

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ГАЗОПЫЛЕВЫХ ПОТОКОВ В ВОЛОКНОВЫХ ФИЛЬТРАХ



М.В. Тумилович

Начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации БГУИР, доктор технических наук, доцент



Л.П. Пилиневич

Профессор кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, доктор технических наук, профессор

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь
E-mail: tumilovich@bsuir.by

Abstract. Modeling of sedimentation of high-disperse particles from gas streams in porous fiber materials is carried out. It is shown, under usual conditions efficiency of a kolmatation of high-disperse particles with a diameter of 0,5 microns and below, generally depends on the speed of a stream and the size of fibers of the filter – the speed more than diameter of fibers is higher, the efficiency of a kolmatation is lower. Increase in density of packing of the filtering material has not so significant effect on extent of catching of particles, but leads to growth of resistance and according to decline in production of the filter.

При производстве и механической обработке большинства материалов и изделий выделяется значительное количество пылеобразных веществ. Одним из способов снижения концентрации вредных пылеобразных веществ до значений, не превышающих предельно-допустимые нормы, является очистка воздуха с применением традиционных методов и очистного оборудования. Однако нестабильность рабочих характеристик используемого оборудования при изменении концентрации, физико-химического и дисперсного состава фильтруемых частиц, требует совершенствования конструкций и оптимизации эксплуатационных параметров фильтрующих аппаратов. Одним из наиболее эффективных методов, позволяющим провести оптимизацию эксплуатационных параметров фильтрующих аппаратов является компьютерное моделирование. Для моделирования процесса очистки газопылевых потоков с помощью современных компьютерных средств, позволяющих осуществлять выбор оптимальных режимных параметров, необходимо вначале выполнить формализацию процесса.

Целью данной работы является моделирование процесса очистки газопылевых потоков в пористых волокнистых материалах (ПВМ).

Моделирование процесса очистки высокодисперсных частиц в ПВМ целесообразно начать с рассмотрения осаждения на одиночном модельном цилиндре, являющимся элементом структуры ПВМ, что позволяет перейти к исследованию процессов осаждения в реальном фильтре. Следует отметить, что волокнистые фильтры имеют весьма сложную пространственную структуру, что затрудняет ее моделирование. Поэтому стандартные уравнения фильтрации не всегда являются адекватными. Это обстоятельство требует, как более глубокого изучения возможности применения уже разработанных моделей применительно к реальным фильтрам и условиям фильтрации, так и разработки новых более универсальных моделей, позволяющих с максимальной точностью предсказать эффективность работы фильтра.

На практике качество фильтра оценивается степенью выноса высокодисперсных частиц

из фильтра, равной отношению массы частицы, пропущенных фильтром к массе частиц, поступивших на него с газом, или обратной величиной – степенью задержки частиц, которая характеризует эффективность фильтра.

Примем, что однородный волоконный фильтр состоит из монодисперсных волокон, расположенных параллельно друг другу и перпендикулярно потоку, которые образуют регулярную 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 ПВМ, как правило, характеризуются малой плотностью упаковки, т.е. большими расстояниями между волокнами, значительно превышающими размеры частиц, ситовым эффектом пренебрегаем.

Определим эффективность осаждения 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 равна $U(1-\alpha)$. 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 $\xi'_{\Sigma} d_f L U_0 c / (1-\alpha)$, где ξ'_{Σ} – суммарный коэффициент захвата волокном единичной длины. Та же величина убыли частиц при прохождении потока через фильтр может быть выражена в виде $-S U_0 d c$. Приравнявая эти два выражения и подставив значение L , получим:

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

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

$$\ln \frac{c_{вых}}{c_{ex}} = -\frac{4\alpha H \xi'_{\Sigma}}{\pi d_f (1-\alpha)} = \ln K \quad (2)$$

или

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

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 определяется в виде:

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

или эффективность осаждения по фракциям

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

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 и через пористость фильтра $\Pi = 1 - \alpha$, т.е.

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

В этом случае пористость определяется одним из известных методов [1].

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:

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

где член $4\alpha HS / d_f = L\pi d_f = S_f$ представляет собой общую поверхность волокон, т.е.

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

Общую поверхность волокон S_f можно определить через удельную поверхность $S_{уд}$ [$\text{м}^2/\text{кг}$] фильтрующего материала следующим образом: $S_f = S_{уд} \cdot m$, где m – масса фильтрующего материала, а определяется, например, методом БЭТ.

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

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

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 задерживающая способность фильтрующего материала (меньше коэффициент проскока). Это хорошо согласуется с экспериментальными данными (см., например [2]) и достаточно ясно объясняет, почему в процессе накопления пыли на волокнах фильтра повышается эффективность фильтрации. Основной проблемой при решении уравнения (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 [3], 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 [3]:

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

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 осаждения (кольматации), полученные на базе ячеистых моделей, не являются в полной мере адекватными и пригодны лишь для оценочных расчетов. Поэтому Н.А. Фуксом с сотрудниками [4] 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 [5].

В соответствии с теорией Кирша – Стечкиной – Фукса [6, 7] 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 $K_n = \frac{2\lambda}{d_f}$ – число Кнудсена, τ' – численный коэффициент, для веерной модели равный 1,43.

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

$$E^e = \frac{F_\phi^a}{F_\phi^p} = \frac{\xi'_\Sigma{}^e}{\xi'_\Sigma{}^p} \quad (12)$$

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

$$\sigma = \frac{\overline{d_f}^2 - d_{f,i}^2}{d_{f,i}^2} \quad (13)$$

Тогда, гидродинамический фактор с учетом полидисперсности волокон, запишется:

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

При известном экспериментальном значении сопротивления фильтра $\Delta P_{\text{экс}}$ можно определить F_ϕ^p по формуле:

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

а силу сопротивления в верной модели

$$F_\phi^e = \frac{4\pi}{K_0^e} = \frac{4\pi}{-0,5 \ln \left(\frac{\alpha}{1+\sigma} \right) - 0,52 + 0,64 \left(\frac{\alpha}{1+\sigma} \right) + \tau'(1-\alpha)K_n} \quad (15b)$$

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

$$K = \exp \left[- \frac{4\xi_\Sigma^b \alpha H}{\pi d_f E^b (1+\sigma)} \right], \quad (16)$$

а эффективность фильтра

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

По теории Кирша – Стечкиной – Фукса, являющейся по мнению многих авторов наиболее точной для модельных фильтров в области с доминирующими диффузией и захватом (например, [3, 8]), в области максимального проскока коэффициент захвата отдельным волокном определяется как

$$\xi_\Sigma^e = \xi_D^e + \xi_R^e + \xi_{DR}^e \quad \text{или} \quad \xi_\Sigma^e = 1 - (1 + \xi_D^e)(1 - \xi_R^e), \quad (18)$$

где:

$$\begin{aligned} \xi_D^e &= 2,7Pe^{-2/3} \left[1 + 0,39(K_0^e)^{-1/3} Pe^{1/3} K_n \right] + 0,62Pe^{-1}; \\ \xi_R^e &= (2K_0^e)^{-1} \left[(1+R_K)^{-1} - (1+R_K) + 2(1+R_K) \ln(1+R_K) + 2\tau' K_n (2+R_K) R_K (1+R_K)^{-1} \right]; \\ \xi_{DR}^e &= 1,24(K_0^e)^{-1/2} Pe^{-1/2} R_K^{2/3}. \end{aligned} \quad (19)$$

Рассчитать эффективность фильтра по (17) можно при условии, что диаметры волокон различаются не очень сильно (например, если $d_{f1} < d_{f2}$, то теория верна при $d_{f2}/d_{f1} \geq 0,2$). Теория верна также при $Re \ll 1$, $\Delta P/U_0 = const$, $d_f \leq 1$ 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: $Re < 1$, $\alpha < 0,1$. 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 (19), 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 (19): $Re \ll 1$, $d_f \leq 1$ мкм, $\alpha < 0,1$, $\Delta P/U_0 = const$, не очень большая однородность волокон, т.е. при $d_{f1} > d_{f2}$ должно выполняться условие $d_{f2}/d_{f1} \geq 0,2$.

Коэффициент проскока и эффективность очистки газа модельным волоконным фильтром определяется соответственно из выражений (2) и (3), а реального фильтра по теории Кирша–Стечкиной–Фукса с учетом неоднородности структуры и полидисперсности волокон – из (16) и (17). 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

$$\alpha = \frac{\text{объем волокон}}{\text{объем фильтра}} = \frac{L\pi d_f^2}{4SH}, \text{ то } L = \frac{4\alpha HS}{\pi d_f^2}, \text{ и}$$

$$F^* = \frac{S_f}{S} = \frac{4\pi d_f}{S} = \frac{4\alpha H \pi d_f S}{\pi d_f^2 S} \quad (20)$$

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

$$f = F^* \frac{1}{\pi(1-\alpha)} = \frac{F^*}{\pi\Pi} \quad (21)$$

При диффузионном осаждении, которое является доминирующим механизмом в области размеров частиц $d_p < 0,5$ мкм, осаждение происходит фактически только на 2/3 общей поверхности волокон. 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^* (21) вряд ли приведет к недооценке общей эффективности фильтра, т.к. данные теоретических расчетов, как правило, являются завышенными.

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

$$F_u^* = \frac{S_{ud} \cdot m}{S} F^* \quad \text{и} \quad f = \frac{F_u^*}{\pi \Pi} \quad (22)$$

или с корреляцией рабочей поверхности:

$$f = \frac{5 F_u^*}{6 \pi \Pi} \quad (23)$$

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

Учитывая вышеизложенное, можно записать:

– для однородного модельного фильтра:

$$\xi_\Phi = 1 - \exp\left(-\frac{5 F_u^* \xi_\Sigma}{6 \pi \Pi}\right); \quad (24)$$

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

$$\xi_\Phi = 1 - \exp\left(-\frac{5}{6} F_u^* \cdot 1,0664 \text{Re}^{-0,489} N_{Sc}\right) \quad (25)$$

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

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

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 (24) – (26) для определения эффективности реальных фильтров требует учета неоднородности их структуры и полидисперсности волокна, которые можно описать известными формулами логарифмически нормального распределения.

Произведенная формализация процесса очистки газопылевых потоков в пористых волоконных материалах позволяет определить связи между переменными процесса в динамическом режиме и перейти к компьютерному моделированию для решения задачи оптимизации.

Литература

- [1]. Пилиневич, Л.П. Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой: методы получения/ Л.П. Пилиневич, В.В.Мазюк, В.В.Савич, М.В.Тумилович. – Минск: Тонпик, 2006. – 268 с.
- [2]. Хлебников, Ю.П. Фильтры систем кондиционирования воздуха и вентиляции/ Ю.П. Хлебников. – Москва.: Стройиздат, 1990. – 128 с.

- [3]. Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки/ В.В. Белоусов – Москва: Металлургия. – 1988. – 256 с.
- [4]. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей./ Н.А. Фукс.– Москва: Изд-во АН СССР. – 1955. – 351 с.
- [5]. Двухименный, В.А. Системы очистки воздуха от аэрозольных частиц на АЭС /В.А. Двухименный, Б.М. Столяров, С.С. Черный. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 88 с.
- [6]. Кириш, А.А. Эффективность аэрозольных фильтров, состоящих из ультратонких полидисперсных волокон / А.А., Кириш, И.Б., Стечкина, Н.А. Фукс // Коллоидный журнал, 1975. – №1. С. 41-46.
- [7]. 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. Show.: John Willy and Sohu, Inc., 1978. – P. 165-256.
- [8]. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли. В.Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков. – Москва: Химия, 1981. – 390 с.

Библиотека БГУИР