

ников необходимо учитывать технологические особенности отдельных звеньев, имеющих частотный привод.

### Выводы

1. Специфический характер протекания переходных процессов при пуске ТПЧ бесконтактного транспорта позволил выделить область научных вопросов, не решенных ранее, касающихся электромагнитной совместимости и искробезопасности посторонних контуров. Учитывая то, что ТПЧ сам является источником помех и одновременно питается от несинусоидального напряжения, необходимо оценивать общий уровень дополнительных потерь в системе электроснабжения. Поэтому проанализированы значения электромагнитных помех с учетом особенностей подземных шахтных сетей – низкий уровень мощности короткого замыкания в схеме питания подземных участков, который обуславливает высокие значения дополнительных потерь мощности от ВГ в трансформаторах и кабельных линиях.

2. Для анализа режимных параметров ТПЧ как элемента системы электроснабжения предложено учитывать комплексную обобщенную нагрузку узла (на примере угольных шахт). Такая постановка задачи моделирования позволяет выявить взаимосвязи режимных параметров энергосистемы, линейной нагрузки и мощных нелинейных нагрузок ТПЧ и оценить уровни электромагнитной совместимости узлов нагрузки. Путем математического моделирования установлены зоны годового электромагнитного ущерба от несинусоидальности напряжения в основном электрооборудовании (3,5...8,0 тыс. грн. для трансформаторов передвижных подстанций мощностью соответственно 160...630 кВ·А и 0,3...1,8 тыс. грн. для асинхронных двигателей мощностью соответственно 10...100 кВт).

### Список литературы

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. / И.В. Жежеленко. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 254 с.
2. Электромагнитная совместимость потребителей [текст]: Э45 моногр. / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. – М.: Машиностроение, 2012. – 350 с.
3. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович; Под ред. И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
4. Пивняк Г.Г., Шидловский А.К., Кігель Г.А., Рыбалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
5. Расчеты показателей электромагнитной совместимости [текст]: Э45 Учебное пособие / Г.Г. Пивняк, И.В. Жежеленко, Ю.А. Папаика – Д.: Национальный горный университет, 2014. – 114 с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Випанасенко С.І.*

УДК 621.319.7.001

**В.И. Голинько, д-р техн. наук Д.С. Пустовой**

*(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ «Национальный горный университет»)*

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ЗАРЯДКИ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ОЧИСТКЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ОТ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ

**Введение.** 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.

**Состояние вопроса.** 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 аэрозолей улавливаются эффективно, поскольку и на эти частицы действует достаточно большая сила [1].

Энергия, потребляемая в электрофильтре, складывается из энергии, расходуемой источником 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/м<sup>3</sup>) и дисперсности частиц (до долей мкм) и невысокой затрате электроэнергии (около 0,1...0,5 кВт·ч на 1000 м<sup>3</sup> газов). Электрофильтр может обеспыливать влажную и коррозионноактивную газовую среду с температурой до 500°С. Производительность электрофильтров достигает сотен тысяч м<sup>3</sup>/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, частица 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 достигать до десятков и сотен за 1 мин, они могут привести к существенному снижению их эффективности. Пробой отражается также на состоянии электродов [2].

В настоящее время, несмотря на рассмотренные достоинства электрофильтров, 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 переделать весьма сложно, а часто и 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.

Известны 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 отрицательного ионизаторов) с отдельными воздуховодами, и ударноструйной камеры коагуляции [4,5].

Однако этим устройствам 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 несущественности 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.

**Цель работы.** Повышение эффективности коагуляции мелкодисперсных частиц пыли за счет предотвращения осаждения пыли в зарядных камерах при одновременном снижении энергетических затрат на коагуляцию и очистку зарядных камер от пыли.

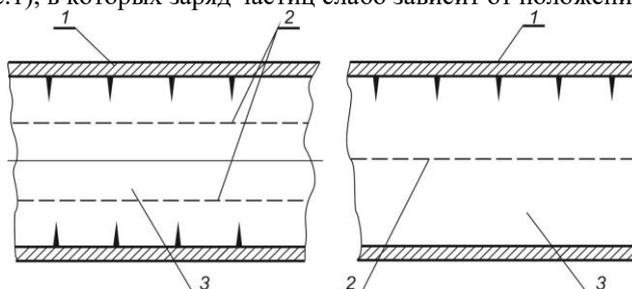
**Материалы исследований.** Процессы зарядки частиц пыли достаточно хорошо изложены в литературе для зарядных камер с протеканием коронного разряда в системе электродов типа «нить - цилиндр», для которых имеется более-менее строгое математическое описание напряженности поля между электродами и распределения 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:

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

где  $g_m$  – величина предельного заряда, Кл;  $E_0$  – напряженность внешнего электрического поля, В/м;  $k$  – подвижность ионов, м<sup>2</sup>/В·с;  $e$  – заряд иона, Кл;  $n_0$  – концентрация ионов в невозмущенной среде, м<sup>-3</sup>;  $\rho$  – эквивалентный радиус частицы, мкм;  $t$  – время зарядки, с;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

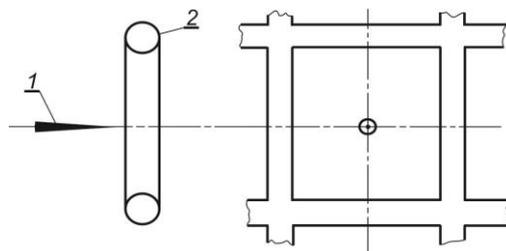
Для зарядных камер в которых в качестве коронирующих электродов используется острие процесс зарядки математически достаточно строго описан для 3-х секционных и 2-х секционных [10] плоских зарядных устройствах (рис.1), в которых заряд частиц слабо зависит от положения их траектории.



**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 крупноячейстой сеткой, одиночный элемент которого приведен на рис. 2.



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

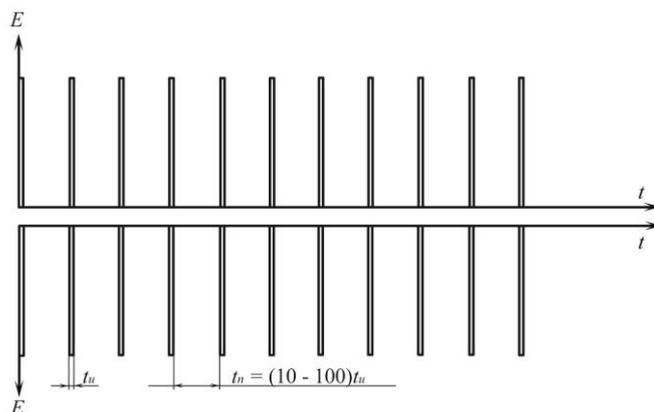
Величина зарядов частиц пыли, приобретаемых ими в поле коронного разряда, определяется двумя процессами – направленным движением ионов к частице под действием внешнего электрического поля

(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.

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. 3).



**Рис. 3. Временная диаграмма напряжения для зарядки мелкодисперсной фазы аэрозоля**

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 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 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.

Особенностью данного метода зарядки 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 в течении всего времени 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 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

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

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 [10] 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 межэлектродным 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. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. - 210 с.
2. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. М., Стройиздат, 1974. 207 с.
3. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. Учебник для вузов. -М.: Металлургия. - 1988. - 256 с.
4. Авторское свидетельство СССР М 227958, кл. Е 21 F 5/20, 1967.
5. Авторское свидетельство СССР 787678, кл. Е 21 F 5/00, 1980.
6. Шеерсон Б.Л. Электрическая очистка газов / Б.Л. Шеерсон. – М.: Металлургиздат, 1960. – 187 с.
7. Кизим И.А. Исследование и разработка осадительных электродов для горизонтальных электрофильтров / Кизим И.А., Мальгин А.Д., Решидов И.К. // 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 / В.И. Левитов, В.И. Ткаченко // Сб.: Электрическая очистка газов. - М.: Энергия, - 1968. - С. 24-33.
9. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. – М.: Энергия, 1974.- 480 с.
10. 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.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Самусею В.И.*