

Поскольку [4] свойства оптимальности, устойчивости и сходимости алгоритма (2) при условии (3) справедливы для широкого класса операторов A_h^{-1} , то указанные выше методики коррекции погрешностей СКД могут быть применены для решения многих других некорректных задач, возникающих при синтезе, идентификации динамических объектов [2], а также для аналитической коррекции погрешностей многих других измерительных систем.

Л и т е р а т у р а

1. Герц Е.В., Есин В.И., Прядко Ю.Г. Исследование переходных процессов в пневматических системах. - В сб.: Механика машин. - М.: Наука, 1974. Вып. 43, с.95-104.
2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1974. - 224 с.
3. Лоран П.-Ж. Аппроксимация и оптимизация. - М.: Мир, 1975. - 496 с.
4. Гребенников А.И. Метод сплайнов и решение некорректных задач теории приближений. - М.: Изд-во МГУ, 1983. - 208 с.
5. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошников В.Л. Методы сплайн-функций. - М.: Наука, 1980. - 352 с.

УДК 621.43.038-772.002.3

А.М.Жижкин, Е.А.Изжеуров

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ СТРУКТУРЫ НА ГИДРОДИНАМИКУ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛОВ

Пористые металлы находят широкое применение в элементах гидропневмоавтоматики летательных аппаратов для целей дросселирования и фильтрации.

Особенности изготовления элементов гидропневмоавтоматики из пористых металлов существенно влияют на их проницаемость. В частности, при изготовлении пористых конструкций из-за сил трения о стенки матрицы имеет место анизотропия структуры в них.

Качественный характер этого явления отмечают многие исследо-

ватели [1-3]. Например, при исследовании влияния различных факторов на проницаемость фильтров Е.И.Павловская и Б.Ф.Шибряев показали, что производительность пористых цилиндрических фильтров из-за неравномерности пропрессовки возрастает непропорционально их высоте. С.В.Белов, анализируя структуру пористых изделий, указывает, что изготовленные способом одно- и двухстороннего прессования втулки имеют существенную неравномерность пористости, достигающую в ряде случаев 80% от средней по объему.

В гидравлических расчетах пористых изделий структурные характеристики, как правило, принимаются осредненными по объему, что в ряде случаев приводит к значительным погрешностям в оценке их работоспособности.

Целью данной работы является попытка оценить влияние изменения пористости в направлении фильтрации на гидродинамические потери в пористых изделиях.

Зависимость градиента давления рабочей жидкости в пористой среде от скорости при установившейся фильтрации может быть представлена в виде

$$\frac{dP}{dL} = A(v, d_n, \mu) f(\Pi) \quad (1)$$

для ламинарного и

$$\frac{dP}{dL} = A_1(v, d_n, \mu) f_1(\Pi) + B(v, d_n, \rho_c) f_2(\Pi) \quad (2)$$

для турбулентного режимов течения [4], где dP/dL - градиент давления; $A(v, d_n, \mu)$; $A_1(v, d_n, \mu)$; $B(v, d_n, \rho_c)$ - функции, зависящие от структуры пористой среды, диаметра волокна (частиц) d_n , динамической вязкости μ рабочей жидкости и скорости фильтрации v ; Π - пористость; $f(\Pi) = (1-\Pi)^2/\Pi^3$; $f_1(\Pi) = \frac{(1-\Pi)}{\Pi^3}$. В изделиях из пористых материалов структурные параметры (пористость, гидравлический диаметр, извилистость и т.д.) могут иметь различные значения по объему. Если пористость в них изменяется по известному закону в направлении фильтрации рабочей жидкости и является функцией длины, можно записать дифференциальные уравнения фильтрации в пористом материале в виде

$$\frac{dP}{dL} = A(v, d_n, \mu) f[\Pi(L)] \quad (3)$$

для ламинарного и

$$\frac{dP}{dL} = A_1(v, d_n, \mu) f_1[\Pi(L)] + B(v, d_n, \rho_c) f_2[\Pi(L)] \quad (4)$$

для турбулентного режимов течения.

Однако для анализа работоспособности пористых конструкций, для выполнения инженерных расчетов необходимы интегральные уравнения фильтрации жидкости в пористом материале. При анализе влияния изменения пористости на гидравлические характеристики скорость фильтрации v , вязкость μ и плотность жидкости ρ_c , диаметр волокон (частиц) d_n пористой структуры – постоянны, а течение жидкости в недеформируемой пористой среде стационарное и изотермическое.

Зависимости (3) и (4) – обыкновенные дифференциальные уравнения с разделяющимися переменными. Интегрируя их и используя граничные условия (при $L_1 = 0$ $P=P_1$, а при $L_2=L_u$ $P=P_2$, где P_1, P_2 – давление рабочей жидкости на входе и выходе пористого изделия, L_u – его длина), получим гидравлические потери

$$\Delta P^a = A(v) \int_{L_1}^{L_2} f[\Pi(L)] dL \quad (5)$$

при ламинарном и

$$\Delta P^T = A_L(v) \int_{L_1}^{L_2} f[\Pi(L)] dL + B(v) \int_{L_1}^{L_2} f_1[\Pi(L)] dL \quad (6)$$

при турбулентном режимах течения.

Уравнения (5) и (6) являются общим видом интегральных зависимостей для одномерной фильтрации несжимаемой жидкости в пористой среде с переменной вдоль направления течения пористостью.

Для вычисления гидравлических потерь в пористых конструкциях, изготовленных по конкретной технологии, необходимо знать зависимость $\Pi(L)$. Для пористого металла МР такая зависимость может быть получена из экспериментальных данных работы [6] и представлена в виде зависимости степени опрессовки – ζ от фактора формы Φ (рис.1). Степень опрессовки ζ определяет деформацию при прессовании пористых материалов

$$\zeta = \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_3}, \quad (7)$$

где $\bar{\rho}$ и $\bar{\rho}_3$ – относительные плотности пористого изделия и заготовки соответственно.

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_M}; \quad \bar{\rho}_3 = \frac{\rho_3}{\rho_M}, \quad (8)$$

где ρ, ρ_M, ρ_3 – плотность изделия, материала волокна и заготовки соответственно.

Используя определение пористости, а также уравнения (7) и (8), получим зависимость, связывающую степень опрессовки с пористостью конструкции

$$\eta = \frac{1 - \Pi}{1 - \Pi_3}, \quad (9)$$

где Π , Π_3 - соответственно пористость изделия и заготовки.

Фактор формы Φ для пористых изделий был определен как

$$\Phi = \frac{F_{\sigma}}{2S}, \quad (10), \text{ где } F_{\sigma} - \text{боковая площадь изделия;} \\ S - \text{площадь основания изделия.}$$

При решении большинства технических задач в машиностроении часто применяют пористые элементы простой геометрии типа цилиндра или втулки. При этом фактор формы Φ изменяется для цилиндрических изделий в диапазоне 0,05-7. Для втулок Φ изменяется в диапазоне 0,5-5. Поэтому можно с достаточной для инженерных расчетов точностью (погрешность не превышает 3-5%) действительную графическую зависимость $\eta = \eta(\Phi)$ заменить кусочно-линейной аппроксимацией. В случае необходимости более точного представления $\eta = \eta(\Phi)$ достаточно разделить диапазон изменения $\eta = \eta(\Phi)$ на определенное число интервалов и в пределах каждого интервала заменить $\eta = \eta(\Phi)$ линейной зависимостью. Так, например, для зависимости (см. рис. I)

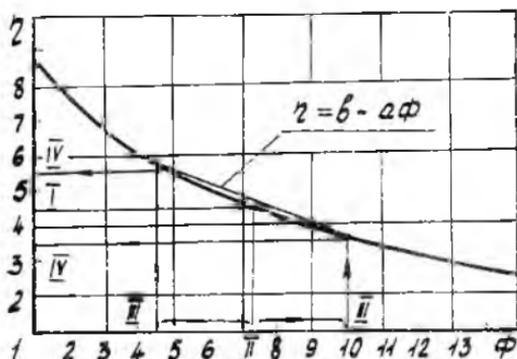
$$\eta = \beta - \alpha\Phi \quad (11), \text{ где } \beta = \frac{\eta_1\Phi_2 - \eta_2\Phi_1}{\Phi_2 - \Phi_1} \quad (12), \alpha = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\Phi_2 - \Phi_1} \quad (13),$$

η_1, η_2 - степени опрессовки на торцах пористых изделий; Φ_1, Φ_2 - условные факторы формы; $\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ - фактический фактор формы пористого элемента.

Используя зависимости (5), (6), (9), (11), получим общие уравнения для определения гидравлических потерь в пористых конструкциях

$$\Delta P^R = A(\nu) \int_{L_1}^{L_2} \frac{[\beta - \alpha\Phi(L)](1 - \Pi_3)^2}{\{1 - [\beta - \alpha\Phi(L)](1 - \Pi_3)\}^3} dL \quad (14)$$

для ламинарного и



Р и с. I. Зависимость степени опрессовки η от фактора формы Φ

$$\Delta P^r = A_1(v) \int_{L_1}^{L_2} \frac{\{[\delta - \alpha \Phi(L)](1 - \Pi_3)\}^2 dL}{\{1 - [\delta - \alpha \Phi(L)](1 - \Pi_3)\}^3} + B(v) \int_{L_1}^{L_2} \frac{\{[\delta - \alpha \Phi(L)](1 - \Pi_3)\} dL}{\{1 - [\delta - \alpha \Phi(L)](1 - \Pi_3)\}^3} \quad (15)$$

для турбулентного режимов течения жидкости.

Для выполнения расчетов гидравлических потерь в конкретном изделии из пористого материала необходимо определить зависимость $\Phi = \Phi(L)$ и вычислить интегралы в (14) и (15).

Таким образом, для каждого типа конструкции из пористого материала интегралы должны быть вычислены с учетом геометрических особенностей образцов.

Выражение для гидравлических потерь в изделиях цилиндрической формы из МР после выполнения подстановок, интегрирования (14), (15) и выполнения преобразований, с учетом того, что $\Phi_4 = 2L/D$, принимает вид

$$\Delta P^l = \frac{A(v)}{\bar{\rho}_3 m} \left\{ \ln \left| \frac{\kappa + mL_2}{\kappa + mL_1} \right| + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\delta + \kappa}{\kappa + mL_1} \right)^2 - \left(\frac{\delta + \kappa}{\kappa + mL_2} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{\delta + \kappa}{\kappa + mL_2} - \frac{\delta + \kappa}{\kappa + mL_1} \right) \right\} \quad (16)$$

для ламинарного и

$$\Delta P^r = \frac{A_1(v)}{\bar{\rho}_3 m} \left\{ \ln \left| \frac{\kappa + mL_2}{\kappa + mL_1} \right| + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\delta + \kappa}{\kappa + mL_1} \right)^2 - \left(\frac{\delta + \kappa}{\kappa + mL_2} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + 2 \left(\frac{\delta + \kappa}{\kappa + mL_2} - \frac{\delta + \kappa}{\kappa + mL_1} \right) \right\} + \frac{B(v)}{\bar{\rho}_3^2 m} \left\{ \left(\frac{1}{\kappa + mL_2} - \frac{1}{\kappa + mL_1} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left[\frac{\delta + \kappa}{(\kappa + mL_1)^2} - \frac{\delta + \kappa}{(\kappa + mL_2)^2} \right] \right\} \quad (17)$$

для турбулентного режимов течения;

$$\bar{\rho}_3 = 1 - \Pi_3; \quad m = 2a/D; \quad \kappa = 1/\rho_3 - \delta;$$

$$A(v) = \frac{153}{2d_n^2} \mu v; \quad A_1(v) = \frac{113}{2d_n^2} \mu v; \quad B(v) = \frac{1,42}{2d_n} \rho_c v^2;$$

где D - диаметр образца.

Сравнение результатов расчетов по предложенной методике с расчетами по осредненным параметрам представлено на рис. 2, где относительные гидравлические потери $\Delta \bar{P} = \Delta P_{пср} / \Delta P_{пвар}$ - безразмерная величина, равная отношению гидравлических потерь пористого изделия, вычисленных по его средней пористости $\Pi_{ср}$, к гидравлическим потерям того же изделия, определенных с учетом изменения пористости $\Pi_{вар}$ вдоль направления фильтрации. Расчеты проведены для ламинарного режима течения жидкости. Для турбулентного режима течения характер изменения $\Delta \bar{P}$ сохраняется.

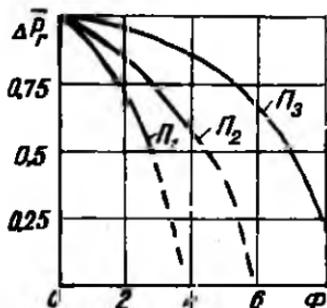
Из полученных результатов следует, что с увеличением фактора формы (длины изделия) $\Delta \bar{P}$ убывает и погрешности неучета изменения пористости могут быть значительными (до 100% и более).

Велико также влияние средней пористости изделий, с увеличением которой ошибка в определении гидравлических потерь за счет неучета изменения пористости уменьшается. И в пределе, если изменения пористости нет (изотропная среда) и $d\Pi/dL = 0$, то уравнения (14) и (15) после взятия интегралов принимают вид известных зависимостей для изотропной пористой среды, приведенных, например, в [4]. Пунктиром на рис. 2 показаны значения $\Delta \bar{P}$,

полученные по экстраполированным значениям $\zeta = \zeta(\Phi)$. Предельно максимальные значения ζ_{max} могут быть заданы в каждом случае. Действительные предельные значения для ζ_{max} зависят от вида пористого материала и технологии его изготовления. Точка пересечения кривых с осью Φ означает, что для заданной средней пористости $\Pi_{ср}$ получен предельный (расчетный) фактор формы Φ_n , при котором один из торцов пористого изделия становится теоретически непроницаем.

Таким образом, в результате проведенной работы получены уравнения фильтрации жидкости в пористой среде с переменной пористостью в направлении течения жидкости. Анализ полученных зависимостей показал, что погрешности от неучета изменения пористости могут достигать 100% и более.

Показано, что существуют предельные длины, при которых порис-



Р и с. 2. Влияние фактора формы Φ изделия из МР на относительные гидравлические потери $\Delta \bar{P}$: Π_1 - пористость изделия; $\Pi_2 = 50\%$; $\Pi_3 = 60\%$

тая конструкция становится теоретически непроницаемой. Предельные значения длин пористых образцов зависят, в основном, от средней пористости, степени опрессовки, фактора формы.

Л и т е р а т у р а

1. П а в л о в с к а я Е.И., Ш и б р я е в Б.Ф. Металлокерамические фильтры.-М.:Недра, 1967. - 164 с.

Б е л о в С.В. Пористые металлы в машиностроении.-М.:Машиностроение, 1981. - 247 с.

3. С т а р о д о м с к и й М.В. и др. Гидравлические характеристики пористых волокнистых материалов.- В сб.: Теплофизика и теплотехника.- АН УССР, 1970, с.16-18. Вып.16.

4. И з ж е у р о в Е.А., Б е л о у с о в А.И. Некоторые особенности течения жидкостей в материале МР. - В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов.- Куйбышев: КуАИ, 1976, с.28-32.

5. Б е л я н и н П.Н., Ч е р н е н к о Ж.С. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем.-М.:Машиностроение, 1964.- - 294 с.

6. П и ц у г и н Д.Ф., Ш а й м о р д а н о в Л.Г. Влияние формы и объема изделия из МР на его упруго-демпфирующие характеристики.-В сб.:Вибрационная прочность и надежность двигателей летательных аппаратов.- Куйбышев: КуАИ, 1977, с.20-24.

УДК 621.378.9:658.562

О.А.Журавлев, В.П.Кабанова, А.И.Федосов, Л.И.Федосова

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВИБРООПОР МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Традиционные методы экспериментального исследования колебаний виброопор (датчики, щупы, песочные фигуры) не могут с достаточной точностью дать распределение амплитуд смещений точек рабочей поверхности.

Более достоверные результаты могут быть получены с помощью метода голографической интерферометрии, в котором амплитуды сме-