

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

Жижкин А.М.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Для описания гидродинамических характеристик пористой среды чаще всего используется в качестве характерного, определяющего, размера средний размер пор d_c . Однако ряд авторов, отмечают, что гидравлические потери в пористых материалах обусловлены, в основном, наличием средних и крупных пор [1]. Наличие пор разных размеров учитывает закон распределения пор по размерам, его параметры.

Рассмотрим влияние распределения пор по размерам на гидродинамические свойства пористой среды, представляющей собой набор капилляров разного диаметра. Объемный расход через капилляр при ламинарном режиме течения жидкости можно определить по формуле Гагена-Пуазейля

$$Q_r = \frac{\pi}{128\mu} \frac{\Delta P}{L} d_c^4, \quad (1)$$

где Q_r – объемный расход жидкости; $\Delta P = P_1 - P_2$ - перепад давления на входе и выходе; L - длина трубы; μ - коэффициент динамической вязкости жидкости; d_c - средний размер пор [1].

Для единичной поверхности идеальной пористой среды зависимость (1) можно представить в виде

$$Q_r^{d=const} = \frac{\Pi}{32\mu} \frac{\Delta P}{L} d_c^2 = A d_c^2, \quad (2)$$

где $A = \Pi \Delta P / 32\mu L$.

Пусть в рассматриваемой пористой среде вероятность появления размера $d_i = (d_c + \Delta d_i)$ равна $p(d_i)$, где $\Delta d_i = (d_i - d_c)$, при этом $d_i > 0$ (Δd_i - алгебраическая величина). Тогда уравнение для объемного расхода при переменном диаметре пор, используя выражение (2), можно записать в виде

$$Q_r^{d=var} = A \sum_{i=1}^{N^l} (d_c + \Delta d_i)^2 p(d_i),$$

где N^l - число пор рассматриваемой среды. Выполнив необходимые преобразования, получим

$$Q_r^{d=var} = A(d_c^2 + D) = A d_c^2 (1 + D / d_c^2), \quad (3)$$

где D – дисперсия.

Из сравнения выражений (2) и (3) видно, что определяющим раз-

мером пористой среды с неоднородной поровой структурой при определении гидродинамических характеристик является параметр

$$d_x = d_c \sqrt{(1 + K_B^2)} = d_c \sqrt{1 + D/d_c^2}, \quad (4)$$

где K_B – коэффициент вариации.

Для изделий из материала МР зависимость (4) можно выразить через параметры закона распределения пор по размерам α и β

$$d_x = d_c (1 + 1/\alpha)^{1/2} = (d_c^2 + \alpha/\beta^2)^{1/2}. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что характерный размер пористой структуры материала МР определяется двумя параметрами d_c и α – параметры закона распределения пор по размерам, которые, как показали результаты структурных исследований, однозначно определяют геометрию порового объема. Из формулы (5) 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 $D \gg d_c$, 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 $\alpha \rightarrow 0$

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

(d_{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 и на закон распределения пор как в материале МР, так и на любой другой пористый материал, распределение пор в котором имеет вероятностный закон.

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 записана в виде

$$\Delta P / L = f(V_x, D_x, \rho, \mu), \quad (6)$$

где V_x – характерная скорость течения; D_x – характерный (определяющий) размер образца;

Исследованию влияния различных параметров на $\Delta P/L$ посвящены многочисленные работы. В работе, например, [2] 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 ξ и числом Рейнольдса Re

$$\xi = \frac{2\Delta P D_x}{L V_x^2 \rho}; \quad Re = \frac{V_x D_x \rho}{\mu}.$$

За характерный (определяющий) линейный размер необходимо принять параметр, определяющий как масштабный, так и случайный факторы внутреннего строения. Такой характеристикой пористой среды, как было показано выше, является характерный размер d_x , определяемый по формуле (4), ($D_x = d_x$).

За характерную линейную скорость V_x можно принять среднюю скорость потока в порах, которая выражается через среднюю скорость V и пористость Π

$$V_x = V / \Pi \quad (7)$$

Используя выражения (4) и (7), получим зависимости, определяющие ξ_{dx} и Re_{dx}

$$\xi_{dx} = \frac{2\Delta P \Pi^2 d_c (1 + K_B^2)^{1/2}}{L V^2 \rho}, \quad (8)$$

$$Re_{dx} = \frac{V \rho d_c (1 + K_B^2)^{1/2}}{\Pi \mu} \quad (9)$$

Зависимость между ξ_{dx} и Re_{dx} определяется выражением вида

$$\xi_{dx} = A / Re_{dx}, \quad (10)$$

при ламинарном, и

$$\xi_{dx} = A / Re_{dx} + B \quad (11)$$

при переходном режиме течения. Постоянные A и B определяются экспериментально.

С учетом выражений (8), (9) зависимости (10) и (11) можно представить в виде уравнения

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{A}{2\Pi d_c (1 + K_B^2)} \mu V \quad (12)$$

для ламинарного, и

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{A\mu V}{2\Pi d_c (1 + K_B^2)} + \frac{B\rho V^2}{2\Pi^2 d_c (1 + K_B^2)^{1/2}} \quad (13)$$

для турбулентного и переходного режимов течения жидкости.

Для материала МР характерный размер определен выражением (5), а коэффициент сопротивления ξ_{dx} и число Рейнольдса Re_{dx} с учетом зави-

симостей (8), (9) формулами

$$\xi_{dx} = \frac{2\Delta P \Pi^2 d_c (1+1/\alpha)^{1/2}}{LV^2 \rho}, \quad (14)$$

$$\text{Re}_{dx} = \frac{V \rho d_c (1+1/\alpha)^{1/2}}{\Pi \mu}, \quad (15)$$

Из экспериментальных исследований гидравлических потерь в материале МР получены значения постоянных A и B в уравнениях (10) и (11). С учетом этих значений

$$\xi_{dx} = 230 / \text{Re}_{dx} \quad (16)$$

при ламинарном и

$$\xi_{dx} = 230 / \text{Re}_{dx} + 3 \quad (17)$$

переходном и турбулентном режиме течения.

Графическая интерпретация уравнения (17) приведена на рис. 1. Экспериментальные данные в пределах погрешностей (15...20%) совпадают с аналитической зависимостью (17), которая учитывает как среднее значение пор d_c так и степень неоднородности структуры порового объема.

Таким образом, гидравлические потери в МР определяются как средним размером d_c (масштабный фактор), так и степенью неоднородности структуры, которая определяется параметром α . Следовательно, зависимости (16) и (17) описывают более общий случай процесса фильтрации жидкости в материале МР, чем описанный, например, в работе [1].

Таким образом, уравнения (.5), (14)-(17) могут быть использованы для расчета гидравлических потерь в образцах из материала МР, полученных как по известным, так и по вновь разрабатываемым технологиям.

С учетом формул (14) и (15) уравнения (16) и (17) можно представить аналогично выражениям (12) и (13) в виде

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{230}{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)} \mu V \quad (18)$$

при ламинарном и

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{230 \mu V}{2\Pi d_c^2 (1+1/\alpha)} + \frac{3\rho V^2}{2\Pi^2 d_c (1+1/\alpha)^{1/2}} \quad (19)$$

при переходных режимах течения жидкости в материале МР.

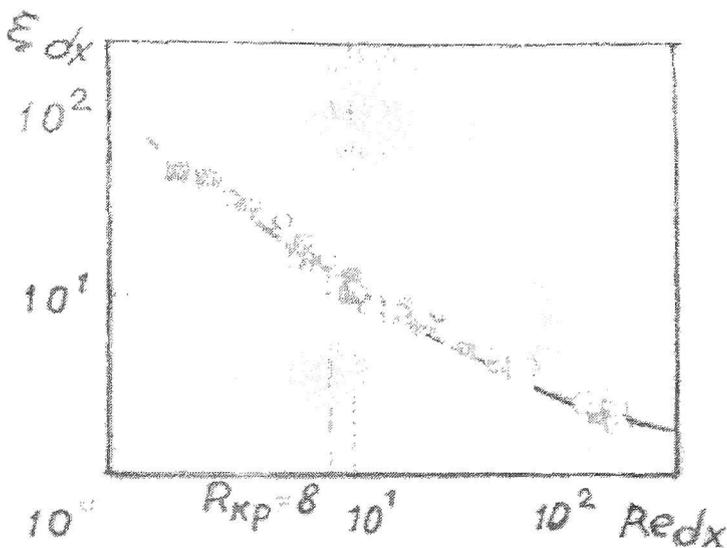


Рис.1. Зависимость коэффициента гидравлических потерь ξ_{dx} от числа Рейнольдса Re_{dx} ($d_n = 0,09$ мм):
 \square - $\Pi = 0,741$, $\alpha = 1,56$; \blacksquare - $\Pi = 0,752$, $\alpha = 1,48$;
 \circ - $\Pi = 0,608$, $\alpha = 1,32$; \bullet - $\Pi = 0,614$, $\alpha = 1,30$

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 (18) и идеальной пористой среде

$$\Delta P / L = 64 \mu V / 2 \Pi d_c^2. \quad (20)$$

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

$$\Delta P_{MP} / \Delta P_n = 3,6 / (1 + 1/\alpha). \quad (21)$$

Откуда 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 как у материала МР ($\alpha_{MP} = \alpha_n$), то, используя выражения (18) и (20), получим, что отношение

$$\Delta P_{MP} / \Delta P_n^{d=var} = 3,6.$$

Таким образом, гидравлические потери в тонкостенных конструкциях из МР примерно в четыре раза больше, чем в пористой структуре,

состоящей из пор постоянного размера по длине фильтрации.

Снижение гидравлической эффективности по сравнению с идеальной пористой средой у материала МР связано с изменением размера пор вдоль направления фильтрации и их извилистостью, что вызывает дополнительные гидравлические потери.

Список литературы

1. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. М. Машиностроение, 1981, - 247с.
2. Минц Д.Е., Шуберт С.А. Гидравлика зернистых материалов. М.
3. Минкоммунхоз РСФСР, 1955, - 112с.

СОВРЕМЕННЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКОНОМИЧНОСТИ КАМЕР СГОРАНИЯ ЖРД

Калмыков Г.П., Лозино-Лозинская И.Г., Исаков Д.В.
ФГУП Исследовательский центр имени М.В. Келдыша.
Росавиакосмос, г. Москва

Широкие фундаментальные теоретические исследования по термодинамике, теплообмену и газовой динамике, проведенные под руководством основоположников ЖРД: М.В. Келдыша, В.П. Глушко, А.П. Ваничева, позволили разработать основы расчетов энергетических характеристик камер сгорания. Именно тогда сложились методы расчета термодинамических свойств продуктов сгорания, определяющие теоретические значения энергетических характеристик камер сгорания ЖРД на различных компонентах топлива для любых сочетаний параметров, созданы уникальные базы данных, изданы справочники и программы расчета.

Абсолютными характеристиками экономичности камер сгорания ЖРД являются значения удельного импульса тяги в пустоте J_{Π} и характеристическая скорость C .

С точки зрения общей термодинамики и термодинамического цикла вся масса компонентов топлива, поступающих в КС должна дать импульс тяги и характеристическую скорость, равные

$$J_{\Pi}^T = f(Km; p_k; I_{O_2}; I_{ГОР}; Fa)$$
$$C_T = f(Km; p_k; I_{O_2}; I_{ГОР})$$