

УДК 621.319.7.001

В. И. ГОЛИНЬКО, Д. С. ПУСТОВОЙ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ОТ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ

Показана возможность применения импульсного 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. Установлено, что при значительной скважности импульсного напряжения, величина заряда крупных частиц пыли и время действия внешнего электрического поля под воздействием которого осуществляется направленное движение частиц пыли к заземленному электроду и стенкам зарядной камеры значительно меньше чем в поле униполярного постоянного коронного разряда.

Ключевые слова: аэрозоль, коагуляция, электроионизация, пыль, электрическое поле, зарядная камера, коронный разряд.

Введение. В настоящее время 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 и необходимости замены или чистки фильтрующих элементов, область их применения ограничена.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Решением проблемы удаления мелкодисперсной пыли (менее 5 мкм) из запыленного воздуха может быть электростатическое осаждение.

Фундаментальным отличием процесса электростатического осаждения от механических методов сепарации частиц является то, что в этом случае энергия, подводимая к обрабатываемым газопылевым потокам, расходуется преимущественно на оказание непосредственного воздействия на осаждаемые частицы. Этим обусловлены многие преимущества процесса электрофильтрации, основными из которых являются умеренное потребление энергии, а также то, что даже мельчайшие частицы субмикрометрового диапазона улавливаются эффективно, поскольку и на эти частицы действует достаточно большая сила [1].

Энергия, потребляемая в электрофильтре, складывается из энергии, расходуемой генератором тока высокого напряжения, и энергии, необходимой для преодоления гидравлического сопротивления при прохождении газа через электрофильтр. Гидравлическое сопротивление электрофильтра при его правильной эксплуатации не превышает 100...150 Па, т. е. значительно ниже, чем у большинства других пылеуловителей.

Электрофильтр относится к наиболее эффективным пылеулавливающим аппаратам. Эффективность очистки достигает 99,9 % в широких пределах концентраций (от нескольких мг до 200 г/м³) и дисперсности частиц (до долей мкм) и невысокой затрате электроэнергии (около 0,1...0,5 кВт·ч на 1000 м³ газов). Электрофильтр может обеспыливать влажную и коррозионноактивную газовую среду с температурой до 500°C. Производительность электрофильтров достигает сотен тысяч м³/ч очищаемого газа. Однако электрофильтры имеют такие недостатки как их высокая чувствительность к поддержанию параметров очистки, высокая металлоемкость и большие габариты, а также высокая требовательность к уровню монтажа и обслуживания. К недостаткам электрофильтров относится также то, что достигнув поверхности осадительного электрода и отдав ему свой заряд, ча-

стица удерживается на поверхности только молекулярными силами, которым приходится преодолевать размывающее действие воздушного потока, стремящегося оторвать осевшую частицу от электрода. Этот фактор заметно влияет на эффективность электрических фильтров [2]. Кроме того, на эффективность электрофильтров оказывают влияние электрические пробой, возникающие вследствие накопления пыли на осадительных электродах и относительно небольшого расстояния между коронирующим электродом и ближайшими к нему заземленными электродами ионизационной зоны.

Пробой сопровождается кратковременным значительным увеличением тока. Источники питания электрических фильтров обычно снабжены защитой от перегрузок и поэтому при пробоях отключаются. Продолжительность пробоев измеряется долями секунды, однако ввиду того, что число их может доходить до десятков и сотен за 1 мин, они могут привести к существенному снижению эффективности фильтров. Пробой отражается также на состоянии электродов [2].

В настоящее время, несмотря на рассмотренные достоинства электрофильтров применяемых на предприятиях, в частности обогатительных фабриках, предпочтение традиционно отдается инерционным средствам улавливания пыли. Наиболее распространенные из них циклоны, эффективность которых в области улавливания мелкодисперсной фракции низкая. Существующие системы пылеулавливания переделывать невозможно. Необходимо искать решения, чтобы существующие системы без существенного изменения их топологии и конструкции стали более эффективными.

Для повышения эффективности улавливания высокодисперсной пыли в инерционных средствах очистки применяется вынужденная коагуляция пыли с целью ее укрупнения и ускорения оседания [3]. 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 осуществляется их предварительная коагуляция с использованием электрического и ударноструйного взаимодействия, которое состоит из двух зарядных камер (положительного и отрицательно ионизаторов) с разделительными воздуховодами, и ударноструйной камеры коагуляции [4].

© В. И. Голинько, Д. С. Пустовой. 2015

Однако этому устройству присущ ряд недостатков, основной из которых заключается в накоплении пыли в зарядных камерах, что приводит к появлению обратной короны, электрическим пробоям, снижает эффективность зарядки частиц пыли и обуславливает необходимость в периодической очистке зарядных камер от накопленной пыли. Кроме того, наличие ударноструйной 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 взаимноизолированные зарядные камеры, смеситель и трубопровод для отвода запыленного воздуха с встроенным в него соленоидом для воздействия на заряженные частицы электромагнитным полем [5].

Этому устройству также присущ недостаток, связанный с накоплением пыли в зарядных камерах. Кроме того, введение в устройство 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.

Цель работы. Повышение 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.

Материалы исследований зарядки аэрозолей импульсным коронным разрядом с целью коагуляции мелкодисперсной фазы аэрозоля. Процессы зарядки частиц пыли достаточно хорошо изложены в литературе для зарядных камер с протеканием коронного разряда в системе электродов типа «нить - цилиндр», для которых имеется более-менее строгое математическое описание напряженности поля между электродами и распределения ионов в междуэлектродном пространстве. Коронирующие электроды типа «нить» широко использовали в первое время в электрофильтрах [6], однако в последующем при разработке как однозонных, так и двухзонных электрофильтров в качестве коронирующих электродов в основном стали использовать систему электродов типа «острие» («игла»), расположенную над поверхностью, служащей для осаждения пыли [7, 8]. Такие электроды обеспечивают протекание значительного ионного тока при существенно меньшем напряжении, чем при применении коронирующих электродов типа «нить».

Зарядка частиц с $\rho > 1$ мкм осуществляется в основном за счет направленного движения ионов к частице. Выведенное Потенье [9] уравнение зарядки хорошо согласуется с экспериментом и имеет для частиц сферической формы вид:

$$g = g_m \frac{\pi k e n_0 t}{4\pi \varepsilon_0 + \pi k e n_0 t} = 4\pi \varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1}\right) E_0 \rho^2 \frac{\pi k e n_0 t}{4\pi \varepsilon_0 + \pi k e n_0 t}, \quad (1)$$

где g_m – величина предельного заряда, Кл; E_0 – напряженность внешнего электрического поля, В/м; k – подвижность ионов, м²/В·с; e – заряд иона, Кл; n_0 – концентрация ионов в невозмущенной среде, м⁻³; ρ – эквивалентный радиус частицы, мкм; t – время зарядки, с; ε – относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

Для зарядных камер в которых в качестве коронирующих электродов используется острие процесс зарядки математически достаточно строго описан для 3-х секционных и 2-х секционных [10] плоских зарядных устройствах (рис. 1), в которых заряд частиц слабо зависит от положения их траектории.

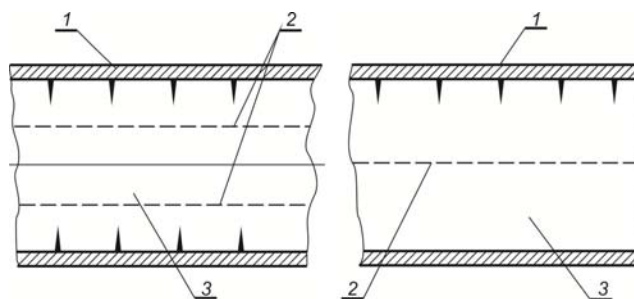


Рис. 1 - Трехзонное и двухзонное зарядные устройства: 1 - коронирующие электроды; 2 – сетка; 3 – зона зарядки

Для уменьшения осаждения пыли на стенках камеры к сеткам зарядной секции прикладывается переменное напряжение с частотой $f = 100 \dots 800$ Гц. Кроме того, запыленный воздух выпускается полоской по центру зарядной секции, а в остальную часть камеры поступает воздух, предварительно очищенный от пыли с помощью фильтров. Такая конструкция зарядных секций позволяет получить практически по всему объему секций равномерную концентрацию ионов и постоянную напряженность поля, что использовалось авторами [9] для определения концентрации монодисперсных аэрозолей. Ввиду значительной сложности этих камер, применение их в устройствах для интенсификации улавливания пыли нецелесообразно.

Для случая, когда зарядка частиц пыли в поле коронного разряда используется для коагуляции мелкодисперсной фазы аэрозоля, нет необходимости в интенсификации процесса зарядки крупнодисперсной фазы аэрозоля и осаждения ее под воздействием электростатических сил. Наоборот, задача состоит в том, чтобы минимизировать процесс осаждения пыли в зарядных камерах, что исключает необходимость в их периодической очистке от накопленной пыли и возможность пробоя разрядного промежутка или появления обратной короны при накоплении пыли в зарядной камере. Поэтому, для снижения величины зарядов крупнодисперсных частиц аэрозоля следует свести к минимуму длительность процесса зарядки частиц непосредственно в поле коронного разряда под воздействием направленного движения ионов к

частице пыли. Это можно обеспечить при применении зарядного устройства с системой коронирующих электродов типа «острие» и расположенной поперек потока запыленного воздуха крупноячеистой сеткой, одиночный элемент которого приведен на рис. 2.

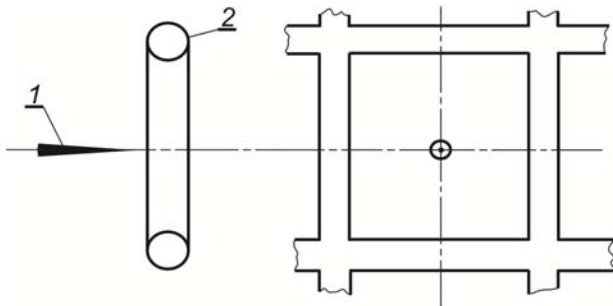


Рис. 2 - Зарядное устройство типа «острие-сетка»: 1 - коронирующие электроды; 2 – сетка

Величина зарядов частиц пыли, 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. Зарядка крупных частиц пыли осуществляется в основном за счет направленного движения ионов к частице, а мелких частиц пыли - за счет диффузии ионов к их поверхности.

В предложенном методе ударная зарядка крупных частиц пыли и их возможное осаждение в зарядной камере осуществляется только в разрядном промежутке во время действия импульсов напряжения.

Ввиду того, что электрическая энергия расходуется в основном на образование ионов и на зарядку мелкодисперсной фазы аэрозоля, а не на протекания ионных токов, при таком режиме зарядки значительно снижается также энергопотребление устройства в сравнении с рассмотренными аналогами. Благодаря тому, что удельная величина заряда крупных частиц пыли существенно меньше, чем удельная величина заряда мелких частиц, их взаимодействие происходит уже в зарядных камерах за счет поляризационного взаимодействия, что в свою очередь дополнительно повышает эффективность пылеочистки.

Для такого метода зарядки характерным является неравномерное распределение концентрации ионов и напряженности поля по сечению камеры, а, следовательно, заряд частиц может зависеть от положения их траектории относительно оси камеры.

Ввиду сложности распределения концентрации ионов и напряженности электрического поля в камере такой формы аналитическое описание процесса зарядки весьма затруднено. С целью получения математического описания рассмотрим процессы зарядки пыли в близкой по протекающим процессам камере типа "игла - цилиндр" (рис. 3).

При этом введем следующее ограничение: процесс зарядки протекает при высоких скоростях просасывания аэрозоля и малых токах коронного разряда так, что для крупных частиц выполняется условие

$$g_i < 0,2 g_{imax}, \tag{2}$$

где g_i – заряд, который приобретает частица в зарядной камере, Кл; g_{imax} – максимально-возможный заряд частицы при аналогичной напряженности поля, Кл.

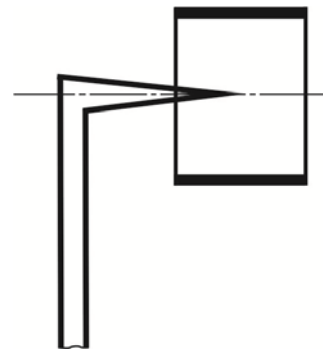


Рис. 3 - Зарядная камера типа «цилиндр-острие»

Введение такого режима зарядки приводит к тому, что в течении времени прохождения частицей зарядной камеры процесс зарядки частицы линейно связан с концентрацией и подвижностью ионов в зарядной камере, то есть в уравнении (1) выполняется условие:

$$\pi k e n_0 t \ll 4 \pi \epsilon_0. \tag{3}$$

При этом уравнение (1) с достаточной для практических целей точностью можно представить в виде:

$$g_i = \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1} \right) E_0 \rho_i^2 \cdot \pi k e n_0 t.$$

Кроме того при выводе уравнения зарядки частиц введем следующие допущения:

1. Расстояние частицы от оси зарядной камеры остается постоянным в процессе зарядки.

2. Скорость воздуха в любой точке камеры постоянна и равна v_0 .

Справедливость первого условия вытекает из того, что согласно расчету скорость дрейфа частиц с $\rho = 10$ мкм в электрическом поле напряженностью $2 \dots 3 \cdot 10^5$ в/м, при зарядах частиц, близких к предельным для этой напряженности, составляет 0,7-1 м/с [11]. В нашем случае при зарядах частиц, составляющих $(0,1 \dots 0,2) g_{max}$ с учетом неустановившегося режима движения частиц под воздействием электрического поля и зарядки частиц по мере движения ее в камере, следует ожидать на один - два порядка уменьшения средней скорости дрейфа частиц. Поэтому при высоких скоростях просасывания ($v_0 \geq 2$ м/с) и малой длине зарядной камеры, смещение частиц весьма незначительно. Второе условие справедливо при расположении зарядной камеры в зоне неустановившегося движения воздуха. При симметричном расположении острия относительно стенок зарядной камеры величина тока коронного разряда через элементарную площадку $2\pi r dl$ равна (рис. 4):

$$dI = 2\pi r k_r n_r E_r e \sin \varphi dl,$$

где n_r, k_r – концентрация и подвижность ионов на участке dl ; E_r – напряженность поля на участке; φ –

угол между элементарной площадкой цилиндра и вектором тока или напряженности поля.

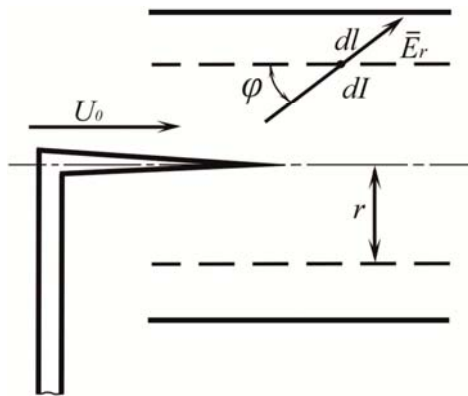


Рис. 4 - К расчету зарядки частиц в системе электродов "цилиндр - острие".

Практически для всего сечения зарядной камеры, при малых токах коронного разряда, $\sin \varphi$ можно считать равным единице, так как наличие ионов при этом незначительно искажает электрическое поле камеры и движение ионов происходит по линиям с наибольшей напряженностью поля, угол наклона которых к поверхности цилиндра близок к 90° . Уменьшение угла φ на периферии пучка ионов сопровождается одновременно снижением концентрации ионов в этой зоне, поэтому, для зоны камеры в которой происходит интенсивная зарядка частиц в уравнении (3) примем равным единице. Исключение составляет зона вблизи острия, где угол φ изменяется практически от 0 до 90° . Однако эта зона занимает незначительную часть камеры и поэтому не вносит существенного вклада в величину суммарного заряда потока аэрозоля.

Заряд dg_r , который приобретает частица на участке dl соответственно равен

$$dg_r = \pi e \rho^2 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) E_r k_r n_r \frac{dl}{U_0}.$$

Выразив из уравнения (3) величину dl через dI с учетом $\sin \varphi = 1$ получим

$$dg_r = \frac{dI}{2rU_0} \rho^2 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right).$$

Полную величину заряда, которую приобретает частица в камере при прохождении через пучок ионов, определим путем интегрирования по всей длине участка зарядки

$$g_r = \int_0^l dg_r = \frac{\rho^2}{2rU_0} \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) \int_0^l dI.$$

Ввиду того, что все ионы, образующиеся в зоне коронного разряда, осаждаются на поверхности цилиндрического электрода зарядной камеры и проходят через цилиндр с радиусом r , интеграл $\int_0^l dI$ равен полному току коронного разряда. Тогда

$$g = \rho^2 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) \frac{I}{2rU_0}. \quad (4)$$

Как видно из полученного выражения заряд частиц пыли, при принятом режиме зарядки, линейно связан с величиной тока коронного разряда и обратно пропорционален скорости газа и радиусу удаления частицы от оси камеры. При постоянной величине тока коронного разряда величина заряда частиц пыли не зависит от изменений параметров окружающей среды.

Наличие в знаменателе выражения (4) величины r свидетельствует о том, что полученное выражение имеет ограниченную зону действия, а именно часть камеры, где соблюдается условие (2) и принятые ограничения. В центральной части камеры при $r \rightarrow 0$ выполнение этих условий невозможно, ввиду высокой напряженности поля и концентрации ионов у острия коронирующего электрода. Кроме того за счет действия электростатических сил и турбулентных пульсаций, происходят относительно большие (по сравнению с радиусом) смещения частиц. Эти факторы снижают величины зарядов частиц в центральной части камеры по сравнению с расчетными по формуле (4). С другой стороны изменение угла φ в этой части камеры от 0 до 90° значительно расширяет зону интенсивной зарядки частиц, компенсируя этим указанное ранее снижение величины зарядов. Дать точную количественную оценку степени влияния упомянутых факторов на величины зарядов частиц и какой из них имеет решающее значение невозможно. Поэтому в центральной зоне камеры заряды частиц однозначно не могут быть определены. Однако количество частиц в данной зоне и их влияние на суммарный заряд всего потока аэрозоля весьма незначительно. Так, например, если принятые условия выполняются в зоне от $R/5$ до R , то для 96 % частиц заряд можно рассчитать по выражению (4). Общий заряд всех частиц i -го радиуса, который они приобретают в камере в единицу времени, при концентрации n_{oi} равен

$$Q_i = U_0 \int_0^R g_i n_{oi} 2\pi r dr = \pi R n_{oi} \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) I \rho_i^2.$$

Из полученного выражения видно, что суммарный заряд частиц, при зарядке в такой камере, линейно связан с ее радиусом, током коронного разряда и не зависит от изменения параметров атмосферы и скорости просасывания аэрозоля.

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 (рис. 5).

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 межэлектродного пространства где, в момент действия импульса имеется высокая напря-

женность 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 достаточную 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.

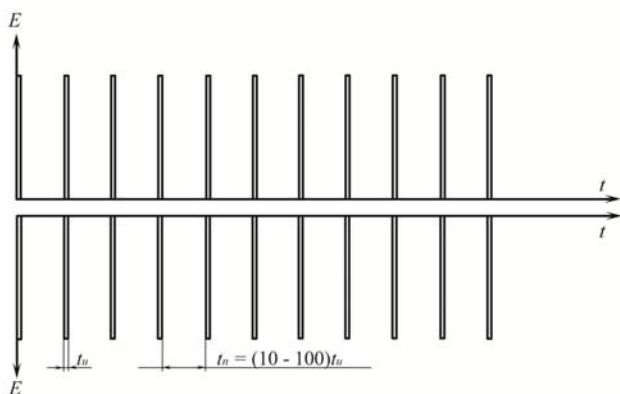


Рис. 5 - Временная диаграмма напряжения для зарядки мелкодисперсной фазы аэрозоля

Особенностью данного метода зарядки является то, что во время действия импульса высоковольтного напряжения наблюдается интенсивная ионизация среды в междуэлектродном 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 в течении всего времени нахождения частиц, как в междуэлектродном 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 междуэлектродного 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 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 междуэлектродном пространстве, В/м.

Выразив напряженность поля через величину напряжения импульса U_u , получим

$$t_u = \frac{a^2}{kU_u}. \quad (5)$$

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} секунды присоединяет 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 [12] 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 $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ - рассчитанная по выражению (5) длительность импульса напряжения для зарядного устройства с расстоянием между электродами 0,05 м при напряжении импульса равном 25 кВ составит $2 \cdot 10^{-3}$ 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 непосредственно у сетки и толщине сетки b , длительность паузы в первом приближении может быть определена как

$$t_n = \frac{b}{V_{cp}},$$

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

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

Величина зарядов частиц крупнодисперсной фазы аэрозоля может быть рассчитана по выражению (5).

Выводы

Показана возможность применения импульсного 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.

На основании анализа процесса зарядки пыли в поле импульсного униполярного коронного разряда для системы электродов «острие - сетка», получены выражения для определения основных параметров процесса зарядки мелкодисперсной фазы аэрозоля позволяющих обеспечить энергоэффективный режим работы системы.

Список литературы: 1. *Ветошкин, А. Г.* Процессы и аппараты пылеочистки [Текст] / *А. Г. Ветошкин.* – Пенза.: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с. 2. *Пирумов, А. И.* Обеспыливание воздуха [Текст] / *А. И. Пирумов.* - М.: Стройиздат, 1974. – 207 с. 3. *Белушов, В. В.* Теоретические основы процессов газоочистки [Текст] / *В. В. Белушов.* - М.: Металлургия, 1988. – 256 с. 4. А.с. 227958, Е 21 F 5/20. Устройство для коагуляции аэрозолей [Текст] / *Бабенко С. А. Москвина Т. А. Гусев В. П. Витюгин В. М.* – № 1100002; 21. 03. 83 (46) 30.06.84. Бюл. № 24 (72). – 2 с. 5. А.с. 787678, Е 21 F 5/20. Устройство для коагуляции пыли [Текст] / *Соболев В. А. Троянская Н. В., Олейник Е. И., Степовая Н. И.* – № 11787678; 23. 02. 79 (46) 15.12.80. Бюл. № 46. – 2 с. 6. *Шеерсон, Б. Л.* Электрическая очистка газов [Текст] / *Б. Л. Шеерсон.* – М.: Металлургиздат, 1960. – 187 с. 7. *Кизим, И. А.* Исследование и разработка осадительных электродов для горизонтальных электрофильтров [Текст] / *И. А. Кизим, А. Д. Мальгин, И. К. Решидов* // Сб.: Электрическая очистка газов. - М.: Энергия, 1968. - С. 34-41. 8. *Левитов, В. И.* О связи электрических характеристик коронирующих электродов и скорости осаждения пыли в электрофильтре [Текст] / *В. И. Левитов, В. И. Ткаченко* // Сб.: Электрическая очистка газов. - М.: Энергия. - 1968. - С. 24-33. 9. *Верещагин, И. П.* Основы электрогазодинамики дисперсных систем [Текст] / *И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян, М. М. Пашин.* – М.: Энергия, 1974. – 480 с. 10. *Малыгин, Н. А.* Экспериментальное исследование малогабаритных зарядных устройств [Текст] / *Н. А. Малыгин, Л. М. Логвинов* // Труды. ЛИАП.

– 1976. – Вып. 103. – С. 76–81. 11. *Капцов, Н. А.* Электрические явления в газах и вакууме [Текст] / *Н. А. Капцов.* – М.; Л.: ОГИЗ, 1974. – 498 с. 12. *Джуварлы, Ч. М.* Трехосный диэлектрический эллипсоид в электрическом поле при учете проводимости [Текст] / *Ч. М. Джуварлы, Г. В. Вечхайзер, В. Я. Штейншрайбер* // Известия АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1969. – №1.

Bibliography (transliterated): 1. *Vetoshkin, A. G.* (2005). Processy i apparaty pyleochnistki. Penza.: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 210. 2. *Pirumov, A. I.* (1974). Obespylivanie vozduxa. Moscow: Strojizdat, 207. 3. *Belousov, V. V.* (1988). Teoreticheskie osnovy processov gazochnistki. Moscow: Metallurgiya, 256. 4. *Babenko, S. A. Moskvina, T. A. Gusev, V. P. Vityugin, V. M.* (1984). A.s. 227958, E 21 F 5/20. Ustrojstvo dlya koagulyacii aerorozlej. № 1100002; 21. 03. 83 (46) 30.06.84, Byul. № 24 (72), 2. 5. *Sobolev, V. A. Troyanskaya, N. V., Olejnik, E. I., Stepovaya, N. I.* (1980). A.s. 787678, E 21 F 5/20. Ustrojstvo dlya koagulyacii pyli. № 11787678; 23. 02. 79 (46) 15.12.80, Byul. № 46, 2. 6. *Sheerson, B. L.* (1960). Elektricheskaya ochnistka gazov. Moscow: Metallurgizdat, 187. 7. *Kizim, I. A., Malgin, A. D., Reshidov, I. K.* (1968). Issledovanie i razrabotka osaditelnyx elektrodov dlya gorizontalnyx elektrofiltriv. Sb.: Elektricheskaya ochnistka gazov. Moscow: Energiya, 34–41. 8. *Levitov, V. I., Tkachenko, V. I.* (1968). O svyazi elektricheskixarakteristik koroniruyushih elektrodov i skorosti osazhdeniya pyli v elektrofiltriv. Sb.: Elektricheskaya ochnistka gazov. Moscow: Energiya, 24–33. 9. *Vereshhagin, I. P., Levitov, V. I., Mirzabekyan, G. Z., Pashin, M. M.* (1974). Osnovy elektrogazodinamiki dispersnyx sistem. Moscow: Energiya, 480. 10. *Malygin, N. A. Logvinov L. M.* (1976). Eksperimentalnoe issledovanie malogabaritnyx zaryadnyx ustrojstv. Trudy. LIAP, Вып. 103, 76–81. 11. *Kapcov, N. A.* (1974). Elektricheskie yavleniya v gazax i vakuume. Moscow; L.: OGIZ, 498. 12. *Dzhuvarly, Ch. M., Vechxajzer, G. V., Shtejnshrajber, V. Ya.* (1969). Trexosnyj dielektricheskij elipsoid v elektricheskom pole pri uchete provodimosti. Izvestiya AN SSSR, «Energetika i transport», №1.

Поступила (received) 20. 12. 2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Голинько Василий Иванович – доктор технических наук, профессор, Кафедра Аэрологии и охраны труда, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет, пр. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, Украина, 49027 E-mail: golinko@nmu.org.ua

Пустовой Дмитрий Сергеевич – аспирант, Кафедра Аэрологии и охраны труда, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет, пр. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, Украина, 49027 E-mail: dimon145886@mail.ru