

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ПОРИСТЫХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ МАТЕРИАЛА "МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ РЕЗИНА"



ФГБОУ ВПО "Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва, (национальный исследовательский университет)"

Алексей Юрьевич Ардаков, Андрей Александрович Осипов, Александр Михайлович Жижкин, к.т.н., Николай Николаевич Ромоданов

В работе приводится метод определения гидравлических потерь в материале "металлическая резина" (МР). Обоснована целесообразность использования эффективного гидравлического диаметра при обобщении опытных данных в качестве характерного размера пористой среды.

This article contains reasons on methods of definition of hydraulic losses in material "metal rubber" (MR) On the basis of the previous researches of the porous materials directed on reduction to concepts of pipe hydraulics, and also the parameters of material MR given about statistical researches, the formulas, allowing to determine the size of hydraulic losses in porous products from material MR were received.

Ключевые слова: материал "металлическая резина" (МР), пористый материал, теплообмен, гидродинамические характеристики, гидравлические потери.

Keywords: reduction of losses in the engine, leakages of a working body, porous materials.

Невозможность дальнейшего повышения КПД авиационных газотурбинных двигателей экстенсивным путем увеличения температуры газов в камере сгорания приводит к необходимости уменьшения потерь в двигателе, вызванных утечками рабочего тела. Одним из решений данной проблемы является применение в качестве уплотнений пористых материалов. В СГАУ на протяжении многих лет исследуется пористый материал "металлическая резина" (МР).

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; ρ - плотность, а μ - 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 ξ и числом Рейнольдса Re

$$\xi = 2\Delta p D_x / (L V_x^2 \rho); \quad Re = V_x D_x \rho / \mu \quad (1)$$

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

$$V_x = V / \Pi.$$

При описании гидродинамических характеристик пористой среды чаще всего используется 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

$$d_c = 4F / \kappa, \quad (2)$$

где F - площадь проходного сечения в пористой среде; κ - 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 $d_i > 0$ (Δd_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 κ , получим формулу для эффективного гидравлического диаметра пористой среды с произвольным законом распределения пор по размерам в виде

$$d_{\text{эф}} = d_c (1 + K^2), \quad (3)$$

где d_c - средний диаметр пор; $(K = (D/d_c^2)^{1/2})$ - коэффициент вариации, а 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

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

где α - параметр функции распределения ($\alpha = d^2/D$).

Из выражения (4) видно, что характерный размер пористой структуры материала МР определяется двумя параметрами (d_c и α), из которых α 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 $\alpha \Rightarrow 0$

$$d_{\text{эф}} = \sqrt{d_c^2 + \sigma^2} \Rightarrow \sqrt{d_c^2} = d_{\text{max}},$$

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

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

где d_r - 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

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

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

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

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

Зависимость между ξ_{d_3} и Re_{d_3} определяется выражением вида

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

$$\text{и } \xi_{d_3} = A_1 / Re_{d_3} + B \text{ при переходном режиме течения.} \quad (7)$$

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 α . 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 $Re_{d_3} = 10$.

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 Π , 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

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

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

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

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 же, как и у материала МР ($\alpha_{MP} = \alpha_n$), то, используя выражения (10) и (12), получим, что отношение $\Delta p_{MP} / \Delta p_n^{d=var} = 4$.

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 значительном влиянии распределения пор на гидравлические потери в пористом материале МР. □

Литература

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. Минкоммунхоз 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.

Связь с авторами:

AYArdakov@koil.ru, +79277128657
azhzhkin@yandex.ru, +79276554995
romadanov-2012@mail.ru, +79879222926

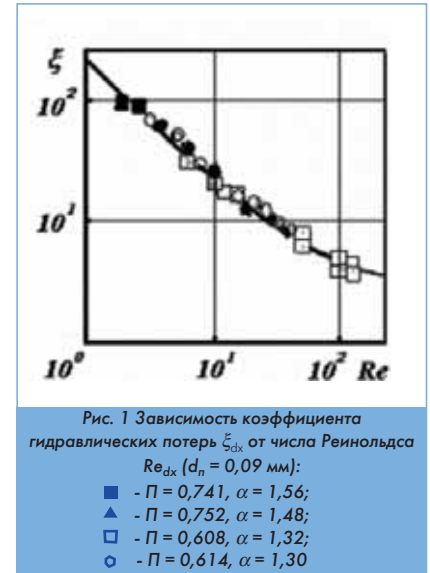


Рис. 1 Зависимость коэффициента гидравлических потерь ξ_{d_3} от числа Рейнольдса Re_{d_3} ($d_n = 0,09$ мм):
 ■ - $\Pi = 0,741, \alpha = 1,56$;
 ▲ - $\Pi = 0,752, \alpha = 1,48$;
 □ - $\Pi = 0,608, \alpha = 1,32$;
 ○ - $\Pi = 0,614, \alpha = 1,30$