

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КОЛЬМАТАЦИИ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

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

*Белорусский национальный технический университет,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси*

Сегодня к очистке воздуха, используемого в промышленности и других отраслях, предъявляются высокие требования. Производственная деятельность многих отраслей промышленности связана с выделением и последующим улавливанием тонких высокодисперсных частиц. Такие процессы имеют место, например, при производстве наполнителей и полимеров, порошкообразных пигментов и химикатов, технического углерода, химических средств защиты растений, извести и цемента, пылевидного кварца и асбеста, в процессе плавки цветных и редких металлов. К широко распространенным и опасным для человека частицам, которые могут находиться в воздухе, относятся: пыль (угольная, хлопковая, корундовая, наждачная, графитовая, дорожная), асбест, стекловолокно, гипс, известняк, магнезит, мрамор, алебастр, карбид и др. Тонкодисперсная пыль, проникая в альвеолы легких, вызывает различного рода заболевания – пневмокониозы. Например, при работе в атмосфере, содержащей пыль диоксида кремния, у работающих развивается одна из тяжелых форм пневмокониоза – силикоз, а воздействие пыли бериллия вызывает бериллиоз [1].

Высокодисперсные частицы, обладающие малой скоростью витания, представляют наиболее серьезную гигиеническую опасность, так как они вызывают заболевания органов дыхания, зрения, кожного покрова и внутренних органов человека. Применяемое в настоящее время для очистки таких высокодисперсных

частиц оборудование является низкопроизводительным, громоздким, энерго- и материалоемким, достаточно дорогостоящим. Наиболее широко используемые в качестве фильтрующих материалов ткани Петрянова в ряде случаев не обладают достаточной термо-, влаго- и маслостойкостью, имеют малый ресурс работы, плохо поддаются или вообще не поддаются регенерации. Эти недостатки ограничивают возможности эффективного и устойчивого улавливания частиц с размером менее 1 мкм системами из традиционных фильтрующих материалов.

Целью работы является исследование влияния структурных и физических характеристик материалов, режимов фильтрации на закономерности коагуляции высокодисперсных частиц из газопылевых потоков в поровом пространстве.

Для очистки воздуха и других газов от высокодисперсных механических примесей используются самые различные физические силы и средства: гравитационные силы, инерционные силы, центробежные силы, силы электрического взаимодействия заряженных частиц, капиллярные силы, а также фильтрующие перегородки с соответствующим размером пор. При этом эффективность использования указанных сил и перегородок различна в разных областях дисперсного состава загрязнений.

Существует несколько механизмов извлечения частиц фильтрующей перегородкой [2, 3]: прямой перехват, инерционное улавливание,

диффузия, электростатическое притяжение и гравитационное осаждение (седиментация). Частицы, размеры которых больше величины пор, будут задерживаться вследствие прямого перехвата. Такой же механизм возможен и для некоторых частиц, размер которых составляет значительную часть диаметра пор. Такие частицы, двигаясь с воздушным потоком вблизи входного отверстия поры, с большой долей вероятности могут удариться о фильтрующую перегородку и закрепиться на ней (кольматация).

Скорость воздуха над поверхностью фильтрующей перегородки называется лобовой, сквозь поры – поровой. В соответствии с законом Бернулли поровая скорость выше лобовой. При подходе к поре линии тока искривляются, а частицы благодаря инерции продолжают двигаться прямолинейно и задерживаются на поверхности между порами. В этом и состоит суть инерционного улавливания.

Механизм диффузии обуславливает эффекты осаждения только очень мелких частиц. При этом захват частиц идет за счет их броуновского движения и диффузии, обусловленной концентрационными градиентами. Диффузии благоприятствуют низкие скорости потока воздуха и высокие концентрационные градиенты. С помощью диффузии улавливаются лишь частицы диаметром меньше 0,1 мкм.

Силы электростатического взаимодействия возникают из-за различий в величине и знаке заряда поверхности фильтрующей перегородки и частицы. Заряд, наведенный на поверхности мембраны посредством трения, всегда отрицателен [4]. Поток воздуха сам по себе может индуцировать заряд на фильтре, и благодаря этому положительно заряженные частицы могут быть извлечены из потока воздуха путем электростатического притяжения к поверхности перегородки. Однако общепринято считать [5], что электростатическое притяжение играет незначительную роль в задержании частиц.

Сила тяжести действует только на достаточно крупные частицы, и при фильтрации воздуха ею можно пренебречь.

Если силы адгезии, стремящиеся удержать частицу на фильтрующей поверхности, превышают силы, обуславливающие отрыв частицы, то эту частицу можно рассматривать как «улов-

ленную». В противном случае может произойти повторный унос частицы. К явлению повторного уноса частиц можно отнести эффект рикошета, который зависит от размера частиц, скорости потока и свойств материала, из которого изготовлена фильтрующая перегородка. Этот эффект играет важную роль [5] для частиц диаметром около 1 мкм при скоростях потока свыше 0,80 м/с.

Исследование процесса кольматации высокодисперсных частиц в различных пористых материалах целесообразно начать с осаждения высокодисперсных частиц на одиночном модельном цилиндре, являющемся элементом структуры волоконного фильтрующего материала, что позволяет перейти к исследованию процессов осаждения в реальном фильтре. Волоконные фильтры имеют весьма сложную пространственную структуру, что затрудняет ее моделирование. Поэтому стандартные уравнения фильтрации не всегда являются адекватными. Это обстоятельство требует более глубокого как изучения возможности использования уже разработанных моделей применительно к реальным фильтрам и условиям фильтрации, так и разработки новых универсальных моделей, позволяющих с максимальной точностью предсказать эффективность работы фильтра.

На практике качество фильтра оценивается степенью выноса высокодисперсных частиц из фильтра, равной отношению массы частиц, пропущенных фильтром, к массе частиц, поступивших на него с газом, или обратной величиной – степенью кольматации (задержки) частиц, которая характеризует эффективность фильтра.

Примем, что однородный волоконный фильтр состоит из монодисперсных волокон, расположенных параллельно друг другу, перпендикулярно потоку образующих равномерную упаковку. Будем считать, что позади волокон происходит полное перемешивание и выравнивание концентрации в поперечном сечении, а частицы не оказывают взаимного влияния друг на друга. Кроме того, в связи с тем что волоконные фильтры, как правило, характеризуются малой плотностью упаковки, т. е. большими расстояниями между волокнами, значительно превышающими размеры частиц, ситовым эффектом пренебрегаем.

Определим эффективность осаждения (коагуляции) частиц в слое волоконного фильтра с учетом его параметров.

Объем волокон в фильтре площадью поперечного сечения S и толщиной d_h с учетом плотности упаковки α равен $\alpha S d_h$. В то же время объем волокон общей длины L равен $\pi d_f^2 L / 4$. Отсюда длина волокна $L = 4\alpha S d_h / \pi d_f^2$. Средняя скорость частиц в фильтре с плотностью упаковки α составляет $U(1 - \alpha)$. Площадь сечения фильтра, занятая волокном, равна $d_f L$. Поток частиц, приходящийся на это сечение: $c d_f L U (1 - \alpha)$, где c – концентрация частиц.

Доля частиц, осевших на волокнах под действием всех механизмов захвата, равна $\xi'_\Sigma d_f L U c / (1 - \alpha)$, где ξ'_Σ – суммарный коэффициент захвата волокном единичной длины. Та же величина убыли частиц при прохождении потока через фильтр может быть выражена в виде $-S U_0 dc$. Приравнявая эти два выражения и подставив значение L , получим:

$$-dc = \frac{4\xi'_\Sigma d_f S U_0 \alpha c d h}{U_0 \pi (1 - \alpha) d_f^2 S}$$

или

$$\frac{dc}{c} = \frac{4\alpha \xi'_\Sigma}{\pi d_f (1 - \alpha)} dh. \quad (1)$$

Проинтегрировав (1) в пределах высоты слоя h от 0 до H при концентрации частиц соответственно $c_{\text{вх}}$ и $c_{\text{вых}}$, получим:

$$\ln \frac{c_{\text{вых}}}{c_{\text{вх}}} = - \frac{4\alpha H \xi'_\Sigma}{\pi d_f (1 - \alpha)} = \ln K$$

или

$$K = \frac{c_{\text{вых}}}{c_{\text{вх}}} = e^{-f \xi'_\Sigma} = \exp(-f \xi'_\Sigma), \quad (2)$$

где K – коэффициент проскока; f – параметр фильтрации, связанный только со структурными и геометрическими параметрами фильтра,

$$f = \frac{4\alpha H}{\pi d_f (1 - \alpha)}. \quad (3)$$

Эффективность однородного фильтра толщиной H

$$\xi_\Phi = 1 - K = 1 - e^{-f \xi'_\Sigma} = 1 - \exp(-f \xi'_\Sigma) \quad (4)$$

или эффективность осаждения по фракциям

$$\xi_\Phi(x) = \frac{c_{\text{вх}}(x) - c_{\text{вых}}(x)}{c_{\text{вх}}(x)}. \quad (5)$$

Формула (2) содержит очевидную связь между параметрами структуры и эффективностью фильтрации и может применяться для расчетов, если известны величины ξ'_Σ , α и d_f .

Плотность упаковки можно определить как отношение плотности фильтра к плотности материала волокон $\alpha = \rho_\Phi / \rho_f$ с помощью метода РЭМ (растровой электронной микроскопии).

Параметр фильтрации может быть также найден через пористость фильтра $\Pi = 1 - \alpha$

$$f = \frac{4}{\pi} \frac{1 - \Pi}{\Pi} \frac{H}{d_f}. \quad (6)$$

В этом случае пористость определяется одним из известных методов [6].

Задача определения структурных параметров, входящих в (3), решается более просто, если структура материала характеризуется поверхностью волокон. Это позволяет в случае реального фильтра частично избежать учета полидисперсности волокон.

Если в (3) правую часть умножить и разделить на S , получим

$$f = \frac{4\alpha H S}{d_f} \frac{1}{S \pi (1 - \alpha)}, \quad (7)$$

где член $4\alpha H S / d_f = L \pi d_f = S_f$ представляет собой общую поверхность волокон

$$f = \frac{S_f}{S} \frac{1}{\pi (1 - \alpha)}. \quad (8)$$

Общую поверхность волокон S_f можно определить через удельную поверхность S_{ud} , м²/кг, фильтрующего материала следующим образом: $S_f = S_{ud} m$, где m – масса фильтрующего материала, и определяется, например методом БЭТ.

Полагая $1 - \alpha \approx 1$, получим упрощенную формулу для определения f

$$f = \frac{S_{ud}m}{S\pi}. \quad (9)$$

Таким образом, в основном уравнении фильтрации (2) с учетом (8) структура материала в общем случае характеризуется двумя параметрами: поверхностью волокон и плотностью упаковки. Из уравнения видно, что чем выше суммарная поверхность волокон и плотность упаковки, тем выше кольматационная способность фильтрующего материала (меньше коэффициент проскока). Это хорошо согласуется с экспериментальными данными (7) и достаточно ясно объясняет, почему в процессе накопления пыли на волокнах фильтра повышается эффективность фильтрации. Основной проблемой при решении (2) является определение суммарного коэффициента захвата волокон единичной длины ξ'_Σ .

Для грубых оценок эффективности в (2) вместо ξ'_Σ можно подставлять значение эффективности осаждения на одиночном цилиндре ξ_Σ , однако величины этих параметров имеют значительное расхождение [8], связанное с тем, что поле скоростей при обтекании волокон в фильтре значительно сложнее, чем при обтекании одиночного цилиндра, принятого в качестве модели.

При известном коэффициенте захвата одиночным цилиндром ξ суммарный коэффициент захвата фильтра или его компоненты с учетом величины α можно грубо оценить следующими зависимостями [8]:

$$\begin{aligned} \xi_\Sigma &= \xi(1 + 4,5\alpha); \\ \xi_\Sigma^{Stk} &= \xi(1 + 110\alpha); \\ \xi_\Sigma^D &= \xi_D(1 - 4\alpha); \\ \xi_\Sigma^R &= \xi_R(1 + 30\alpha). \end{aligned} \quad (10)$$

В высокоэффективных волоконных фильтрах волокна обычно очень тонкие и полидисперсные. Они ориентированы случайным образом и неравномерно распределены по объему фильтрующего материала. В связи с этим уравнения для определения эффективности осажде-

ния (кольматации), полученные на базе ячеечных моделей, не являются в полной мере адекватными и пригодны лишь для оценочных расчетов. Поэтому Н. А. Фуксом с сотрудниками [9] была предложена так называемая веерная модель, представляющая собой систему рядов, параллельных цилиндров, каждый предыдущий ряд, в которой повернут относительно предыдущего на некоторый угол. Веерная модель наиболее полно соответствует реальным условиям фильтрации. При одинаковых с реальным фильтром плотностью упаковки α и диаметром волокон d_f сопротивление такой упорядоченной структуры максимально [10].

В соответствии с теорией Кирша – Стечкиной – Фукса [11, 12] гидродинамический фактор для веерной модели фильтра с учетом эффекта скольжения газа около тонких волокон, записывается следующим образом:

$$K_0^b = -0,5 \ln \alpha - 5,52 + 0,64\alpha + \tau'(1 - \alpha)K_n, \quad (11)$$

где $K_n = 2\lambda/d_f$ – число Кнудсена, τ' – численный коэффициент, для веерной модели равный 1,43.

Неоднородность структуры в реальных фильтрах влияет на суммарный коэффициент захвата и сопротивление фильтра. Для учета неоднородности введен коэффициент неоднородности структуры E^B , характеризующий отношение силы, действующей на единицу длины волокна в веерной модели F_Φ^B , к силе, действующей в реальном фильтре F_Φ^P :

$$E^B = \frac{F_\Phi^B}{F_\Phi^P} = \frac{\xi_\Sigma'^B}{\xi_\Sigma'^P}. \quad (12)$$

В реальных фильтрах волокна полидисперсны. Мерой полидисперсности является квадратичное отклонение σ диаметров волокон от среднего

$$\sigma = \frac{\bar{d}_f^2 - \bar{d}_{f,i}^2}{\bar{d}_{f,i}^2}. \quad (13)$$

Тогда запишем гидродинамический фактор с учетом полидисперсности волокон

$$K_0^B = -0,5 \ln \left(\frac{\alpha}{1+\sigma} \right) - 0,52 + 0,64 \left(\frac{\alpha}{1+\sigma} \right) + \tau'(1-\alpha)K_n. \quad (14)$$

При известном экспериментальном значении сопротивления фильтра $\Delta P_{\text{экс}}$ можно определить F_Φ^P по формуле

$$F_\Phi^P = \frac{\Delta P_{\text{экс}} \pi^2 d_{f,i}^{-2} (1+\sigma)}{4\alpha\mu U_0 H}, \quad (15)$$

а силу сопротивления в веерной модели

$$F_\Phi^B = \frac{4\pi}{K_0^B} = \frac{4\pi}{-0,5 \ln \left(\frac{\alpha}{1+\sigma} \right) - 0,52 + 0,64 \left(\frac{\alpha}{1+\sigma} \right) + \tau'(1-\alpha)K_n}. \quad (16)$$

Коэффициент проскока в реальном фильтре для определенного значения U_0 рассчитывается по формуле, аналогичной (2):

$$K = \exp \left[-\frac{4\xi_\Sigma^B \alpha H}{\pi d_f E^B (1+\sigma)} \right], \quad (17)$$

а эффективность фильтра

$$\xi_\Phi = 1 - \exp \left[-\frac{4\xi_\Sigma^B \alpha H}{\pi d_f E^B (1+\sigma)} \right]. \quad (18)$$

По теории Кирша – Стечкиной – Фукса, являющейся, по мнению многих авторов, наиболее точной для модельных фильтров в области с доминирующими диффузией и захватом [8, 13], в области максимального проскока коэффициент захвата отдельным волокном определяется как

$$\xi_\Sigma^B = \xi_D^B + \xi_R^B + \xi_{\text{DR}}^B.$$

или

$$\xi_\Sigma^B = 1 - (1 + \xi_D^B)(1 - \xi_R^B), \quad (19)$$

где

$$\xi_D^B = 2,7 \text{Pe}^{-2/3} \left[1 + 0,39(K_0^B)^{-1/3} \text{Pe}^{1/3} K_n \right] + 0,62 \text{Pe}^{-1}; \quad (20)$$

$$\xi_R^B = (2K_0^B)^{-1} \left[(1 + R_K)^{-1} - (1 + R_K) + 2(1 + R_K) \ln(1 + R_K) + 2\tau' K_n (2 + R_K) R_K (1 + R_K)^{-1} \right];$$

$$\xi_{\text{DR}}^B = 1,24(K_0^B)^{-1/2} \text{Pe}^{-1/2} R_K^{2/3}.$$

Рассчитать эффективность фильтра по (18) можно при условии, что диаметры волокон различаются не очень сильно (например, если $d_{f_1} < d_{f_2}$, то теория верна при $d_{f_2}/d_{f_1} \geq 0,2$). Теория верна также при $\text{Re} \ll 1$, $\Delta P/U_0 = \text{const}$, $d_f \leq 1$ мкм, $\alpha < 0,1$.

Анализ приведенных выражений для определения ξ_Σ' показывает, что их в основном отличает друг от друга форма описания поля потока, т. е. гидродинамический фактор, зависящий от параметров модели фильтра, а также учет неоднородности структуры и полидисперсности волокон. Все корреляции не учитывают явно Re и применимы при следующих условиях: $\text{Re} < 1$; $\alpha < 0,1$. В области чисто диффузионного осаждения ($d_p < 0,3$ мкм и $U_0 < 1$ м/с) для волокон размером $d_f = 2$ мкм хорошее совпадение с экспериментальными данными дают корреляции Ли и Лиу на основе гидродинамического фактора Кувабары. Для фильтров из ультрадисперсных волокон ($d_f < 1$ мкм) более точными являются уравнения Кирша – Стечкиной – Фукса, полученные для веерной модели (20), которые учитывают неоднородность реального фильтра и полидисперсность волокон, а также эффект скольжения молекул газа около тонких волокон и совместное действие механизмов осаждения в результате диффузии и касания. Область применимости (20): $\text{Re} \ll 1$; $d_f \leq 1$ мкм; $\alpha < 0,1$; $\Delta P/U_0 = \text{const}$, не очень большая однородность волокон, т. е. при $d_{f_1} > d_{f_2}$ должно выполняться условие $d_{f_2}/d_{f_1} \geq 0,2$.

Коэффициент проскока и эффективность очистки газа модельным волоконным фильтром определяются соответственно из (2) и (3), а реального фильтра по теории Кирша – Стечкиной – Фукса с учетом неоднородности структуры и полидисперсности волокон – из (18) и (19). Все эти и другие известные выражения аналогичны и содержат параметр фильтрации (3), который наглядно описывается соотношением общей поверхности волокон S_f фильтра к площади фильтра S , которое можно назвать удельной площадью волокон F^* :

так как

$$\alpha = \frac{\text{Объем волокон}}{\text{Объем фильтра}} = \frac{L\pi d_f^2}{4SH},$$

то

$$L = \frac{4\alpha HS}{\pi d_f^2}; \quad (21)$$

$$F^* = \frac{S_f}{S} = \frac{4\pi d_f}{S} = \frac{4\alpha H \pi d_f S}{\pi d_f^2 S}$$

(этот результат соответствует и (5)), а параметр f определяется как

$$f = F^* \frac{1}{\pi(1-\alpha)} = \frac{F^*}{\pi\Pi}. \quad (22)$$

При диффузионном осаждении, которое является доминирующим механизмом в области размеров частиц $d_p < 0,5$ мкм, кольтатационное осаждение происходит фактически только на 2/3 общей поверхности волокна. Если допустить, что действуют и другие механизмы задержки, то можно считать рабочей всю лобовую поверхность волокна плюс часть задней поверхности (по направлению потока), т. е. 5/6 общей поверхностью. Введение такой коррекции в формулу для определения F^* (22) вряд ли приведет к недооценке общей эффективности фильтра, так как данные теоретических расчетов, как правило, являются завышенными.

Выше отмечено, что общую поверхность волокон удобно, с точки зрения ее измерения, выразить через удельную поверхность: $S_f = S_{ud}m$, тогда:

$$F_u^* = \frac{S_{ud}m}{S} F^* \text{ и } f = \frac{F_u^*}{\pi\Pi}, \quad (23)$$

или с корреляцией рабочей поверхности

$$f = \frac{5 F_u^*}{6 \pi\Pi}. \quad (24)$$

Для очень низкой плотности упаковки можно использовать упрощенную форму (9).

Учитывая изложенное выше, можно записать:

- для однородного модельного фильтра:

$$6 \xi_\Phi = 1 - \exp\left(-\frac{5 F_u^* \xi_\Sigma}{6 \pi\Pi}\right); \quad (25)$$

- для однородного фильтра с учетом режима течения (из корреляции для коэффициента массопереноса)

$$\xi_\Phi = 1 - \exp\left(-\frac{5}{6} F_u^* \cdot 1,0664 \text{Re}^{-0,489} N_{Sc}\right); \quad (26)$$

- для неоднородного фильтра из полидисперсных ультратонких волокон (на основе верной модели)

$$\xi_\Phi = 1 - \exp\left(-\frac{5}{6} F_u^* \cdot 1,0664 \text{Re}^{-0,489} N_{Sc}\right). \quad (27)$$

Параметр F_u^* (или F^*) может служить фактором оптимизации волоконных фильтров, поскольку учитывает общую поверхность осаждения, что удобно для определения пылеемкости и ресурса работы фильтра, материалоемкость, геометрические и структурные параметры фильтра, и является безразмерным, что позволяет использовать его в сочетании с другими параметрами для сравнения фильтров между собой. Применение уравнений (25)–(27) для определения эффективности реальных фильтров требует учета неоднородности их структуры и полидисперсности волокна. В [12] показано, что учесть макро- (пористость) и микро-неоднородности (полидисперсность волокон) можно путем введения среднего значения $\overline{d_f}$ и α^* , которые хорошо описываются с помощью логарифмически нормального распределения:

$$d_f = d_{f,50} \exp(0,5 \ln^2 \sigma_f) \quad (28)$$

и

$$\alpha^* = \alpha / \exp(5 \ln^2 \sigma_f), \quad (29)$$

где $d_{f,50}$ – медианный диаметр волокон,

$\sigma_f = \sqrt{\frac{d_{f,84}}{d_{f,16}}}$ – стандартное отклонение размеров

волокон, для которых суммарная масса всех волокон, имеющих размер меньше $d_{f,84}$ и $d_{f,16}$, составляет соответственно 84 и 16 % общей массы волокон.

На основании изложенного можно сделать вывод, что для обеспечения высокоэффективной кольтатации высокодисперсных частиц волоконные фильтры должны обеспечивать селективное улавливание, иметь минимальный диаметр волокон и максимальную плотность упаковки. Однако такие фильтры сложны в изготовлении, имеют большие габариты и недо-

статочны эффективны при фильтрации высокодисперсных частиц.

Рассмотрим теперь особенности кольматации высокодисперсных частиц через пористые порошковые материалы (ППМ). ППМ по своей структуре аналогичны зернистым насыпным фильтрам, но отличаются от них значительно более высокой равномерностью структуры – распределением пористости и размеров пор, и при одинаковом размере составляющих материал частиц пористые порошковые материалы отличаются меньшими размерами пор, что обусловлено наличием контактных шеек между частицами.

В режиме глубинной фильтрации высокодисперсных частиц через ППМ действуют такие же механизмы кольматации частиц, однако в данном случае прослеживается более четкая зависимость размера задерживаемых частиц от максимального размера пор $d_{П, \max}$. Например, в [14, 15] даются следующие соотношения соответственно: $d_p = (0,41 - 0,43)d_{П, \max}$; $d_p = 0,36d_{П, \max}$ (при $d_{П, \max} \leq 20$ мкм). В [6] получена более точная зависимость размера задерживаемых частиц от среднего размера пор и пористости ППМ: $d_p = d_{П, \max} [0,052 \exp \times (4,402\Pi)]^{-1}$. В режиме поверхностной фильтрации, которая характерна для ППМ, эта связь очевидна, поскольку в этом случае доминирующим фильтрующим является ситовая задержка (по крайней мере, в начальный период фильтрации, пока не образовался автослой). Естественно, что и эффективность задержки частиц различных размеров также зависит от размера пор.

По сравнению с высокоэффективными волоконными фильтрами ППМ имеют один существенный недостаток – значительно более высокое аэродинамическое сопротивление, обусловленное малыми размерами пор, и как следствие значительно более низкую пропускную способность. Их проницаемость, выражаемая через коэффициент проницаемости, является функцией размера и извилистости пор, а также толщины материала [6]. Для ламинарного режима течения коэффициент проницаемости определяется из закона Дарси

$$K_\mu = \frac{Q_\Gamma \mu H}{S \Delta p}, \quad (30)$$

где Q_Γ – расход газа; μ – вязкость воздуха; Δp – перепад давления, т. е. разница между давлением на входе и выходе ППМ:

$$\Delta p = \chi_\Phi \frac{\rho_\Gamma U_0^2 H}{2d_{\text{лср}}}, \quad (31)$$

где χ_Φ – коэффициент аэродинамического сопротивления.

Но при $Re = Re_{\text{кр}}$, т. е. при критическом числе Рейнольдса, которое изменяется для различных ППМ от 0,1 до 75 [16], наблюдаются отклонения от закона Дарси. В общем случае для различных режимов течения проницаемость определяется из двухчленного выражения

$$\frac{\Delta p}{2RTH} M = \frac{\mu}{K_\mu} j + \frac{\rho}{K_\rho} j^2, \quad (32)$$

где $j = \frac{\rho_\Gamma Q_\Gamma}{S}$; K_μ , K_ρ – вязкостный и инерционный коэффициенты проницаемости.

Коэффициент проницаемости K_μ при ламинарном режиме течения можно также выразить через пористость и удельную поверхность ППМ (зависимость Козени)

$$K_\mu = \frac{0,5\Pi^3}{\beta S_{\text{уд}}^2}, \quad (33)$$

где β – коэффициент извилистости пор.

Зависимости (30)–(33) показывают, что коэффициент проницаемости ППМ тем выше, чем больше размер пор и пористость и меньше толщина фильтра, удельная поверхность материала и извилистость пор.

Большое влияние на повышение эффективности кольматации оказывает увеличение удельной поверхности ППМ, что может быть достигнуто в результате использования для их изготовления порошков с развитой поверхностью, например дендритных порошков, или другими приемами. Однако повышение удельной поверхности приводит к возрастанию аэродинамического сопротивления фильтра.

На основании изложенного можно сделать вывод, что ППМ целесообразно использовать для ультратонкой очистки газов только в тех областях, где невозможно применение высокоэффективных волоконных фильтров, например при очистке высокотемпературных и агрессив-

ных газов, повышенных требованиях к механической прочности и жесткости, обеспечении гарантированного отсутствия проскока частиц определенного размера, тепло- и электропроводности.

Все более повышающиеся требования к эффективности очистки воздуха от высокодисперсных частиц (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 состава фильтруемых частиц требует дальнейшего совершенствования и оптимизации эксплуатационных параметров фильтров с использованием пористых материалов. Представляется, что одним

из путей повышения эффективности фильтров на основе пористых материалов является использование электростатических эффектов, т. е. применение фильтрации предварительно заряженных высокодисперсных частиц через заряженные и нейтральные волокна [17, 18].

ВЫВОД

Проведен теоретический анализ закономерностей коагуляции высокодисперсных частиц из газовых потоков в различных пористых материалах. Показано, что при обычных условиях эффективность коагуляции высокодисперсных частиц диаметром 0,5 мкм и ниже в основном зависит от скорости потока и размера волокон фильтра – чем выше скорость и больше диаметр волокон, тем ниже эффективность коагуляции. Увеличение плотности упаковки фильтрующего материала оказывает не столь существенное влияние на степень улавливания частиц, но приводит к росту сопротивления и соответственно снижению производительности фильтра. При высоких скоростях потока проявляется и совместное действие механизмов диффузии, касания и, частично, инерции. Повышение скорости потока и перевод его в турбулентный режим способствуют улучшению условий коагуляции высокодисперсных частиц за счет усиления действия механизма турбулентной диффузии, что, однако, приводит к увеличению проскока крупных частиц. Для повышения эффективности коагуляции высокодисперсных частиц предложено использование комбинированного действия механизмов

кулоновского и индукционного улавливания частиц, а также турбулентной диффузии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов, А. И. Техника защиты окружающей среды / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, Н. С. Торочешников. – М.: Химия, 1989. – 512 с.
2. Мазус, М. Г. Фильтры для улавливания промышленных пылей / М. Г. Мазус, А. Д. Мальгин, М. Л. Моргулис. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
3. Синайский, Э. Г. Сепарация многофазных многокомпонентных систем / Э. Г. Синайский, Е. Я. Лапица, Ю. В. Зайцев. – М.: Недра, 2002. – 226 с.
4. Binek, B. Влияние электростатических зарядов мембранных фильтров на эффективность разделения / B. Binek, S. Przyborowski // Staub. – 1965. – V. 25. – P. 10–13.
5. Heidam, N. Z. Обзор: фракционирование аэрозолей последовательной фильтрацией на мембранах Нуклепор / N. Z. Heidam // Atm. Environ. – 1981. – V. 15. – P. 891–904.
6. Витязь, П. А. Пористые порошковые материалы и изделия из них / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, В. К. Шелег. – Минск: Вышэйш. шк., 1987. – 164 с.
7. Хлебников, Ю. П. Фильтры систем кондиционирования воздуха и вентиляции / Ю. П. Хлебников. – М.: Стройиздат, 1990. – 128 с.
8. Белоусов, В. В. Теоретические основы процессов газоочистки / В. В. Белоусов. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
9. Фукс, Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 351 с.
10. 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.
11. Кирш, А. А. Эффективность аэрозольных фильтров, состоящих из ультратонких полидисперсных волокон / А. А. Кирш, И. Б. Стечкина, Н. А. Фукс // Коллоидный журнал. – 1975. – № 1. – С. 41–46.
12. Kirch, A. A. The Theory of Aerosol Filtration with Fibrous Filters / A. A. Kirch, I. B. Stechkina // In Fundamental of Aerosol Science / Ed. by David T. Shaw. John Wiley and Sonu, Inc., 1978. – P. 165–256.
13. Ужов, В. Н. Очистка промышленных газов от пыли / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков. – М.: Химия, 1981. – 390 с.
14. Андриевский, Р. А. Пористые металлокерамические материалы / Р. А. Андриевский. – М.: Металлургия, 1964. – 167 с.
15. Сорокин, В. К. О связи тонкости фильтрации с размером пор спеченных листовых материалов / В. К. Сорокин // Порошковая металлургия. – 1977. – № 4. – С. 103–106.
16. Ильин, Ю. В. Течение газа через пористые металлические стенки / Ю. В. Ильин // Известия вузов. Сер. Авиационная техника. – Казань. – 1959. – № 1. – С. 59–73.
17. Пористые материалы и устройства на их основе для очистки воздуха от пылегазовых выбросов, сварочных и других ультрадисперсных аэрозолей / М. В. Тумилович [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 8-й Междунар. науч.-техн.

конф., Минск, 27–28 мая 2008 г. / Ин-т порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси; редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2008. – С. 104–105.

18. **Тумилович, М. В.** Использование электрических сил для повышения эффективности фильтрации ультрадисперсных аэрозолей / М. В. Тумилович, В. В. Савич, А. Е. Галкин // Новые материалы и технологии: порошко-

вая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 9-й Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, ГНПО ПМ НАН Беларуси, 29–30 сентября 2010 г.; редкол: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2010. – С. 116–118.

Поступила 21.10.2011