

Обоснована целесообразность использования эффективного гидравлического диаметра, который учитывает как среднее значение размера пор, так и распределение пор по размерам, при обобщении опытных данных в качестве характерного размера пористой среды.

Применение пористых материалов для интенсификации теплообмена связано с решением задачи об оптимизации их тепловых и структурных свойств. Для этого необходимо детальное представление о теплофизических, структурных, теплообменных и гидродинамических характеристиках пористых конструкций [1].

Гидравлические потери в пористых конструкциях определяются физическими свойствами рабочего тела, кинематическими характеристиками потока и особенностями внутреннего строения пористой структуры. В общем случае зависимость между этими факторами может быть представлена выражением вида

$$\Delta p / L = f(V_x, D_x, \rho, \mu),$$

где  $\Delta p = p_1 - p_2$  - перепад давления на входе и выходе, а  $L$  - длина пористого образца;  $V_x$  - характерная скорость течения;  $D_x$  - характерный размер пористой структуры образца;  $\rho$  - плотность, а  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости жидкости [2, 3].

Исследованию влияния различных параметров на  $\Delta p/L$  посвящены многочисленные работы. В работе, например, [3] с помощью методов теории подобия и размерностей получено два безразмерных комплекса, которые определяют течение жидкости в пористой среде. По аналогии с трубной гидравликой эти комплексы называют коэффициентом сопротивления трения  $\xi$  и числом Рейнольдса  $Re$

$$\xi = \frac{2\Delta p D_x}{LV_x^2 \rho}; \quad Re = \frac{V_x D_x \rho}{\mu} \quad (1)$$

За характерную линейную скорость  $V_x$  принимают среднюю скорость потока в порах, которая выражается через среднюю скорость  $V$  и среднеобъемную пористость  $\Pi$

$$V_x = V / \Pi.$$

При описании гидродинамических характеристик пористой среды чаще всего ис-

пользуется в качестве характерного (определяющего) размера средний диаметр пор  $d_c$ . В пористых структурах форма каналов, как правило, отличается от цилиндрической. Поэтому, как и в трубной гидравлике, в качестве определяющего размера используют также и гидравлический диаметр пористой среды, определяемый выражением

$$d_s = \frac{4F}{\kappa}, \quad (2)$$

где  $F$  - площадь проходного сечения в пористой среде;  $\kappa$  - смоченный периметр [3].

Однако ряд авторов, отмечают, что гидравлические потери в пористых материалах обусловлены, в основном, наличием средних и крупных пор [2]. Этот фактор не учитывают модели пористых сред, в которых используется осредненный размер пористой среды.

Для оценки влияния изменения пор по размерам в объеме пористого изделия на гидродинамические свойства пористой структуры используем её модель, которая представляет собой набор капилляров разного диаметра. Размер капилляров в направлении перпендикулярном течению рабочей среды изменяется по произвольному закону (течение одномерное). В направлении течения рабочей среды размер пор не меняется. Все поры гидравлически связаны между собой.

Выделим объем пористой среды, состоящий из  $N$  пор различного диаметра. Пусть в этом объеме пористой среды вероятность появления размера  $d_i = (d_c + \Delta d_i)$  равна  $p(d_i)$ , где  $\Delta d_i = (d_i - d_c)$ , при этом  $d_i > 0$  ( $\Delta d_i$  - алгебраическая величина).

Площадь проходного сечения выделенного участка пористой среды выражается зависимостью

$$F = \sum_{i=1}^N \frac{\pi d_i^2}{4} p(d_i),$$

а смоченный периметр равен

$$\kappa = \sum_{i=1}^N \pi d_i p(d_i).$$

Используя выражение (2) и зависимости для  $F$  и  $\kappa$ , получим формулу для эффективного гидравлического диаметра пористой среды с произвольным законом распределения пор по размерам в виде

$$d_{э} = d_c (1 + K^2), \quad (3)$$

где  $d_c$  – средний диаметр пор;

$K$  – коэффициент вариации;

$K = (D/d_c^2)^{1/2}$ ,  $D$  – дисперсия.

Используя зависимость (3), можно получить выражение для эффективного гидравлического диаметра пористой структуры с распределением пор по размерам применительно к материалу МР в виде

$$d_{э} = d_c (1 + 1/\alpha), \quad (4)$$

где  $\alpha$  – параметр функции распределения

$$(\alpha = d^2 / D).$$

Из выражения (4) видно, что характерный размер пористой структуры материала МР определяется двумя параметрами ( $d_c$  и  $\alpha$ ), из которых  $\alpha$  является параметром закона распределения пор по размерам.

Из формулы (4) следует, что при  $\alpha \rightarrow \infty$  характерный размер  $d_x = d_c$  (случай идеальной пористой среды).

При  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $d_c = \text{const}$ , дисперсия  $D \gg d_c^2$ , при этом среднеквадратичное отклонение стремится по абсолютному значению к величине максимальной поры,  $\sigma = (d_{\text{max}} - d_c) \rightarrow d_{\text{max}}$ . Используя выражение (4), можно записать, что при  $\alpha \rightarrow 0$

$$d_{э} = \sqrt{d_c^2 + \sigma^2} \rightarrow \sqrt{d_{\text{max}}^2} = d_{\text{max}},$$

где  $d_{\text{max}}$  – максимальный размер поры.

Таким образом, в случае пористой среды с крайне неоднородной структурой характерный размер ее при массопереносе определяется, в основном, величиной максимальной поры.

Так как на вид закона распределения пор по размерам не накладывалось никаких ограничений, то полученный результат можно распространить не только на материал МР, но и на пористые материалы, распределение пор по размерам в которых имеет любой другой закон распределения.

Среднее расстояние  $d_c$  в конструкциях из материала МР при относительной толщи-

не  $\delta_\phi / D_c > 1$  ( $D_c$  – диаметр спирали,  $\delta_\phi$  – толщина конструкции) по данным структурных исследований [4], может быть определено выражением, полученным в работе [5]

$$d_c = d_2 = \Pi d_n / (1 - \Pi),$$

где  $d_2$  – гидравлический диаметр пористой среды, который равен среднему диаметру пор  $d_c$ ;

$d_n$  – диаметр проволоки.

Для тонкостенных изделий из материала МР при относительной толщине стенки  $\delta_\phi / D_c < 1$  было получено в работе [5] выражение для среднего расстояния  $d_c$ , которое хорошо согласуется со значениями гидравлического диаметра, полученными с учетом толщины конструкции

$$d_c = d_2 = \Pi d_n / (1 - \Pi + d_n / 2\delta_\phi).$$

Коэффициент сопротивления  $\xi_{d_3}$  и число Рейнольдса  $Re_{d_3}$  с учетом зависимостей (1), (4), могут быть определены формулами

$$\xi_{d_3} = \frac{2\Delta p \Pi^2 d_c (1 + 1/\alpha)}{LV^2 \rho},$$

$$Re_{d_3} = \frac{V \rho d_c (1 + 1/\alpha)}{\Pi \mu}. \quad (5)$$

Зависимость между  $\xi_{d_3}$  и  $Re_{d_3}$  определяется выражением вида

$$\xi_{d_3} = A / Re_{d_3}, \quad (6)$$

при ламинарном, и

$$\xi_{d_3} = A_1 / Re_{d_3} + B \quad (7)$$

при переходном режиме течения.

Для численного определения постоянных  $A$ ,  $A_1$  и  $B$  в уравнениях (6) и (7) необходимо проводить большой объем экспериментальных исследований. Методика проведения таких исследований гидравлических потерь в материале МР подробно изложена в работе [6].

Таким образом, гидравлические потери в МР определяются как средним размером  $d_c$  (масштабный фактор), так и степенью неоднородности структуры, которая определяется параметром  $\alpha$ . Следовательно, зависимости (6) и (7) описывают более общий случай процесса фильтрации жидкости в материале МР, чем описанный, например, в работе [5].

Уравнения (5) – (7) могут быть использованы для расчета гидравлических потерь в образцах из материала МР, полученных как

по известным, так и по вновь разрабатываемым технологиям.

С учетом выражений (5), зависимости (6) и (7) можно представить в виде уравнений

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{A}{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)^2} \mu V \quad (8)$$

при ламинарном и

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{A_1 \mu V}{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)^2} + \frac{B \rho V^2}{2\Pi^2 d_c (1+1/\alpha)} \quad (9)$$

при переходных режимах течения жидкости в материале МР.

Из экспериментальных исследований гидравлических потерь в материале МР определены значения постоянных  $A$ ,  $A_1$  и  $B$  в уравнениях (8) и (10). С учетом этих значений уравнения (8) и (10) можно представить в виде

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{240}{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)^2} \mu V \quad (10)$$

при ламинарном и

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{220 \mu V}{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)^2} + \frac{2 \rho V^2}{2\Pi^2 d_c (1+1/\alpha)} \quad (11)$$

при переходных режимах течения жидкости в материале МР. Критическое значение числа Рейнольдса  $Re_{dx} = 10$ .

Графическая интерпретация уравнений (10) и (11) приведена на рис. 1. Экспериментальные данные в пределах погрешностей (15...20%) совпадают с аналитическими зависимостями (10) (11), в которых за характерную линейную скорость  $V_x$  принята средняя скорость потока в порах. Она выражена через среднеобъемные скорость  $V$  и пористость  $\Pi$ , а за характерный (определяющий) размер пористой структуры принят эффективный гидравлический диаметр, который учитывает как среднее значение пор  $d_c$  так и степень относительного варьирования их размеров  $1/\alpha$ .

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о возможном значительном влиянии изменения размера пор на гидравлические потери в пористом материале МР

Важный практический интерес представляет оценка гидравлической эффективности материала МР в сравнении с идеальной пористой средой. При сравнении используем зависимости для определения

гидравлических потерь в материале МР (10) и в идеальной пористой среде

$$\Delta p / L = 64 \mu V / 2\Pi d_u^2. \quad (12)$$

При равных длинах  $L_{MP} = L_u$  и среднем диаметре  $d_{MP} = d_u$  получим, что

$$\Delta p_{MP} / \Delta p_u = 4 / (1 + 1/\alpha)^2. \quad (13)$$

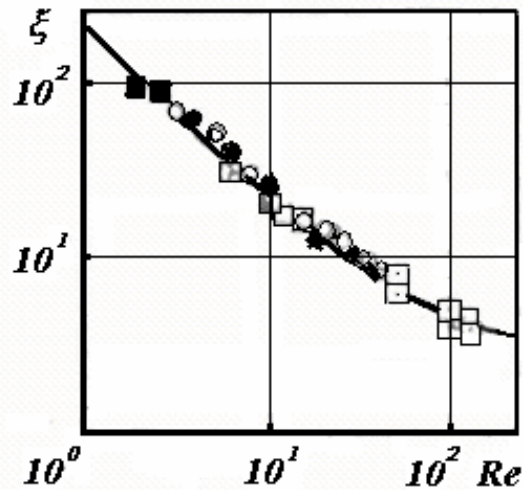


Рис.1. Зависимость коэффициента гидравлических потерь  $\xi_{dx}$  от числа Рейнольдса  $Re_{dx}$  ( $d_n = 0,09$  мм):

□ -  $\Pi = 0,741$ ,  $\alpha = 1,56$ ;

■ -  $\Pi = 0,752$ ,  $\alpha = 1,48$ ;

○ -  $\Pi = 0,608$ ,  $\alpha = 1,32$ ;

● -  $\Pi = 0,614$ ,  $\alpha = 1,30$

Отсюда видно, что относительные гидравлические потери в материале МР зависят от степени неоднородности его структуры.

Если пористая структура состоит из набора цилиндрических пор, функция распределения которых такая же как и у материала МР ( $\alpha_{MP} = \alpha_u$ ), то, используя выражения (10) и (12), получим, что отношение

$$\Delta P_{MP} / \Delta P_u^{d=var} = 4.$$

Таким образом, гидравлические потери в конструкциях из МР в четыре раза больше, чем в пористой структуре, состоящей из пор постоянного размера по длине фильтрации.

Снижение гидравлической эффективности конструкций из МР по сравнению с пористой структурой, состоящей из набора цилиндрических пор, функция распределения которых такая же, как и у материала МР, связано с изменением размера пор вдоль направления фильтрации и их извилистостью,

что вызывает дополнительные гидравлические потери.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о возможном значительном влиянии изменения размера пор на гидравлические потери в пористом материале МР.

#### Список литературы

1. Левитан М.М., Расин О.Г. Эффективность применения пористых материалов для интенсификации теплообмена в каналах //Тепло - и массообмен в системах с пористыми элементами: Сб. тр. – Минск, 1981. – С. 91 – 99.
2. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. М. Машиностроение, 1981, - 247с.
3. Минц Д.Е., Шуберт С.А. Гидравлика зернистых материалов. М. Минкоммухоз РСФСР, 1955, - 112с.

4. Жижкин А.М. Распределение пор по размерам в тонкостенных изделиях из материала МР //Труды международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Часть 1. Самара. 2003. – С. 185 – 190.

5. Белоусов АИ, Изжеуров Е.А., Сетин А.Д. Исследование гидродинамических и фильтровальных характеристик пористого материала МР //Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. – Куйбышев, 1975. Вып 2. С. 70-80.

6. Изжеуров Е.А. Формирование элементов конструкций гидродинамического тракта энергетических установок из упругого пористого материала МР. М.: Машиностроение, 2001.– 286 с.

## HYDRAULIC LOSSES IN PRODUCTS FROM MATERIAL MR

© 2006 A.M. Zhizhkin

Samara State Aerospace University

The expediency of use of effective hydraulic diameter, which considers both a mean of a size of pores, and distribution of pores on sizes, is proved at generalization of empirical data as a characteristic size of porous medium.