XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. I:
С. 66-68, 2002. © Санкт-Петербургский государственный технический университет, 2002.

УДК 669.162.252

А.А.Бугаев (5 курс, каф. ТОиЭС), А.А.Писаренко (1 курс, каф. ТОиЭС),
Н.И.Ватин, д.т.н., проф.

ДОПУЩЕНИЕ О РАВНОМЕРНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВОЛОКОН В ТЕОРИИ СТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

С ростом научно-технического прогресса, а в частности с развитием микроэлектронной промышленности и увеличением степени интеграции интегральных схем, возрастает потребность в наличии высокоэффективных фильтров воздуха. Создание таких фильтров требует наличие математической модели волокнистого фильтра с более точным описанием процессов, проходящих в нем.

Описанные в литературе исследования, по очистке газов волокнистыми фильтрами в большей степени относятся к изучению стационарного процесса фильтрации (не изменяющегося во времени) на моделях идеального фильтра (модели изолированного цилиндра), без изучения реальной микроструктуры фильтрующего материала [1…3].

Для однородного фильтра, состоящего из равномерно расположенных цилиндрических волокон диаметром 2R с плотностью упаковки α = const в котором волокна расположены параллельно одно другому и перпендикулярно потоку, была получена формула для расчета величины η – эффективности осаждения частиц в слое волокнистого фильтра с учетом его параметров [1]:

$$\eta = 1 - e^{-\chi \cdot H}, \tag{1}$$

где $\chi = \dfrac{2 \cdot \alpha \cdot \eta''_{\Sigma}}{\pi \cdot R \cdot (1-\alpha)}$; α – плотность упаковки волокнистого; H – высота волокнистого фильтра; η''_{Σ} - суммарный коэффициент захвата волокном единичной длины.

При выводе этой формулы нами использовалось предположение об однородности фильтра.

Рассмотрим пример, когда фильтр неоднороден, т.е. состоит из неравномерно расположенных цилиндрических волокон диаметром $2R$ с плотностью упаковки $\alpha \neq$ const.

Предположим, что фильтр состоит из бесконечно малых слоев толщиной dh и площадью поперечного сечения S, имеющих одинаковые характеристики. Но в отличие от ранее рассмотренного примера, в пределах этого слоя величина плотности упаковки будет не постоянной, т.е. будет изменяться от α_{max} до α_{min}. Также будем считать, что влияние соседних волокон на суммарный коэффициент захвата с учетом всех механизмов осаждения мало и η''_{Σ} = const.

Вырежем из слоя толщиной dh и площадью поперечного сечения S, бесконечно малый объем, толщина которого dh, а площадь поперечного сечения dS. Так как слой бесконечно мал то, с достаточной долей вероятности, можно принять для него плотность упаковки волокон α постоянной.

Объем волокон в фильтре площадью поперечного сечения dS высотой dh с учетом плотности упаковки α равен $\alpha \cdot dS \cdot dh$. В то же время объем волокон общей длины L равен $\pi \cdot R^2 \cdot L$. Отсюда длина волокон:

$$L = \frac{\alpha \cdot dS \cdot dh}{\pi \cdot R^2}. \tag{2}$$

Средняя скорость частиц в фильтре с плотностью упаковки α равна $U/(1\text{-}\alpha)$. Площадь сечения фильтра, занятая волокном, равна $2 \cdot R \cdot L$. Поток частиц, приходящийся на это сечение, равен:

$$z \cdot 2 \cdot R \cdot L \cdot U/(1\text{-}\alpha),$$

где z – концентрация частиц (счетная или массовая).

Доля частиц, осевших на волокнах под действием всех механизмов захвата, равна:

$$\eta''_{\Sigma} \cdot 2 \cdot R \cdot dL \cdot U \cdot z/(1\text{-}\alpha),$$

где η''_{Σ} лежит в пределах от 0 до 1.

Та же величина убыли частиц при прохождении потока со скоростью U через фильтр площадью S может быть выражена в виде величины $S \cdot U \cdot dz$.

Приравняем два этих выражения и подставим L из формулы (2):

$$\frac{dz}{z} = -\frac{2 \cdot \alpha \cdot \eta''_{\Sigma}}{\pi \cdot R \cdot (1-\alpha)} dh. \tag{3}$$

Общее количество частиц осевших на волокнах в элементарном объеме $dV = dS \cdot dh$ будет равно:

$$dz = -\frac{2 \cdot \alpha \cdot \eta''_{\Sigma}}{\pi \cdot R \cdot (1-\alpha)} \cdot z' \cdot dh. \tag{4}$$

Просуммировав (4) по всему слою S получим общее количество частиц осевших на волокнах в объеме $V = S \cdot dz$:

$$\Delta z = -\frac{2 \cdot \eta''_{\Sigma}}{\pi \cdot R} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i}{1-\alpha_i} \cdot z' \cdot dh. \tag{5}$$

Заметим, что в формуле (5) z' – количество пыли на входе в элементарный объем $dV = dS \cdot dz$, а Δz количество пыли на выходе из объема $V = S \cdot dz$. Если принять z – количество пыли на входе из объема $V = S \cdot dz$ то:

$$z = S \cdot z'. \tag{6}$$

С учетом (6) формула (5) примет вид:

$$\Delta z = -\frac{2 \cdot \eta''_{\Sigma}}{\pi \cdot R} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i}{1-\alpha_i} \cdot \frac{z}{S} \cdot dh. \tag{7}$$

Обозначим:

$$\alpha_{слоя} = \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i}{1-\alpha_i}. \tag{8}$$

Получено выражение для эффективности волокнистого фильтра с учетом неравномерного распределения волокон:

$$\eta = 1 - e^{-\chi \cdot H}, \tag{9}$$

где $\chi = \dfrac{2 \cdot \alpha_{слоя} \cdot \eta''_{\Sigma}}{\pi \cdot R \cdot (1-\alpha)}$.

В формуле (8) α_i это плотность упаковки волокон i-го элементарного объема, а n – количество элементарных объемов dV содержащихся в объеме V. Зная закон распределения случайной величины α можно определить величину $\alpha_{слоя}$, а значит можно определить и эффективность фильтра с учетом неравномерности расположения волокон.

Выводы. Предложена более точная зависимость (9) между эффективностью фильтра и основными параметрами фильтрации (размер частиц, скорость потока, диаметр волокон, пористость фильтра).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ужов В.Н., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов фильтрами. М., 1970.- 320 с.
2. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. М., 1981.- 392 с.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М., 1955.- 352 с.