

Е. Н. УШАКОВА, В. И. КОЗЛОВ, академик И. В. ПЕТРЯНОВ

К ВОПРОСУ О ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРУЮЩИХ СВОЙСТВАХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПЕТРЯНОВА

Опубликованные в последние годы теоретические и экспериментальные работы, посвященные исследованиям в области волокнистых фильтров, открывают широкие перспективы расчета эффективности и сопротивления различных фильтрующих материалов.

Фильтрующие материалы Петрянова (ФП) представляют собой чрезвычайно однородные по структуре фильтрующие слои, что сближает их с модельными фильтрами; с другой стороны, ленточная форма волокон не дает возможности непосредственного перенесения на них теории фильтрации, развитой для фильтров с цилиндрическими волокнами. Поэтому для ФП прежде всего необходимо найти параметр, заменяющий радиус волокон в гидродинамических уравнениях и уравнениях фильтрации.

а) Сопротивление системы параллельных цилиндров Δp_0 при отсутствии скольжения, согласно (1), равно:

$$\Delta p_0 = \frac{4\beta\mu HU}{a^2 (-0,5 \ln \beta - \lambda)}. \quad (1)$$

При наличии скольжения (2):

$$\Delta p = \frac{4\beta\mu HU}{a^2 \left[-0,5 \ln \beta - \lambda + \tau \left(1 - \frac{\pi\beta}{3} \right) \text{Кп} \right]}, \quad (2)$$

где β — плотность упаковки фильтра, H — его толщина, a — радиус волокон, μ — вязкость газа, U — скорость газового потока перед фильтром, λ — постоянная величина, зависящая от структуры фильтра и равная для модели Кувобара 0,75, а для веерной модели 0,52, τ — коэффициент порядка 1, зависящий от характера отражения газовых молекул от стенки, $\text{Кп} = l/a$ — число Кнудсена, l — длина свободного пробега молекул газа.

Изучение зависимости $m/\Delta p$ от $\lg \beta$, где $m = 4\mu U g / \rho$, g — вес единицы площади фильтра, на материалах ФП показало линейную зависимость этих величин (рис. 1), что соответствует формулам (1) и (2) и указывает на идентичность гидродинамических свойств материалов ФП и фильтров с цилиндрическими волокнами. Зависимость $\Delta p(\beta)$ для материалов ФП, как показали экспериментальные исследования (3), может быть выражена формулой (2) с коэффициентом при Кп , равном 1. Средний гидродинамический радиус a был определен нами для ряда образцов ФП из наклона графика $m/\Delta p$ от $\lg \beta$, который пропорционален a^2 , а из отрезка, отсекаемого графиком на оси $m/\Delta p$, определена величина $\lambda - \text{Кп}$. Значение числа Кнудсена определялось двумя методами: по формуле $\text{Кп} = l/a$ и из графика зависимости $1/\Delta p$ от $1/P$ (P — давление газа, $\text{Кп} \sim 1/(Pa)$) при $\beta = \text{const}$. Наблюдалось хорошее совпадение значений чисел Кнудсена, определенных этими методами. Найденная экспериментально величина λ для образцов ФП с различным a равна: $\lambda = 0,48 \pm 0,08$, что близко к значению для веерной модели 0,52. Таким образом, средний гидродинамический радиус волокон ФП может быть вычислен по фор-

муле

$$a^2 = \frac{4\mu g U}{\Delta p p (-0,5 \ln \beta - 0,48 + Kn)} \quad (3)$$

б) Фильтрующие свойства материалов ФП при параметре зацепления $R < 1$ и параметре Стокса менее 0,2. Коэффициент захвата реальных фильтров с цилиндрическими волокнами может быть вычислен по формулам для веерной модели фильтра (⁴, ⁵):

$$\eta_{\Sigma} = \eta_D + \eta_R + \eta_{RD}, \quad (4)$$

$$\eta_D = 2,7Pe^{-2/3}, \quad (5)$$

$$\eta_R = (2k)^{-1} \{1 + R\}^{-1} - (1 + R) + 2(1 + R)(1 + 2Kn) \ln(1 + R), \quad (6)$$

$$\eta_{RD} = 1,24k^{-2}R^{2/3}Pe^{-1/2}, \quad (7)$$

где η_{Σ} , η_D , η_R , η_{RD} — соответственно общий коэффициент захвата, коэффициент захвата за счет диффузии, коэффициент захвата за счет зацепле-

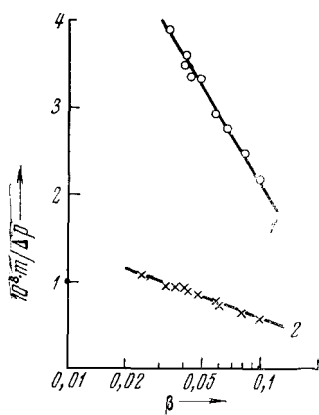


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость $m / \Delta p$ от $\lg \beta$ для материалов ФПП-15 (1) и ФПП-70 (2)

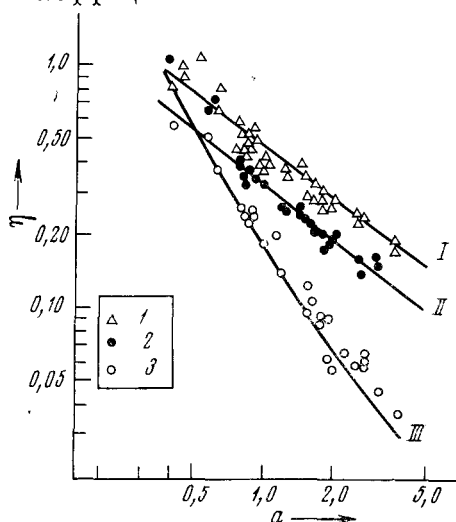


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость коэффициента захвата от среднего гидродинамического радиуса материалов ФПП при скорости фильтрации 1 см/сек, $k = 1,3$. I—III — вычислены по формулам (4) — (7) при $r = 0,041 \mu$, $0,062 \mu$, $0,34 \mu$, соответственно. I—3 — экспериментальные точки при $r = 0,041$, $0,062$ и $0,34 \mu$ соответственно

ния и интерференционный член диффузии и зацепления, $Pe = 2aU / D$, $k = -0,5 \ln \beta - \lambda + Kn$, a — радиус волокон, U — скорость фильтрации, r — радиус частиц.

Нами были измерены коэффициенты проскока и вычислены коэффициенты захвата материалов ФП с различным средним гидродинамическим радиусом от 0,4 до 4 μ , при скорости фильтрации 0,5—10 см/сек по аэрозолям с радиусом частиц 0,04—0,4 μ . Параметр зацепления $R < 1$ и параметр Стокса $Stk < 0,2$. В опытах применялся аэрозоль селена со средним размером частиц 0,04, 0,05 и 0,06 μ , средним геометрическим отклонением $\beta_g = 1,26$ —1,20 и аэрозоль стеариновой кислоты со средним размером частиц 0,16—0,4 μ , $\beta_g = 1,16$ —1,10.

Для измерения размера частиц проба селенового аэрозоля отбиралась из потока при определенной скорости на ультратонкие волокна ФП размером 0,02—0,05 м, нанесенные на объектную сеточку, и фотографировалась затем в электронном микроскопе. Ошибка в измерении размера частиц не превышала 10%. Размер частиц аэрозоля стеариновой кислоты, получаемого в генераторе Ла-Мера, измерялся фотографическим осцилляционным методом по отклонению в электрическом поле (6) с ошибкой не выше 5%. Аэрозоли из генератора получались незаряженными, поэтому для измерений размера предварительно заряжались.

Коэффициенты захвата вычислялись из опытных данных по формуле

$$\eta = \frac{\pi a \ln K}{2\beta H}, \quad (8)$$

где K — коэффициент проскока фильтров, a — средний гидродинамический радиус и сравнивались с η_z , вычисленными по формулам (4) — (7) для

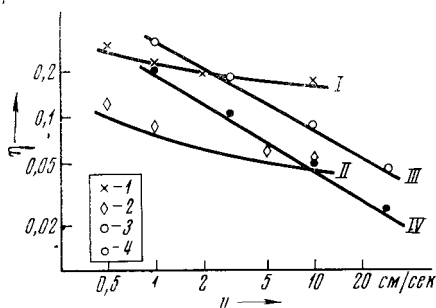


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость коэффициента захвата от скорости фильтрации для ФПП-15 с $a = 0,88 \mu$ (кривые I, III, эксп. точки 1, 3) и ФПП-70 с $a = 1,77 \mu$ (кривые II, IV, эксп. 2, 4) и аэрозолей с радиусом частиц 0,34 м (I, II, 1, 2) и 0,055 м (III, IV, 3, 4), I—IV — вычислены по формулам (4) — (7)

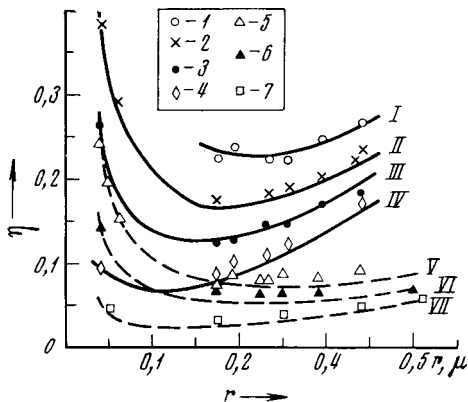


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость коэффициента захвата от радиуса частиц для ФПП-15 с $a = 0,88 \mu$ (I—IV, эксп. точки 1—4) и ФПП-70 с $a = 1,77 \mu$ (V—VII, эксп. точки 5—7) при различной скорости фильтрации. I—VII вычислены по формулам (4) — (7). I, 1 — $U = 0,5$ см/сек, II, V, 2, 5 — $U = 1$ см/сек, III, VI, 3, 6 — $U = 2$ см/сек, IV, VII, 4, 7 — $U = 10$ см/сек

верной модели фильтра. В качестве радиуса волокон принимался средний гидродинамический радиус волокон, который определялся для каждого образца ФП по формуле (3) из нескольких замеров сопротивления фильтра при различной плотности упаковки.

Чтобы исключить влияние электростатических зарядов волокон ФП на коэффициент захвата, фильтры полностью разряжались облучением на кобальтовой установке дозой 1 Мрад.

На рис. 2 приведены зависимости η_z от a , вычисленные по формулам (4) — (7) для частиц трех размеров — 0,04, 0,06, 0,34 м — при скорости фильтрации 1 см/сек, и экспериментальные данные для тех же условий. Экспериментальные точки весьма близки к теоретическим кривым, что указывает как на правомочность замены параметра, определяющего размер волокон ФП, средним гидродинамическим радиусом, так и на применимость формул, полученных для верного модельного фильтра к материалам ФП.

Формулы (4) — (8) не учитывают полидисперсности волокон, которая имеет место во всех реальных фильтрах, а также в материалах ФП. Как

показывает эксперимент, при $a > 0,8$ μ полидисперсностью волокон можно пренебречь. При $a < 0,8$ μ для полидисперсных фильтров поправка на скольжение может быть значительной и ее нельзя учесть средним радиусом волокон.

Зависимость η от скорости фильтрации для ФП с $a = 0,88$ и $1,77$ μ приведена на рис. 3 и от радиуса частиц на рис. 4. Как видно из рис. 3 и 4, наблюдается хорошее совпадение экспериментальных точек с теоретическими кривыми.

Таким образом, формулы для веерной модели могут быть применены для расчета фильтрующих характеристик материалов ФП при условии подстановки в качестве радиуса волокон среднего гидродинамического радиуса.

Физико-химический институт
им. Л. Я. Карпова

Поступило
16 V 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. А. Фукс, И. Б. Стечкина, ДАН, 147, 1144 (1962). ² А. А. Kirsh, I. B. Stechkina, N. A. Fuchs, J. Coll. Inter. Sci., 37, 458 (1971). ³ Б. И. Огородников, Л. А. Зимица, И. В. Петрянов, Вопросы атомной науки и техники, сер. Проектирование, 4, 73 (1971). ⁴ И. Б. Стечкина, А. А. Кирш, Н. А. Фукс, Колл. журн., 31, 121 (1969). ⁵ А. А. Кирш, И. Б. Стечкина, Н. А. Фукс, Колл. журн., 31, 227 (1969). ⁶ Е. Н. Гладкова, Г. Л. Натансон, ЖФХ, 32, 1160 (1958).