

Пустовой Д.С., аспирант
(ГБУЗ «НГУ»)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫХ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ АТМОСФЕРЫ ОТ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ

Пустовий Д.С., аспірант
(ДВНЗ "НГУ")

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОІОНІЗАЦІЙНИХ СПОСОБІВ ОЧИЩЕННЯ АТМОСФЕРИ ВІД ВИСОКОДИСПЕРСНОЮ ПИЛУ

Pustovoy D.S., Doctoral Student
(SHEI «NMU»)

THEORETICAL ANALYSIS OF ELECTRO-IONIZATIONS METHODS OF CLEANING OF ATMOSPHERE FROM HIGH-DISPERSED DUST

Аннотация. Выполнен анализ электроионизационных способов очистки атмосферы от высокодисперсной пыли. На основании выполненного анализа установлено, что для очистки воздуха от высокодисперсной пыли наиболее эффективным является способ коагуляции под воздействием электрического поля. Установлено, что предельные величины зарядов, приобретаемых мелкодисперсными частицами аэрозоля, не зависят от величины напряженности внешнего электрического поля, и линейно связаны с величиной абсолютной температуры воздуха, определяющей скорость термического движения ионов воздуха.

Ключевые слова: аэрозоль, коагуляция, электроионизация, пыль.

Введение. 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 ущерб 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.

Постановка задачи. 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.

Целью работы является разработка способов и средств удаления мелкодисперсной пыли (менее 5 мкм) из запыленного воздуха в рабочей зоне.

Теоретическая часть. Основные закономерности коагуляции аэрозолей впервые установил польский физик М. Смолуховский. Для учета эффективности слипания частиц при столкновении он ввел два понятия: «быстрая» и «медленная» коагуляция. В первом случае столкновения ведут к слипанию частиц, а во втором слипание происходит не с первого столкновения или не все столкнувшиеся частицы коагулируют [1, 2]. Значительный вклад в теорию Смолуховского внес Мюллер. Его исследования показали, что скорость коагуляции полидисперсных частиц выше, чем монодисперсных. Воздействовать на скорость коагуляции можно двумя путями: либо изменением вероятности столкновений частиц, либо воздействием на эффективность их слипания [3].

Вынужденную коагуляцию можно разделить на два вида – кинематическую и направленную (ортокинетическую) [3]. Очень часто аэрозоль находится в поле сил, которые неодинаково действуют на частицы различной крупности, что приводит к движению частиц и их столкновению. Таким постоянно действующим внешним полем является поле гравитации. Неравномерность скоростей частиц при течении аэрозолей в канале в результате турбулентности потока или при течении потока в центробежном аппарате также приводит к столкновениям частиц и к их коагуляции. Коагуляция, вызванная перечисленными причинами, называется кинематической.

К другому виду вынужденной коагуляции следует отнести коагуляцию частиц под действием специально направленного поля. Таким действием обладает акустическое и электрическое поле [3].

Если аэрозоль находится в поле высокоинтенсивных звуковых или ультразвуковых колебаний, в нем протекает так называемая акустическая коагуляция. Так как частицы различной крупности по-разному вовлекаются в движение колеблющейся средой, то возникает гидродинамическое сближение частиц и их столкновение [3].

Очистка атмосферы от высокодисперсной пыли способом коагуляции под воздействием электрического поля заключается в предварительной зарядке нейтральных аэрозольных частиц путем осаждения на них свободных положительных и отрицательных газовых ионов и дальнейшем их укрупнении за счет притягивания разноименных зарядов. При этом эффективность процесса коагуляции напрямую зависит от величины заряда частиц.

Для теоретического обоснования электроионизационных способов очистки атмосферы от высокодисперсной пыли необходимо подробное аналитическое описание связи между зарядами частиц и входными переменными: массой, размерами, формой и вещественным составом частиц, временем зарядки, влажностью, температурой, давлением и химическим составом атмосферы, параметрами коронного разряда.

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.

Зарядка крупных частиц с $\rho > 1$ мкм осуществляется в основном за счет направленного движения ионов к частице. Процесс зарядки таких частиц достаточно изучен. Выведенное Потенье [4] 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; E_0 – напряженность внешнего электрического поля; k – подвижность ионов; e – заряд иона; n_0 – концентрация ионов в невозмущенной среде; t – время зарядки; ε – относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

При выводе этого уравнения сделано предположение, что ионы движутся точно вдоль силовых линий поля, которое складывается из внешнего однородного поля E_0 , поля поляризации частицы и кулоновского поля отталкивания частицы, обусловленного его зарядом. Справедливость этого предположения для крупных частиц очевидна, так как расстояние, на котором электрическое поле заметно меняется по величине или направлению, существенно больше средней длины λ свободного пробега ионов в воздухе.

По мере уменьшения размеров частиц, все большее влияние на их зарядку оказывают диффузионные процессы и при $\rho < 0,1$ мкм процесс зарядки можно считать чисто диффузионным, так как как кулоновское поле частиц становится значительно больше величины внешнего поля E_0 . При решении задачи зарядки этих частиц рассматривается диффузия ионов в электрическом поле частицы [5]. Заряд частиц в этом случае определяется выражением

$$g = 4\pi \varepsilon_0 \rho \frac{kT}{e} A(n_0 t) \quad (2)$$

где $A(n_0 t)$ – временная функция, характеризующая скорость диффузионного процесса зарядки.

Таким образом, в случае чисто диффузионных процессов зарядки, заряды частиц пропорциональны их радиусам, что подтверждается экспериментальными данными.

Зарядку частиц с $\rho = 0,1 \dots 1$ мкм необходимо рассматривать с учетом обеих механизмов зарядки (диффузионного и за счет направленного движения ионов к частице). При выводе уравнения зарядки для этих частиц Коше P . предпринимались попытки сделать поправку к уравнению (1) с целью распространить ее действие на частицы вплоть до $\rho = 0,02$ мкм. В поток ионов на частицу включались при этом и ионы, которые проходят от ее поверхности на расстоянии, меньшем чем длина свободного пробега иона в воздухе. Формула при этом имеет вид:

$$g = 4\pi\varepsilon_0 \left[\left(1 + \frac{\lambda}{\rho}\right)^2 + \frac{2}{1 + \frac{\lambda}{\rho}} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right] E_0 \rho^2 \frac{\pi k e n_0 t}{4\pi\varepsilon_0 + \pi k e n_0 t} \quad (3)$$

Однако строгое решение задачи зарядки этих частиц можно получить при решении общего дифференциального уравнения, с учетом обоих процессов зарядки. Для решения этой задачи было составлено уравнение, учитывающее оба механизма зарядки и произведено его численное решение на ЭВМ. При этом были просчитаны кривые зарядки для широкого диапазона значений E_0 , ρ и ε . В результате анализа кривых оказалось, что с достаточной для практических целей точностью, величину зарядов можно подсчитать как сумму зарядов, рассчитанных по теориям ударной и диффузионной зарядки из выражения:

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

Справедливость этого выражения подтверждена экспериментальными исследованиями зарядки частиц размером 0,2...4 мкм [6].

Приведенные выражения справедливы только для частиц сферической формы. Однако на практике частицы промышленной пыли имеют форму, значительно отличающуюся от сферической. Одним из возможных путей аналитического решения задачи зарядки таких частиц является замена реальной частицы трехосным эллипсоидом. Анализ процессов зарядки эллипсоидов, приведенный в работах Г.З. Мирзабекяна, показал, что заряд проводящего или диэлектрического эллипсоида, в случае когда распределение избыточного заряда на нем такое же как и на проводящем эллипсоиде, при условии что большая полуось превосходит малую не более чем в 2 раза, можно вычислить как заряд шара равного объема. Тогда выражения для характерного времени τ перераспределения зарядов в случае ориентации вытянутого диэлектрического эллипсоида вдоль силовых линий поля имеют вид

$$\tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon d_c + 1 - d_c}{\sigma_v d_c + d_c \frac{a}{b^2} \sigma_s} \quad (5)$$

где d_c —коэффициент деполяризации эллипсоида

$$d_c = -\frac{\gamma\beta}{\sqrt{1-\gamma^2(\beta^2-\gamma^2)}} E(k, \varphi) + \frac{\beta^2}{\beta^2-\gamma^2}, \quad (6)$$

a, b, c – оси эллипсоида; σ_V – объемная проводимость; σ_s – поверхностная проводимость;

$$\gamma = \frac{c}{a}; \beta = \frac{b}{a};$$

$E(k, \varphi)$ – эллиптический интеграл второго рода;

$$\varphi = \arcsin \sqrt{1 - \gamma^2}; k = \sqrt{\frac{1 - \beta^2}{1 - \gamma^2}}.$$

Анализ выражения показал, что для различных видов пыли горных пород, с учетом их проводимости [7], максимальное значение τ не превышает 10-5 с. Так как длительность процесса зарядки значительно больше τ , то распределение избыточного заряда на диэлектрических частицах различных видов пыли аналогичное распределению на проводящих частицах. Поэтому при анализе процессов зарядки различных видов пыли горнорудных предприятий, частицы которых не имеют сильно развитых осей, с достаточной точностью можно использовать выражение (4). При этом радиус шара r необходимо заменить в формуле эквивалентным радиусом частицы ρ , (радиус шара, объем которого равен объему частицы).

Результаты и их обсуждение. Из выражения (1) и (4) следует, что одним из факторов, влияющих на величину заряда частицы является относительная диэлектрическая проницаемость материала. Исходя из того, что диэлектрическая проницаемость горных пород находится обычно в пределах $\epsilon = 10 \dots 20$ [8], максимальные изменения величины коэффициента $1 + 2(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)$, характеризующего зависимость заряда от ϵ , находятся в пределах 2,5...2,7. Это обуславливает слабую зависимость заряда частиц пыли горнорудных предприятий от ее физико-химического состава.

Следующей группой, факторов, влияющих на величину заряда частиц, являются параметры коронного разряда, величины, характеризующие состояние атмосферы, и время зарядки аэрозоля.

Как видно из выражения (2) предельные величины зарядов, приобретаемых мелкодисперсными частицами аэрозоля, не зависят от величины напряженности внешнего электрического поля, и линейно связаны с величиной абсолютной температуры воздуха, определяющей скорость термического движения ионов воздуха. Влажность, давление, химический состав атмосферы, концентрация и подвижность ионов в зарядной камере не влияют на величину предельного заряда частиц. В свою очередь предельный заряд более крупных частиц линейно связан с напряженностью электрического поля, на которую прямо или косвенно влияют концентрация и подвижность ионов, температура, влажность, давление и химический состав атмосферы.

Скорость зарядки всех частиц непосредственно связана с концентрацией ионов и временем зарядки; кроме того, на скорость зарядки крупных частиц влияет величина подвижности ионов.

Для выяснения степени влияния изменений параметров воздуха на величину зарядов частиц произведем анализ влияния этих параметров на подвижность и концентрацию ионов в поле коронного разряда, а также на напряженность электрического поля и ток коронного разряда. Для этого рассмотрим коронный разряд в концентрических цилиндрах, поле которых может быть достаточно строго рассчитано.

Напряженность поля можно рассчитать по формуле [9]

$$E_0 = \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} + \left(E_k \frac{r_0}{r}\right)^2}, \quad (7)$$

где: I – ток на единицу длины коронирующего электрода; r_0 – радиус коронирующего электрода; r – координата точки межэлектродного пространства; E_k – критическая напряженность.

Критическая напряженность с достаточной степенью точности определяется по эмпирической формуле Пика

$$E_k = 33 \cdot \delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r_0}}\right) \cdot 10^5, \text{ В/м} \quad (8)$$

где $\delta = \frac{\gamma}{\gamma_0}$ – относительная плотность воздуха; γ_0 – плотность воздуха при $P = 101,3$ кПа, $t = 25^\circ\text{C}$.

Величину тока можно определить по второй формуле Таунсенда

$$I = \frac{2k(U - U_k)\nu}{R^2 \ln \frac{R}{r_0}} \cdot 10^{-3}, \text{ А/м} \quad (9)$$

где R – радиус наружного электрода; U – величина приложенного напряжения; U_k – напряжение зажигания короны.

Используя выражение (7) можно определить концентрацию ионов в межэлектродном пространстве

$$n_0 = \frac{I}{2\pi r e k E_0} = \frac{I}{2\pi r e k \sqrt{\frac{I}{2\pi\epsilon_0 k} + \left(E_k \frac{r_0}{r}\right)^2}}, \text{ м}^{-3} \quad (10)$$

Подвижность ионов при невысоких значениях E/ρ характерных для коронного разряда, протекающего при атмосферном давлении, можно определить из уравнения Ланжевена

$$k = \frac{0,104 \sqrt{\frac{M+m}{m}}}{\frac{\gamma}{\gamma_0} \sqrt{(\varepsilon-1)M_0}} = k_0 \frac{\gamma_0}{\gamma}, \text{ В/М}\cdot\text{с} \quad (11)$$

где M – масса иона; m – масса нейтральной молекулы; M_0 – молекулярный вес газа; k_0 – подвижность ионов при нормальных условиях.

В смесях газов нет, как можно было бы ожидать, ионов, соответствующих каждой компоненте смеси в отдельности, а образуется один род ионов. Некоторые газы, а также пары воды, при добавлении их к воздуху уменьшают подвижность ионов. Это объясняется присоединением к ионизированным молекулам нейтральных молекул добавок и образованием за счет этого тяжелых ионов, дрейфовая скорость которых значительно ниже скорости молекулярных ионов.

Выводы. Как видно из уравнений (7) – (11) параметры коронного разряда, а, следовательно, и заряд частиц в значительной степени зависят от изменения параметров атмосферы. Поэтому с целью устранения или уменьшения влияния изменения параметров атмосферы на величину заряда частиц, а, следовательно, и на эффективность последующей коагуляции мелкодисперсных частиц аэрозоля, необходимо подбирать режим зарядки частиц пыли который учитывает параметры атмосферы и свойства частиц аэрозолей. Управление режимом зарядки при этом может осуществляться путем управления одним из параметров разряда: тока коронного разряда, напряжения на коронирующем электроде или мощности коронного разряда.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хмелев, В. Н. Ультразвуковое распыление жидкостей [монография] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов., А.В. Шалунова // – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технич. ун-та, 2010. – 271 с.
2. Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. Учебник для вузов / В. В Белоусов // . – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
3. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. Учебник для вузов / Ю.П. Райзер. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 736 с.
4. Токарев, А.В. Коронный разряд и его применение / А.В. Токарев – Бишкек: КРСУ, 2009. – 138 с.
5. Макальский, Л.М. Экспериментальные исследования зарядки частиц размером 0,2...0,4 мкм ионами воздуха / Л.М. Макальский, Г.З. Мирзабемян – В кн.: Сильные электрические поля в технологических процессах. Выпуск 2. – М.: Энергия, 1971 – С. 95 – 109.
6. Горшков, М.М. Об электропроводности горных пород при ударном сжатии / М. М. Горшков, В. Т. Заикин, С.В. Лобачев // Прикладная механика и техническая физика, 2001. – Т. 42, – № 2. – С. 16 - 22
7. Шпайхер, Е.Д. Геологоразведочные работы и геологоэкономическая оценка месторождений полезных ископаемых / Е.Д. Шпайхер, В.А. Салихов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2002. – 311 с.
8. Берлов А.В. Математическое моделирование тепловых режимов составных элементов конструкций под воздействием электромагнитных полей. /А.В. Берлов // Труды XV международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии», НМетАУ, г. Днепрпетровск, Украина, 7 – 9 октября 2008 г. – Днепрпетровск: «Новая идеология», 2008. – С. 11 - 13

REFERENCES

1. Hmelev V.N., Shalunov A.V. and Shalunova A.V. (2010), *Ultrazvukovoye raspyleniye zhidkostey* [Ultrasonic atomization of liquids], Univ Altai State. tehn. University, Biysk, Russia
2. Belousov V.V. (1988), *Teoreticheskiye osnovy processov gazoочистki* [Theoretical fundamentals of gas cleaning], Metallurgy, Moscow, SU.
3. Rajzer Ju.P.(2009), *Fizika gazovogo razrjada* [Physics of gas discharge], Recently Intelligence, Moscow, Russia
4. Tokarev A.V. (2009), *Koronnyi razryad i ego primeneniye* [Corona discharge and its application], KRSU, Bishkek, Kirgizstan.
5. Makalsky L.M. and Mirzabekjan G.Z. (1971), «Experimental researches of charging of particles measuring 0,2...by 0,4 mkm ions of air», *Silnye elektricheskiye polya v tehnologicheskikh processakh* [Strong electric fields in technological processes], Energy, Moscow, SU, pp. 95-109.
6. Gorshkov M.M., Zaikin V.T. and Lobachev S.V. (2001), «About conductivity of mountain breeds at the shock compression», *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 42, no. 2, pp. 16 – 22
7. Shpajher E.D. and Salihov V.A. (2002), *Geologorazvedochnye raboty i geologoekonomicheskaya oценка mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Upstream activities geologoekonomicheskaya evaluation of mineral deposits], SibGIU, Novokuznetsk, Russia.
8. Berlov A.V. (2008), «Mathematical design of the thermal modes of component elements of constructions under act of the electromagnetic fields», *Trudy XV Mezhdunarodnoy konferenciyi «Teplotekhnika I energetika v metallurgii»*, NMetAU [Proceedings of the XV International Conference "Heat and power engineering in metallurgy" NMetAU], Dnepropetrovsk, Ukraine, 7 - 9 October 2008, pp. 11-13.

Об авторе

Пустовой Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры Аэрологии и охраны труда, Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», Днепропетровск, Украина

About the author

Pustovoy Dmytro Sergijovych, , Doctoral Student in Department of department Aerology and protection of labour, State Institution of Higher Education «National Mining University», Dnipropetrovsk, Ukraine

Анотація. Виконаний аналіз електроіонізаційних методів очищення повітря від високодисперсною пилу. На підставі виконаного аналізу встановлено, що для очищення повітря від високодисперсною пилу найбільш ефективним є спосіб коагуляції під впливом електричного поля. Встановлено, що граничні величини зарядів, набуті дрібнодисперсними частинками аерозолі, не залежать від величини напруженості зовнішнього електричного поля, і лінійно пов'язані з величиною абсолютної температури повітря, визначальною швидкість термічного руху іонів повітря.

Ключові слова: аерозоль, пил, коагуляція, електроіонізація.

Abstract. Analysis of ways to improve efficiency air filtration fine dust executed. Based on the conducted analysis revealed that for cleaning the air from fine dust is the most effective way to coagulate under the influence an electric field. That marginal magnitudes of the charges purchased finely dispersed aerosol particles, do not depend on the magnitude of the external electric field, and linearly related to the magnitude of the absolute temperature, which determines the rate of the thermal motion of air ions, is established.

Keywords: aerosol, dust, coagulation, electroionization.

Статья поступила в редакцию 15.10.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Т.В. Бунько