

Л.З. БОГУСЛАВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент, зав. отд. ИИПТ
НАН Украины, Николаев;

В.В. ДИОРДИЙЧУК, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ПЫЛИ ПОЛЕМ КОРОННОГО РАЗРЯДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы эффективности улавливания пыли из промышленных газовых выбросов путем электростатической фильтрации, при одновременном питании коронного разряда в технологическом объеме различными типами постоянного, переменного и импульсного напряжения. Установлена взаимосвязь между длиной пролета частиц пыли по зоне фильтрации и эффективностью фильтрации. Экспериментально подтверждена квадратичная форма зависимости эффективности осаждения от величины питающего напряжения. Установлено повышение эффективности осаждения пыли при использовании комбинированного питания.

Ключевые слова: электростатическая фильтрация, длина пролета частиц, скорость дрейфа, форма питающего напряжения

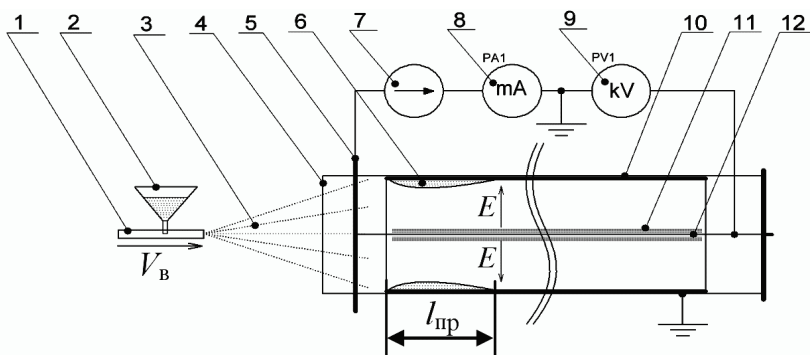
Введение. Газовые выбросы химических, металлургических, текстильных, цементных предприятий, а также тепловых электростанций являются опаснейшими загрязнителями атмосферы и требуют фильтрации пыли, которая в них содержится. Использование электростатических фильтров (ЭФ) позволяет улавливать до 99 % пыли, уносимой промышленными газами, при этом являясь одним из наиболее эффективных способов очистки [1]. Тем не менее, работы направленные на снижение удельных затрат электроэнергии на очистку 1000 м³ газа без снижения качества не теряют своей актуальности. Учитывая, что большинство систем ЭФ в Украине морально устарели и их энергопотребление в 5-6 раз превосходит современные показатели развитых стран [2], использование новых систем питания ЭФ в комплексе с современными системами управления ими позволит значительно уменьшить удельные энергозатраты за счет повышения стабильности работы фильтрующих аппаратов.

Анализ предварительных исследований. Обычно для питания ЭФ применяют постоянное напряжение [1, 4]. Известен опыт применения переменного, прерывистого и других типов напряжения для повышения качества фильтрации в случае улавливания высокоомной пыли и агрессивных туманов [5]. В работах [4, 5] показано, что суммирование постоянного напряжения с импульсным может уменьшить запыленность газов на выходе ЭФ и снизить влияние эффекта обратного коронирования осадительного электрода (ОЭ). В ИИПТ НАН Украины ведутся работы над повышением эффективности рабо-

ты существующих ЭФ с применением дополнительных импульсных высокочастотных источников питания [3] формирующих специальные формы напряжения, обеспечивающие как дозарядку пыли, так и эффективную деструкцию экологически опасных газовых выбросов путем использования стабильных стримерных разрядов [6]. Исследования [6, 7] показывают, что при применении разрядно-импульсных источников напряжения необходимо решать задачи синтеза их разрядных электрических цепей для оптимизации скорости нарастания разрядных токов в газовом промежутке ЭФ.

Целью работы является экспериментальное исследование степени влияния формы питающего напряжения на эффективность процесса осаждения пылевых частиц в поле коронного разряда из равномерного газового потока.

Экспериментальный стенд для определения эффективности осаждения пылевых частиц при питании коронного разряда различными типами напряжения схематично изображен на рис. 1 и состоит из источника питания и макета электродной системы (ЭС) ЭФ и устройством подачи пыли. Применялся источник питания, описанный ранее в [8], на базе которого реализовывалось питание ЭС постоянным, переменным, импульсным и комбинированным напряжением. ЭС - двухэлектродная, выполнена в виде концентрических цилиндров и представляет собой пластиковую трубу 4, внутрь которой вставлена и закреплена оцинкованная труба 10 диаметром 100 мм длиной 1000 мм. Пластиковая труба использована для крепления растяжек центрального коронирующего электрода (КЭ) и как корпус ЭС. КЭ изготовлен из медной проволоки диаметром 0,3 мм длиной 1200 мм.



1 – смеситель; 2 – бункер подачи пыли; 3 – воздушно-пылевой поток; 4 – корпус макета ЭС ЭФ; 5 – шпилька натяжения КЭ; 6 – пыль, осевшая на ОЭ; 7 – источник высокого напряжения; 8 – миллиамперметр; 9 – киловольтметр; 10 – ОЭ; 11 – свечение коронного разряда; 12 – КЭ

Рисунок 1 – Стенд для определения эффективности электрической фильтрации

Устройство подачи пыли состоит смесителя 1, к которому подключен источник сжатого воздуха, и бункера подачи пыли 2. Выходное отверстие

смесителя 1 расположено по оси с КЭ 12. В качестве пыли использовался строительный гипс марки Г-5.

Сжатый воздух, проходя по смесителю 1, втягивает пыль, загруженную в бункер подачи пыли 2, смешивается с ней, и со скоростью V_b попадает в корпус макета ЭС 4. К КЭ 12 приложено высокое напряжение источника 7, которое обуславливает зажигание коронного разряда 11 в разрядном промежутке ЭС. Частицы пыли, вдуваемые в макет ЭФ, подвергаются воздействию ионного ветра коронного разряда и приобретают электрический заряд. Под действием сил электрического поля частицы пыли двигаются в направлении ОЭ, после чего оседают на нем и удерживаются.

Вдуваемая пыль влетает в макет ЭС со скоростью V_b и оседает внутри с некоторым распределением по длине, под действием сил электрического поля. Известно что, сила действует на частицу в радиальном направлении, а ее величина пропорциональна напряженности электрического поля и величине накопленного на частице заряда. Так же, из литературы известно, что максимальный заряд частицы пропорционален квадрату ее радиуса и накапливается за время 0,1 - 0,5 секунд [2].

$$Q_{np} = 4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E_3 r^2, \quad (1)$$

где E_3 – напряженность электрического поля в той точке, где частица получает заряд, В/м; r – радиус частицы, м; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, Ф/м; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

Движение заряженной частицы пыли в ЭФ характеризуется скоростью дрейфа к ОЭ, которая определяется как [3]:

$$V_d = \frac{4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}\right) E_{cp}^2 r}{6\eta}, \quad (2)$$

где V_d – скоростью дрейфа к ОЭ, м/с; E_{cp} – средняя напряженность электрического поля по длине пути частицы, В/м; η – коэффициент динамической вязкости среды, (Н · с)/м².

Из 4 видно, что теоретическая скорость дрейфа не зависит от скорости потока газа V_r , однако в реальных ЭФ используются такое понятие как эффективная скорость дрейфа V_{ϕ} , зависящая от всех параметров ЭФ, которые влияют на эффективность очистки. [4]

$$V_{\phi} = \frac{h_0 V_r}{l_a} \ln \left(\frac{1}{1 - \eta_{\phi}} \right), \quad (3)$$

где h_0 – межэлектродное расстояние, м; V_r – скорость газа, м/с; l_a – длина активной зоны, м; η_{ϕ} – степень очистки газов.

Время от попадания частицы в активную зону ЭС до осаждения на поверхность электрода $t_{oc} = h_0/V_d$, где h_0 межэлектродное расстояние, м; V_d –

скорость дрейфа, м/с. Длина пролета пыли вдоль оси ЭС $l_{пр}$ м при скорости газа V_r м/с, $l_{пр} = h_0 V_r / V_d$. Поставляя скорость дрейфа из выражения (3) выражение для длин пролета $l_{пр}$, получим:

$$l_{пр} = \frac{h_0 V_r l_a}{h_0 V_r \ln\left(\frac{1}{1-\eta_\phi}\right)} = \frac{l_a}{\ln\left(\frac{1}{1-\eta_\phi}\right)}, \quad (4)$$

которое связывает глубину пролета частицы с эффективностью работы ЭФ. Таким образом, длина пролета пыли по активной зоне ЭС на основании известных выражений связана с эффективностью электрической фильтрации, что позволяет использовать простые методы измерения для оценки эффективности пылеулавливания.

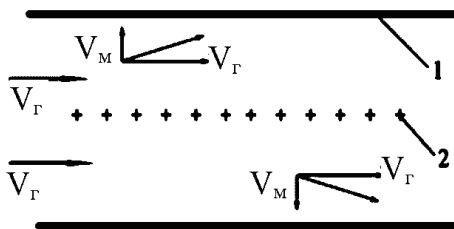


Рисунок 2 – Движение частиц пыли в межэлектродном промежутке, V_r – скорость газа, V_M – скорость дрейфа к ОЭ; 1 – ОЭ, 2 – КЭ

В эксперименте коронный разряд зажигался при подаче напряжения на центральный электрод макета ЭФ. Напряжение, приложенное к центральному КЭ, изменялось по форме – постоянное, переменное синусоидальное с частотой 50 Гц, импульсно периодическое двухполярное с частотой 10 кГц, постоянное с наложенными на него импульсами с различной частотой повторения. Пыль – строительный гипс, смешивалась с потоком воздуха и поступала в макет ЭФ. После завершения работы измерялась глубина пролета $l_{пр}$ пыли по длине макета от начала активной зоны, со стороны попадания пыли в активную зону. Постоянное, переменное напряжения варьировались по амплитуде. При использовании комбинированного напряжения величина постоянного напряжения фиксировалась, а варьировалась частота повторения импульсов. Амплитуда импульсов составляла $15 \text{ кВ} \pm 15 \%$, с фронтом нарастания 50 мкс и временем спада от 500 мкс - 700 мкс.

Результаты исследования. На рис. 3 показана ЭС макета ЭФ с осажденной на поверхности ОЭ пылью и процедура замера длины пролета пыли по длине ЭС.

На рис. 4 представлены сводные результаты измерения глубины пролета пылевых частиц при питании коронного разряда напряжением различных

типов. Наихудшие результаты были получены при использовании импульсно-периодического напряжения питания частотой 10кГц. Причины этого следующие: с одной стороны низкий уровень действующего значения напряжения не позволяет обеспечить устойчивое движение частиц к ОЭ, с другой стороны высокая амплитуда единичного импульса, по сравнению с действующим значением напряжения, приводит к пробоев разрядного промежутка. Таким образом, искровой пробой промежутка происходит при низких уровнях действующего значения, которое недостаточно для эффективного пылеулавливания.

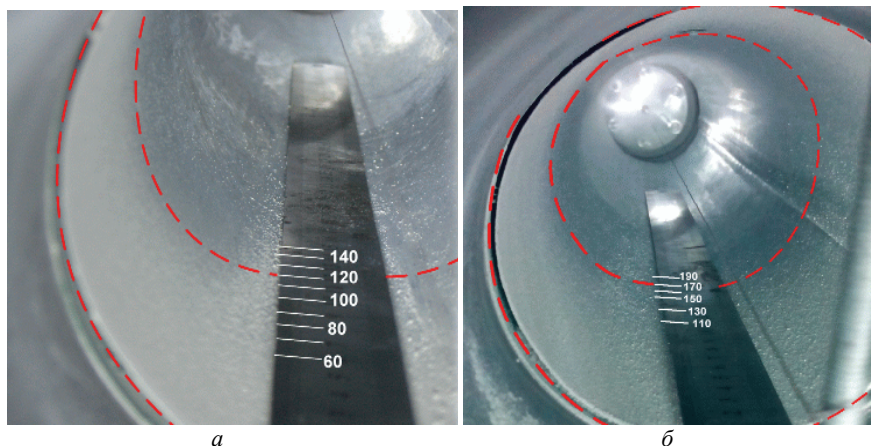


Рисунок 3 – Пыль, осевшая на стенках ОЭ: *а* – при питании постоянным напряжением 20 кВ, *б* – при питании постоянным и импульсным напряжением 25 Гц

Минимальная глубина пролета пыли получена при использовании комбинированного напряжения. Постоянная составляющая напряжения фиксировалась на уровне 20 кВ и суммировалась с импульсами напряжения частотой следования 25 Гц. Подобный прирост эффективности пылеулавливания можно объяснить интенсификацией процессов заряда частиц пыли в неоднородном быстроизменяющемся электрическом поле, посредством увеличения количества столкновений частиц пыли с носителями заряда и роста плотности объемного заряда.

Длина пролета пыли при питании макета ЭС постоянным напряжением в относительных единицах представлена на рис. 5, где относительная длина пролета частицы определена как отношение фактической глубины пролета к длине активной зоны макета ЭС $l_{пр}^* = l_{пр}/l_a$, где $l_{пр}$ – глубина пролета, l_a – длина активной зоны; а относительное напряжение определяется как отношение текущего напряжения к пробойному, $U^* = U/U_{пр}$, где $U_{пр}$ – пробойное напряжение кВ, U – текущее напряжение, кВ.

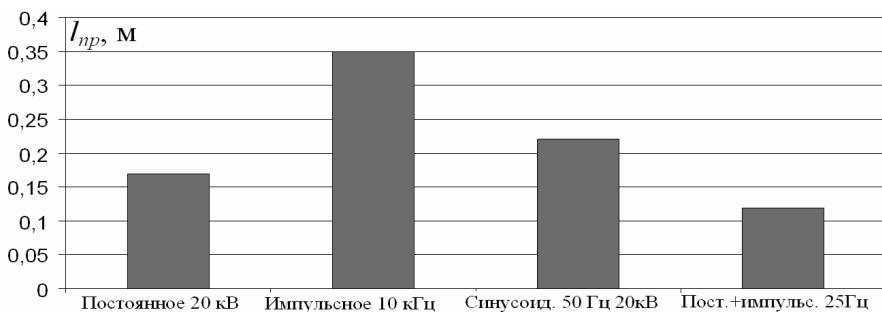


Рисунок 4 – Глубина пролета для различных типов питающего напряжения

Из представленной зависимости видно, что относительная длина пролета пыли резко снижается при увеличении рабочего напряжения до уровня близкого к пробойному напряжению. Рост напряженности электрического поля внешней зоны коронного разряда обуславливает рост скорости дрейфа частицы к ОЭ. Представленная кривая хорошо описывается квадратичной зависимостью, что соответствует характеру выражения (2).

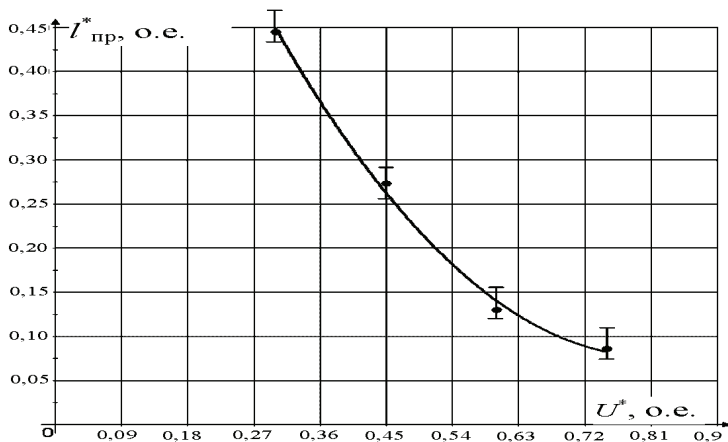


Рисунок 5 – Относительная длина пролета пыли в зависимости относительного напряжения

Суммирование импульсной составляющей различной частоты с уровнем постоянного напряжения 20 кВ приводит к уменьшению длины пролета частиц до 30 % по сравнению с питанием ЭС постоянным напряжением. Подобная тенденция сохраняется для более высоких частот следования импульсов.

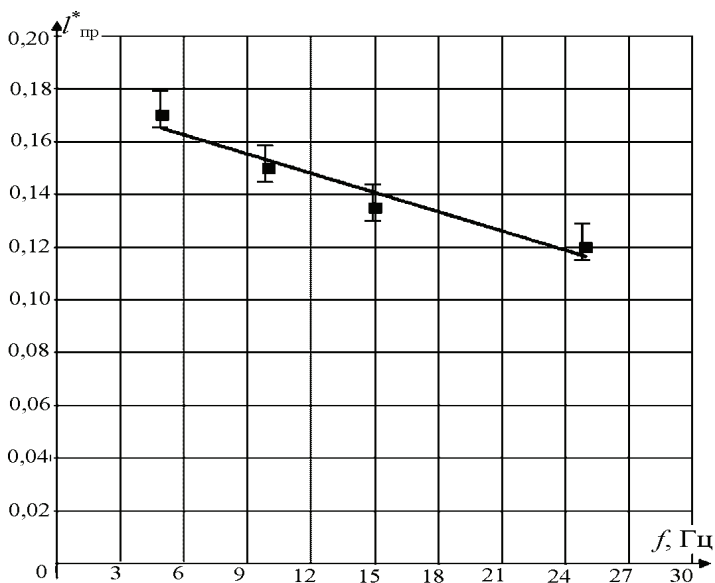


Рисунок 6 – Относительная длина пролета пыли при различных частотах следования импульсов, уровень постоянного напряжения 20 кВ

Выводы. В результате проведенных экспериментов получены величины длины пролета пылевых частиц для различных типов питающего напряжения, уровня постоянного напряжения и частоты следования импульсов при использовании комбинированного напряжения. При использовании постоянного напряжения питания длина пролета пылевых частиц резко снижается при росте рабочего напряжения до уровня близкого к напряжению пробоя, вследствие роста напряженности электрического поля. Использование комбинированного питания позволяет снизить уровень постоянного напряжения, снизив тем самым вероятность пробоя промежутка. Также, использование комбинированного питания длина пролета пылевых частиц может быть уменьшена повышением частоты следования импульсов напряжения при неизменном режиме работы источника постоянного напряжения. Учитывая тот факт, что мощность, потребляемая при питании постоянным напряжением, растет пропорционально кубу напряжения, использование комбинированного питания позволяет снизить удельные затраты электроэнергии на метр кубический очищаемого газа. Таким образом, применение комбинированного питания позволяет повысить эффективность очистки газов с помощью ЭФ в среднем на 30 % при одновременном снижении мощности потребляемой источником постоянного напряжения.

Список литературы. 1. Алиев Г.М.-А., Гоник А.Е. Электрооборудование и режимы питания

электрофильтров. – М.: Энергия, 1968. – 128 с. **2.** *Богуславский Л.З.* Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов / *Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко, В.В. Диордийчук, Д.В. Винниченко, Н.С. Ярошинский* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52 (958). – С. 31-38. **3.** *Богуславский Л.З.* Высоковольтный высокочастотный импульсный источник питания для повышения эффективности систем газоочистки / *Л.З. Богуславский, В.В. Диордийчук, Л. Н. Мирошниченко, Ю. Г. Казарян, Н. С. Ярошинский* // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 99–100. **4.** *Санаев Ю.И.* Обеспыливание газов электрофильтрами. - Семибратово: Кондор-Эко, 2009. – 170 с. **5.** *Переводчиков В.И., Шапенко В.Н., Щербаков А.В., Калинин В.Г., Стученков В.М.* Источники знакопеременного, импульсного и импульсно-знакопеременного питания электрофильтров // Электрические станции, 2003. – № 1. – С. 56–61. **6.** *Щерба А.А., Супруновская Н.И.* Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 3–9. **7.** *Щерба А.А., Супруновская Н.И.* Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 1. – С. 3–11. **8.** *Диордийчук В.В.* Регулирование параметров источников импульсного и постоянного напряжений при одновременном питании электрофильтров // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 132–134.

Bibliography (transliterated): **1.** Aliev G.M.–A., Gonik A.E. Jelektrooborudovanie i rezhimy pitaniya jelektrofil'trov. Moskow: Jenergija, 1968. 128. Print. **2.** Boguslavskij L.Z. L.N. Miroshnichenko, V.V. Diordijchuk, D.V. Vinnichenko, N.S. Jaroshinskij "Sozdanie maketnyh obrazcov vysokovol'tnogo oborudovaniya kompleksnyh sistem jelektrofil'tracii jekologicheski opasnyh promyshlennyh vybrosov". Visnik NTU «HPІ». Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. 2012. No 52 (958). 31–38. Print. **3.** Boguslavskij L.Z. V.V. Diordijchuk, L. N. Miroshnichenko, Ju. G. Kazarjan, N. S. Jaroshinskij "Vysokovol'tnyj vysokochastotnyj impul'snyj istochnik pitaniya dlja povyshenija jeffektivnosti sistem gazoochistki" Tehn. elektrodinamika. 2012. No 2. 99–100. Print. **4.** Sanaev Ju.I. Obespylivanie gazov jelektrofil'trami. Semibratovo: Kondor-Eko. 2009. 170. Print. **5.** Perevodchikov V.I., Shapenko V.N., Shherbakov A.V., Kalinin V.G., Stuchenkov V.M. "Istochniki znakoperemennogo, impul'snogo i impul'sno-znakoperemennogo pitaniya jelektrofil'trov". Jelektricheskie stancii. 2003. No 1. S. 56–61. Print. **6.** Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. "Zakonomernosti povyshenija skorosti narastaniya razrjadnyh tokov v nagruzke pri ogranichenii ih maksimal'nyh znachenij". Tehn. elektrodinamika. 2012. No 5. 3–9. Print. **7.** Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. "Sintez jelektricheskikh cepej s emkostnymi nakopiteljami jenergii v poluprovodnikovyh formirovateljah moshnyh razrjadnyh impul'sov" Tehn. elektrodinamika. 2014. No 1. 3–11. Print. **8.** Diordijchuk V.V. "Regulirovanie parametrov istochnikov impul'snogo i postojannogo naprjazhenij pri odnovremennom pitanii jelektrofil'trov" Tehn. elektrodinamika. – 2014. No 4. 132–134. Print.

Поступила (received) 22.10.2014

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Ефективність осадження пилу полем коронного розряду при різних типах живлюючої напруги / Л. З. Богуславський, В. В. Диордійчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 41–48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Розглянуто питання ефективності вловлювання пилу з промислових газових викидів шляхом електростатичної фільтрації при живленні одночасному живленні коронного розряду в технологічному об'ємі різними типами постійної, змінної та імпульсної напруги. Встановлено взаємозв'язок між довжиною прольоту часток пилу по зоні фільтрації з ефективністю фільтрації. Експериментально підтверджено квадратична форма залежності ефективності осадження пилу від величини напруги, що живить. Встановлено підвищення ефективності осадження пилу при використанні комбінованого живлення.

Ключові слова: електростатична фільтрація, довжина прольоту частки, швидкість дрейфу, форма напруги живлення.

Эффективность осаждения пыли полем коронного разряда при различных типах питающего напряжения / Л. З. Богуславский, В. В. Диордийчук // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 41-48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Рассмотрены вопросы эффективности улавливания пыли из промышленных газовых выбросов путем электростатической фильтрации, при одновременном питании коронного разряда в технологическом объеме различными типами постоянного, переменного и импульсного напряжения. Установлена взаимосвязь между длиной пролета частиц пыли по зоне фильтрации и эффективностью фильтрации. Экспериментально подтверждена квадратичная форма зависимости эффективности осаждения от величины питающего напряжения. Установлено повышение эффективности осаждения пыли при использовании комбинированного питания.

Ключевые слова: электростатическая фильтрация, длина пролета частиц, скорость дрейфа, форма питающего напряжения.

The dust removal efficiency by corona discharge field with various source voltages forms / L. Z. Boguslavskij, V. V. Diordijchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 41-48. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

The efficiency of dust removal from industrial wasted gases by electrostatic precipitation during corona discharge feeding by different types of high voltage is considered. Theoretically substantiated using particles passage length by an active zone like precipitation efficiency factor. The experimental values of particles passage length for various levels of DC voltage and for various frequency of combined voltage is carried out. The results shown that the AC voltage and pulse voltage does not able to hold dust removal efficiency on required level. But dust deposition gain is proved by using of DC voltage and pulse voltage superposition. Dust removal efficiency increases with reduction of electrical power consumption is proven in case of DC voltage and pulse voltage superposition.

Keywords: electrostatic precipitation, particles passage length, migration velocity, source voltage form.