E'_p$  при  $p = R$ .

Таким образом, концентрацию ионов в любой точке межэлектродного пространства в момент паузы можно определить как

$$n(p, t) = \frac{1}{1 + k E'_R t} \cdot \frac{I}{2\pi k p \sqrt{\frac{I}{2\pi k \epsilon_0} + \left(E_0 \frac{p_0}{p}\right)^2}}. \tag{11}$$

Из анализа выражений (3), (6) и (11) видно, что при малых радиусах наружного электрода  $R < 10^{-2}$  м и длительности паузы между ионизирующими импульсами  $t_n < 0,001$  секунды, существующая концентрация ионов в межэлектродном пространстве за время паузы практически не изменяется. Напряженность электрического поля в момент паузы фактически на порядок ниже напряженности в момент действия ионизирующего напряжения. В этом случае заряд, сообщаемый частицам пыли с  $\rho > 2$  мкм в камере

$$g = 4\pi \epsilon_0 \left( 1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right) \rho^2 \left( E_p \frac{\pi k e n_p t_u m}{4\pi \epsilon_0 + \pi k e n_p t_u m} + E'_r \frac{\pi k e n_p t_n m}{4\pi \epsilon_0 + \pi k e n_p t_n m} \right), \tag{12}$$

где  $t_u$  – длительность импульса ионизирующего напряжения;  $t_n$  – длительность

паузы;  $m$  – количество импульсов.

При малой длительности заряд, приобретаемый частицами при  $t = 10(4\epsilon_0 / ken_p)$ , практически на порядок ниже заряда, который они приобретают в поле униполярного коронного разряда.

Частицы аэрозоля с  $\rho < 0,1$  мкм, для которых процесс зарядки можно считать чисто диффузионным, за это же время приобретают заряды близкие к предельным. Величина заряд частиц в этом случае

$$g = \rho \frac{4\pi\epsilon_0 kT}{e} A(n_p, t).$$

При радиусах частиц аэрозоля  $0,1 < \rho < 2$  мкм величину заряда необходимо определить с учетом обоих процессов зарядки, т.е.

$$g = 4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) \rho^2 \left( E_r \frac{\pi k n_p t_u m}{4\pi\epsilon_0 + \pi k n_p t_u m} + E'_r \frac{\pi k e n_p t_n m}{4\pi\epsilon_0 + \pi k e n_p t_n m} \right) + \rho \frac{4\pi\epsilon_0 R T}{e} A(n_p, t).$$

Отношение величины заряда, приобретаемого в этом случае, к величине заряда частиц в униполярном коронном разряде изменяется от единицы (при  $\rho = 0,1$  мкм) до десятых долей (при  $\rho = 2$  мкм).

*Результаты исследования*

Исходя из полученных соотношений рассмотрим возможность применения данного вида коронного разряда для целей коагуляции мелкодисперсной фазы аэрозоля при использовании зарядного устройства с системой коронирующих электродов типа "острие" и заземленного электрода, выполненного в виде расположенной поперек потока запыленного воздуха крупноячеистой сетки (рис. 3).

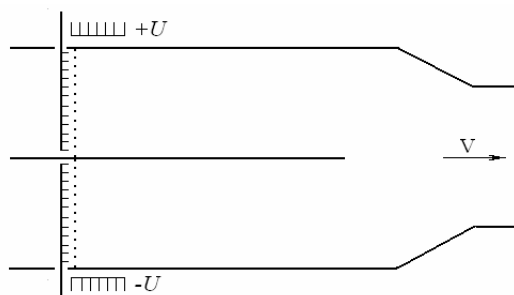


Рис. 3. Зарядное устройство с системой электродов "острие-сетка"

Следует отметить, что для такой конструкции зарядной камеры математически описать процесс зарядки частиц аэрозоля импульсным напряжением невозможно. Однако полученные зависимости, описывающие закономерности

протекания разряда в системе концентрических цилиндров, позволяют с достаточной для практических целей точностью оценить величину зарядов частиц аэрозоля.

Особенностью данного зарядного устройства является то, что во время действия импульса высоковольтного напряжения наблюдается интенсивная ионизация среды в межэлектродном пространстве, а в моменты паузы между импульсами напряжения происходит вынос движущейся пылегазовой средой образовавшихся ионов за пределы разрядного промежутка. Зарядка крупнодисперсной фазы аэрозоля при этом практически происходит только в междуэлектродном пространстве в течение времени действия импульсного напряжения. Зарядка мелкодисперсной фазы аэрозоля осуществляется за все время нахождения частиц как в межэлектродном пространстве, так и при дальнейшем перемещении пылегазовой среды в трубопроводе, вплоть до перемешивания двух потоков с разноименными ионами.

Длительность импульса напряжения для такого зарядного устройства целесообразно выбрать такой, чтобы, с одной стороны, за время его действия полностью происходило насыщение межэлектродного пространства ионами, а с другой – свести к минимуму стекание ионного тока во время действия импульса на сетку. В таком случае энергия источника высоковольтного напряжения будет в основном расходоваться на насыщение среды ионами и таким образом обеспечиваться максимальная энергетическая эффективность процесса зарядки. В первом приближении она может быть рассчитана как

$$t_u = \frac{a}{kE_{cp}},$$

где  $a$  – расстояние между электродами, м;  $E_{cp}$  – среднее значение напряженности поля в межэлектродном пространстве, В/м.

Выразив напряженность поля через величину напряжения импульса  $U_u$ , получим

$$t_u = \frac{a^2}{kU_u}. \quad (13)$$

При известных расстояниях между электродами и величине напряжения импульса, рассчитанная по приведенному выражению длительность импульса напряжения зависит от подвижности ионов. В зависимости от подвижности, ионы принято делить на легкие, средние и тяжелые. Отрицательно заряженные ионы образуются при присоединении к нейтральной молекуле электрона, причем к электрону примерно через  $10^{-7}$  секунды присоединяется до 3-9 нейтральных молекул, образуя при этом отрицательно заряженный ионный кластер. Положительно заряженные ионы – молекулы у которых, как правило, не хватает

одного электрона. Такие молекулы примерно через  $10^{-7}$  секунд присоединяют к себе 4-12 нейтральных молекул, образуя положительно заряженный ионный кластер. Ввиду этого подвижность ионов может изменяться в довольно широких пределах и существенно зависит от времени, прошедшего с момента образования иона. Так, авторами работы [9] установлено, что в непосредственной близости около короны подвижность ионов в среднем составляет  $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , а по мере удаления от разряда она снижается до  $0,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

В этом случае при подвижности ионов  $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  рассчитанная по выражению (13) длительность импульса напряжения для зарядного устройства с расстоянием между электродами 0,05 м при напряжении импульса, равном 25 кВ, составит  $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ .

Из выражения (7), полученного для системы электродов "нить-цилиндр", следует, что во время паузы между импульсами высоковольтного напряжения максимальное значение напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве, обусловленного наличием объемного заряда ионов (при расстоянии между электродами 0,05 м и напряжении импульса, равном 25 кВ) наблюдается у наружного электрода и не превышает  $0,5 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ . При подвижности ионов  $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  максимально возможная скорость стекания ионов на заземленный электрод для этого случая составляет 2,5 м/с.

Длительность паузы между импульсами напряжения целесообразно выбирать такой, чтобы обеспечить за это время вынос образовавшихся ионов движущимся пылегазовым потоком за пределы разрядного промежутка. При расположении конца острия иглы непосредственно у сетки и толщине сетки  $b$ , длительность паузы в первом приближении может быть определена как

$$t_n = \frac{b}{V_{cp}}, \quad (14)$$

где  $V_{cp}$  – скорость движения пылегазовой среды, м/с;

В реальном устройстве параметры импульсного напряжения должны быть уточнены путем поиска максимума потока ионов, поступающих на контрольный электрод, расположенный в трубопроводе за межэлектродным пространством по ходу движения пылегазовой среды.

Величина зарядов частиц крупнодисперсной фазы аэрозоля может быть рассчитана по выражению (13).

### *Выводы*

1. Предложенное устройство для формирования импульса высоковольтного напряжения дает возможность повысить энергетическую эффективность зарядки аэрозолей. Достигается это за счет интенсифицирования ионизации среды в межэлектродном пространстве. Обеспечивается это тем, что в моменты паузы между импульсами напряжения происходит вынос образовавшихся ио-

**Збагачення корисних копалин, 2015. – Вип. 61(102)**

нов за пределы разрядного промежутка движущейся пылегазовой средой. При этом зарядка крупнодисперсной фазы аэрозоля происходит только в междуэлектродном пространстве в течение времени действия импульсного напряжения.

2. На основании изучения характера зарядки пыли в поле импульсного униполярного коронного разряда получены выражения для определения основных параметров процесса зарядки мелкодисперсной фазы аэрозоля, что позволяет обеспечить энергоэффективный режим работы системы электродов "острие – сетка".

### Список литературы

1. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.
2. Авторское свидетельство СССР М 227958, кл. Е 21 F 5/20, 1967.
3. Авторское свидетельство СССР 787678, кл. Е 21 F 5/00, 1980.
4. Пат. 94121 Україна, МПК Е21F 5/00. Пристрій для очищення повітря від пилу / В.І. Голінько, Я.Я. Лебедев, Д.С. Пустовой: заявник ДВНЗ "НГУ". – № u201405005; заяв. 12.05.2014; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 20.
5. Мирзабемян Г.З. Зарядка аэрозолей в поле коронного разряда. – В кн.: Сильные электрические поля в технологических процессах. – М.: Энергия, 1969. – С. 20-39.
6. Хухрина Е.В. Нормирование запыленности воздуха производственных помещений. Материалы симпозиума по проблеме пневмокониозов. – М., 1957.
7. Хорхордин Н.И. К вопросу об автоматизированном контроле запыленности рудничной атмосферы. В кн.: Эффективная и безопасная разработка месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1975. – Вып. 4. – С. 51-54.
8. Чулаков Н.Ч., Карабеков Н.Н., Бакланов В.В. Эффективность улавливания частиц пыли по фракциям аналитическими фильтрами АФА. В кн.: Горное дело. – Алма-Ата, 1975. – Вып. 11. – С. 211-215.
9. Джуварлы Ч.М., Вечхайзер Г.В., Штейншрайбер В.Я. Трехосный диэлектрический эллипсоид в электрическом поле при учете проводимости // Известия АН СССР, "Энергетика и транспорт". – 1969. – №1.

© Пустовой Д.С., 2015

*Надійшла до редколегії 27.09.2015 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Голінько*