

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КОЛЬМАТАЦИИ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ПОРИСТЫХ ВОЛОКНОВЫХ МАТЕРИАЛАХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Докт. техн. наук ТУМИЛОВИЧ М. В.¹⁾, докт. техн. наук, проф. ПИЛИНЕВИЧ Л. П.²⁾,
докт. техн. наук БАЙКОВ В. И.³⁾, канд. техн. наук ГАЛКИН А. Е.⁴⁾, канд. физ.-мат. наук СИДОРОВИЧ Т. В.³⁾*

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,

³⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси,

⁴⁾ЗАО «Минскэкспо»

Более глубокая эффективность очистки воздуха от высокодисперсных частиц загрязнений (99,99 % для частиц размером 0,1 мкм и менее), нестабильность рабочих характеристик используемых в настоящее время фильтров при изменении концентрации, физико-химического и дисперсного составов фильтруемых частиц требуют совершенствования конструкций и оптимизации эксплуатационных параметров фильтрующих аппаратов с использованием высокопористых материалов, в первую очередь с открытой пористостью более 60 %. Типичными их представителями являются пористые волокновые материалы.

Цель данной статьи – теоретическое исследование закономерностей кольматации (осаждения) в пористых волокновых материалах высокодисперсных частиц из газовых потоков под воздействием электрического поля.

Теоретические аспекты кольматации высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых материалах были рассмотрены в [1]. Исследование влияния электрического поля на закономерности осаждения высокодисперсных частиц в электрическом поле на одиночном волокне фильтра проведено в [2]. Там было показано, что эффективность кольматации высокодисперсных частиц менее 1 мкм с увеличением скорости фильтрации возрастает в случае, когда частицы и волокна заряжены.

В настоящее время для повышения производительности и эффективности улавливания высокодисперсных частиц широко применяются электреты фильтры [3–6], а также широкое

распространение получают электростатические фильтры различных типов, в том числе поляризационные, с использованием полимерных волокновых материалов, помещенных в электростатическое поле [7, 8]. В этих фильтрах доминирующим механизмом улавливания частиц является осаждение их на волокнах фильтров за счет электрических сил. И если при фильтрации незаряженных высокодисперсных частиц зависимости эффективности улавливания частиц от скорости потока и диаметра волокон такие же, как и для обычных волокновых фильтрующих материалов, то в случае фильтрации заряженных частиц при их относительно высокой степени зарядки проявляется эффект роста эффективности улавливания, даже при повышении скорости потока.

В электрофильтрах кольматация высокодисперсных частиц из газопылевых потоков происходит под действием электрических сил. В процессе ионизации молекул газов электрическим разрядом содержащиеся в них частицы заряжаются (коронирующий электрод). Ионы адсорбируются на поверхности высокодисперсных пылинок, а затем под действием электрического поля перемещаются и осаждаются на осадительных электродах. Зарядка частиц в поле коронного разряда происходит по двум механизмам: под воздействием электрического поля (частицы бомбардируются ионами, движущимися в направлении силовых линий поля) и при диффузии ионов [9].

Первый механизм преобладает при размерах частиц более 0,5 мкм, второй – менее 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2–0,5 мкм эффективны оба механизма. Максимальная величина заряда частиц размером более 0,5 мкм пропорциональна квадрату диаметра частицы, а частиц размером менее 0,2 мкм – диаметру частицы [10].

В данной статье авторы рассматривают процесс коагуляции высокодисперсных частиц в присутствии электрического поля на однородном волокнутом фильтре, который можно представить как матрицу элементарных ячеек с шахматным и коридорным расположением волокон (рис. 1).

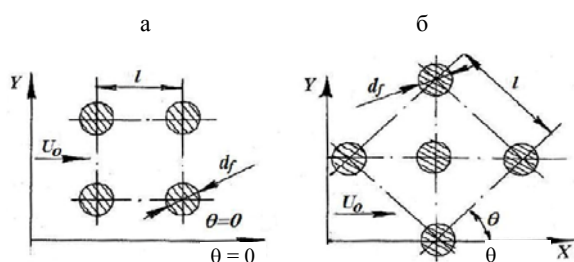


Рис. 1. Элементарные ячейки волокнутого фильтра:
а – коридорное расположение волокон;
б – расположение в шахматном порядке

Модель такого фильтра представляет собой структуру волокнутого фильтрующего материала в виде параллельных волокон, расположенных поперек потока в коридорном или шахматном порядке и образующих упаковку, состоящую из элементарных ячеек определенной конфигурации. В этой модели учитывается влияние соседних волокон на поле течения газа при их обтекании, т. е. влияние плотности упаковки посредством введения гидродинамического фактора. Кроме того, в уравнениях функции потока учитывается взаимное расположение волокон в модельном фильтре.

В случае однородного электрического поля, приложенного поперек волокон, функцию полного электрического потенциала можно определить путем наложения потенциальных функций каждого волокна [11]

$$\Phi_0^e = -E_x + \varepsilon' E_x \frac{d_f^2}{4} \sum_{i=1}^n \frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \times \left[1 - \sum_{j=1}^m \varepsilon' \frac{d_f^2}{4l_{i,j}^2} \right], \quad (1)$$

где E_x – напряженность электрического поля в координате x ; x_i, y_i – координаты местоположения волокон; x, y – декартовы координаты; $l_{i,j}$ – расстояние между волокнами i и j ; n – количество учитываемых волокон; d_f – диаметр волокна; m – количество волокон вокруг рассматриваемого центрального волокна; ε' – коэффициент поляризации волокна, определяемый как

$$\varepsilon' = \frac{\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_B} - 1}{\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_B} + 1}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_f, \varepsilon_B$ – диэлектрическая проницаемость волокна и воздуха соответственно.

Под воздействием разности потенциалов Φ_0^e частица перемещается в электрическом поле со скоростью

$$U^e = -Z_p \Phi_0^e, \quad (3)$$

где Z_p – электрическая подвижность частицы.

В случае небольших частиц диаметром d_p , когда применим закон Стокса, подвижность частицы связана с ее электрическим зарядом q_p и с учетом поправки Канигема K_c определяется из выражения $Z_p = \frac{q_p K_c}{3\pi\mu d_p}$, где μ – динамическая вязкость газа.

Безразмерную скорость частицы в электрическом поле можно выразить следующим образом:

$$W^e = \frac{U^e}{U_0}, \quad (4)$$

а ее компоненты:

$$W_x^e = K_e - \varepsilon' K_e \sum_{i=1}^n \frac{(y-y_i)^2 - (x-x_i)^2}{[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]^2} \left(1 - \sum_{j=1}^m \frac{\varepsilon'}{l_{i,j}^2} \right); \quad (5)$$

$$W_y^e = \varepsilon' K_e \sum_{i=1}^n \frac{2(x-x_i)(y-y_i)}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \left(1 - \sum_{j=1}^m \frac{\varepsilon'}{l_{i,j}^2} \right),$$

где безразмерное электрическое число K_e рассчитывается по формуле

$$K_e = \frac{Z_p E_0}{U_0} = \frac{K_c q_p E_0}{3\pi\mu d_p U_0}, \quad (6)$$

где E_0 – напряженность внешнего электрического поля; U_0 – начальная скорость течения газа вокруг волокна.

Общее уравнение движения частицы в фильтре с учетом движущей силы и силы электрического поля записывается в виде

$$\frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} = \frac{1}{Stk} \left(\bar{U}_f + \bar{U}^e - \frac{d\bar{x}}{dt} \right), \quad (7)$$

где \bar{x} – безразмерный вектор положения; Stk – число Стокса.

Начальные условия для (7)

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x}(t=0) = x_0; \\ \frac{d\bar{x}(t=0)}{dt} = \bar{U}_f + \bar{U}^e. \end{array} \right.$$

Когда безразмерное электрическое число K_e не равно нулю, действующими механизмами кольтматации являются: диффузия, инерция, касание и электрическое взаимодействие; причем последний имеет доминирующее значение. Эффективность фильтрации элементарной ячейки $\xi_{я}$ (рис. 2) вырастает от нуля при отсутствии электрического поля ($K_e = 0$) до 40 % и более при средних напряженностях ($K_e > 1,2$). Такое поведение зависимости $\xi_{я} = f(K_e)$ характерно для матрицы ячеек как с коридорным, так и с шахматным расположением волокон.

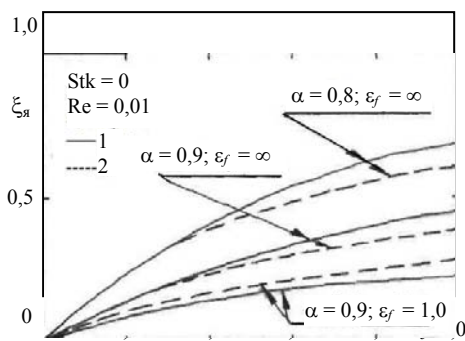


Рис. 2. Зависимость эффективности осаднения частиц в элементарной ячейке $\xi_{я}$ волоконного фильтра от безразмерного электрического числа K_e при различных значениях плотности упаковки α и диэлектрической проницаемости волокон ϵ_f [11]: 1 – ячейка с шахматным расположением волокон; 2 – то же с коридорным

Представленный рисунок также наглядно иллюстрирует влияние диэлектрической про-

ницаемости волокон на эффективность улавливания частиц. При более высоких значениях ϵ_f наблюдаются и большие величины $\xi_{я}$. Необходимо отметить, что даже когда электрические силы становятся преобладающими, сохраняется некоторая разница между эффективностью осаждения в ячейках различных типов – ячейка с шахматным порядком волокон имеет несколько более высокие показатели.

Влияние числа Стокса и электрического числа K_e на значения суммарной эффективности фильтрации матрицы ячеек с шахматным расположением волокон показано на рис. 3. Влияние электрических сил более заметно при малых числах Стокса. В то же время суммарная эффективность осаждения ξ_{ϕ} возрастает с увеличением K_e и слабо зависит от Stk при $K_e \approx 1,0$. Увеличение электрического числа обусловлено ростом напряженности электрического поля, что приводит к возрастанию электрических зарядов на частицах или снижению скорости потока газа.

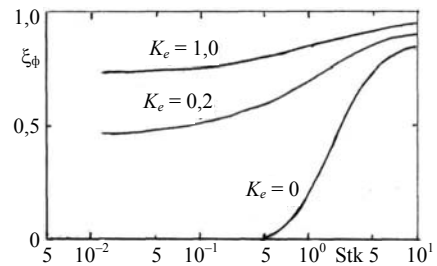


Рис. 3. Зависимость суммарной эффективности кольтматации волоконного фильтра ξ_{ϕ} от числа Стокса для различных значений K_e [11]

На рис. 4 приведены зависимости ξ_{ϕ} от E для двух различных средних значений подвижности частиц Z_p , полученных в [11], для матрицы ячеек с шахматным расположением текстильных волокон при фильтрации частиц полидисперсного латекса.

Частицы, заряженные в поле коронного разряда, отличаются широким распределением подвижностей, а эффективность кольтматации зависит от подвижности частиц. Поэтому в теоретических вычислениях необходимо учитывать распределение подвижностей частиц, что можно сделать тремя методами. Во-первых, предположить, что все частицы имеют одина-

ковую подвижность, равную 2/3 от измеренного среднего значения:

$$Z_p = \frac{2}{3} \bar{Z}_p. \quad (8)$$

Во-вторых, проинтегрировать эффективность коагуляции по всему диапазону изменения подвижности частиц. В этом случае суммарная эффективность коагуляции определяется следующим соотношением:

$$\xi = \int_0^{\infty} \xi(Z_p) N(Z_p) dZ_p, \quad (9)$$

где $N(Z_p)$ – распределение подвижностей частиц; $\xi(Z_p)$ – эффективность коагуляции, получаемая из расчетов траектории, где подвижность Z_p используется в качестве параметра.

В-третьих, представить значения эффективности коагуляции как функции подвижности к экспоненциальной кривой и подставить эту зависимость в выражение (9)

$$\xi(Z_p) = 1 - \exp(-2K_e). \quad (10)$$

Результаты [11], представленные на рис. 4, говорят о том, что нет существенного различия между тремя используемыми методиками и они хорошо согласуются друг с другом. Поэтому имеет смысл применять первый способ из-за его простоты.

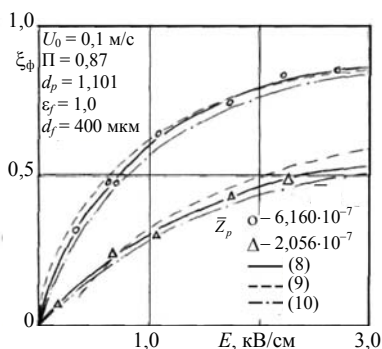


Рис. 4. Зависимость эффективности коагуляции частиц полистирольного латекса ξ_{ϕ} от напряженности электрического поля E для средних значений подвижности Z_p

На величину заряда, приобретаемого частицей, и как следствие на эффективность коагуляции заметное влияние оказывает влажность газового потока – заряд частиц и эффективность их осаждения повышаются с увеличе-

нием относительной влажности газа, особенно при ее значениях более 80 %.

Теоретически суммарную эффективность коагуляции частиц для ячеистой модели волоконного фильтра можно рассчитать с помощью следующего выражения (полагая, что все частицы, траектории движения которых проходят ниже критической, определяемой из (7), будут захвачены):

$$\xi_{\Sigma} = 1 - (1 - \mu_{\Sigma})^{mb}, \quad (11)$$

где ξ_{Σ} – эффективность коагуляции частиц в элементарной ячейке; Σ – количество элементарных ячеек; $mb = H/l\cos\theta$; H – толщина фильтра.

Описанные выше закономерности присущи не только модельным и реальным фильтрам с регулярным расположением волокон, но и однородным фильтрам с хаотичным расположением волокон, находящимся в электрическом поле. И в том, и в другом случаях наложение электрического поля приводит к значительному повышению эффективности коагуляции частиц различного размера [11].

Эффективность коагуляции частиц на заряженных волокнах в значительной степени зависит от скорости фильтрации и формы волокон, что хорошо видно на примере электретенных фильтров с плоскими и цилиндрическими волокнами – с увеличением скорости эффективность коагуляции снижается.

Такая же тенденция характерна для всех типов электретенных и электростатических фильтров как в случае коагуляции заряженных, так и незаряженных частиц. Кроме того, эффективность коагуляции частиц на плоских волокнах выше, чем на цилиндрических, что связано с более высокой напряженностью электрического поля на их узких гранях.

Следует отметить, что когда речь идет о незаряженных частицах, то имеется в виду следующее.

В случае фильтрации в электрическом поле в целом нейтральных частиц естественными (равновесными) зарядами частиц пренебрегают, так как в этом случае заряд волокон, индуцированный мощным внешним электрическим полем, значительно превышает естественный заряд частиц.

При фильтрации через электретеный фильтр заряд частиц действительно равен нулю, так как они специально разряжаются в нейтрализаторе. Это делается потому, что волокна электретеных фильтров несут небольшие заряды, сравнимые с равновесным зарядом частиц, и разряжаются в процессе накопления частиц. Поэтому в данном случае естественными зарядами частиц пренебречь нельзя.

Таким образом, анализ приведенных выше результатов теоретических и экспериментальных исследований, как выполненных различными авторами, так и собственных, показывает, что использование электрического поля позволяет весьма существенно повысить эффективность кольтматации высокодисперсных частиц с размером $d_p < 0,5$ мкм и, что особенно важно, – наиболее трудноулавливаемых частиц $d_p \approx 0,3$ мкм. При этом наибольшие ее значения достигаются в случае фильтрации заряженных частиц через заряженные волокна фильтра. Эффективность кольтматации повышается с увеличением заряда частиц и волокон, а также плотности их упаковки и удельной поверхности, с уменьшением скорости фильтрации. Последнее обстоятельство негативно с точки зрения производительности процесса. Поэтому актуальной задачей является повышение производительности при сохранении заданной эффективности кольтматации высокодисперсных частиц.

ВЫВОДЫ

Проведен теоретический анализ закономерностей кольтматации высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых волоконных материалах под воздействием электрического поля. Показано, что использование электрического поля позволяет весьма существенно повысить эффективность кольтматации высокодисперсных частиц с размером $d_p < 0,5$ мкм и, что особенно важно, наиболее трудноулавливаемых частиц $d_p \approx 0,3$ мкм. При этом наи-

большие ее значения достигаются в случае фильтрации заряженных частиц через заряженные волокна фильтра. Эффективность кольтматации повышается с увеличением заряда частиц и волокон, а также плотности их упаковки и удельной поверхности, с уменьшением скорости фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование закономерностей кольтматации высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых материалах / М. В. Тумилович [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 67–74.
2. Тумилович, М. В. Влияние скорости потока и электрических сил на эффективность фильтрации ультрадисперсных аэрозолей / М. В. Тумилович, Л. П. Пилинович, А. Е. Галкин // Вестник БНТУ. – 2010. – № 5. – С. 54–60.
3. Мяздриков, О. А. Электреты / О. А. Мяздриков, В. Е. Манойлов. – М.; Л.: Госкомэнергоиздат, 1962. – 99 с.
4. Губкин, А. Н. Электреты / А. Н. Губкин. – М.: Наука, 1978. – 192 с.
5. Электреты: пер. с англ. / под ред. Г. Сесслера. – М.: Мир, 1983. – 487 с.
6. Ерашкин, Г. В. Модель электрета с дискретным поверхностным зарядом / Г. В. Ерашкин // Электротехника. – 1985. – № 7. – С. 52–61.
7. Shaddon, R. W. L. Electrically Enhanced Collection of Repairable Aerosols in Granular Bed Filters at Low Reynolds Number / R. W. L. Shaddon // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1985. – Vol. 21, No 2. – P. 501–506.
8. Wang, C. Dust Collection by Particle Inertia and Electrical Forces / C. Wang, НОС // Powder Techn. Pap. Int. Symp. – Kyoto, 1981. – P. 565–572.
9. Двухименный, В. А. Системы очистки воздуха от аэрозольных частиц на АЭС / В. А. Двухименный, Б. М. Столяров, С. С. Черный. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 88 с.
10. Очистка воздуха: учеб. пособие / Е. А. Штокман [и др.]; под общ. ред. Е. А. Штокман. – М.: Изд. 60 АСВ, 1998. – 320 с.
11. Као, J.-M. Dust Deposition in Electrostatically Enhanced Fibrous Filter / J.-M. Kao, G. I. Tardos, R. Pfeffer // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1987. – V. I. A. – 23. – No 3. – P. 464–473.

Поступила 02.05.2012