

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.762

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЬМАТАЦИИ
ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ
В ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

*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»

Для повышения производительности и эффективности кольматации (осаждения) субмикронных высокодисперсных частиц из газовых потоков все более широкое распространение получают электростатические фильтры различных типов, в том числе поляризационные, с использованием разных высокопористых материалов, помещенных в электростатическое поле [1, 2]. В этих фильтрах доминирующим механизмом улавливания частиц является их кольматация на перемычках высокопористых материалов фильтров за счет электрических сил. И если процесс фильтрации незаряженных высокодисперсных частиц в пористых материалах достаточно хорошо изучен экспериментально, то случай кольматации заряженных частиц при их относительно высокой степени зарядки в высокопористых материалах требует отдельного изучения.

Целью авторов статьи являлось экспериментальное исследование закономерностей кольматации в высокопористых материалах высокодисперсных частиц из газовых потоков под воздействием электрического поля. Теоретические аспекты кольматации высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых материалах были рассмотрены в [3]. Исследование влияния электрического поля на закономерности осаждения высокодисперсных частиц в электрическом поле на одиночном волокне

фильтра проведено в [4]. Здесь отмечается, что эффективность кольматации высокодисперсных частиц менее 1 мкм с увеличением скорости фильтрации возрастает в случае, когда частицы и волокна заряжены.

Теоретический анализ закономерностей кольматации высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых волоконных материалах под воздействием электрического поля проведен в [5]. Показано, что использование электрического поля позволяет весьма существенно повысить эффективность кольматации высокодисперсных частиц с размером $d_p < 0,5$ мкм и, что особенно важно, – наиболее трудноулавливаемых частиц $d_p \approx 0,3$ мкм. При этом наибольшая эффективность достигается при фильтрации заряженных частиц сквозь заряженные волокна фильтра.

В традиционных электрофильтрах происходит ионизация частиц газового потока, проходящего между двумя электродами, к которым подведен постоянный электрический ток, и осаждение заряженных частиц на осадительных электродах, в качестве которых в рассматриваемом случае выбран высокопористый ячеистый материал на основе никеля.

Для экспериментального исследования процесса кольматации высокодисперсных частиц в высокопористых материалах под воздействием электрического поля была разработана мо-

дель фильтра, включающая следующие основные элементы: высоковольтный источник питания, содержащий регулятор напряжения; датчики напряжения и тока; коронирующие и осадительные электроды, выполненные из высокопористого материала; систему распределения газов; корпус; систему встраивания осадительных и коронирующих электродов; узлы подвода, распределения и отвода очищаемых газов; устройство для удаления уловленных частиц из бункеров электрофильтра; систему подвода к электрофильтру тока высокого напряжения.

Модельная установка для исследования работы электрофильтра включала в себя следующие элементы: экспериментальный электрофильтр, содержащий осадительные электроды из высокопористого материала; источник высокого напряжения (ИВН), позволяющий производить регулировку напряжения в широких пределах; генератор аэрозоля (частиц) вибрационного типа; вентилятор; контрольно-измерительные приборы.

Структурная схема модели электрофильтра для исследования представлена на рис. 1.

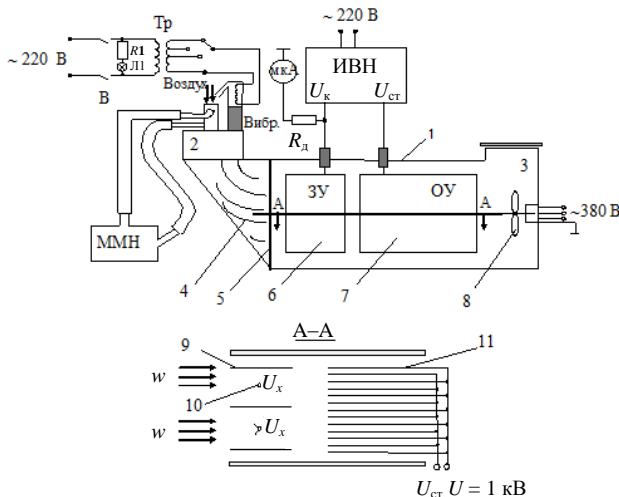


Рис. 1. Структурная схема модели электрофильтра

Модельный электрофильтр состоит из корпуса 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками. В корпусе установлены последовательно друг за другом газораспределительная решетка 4, сетка 5, зарядная камера 6, осадительная камера 7 и всасывающий вентилятор 8.

Зарядная камера выполнена в виде заземленных параллельных друг другу пластин 9,

образующих между собой каналы для очищаемого газа. Между пластинами натянуты цилиндрические и игольчатые провода 10. На провод подается напряжение U , при этом в межэлектродном промежутке возникает коронный разряд.

Осадительная камера выполнена в виде параллельных плоских высокопористых электродов 11, на которые подается напряжение.

Зарядная камера двухзонного электрофильтра моделирует один модуль пластинчатого электрофильтра.

Высоковольтный блок питания включает в себя узлы управления ИВН (расположен на торцевой части корпуса), высоковольтного трансформатора и умножителя напряжения (расположен на задней стенке корпуса). Напряжение U на зарядном устройстве электрофильтра регулировали ступенчато: 8, 10 и 12 кВ. Напряжение на осадительной камере $U_k = 0,5U_{ст}$.

Для измерения напряжения использовали микроамперметр М24 с добавочным сопротивлением R_d .

На выходном патрубке 3 установили матерчатый фильтр для улавливания частиц после электрофильтра.

С помощью системы управления на выходе источника высокого напряжения устанавливали напряжение от 8 до 12 кВ.

В качестве модельных улавливаемых частиц были выбраны высокодисперсные порошки, состоящие из частиц радиусом $15 \cdot 10^{-6}$ м, плотностью $0,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Подачу высокодисперсных частиц в модель осуществляли с помощью вибрационного питателя (Вибр, рис. 1), обеспечивавшего равномерную длительную подачу. Регулировку производительности выполняли ступенчато от трансформатора (Тр).

Удельное содержание частиц пыли определяли как отношение массы M частиц, поступающих в электрофильтр в единицу времени, к объемной скорости газа Q

$$m = \frac{M}{Q}. \quad (1)$$

Если известна масса частиц M_1 , поступающих в электрофильтр, и масса частиц M_2 , осажденных в электрофильтре за фиксированный

интервал времени, можно определить степень очистки

$$\frac{M_2}{M_1} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Массу частиц, поступающих в электрофильтр, определяли с учетом производительности вибропитателя и потерь в газоздушном тракте на распределительной решетке 4 и сетке 5.

Массу частиц, осажденных в электрофильтре, определяли путем измерения массы частиц, осевших на пробоотборном датчике (осадительном электроде). Измерив массу датчика до m_g и после m_{g+n} осаждения на нем частиц и определив разницу, можно получить массу m_n частиц, осажденных на датчике за время работы t :

$$m_n = m_{g+n} - m_g. \quad (3)$$

Тогда масса частиц, осажденных в канале электрофильтра, составит

$$M_2 = \frac{m_n S_n}{S_g t}, \quad (4)$$

где S_g – площадь датчика; S_n – площадь осадительных пластин одного канала электрофильтра; t – время подачи порошка в электрофильтр, т. е. время измерения.

Измерение скорости газа проводили с помощью пневматической трубки. Для этого на входной патрубке электрофильтра устанавливали дополнительный газопровод. В него вводили трубку, изогнутую под углом 90° так, чтобы ось ее начальной части совпадала с направлением потока газа, а отверстие было направлено навстречу потоку. Другую трубку устанавливали заподлицо со стенкой газохода. Обе трубки присоединяли к микроманометру (ММН, рис. 1). При таком подключении измеряли динамический напор $P_{\text{дин}}$ как разницу полного $P_{\text{п}}$ и статического $P_{\text{ст}}$ напоров

$$P_{\text{дин}} = P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}. \quad (5)$$

Скорость газа определяли по формуле

$$W = \sqrt{\frac{2gP_{\text{дин}}}{\gamma_v}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{дин}}$ – динамический напор, мм вод. ст.; γ_v – плотность газа, кг/м^3 (для нормальных атмо-

сферных условий $\gamma_v = 1,2 \text{ кг/м}^3$); g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Динамический напор $P_{\text{дин}}$ определяли как разность показаний микроманометра при включенном h_1 и выключенном h_2 микроманометре, умноженную на коэффициент манометра k (указан на шкале микроманометра):

$$P_{\text{дин}} = (h_1 - h_2)k. \quad (7)$$

Для исследования влияния количества фильтрующих элементов и полярности их подключения на кольтматацию высокодисперсных частиц и их эксплуатационных характеристик (тонкость фильтрации) модель фильтра собирали с одним, двумя и четырьмя пеноникелевыми фильтроэлементами толщиной 10 мм и размером ячейки 0,8–1,0 мм, установленными после зарядного устройства на расстоянии 5 мм друг от друга. Коронирующий электрод зарядного устройства имел положительную полярность, а полярность подключения фильтроэлементов чередовалась. Напряжение питания источника высокого напряжения SN-010S сохранялось постоянным (3,5 кВ).

Наилучший результат был получен в случае, когда модель содержала четыре фильтроэлемента, имеющих чередующуюся полярность подключения, причем первый фильтроэлемент имел отрицательную полярность подключения. При этом абсолютная и номинальная тонкости фильтрации составили соответственно 3,0 и 0,2 мкм.

Для исследования влияния величины зазора между фильтроэлементами на тонкость фильтрации модель фильтра собирали с двумя фильтроэлементами шириной 5,0 мм и размером ячейки 0,8–1,0 мм, установленными после зарядного устройства. Расстояние между фильтроэлементами изменяли от 3 до 17 мм. Коронирующий электрод и второй фильтроэлемент имели положительную полярность, а осадительный электрод и первый фильтроэлемент – отрицательную. Напряжение питания источника высокого напряжения сохранялось постоянным (3,5 кВ).

В результате исследований было установлено, что с уменьшением зазора между фильтроэлементами тонкость фильтрации повышалась. Так, при минимальном зазоре 3 мм абсо-

лютная и номинальная тонкости фильтрации составили соответственно 4,0 и 0,2 мкм. Минимальную величину зазора ограничивали условием отсутствия пробоя между фильтроэлементами-электродами.

Для исследования влияния установки диэлектрического проницаемого материала на тонкость фильтрации модель фильтра собирали с двумя пеноникелевыми фильтроэлементами шириной 5,0 мм и размером ячейки 0,8–1,0 мм. Между фильтроэлементами и после них помещали пластины пенополиуретана толщиной 50,0 мм с размером ячейки 0,7 мм. Кроме того, исследовали схемы, при которых модель содержала только пластины пенополиуретана без фильтроэлементов, но с зарядным устройством, а также без него. В процессе исследований фильтроэлементы и зарядное устройство либо подключали к источнику высокого напряжения, либо не подключали. Напряжение питания преобразователя высокого напряжения оставалось постоянным (3,5 кВ) или возрастало до 4,0 кВ.

Исследования показали, что наибольшая эффективность осаждения достигается при коагуляции заряженных частиц аэрозоля на наружной поверхности пенополиуретана, а также при коагуляции заряженных частиц на заряженной поверхности пенополиуретана, причем максимальную тонкость очистки (0,2 мкм) имеет фильтр, собранный по схеме, в которой использовали комбинируемый механизм коагуляции заряженных частиц аэрозоля: на поверхности фильтроэлементов, на поверхности заряженного пенополиуретана и на поверхности незаряженного пенополиуретана, т. е. реализован принцип селективности коагуляции.

Экспериментальные исследования показали, что значительное влияние на фильтрующие характеристики электрофильтра оказывает также скорость потока газа v_0 . В области скоростей $v_0 < 0,1$ повышение скорости потока однозначно приводит к снижению общей эффективности фильтрации. При этом размер максимально проникающих частиц увеличивается. Например, при фильтрации высокодисперсных частиц NaCl размером 0,01–1,80 мкм эффективность коагуляции E была равна: 99,96 % – при расходе 2 л/мин ($v_0 = 0,05$ м/с) и токе короны $I_k = 5$ мкА; 99,36 % – при расходе 3 л/мин

($v_0 = 0,07$ м/с) и токе короны $I_k = 50$ мкА (табл. 1, рис. 2). Общая эффективность снизилась, несмотря на увеличение тока коронного разряда, хотя при постоянной скорости фильтрации увеличение тока короны приводит к повышению эффективности фильтра.

Таблица 1
Влияние величины тока короны I_k на фракционную эффективность улавливания $E(d_p)$ высокодисперсных частиц NaCl

Размер частицы аэрозоля NaCl d_p , мкм	Эффективность $E(d_p)$, %, для	
	$v_0 = 0,05$ м/с; $I_k = 5$ мкА; $E = 99,96$ %	$v_0 = 0,07$ м/с; $I_k = 50$ мкА; $E = 99,36$ %
0,01	99,90	99,90
0,02	99,90	99,90
0,05	98,50	98,10
0,10	97,00	96,00
0,20	99,20	97,20
0,50	99,90	99,90

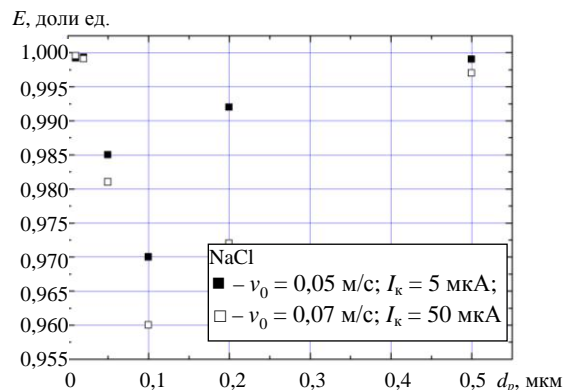


Рис. 2. Фракционная эффективность улавливания высокодисперсных частиц NaCl при различных скоростях потока и токах коронного разряда

Это хорошо видно на примере фильтрации атмосферной пыли (табл. 2, рис. 3). Несколько иная картина наблюдается при скоростях потока $v_0 > 0,1$ м/с. В этой области повышение скорости фильтрации вызывает снижение общей эффективности только при небольших величинах тока коронного разряда. В то же время повышается эффективность коагуляции наиболее проникающих частиц. При токе короны $I_k < 10$ мкА увеличение скорости способствует повышению как общей эффективности, так и фракционной для наиболее проникающих частиц.

Таблица 2

Влияние величины тока короны I_k на фракционную эффективность улавливания $E(d_p)$ частиц атмосферной пыли

Размер частицы атмосферной пыли d_p , мкм	Эффективность $E(d_p)$, %, для		
	$v_0 = 0,35$ м/с; $I_k = 2$ мкА; $E = 93,31$ %	$v_0 = 0,35$ м/с; $I_k = 10$ мкА; $E = 98,49$ %	$v_0 = 0,35$ м/с; $I_k = 50$ мкА; $E = 98,75$ %
0,01	99,90	99,90	99,90
0,02	98,20	99,90	98,30
0,05	93,00	99,70	95,50
0,10		99,40	97,50
0,20		99,00	98,40
0,50		96,70	98,70

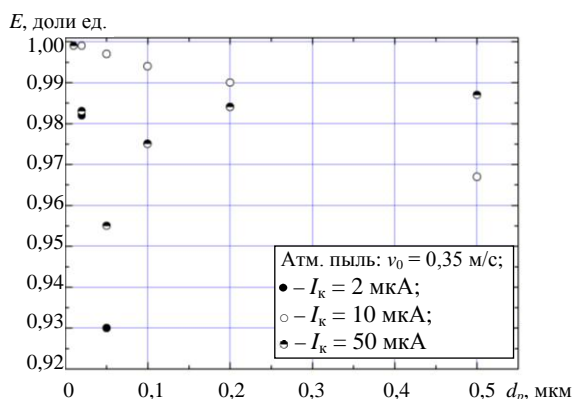


Рис. 3. Фракционная эффективность улавливания высокодисперсных частиц атмосферной пыли при различных величинах тока коронного разряда

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами и объясняются тем, что в результате турбулизации потока, вызванной повышением его скорости, улучшаются условия коагуляции высокодисперсных частиц благодаря действию механизма турбулентной диффузии, эффективность которого усиливается за счет увеличения зарядов частиц при повышении тока короны, т. е. усиления электрического взаимодействия между заряженными частицами и поляризованными перемычками фильтроэлемента. Возникающие при обтекании перемычек турбулентные вихри приближают частицы к их поверхности в зону действия электрических сил. Кроме того, турбулизация потока способствует уменьшению толщины вязкого ламинарного пограничного слоя, препятствующего диффузионному и индукционному осаждению высокодисперсных частиц, несущих малые по величине заряды. Даже при повышении скорости

потока до $v_0 = 1,43$ м/с (60 л/мин) при токе короны $I_k < 8$ мкА модель фильтра обеспечивает эффективность улавливания высокодисперсных частиц NaCl с медианным диаметром 0,1–0,15 мкм при концентрации 5 мг/м³ на уровне 98,1–99,1 %.

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют, что:

- с увеличением количества фильтроэлементов от одного до четырех с чередующейся полярностью подключения тонкость фильтрации повышается. При этом первый фильтроэлемент должен иметь отрицательную полярность подключения;
- уменьшение величины зазора между фильтроэлементами приводит к увеличению эффективности коагуляции с одновременным увеличением тонкости фильтрации;
- при установке диэлектрического проникаемого материала максимальную тонкость фильтрации имеет фильтр, в котором обеспечивается составной механизм коагуляции высокодисперсных заряженных частиц: на поверхности фильтроэлементов, на поверхности заряженного диэлектрика и на поверхности незаряженного диэлектрика (принцип селективности улавливания);

• при скорости фильтрации менее 0,1 м/с увеличение скорости потока высокодисперсных заряженных частиц ведет к снижению фильтрующих характеристик модели электрофильтра, несмотря на увеличение тока короны. При скорости фильтрации более 0,1 м/с для исследованных значений тока короны повышается эффективность коагуляции мелких, наиболее проникающих частиц. При токе короны более 10 мкА увеличение скорости потока способствует улучшению коагуляции высокодисперсных частиц с диаметром менее 0,2 мкм.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что наибольшая эффективность коагуляции (96 % в области наиболее проникающих частиц) достигается на модели фильтра с четырьмя электродами с чередующейся полярностью подключения, причем первый по ходу потока электрод должен иметь отрицательную полярность подключения.

2. Установлено, что наиболее высокая эффективность улавливания заряженных и нейтральных частиц достигается в поляризационном электростатическом фильтре, содержащем диэлектрический фильтрующий материал, помещенный в электрическое поле большой напряженности, создаваемое окружающими металлическими электродами.

3. В результате поляризации перемычек диэлектрика (образование диполей) на их поверхности возникают сильные электрические заряды, благодаря которым доминируют силы кулоновского и индукционного осаждения частиц, являющиеся наиболее эффективными механизмами осаждения как диэлектрических, так и электропроводных высокодисперсных частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Shaddon, R. W. L.** Electrically enhanced collection of reparable aerosols in granular bed filters at low Reynolds number / R. W. L. Shaddon // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1985. – Vol. 21, No 2. – P. 501–506.

2. **Wang, C.** Dust collection by particle inertia and electrical forces / C. Wang // Powder Techn. Pap. Int. Symp. – Kyoto. – 1981. – P. 565–572.

3. **Исследование** закономерностей коагуляции высокодисперсных частиц из газовых потоков в пористых материалах / М. В. Тумилович [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 67–74.

4. **Тумилович, М. В.** Влияние скорости потока и электрических сил на эффективность фильтрации ультрадисперсных аэрозолей / М. В. Тумилович, Л. П. Пилинеч, А. Е. Галкин // Вестник БНТУ. – 2010. – № 5. – С. 54–60.

5. **Исследование** закономерностей коагуляции высокодисперсных частиц в пористых волоконных материалах в электрическом поле / М. В. Тумилович [и др.] // Наука и техника. – 2012. – № 5. – С. 3–7.

Поступила 30.01.2013