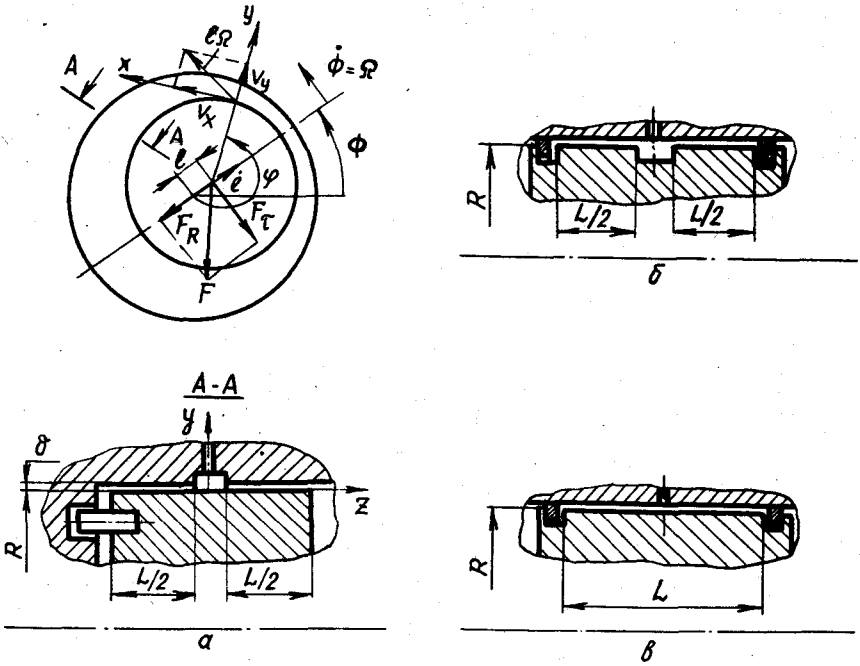
УДК 621.438

В.Б.Балякин

ВЫБОР ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ И ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Гидродинамические демпферы (ГДД) нашли широкое применение в опорах роторов авиационных ГТД. Использование их позволяет решать вопросы повышения эффективности современных двигателей. Наибольшее распространение в двигателестроении получили короткие (проточные и непроточные) и длинные ГДД (рис. 1).



Р и с. 1. Схема гидродинамического демпфера и принятая система координат: а – короткий проточный ГДД; б – короткий непроточный ГДД; в – длинный ГДД

Условия работы гидродинамических демпферов ГТД таковы, что в демпферном зазоре могут иметь место турбулизация и кавитация смазки. Кроме того, большое значение приобретают инерционные силы, возникающие в демпфирующем слое. Это подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями как у нас в стране, так и за рубежом/1-3/. Существующие методики расчета ГДД в одних случаях достаточно сложны, а в других не учитывают указанных особенностей работы ГДД в комплексе.

Для того чтобы полученные закономерности можно было распространить на все устройства данного типа и подобные процессы, происходящие в них, исследования необходимо проводить в безразмерных параметрах, полученных на основании теории размерностей и подобия /4/. Это, в свою очередь, позволит уменьшить число величин, которые необходимо связывать функциональной зависимостью, а следовательно, и упростить ее. Действительно, согласно Π - теореме, вместо N независимых величин, характеризующих работу устройства, получим $N-r$ безразмерных критериев подобия, где r - число размерностей независимых величин.

Гидродинамический демпфер как устройство характеризуется следующими четырьмя геометрическими параметрами: радиусом R, длиной L, демпферным зазором δ, эксцентриситетом e. Состояние рабочей жидкости в демпферном зазоре может быть описано тремя параметрами - динамической вязкостью μ, плотностью ρ и давлением подачи p_K. Динамическое поведение демпфера оценивается еще тремя характеристиками - скоростью прецессии Ω, динамическим давлением смазки p и гидродинамической силой F. Таким образом, ГДД как динамическую систему характеризуют десять независимых размерных величин. Первые восемь ($R, L, \delta, e, \mu, \rho, p_K$ и Ω) являются определяющими величинами, а две последние (p и F) - определяемыми.

Определяемые величины являются функцией определяющих:

$$p, F = f(R, L, \delta, e, \mu, \rho, p_K, \Omega).$$

Найдем безразмерные критерии подобия для гидродинамического демпфера. Имеющиеся N = 10 величин $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \ldots, \Pi_N$, характеризующих устройство и его работу, дают $N-r$ = 7 критериев подобия

$$\Pi = K[\Pi_1]^{x_1} \ldots [\Pi_N]^{x_N},$$

где K - числовая константа.

Размерность величины n_i представим в виде

$$[n_i] = [L]^{A_i} [M]^{B_i} [\tau]^{C_i}.$$

Здесь $[L]$ - размерность длины, м; $[M]$ - размерность массы, кг; $[\tau]$ - размерность времени, с.

Числа $x_1, x_2, \ldots, x_N$ должны быть такими, чтобы размерность Π равнялась нулю. Их находят путем решения системы уравнений

$$\left.\begin{aligned} &A_1 x_1 + A_2 x_2 + \ldots + A_N x_N = 0; \\ &B_1 x_1 + B_2 x_2 + \ldots + B_N x_N = 0; \\ &C_1 x_1 + C_2 x_2 + \ldots + C_N x_N = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (I)$$

Система (I) имеет $N-r$ линейно независимых решений. Каждое решение, состоящее из N значений x_i, дает один критерий подобия. Подставим степени размерностей A_i, B_i, C_i для каждой величины n_i (в нашем случае $n_1 = R$, $n_2 = L$, $n_3 = \delta$, $n_4 = e$, $n_5 = \mu$, $n_6 = \rho$, $n_7 = \rho_к$, $n_8 = \Omega$, $n_9 = p$, $n_{10} = F$). Тогда система уравнений (I) примет вид

$$\left.\begin{aligned} &x_1 + x_2 + x_3 + x_4 - x_5 - 3x_6 - x_7 - x_9 + x_{10} = 0; \\ &x_5 + x_6 + x_7 + x_9 + x_{10} = 0; \\ &-x_5 - x_6 - 2x_7 - x_8 - 2x_9 - 2x_{10} = 0 \ . \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Система (2) имеет $N-r$ = 7 линейно независимых решений. При решении системы (2) семь величин n_i задаются произвольно, остальные три находятся из (2) такие, что критерий Π является безразмерной величиной.

Примем $x_2 = 1$; $x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = 0$, тогда из (2) получим $x_1 = -1$; $x_9 = x_{10} = 0$.

Из первого решения, приняв K = I,0, получим критерий

$$\Pi_1 = K n_1^{x_1} n_2^{x_2} n_3^{x_3} n_4^{x_4} n_5^{x_5} n_6^{x_6} n_7^{x_7} n_8^{x_8} n_9^{x_9} n_{10}^{x_{10}} = n_1^{-1} n_2^{1} = R^{-1} L.$$

Обозначим этот критерий $\lambda = L/R$ и назовем его безразмерной длиной демпфера.

Аналогично для второго решения, приняв $x_3 = 1$, $x_2 = x_4 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = 0$, $K = 1,0$, получим $\Pi_2 = n_1^{-1} n_3 = R^{-1}\delta$. Обозначим

второй критерий $\psi = \delta / R$ и назовем его безразмерным демпферным зазором.

Для третьего решения, положив $x_4 = 1, x_1 = x_2 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = 0, k = 1,0$, получим

$$\Pi_3 = n_4 n_3^{-1} = e \delta^{-1}.$$

Обозначим третий критерий $\varepsilon = e / \delta$ и назовем его относительным эксцентриситетом.

Для четвертого решения, приняв $x_7 = 1, x_5 = -1, x_2 = x_4 = x_6 = x_8 = x_{10} = 0$ и (для удобства вычислений) $k = \frac{1}{12}$, получим

$$\Pi_4 = \frac{1}{12} n_1^{-2} n_3^2 n_5^{-1} n_7 n_8^{-1} = \frac{1}{12} R^{-2} \delta^2 \mu^{-1} p_k \Omega^{-1}.$$

Обозначим четвертый критерий $P_k = \frac{\delta^2 p_k}{12 \mu \Omega R^2}$ и назовем его безразмерным давлением подачи смазки.

Для пятого решения, положив $x_8 = 1, x_1 = x_2 = x_4 = x_7 = x_9 = x_{10} = 0$, $k = 1,0$, найдем

$$\Pi_5 = n_3^2 n_5^{-1} n_6 n_8 = \delta^2 \mu^{-1} \rho \Omega .$$

Обозначим пятый критерий $\sigma = \delta^2 \rho \Omega / \mu$ и назовем его параметром инерции.

Для шестого решения, приняв $x_9 = 1, x_5 = -1, x_2 = x_4 = x_6 = x_7 = x_{10} = 0, k = \frac{1}{12}$, получим

$$\Pi_6 = \frac{1}{12} n_1^{-2} n_3^2 n_5^{-1} n_8^{-1} n_9 = \frac{1}{12} R^{-2} \delta^2 \mu^{-1} \Omega^{-1} p .$$

Обозначим шестой критерий $P = \frac{\delta^2 p}{12 \mu \Omega R^2}$ и назовем его безразмерным динамическим давлением.

Для последнего решения, приняв $x_{10} = 1, x_5 = -1, x_2 = -1, x_4 = x_6 = x_7 = x_9 = 0$, $k = \frac{1}{12}$, определим

$$\Pi_7 = \frac{1}{12} n_1^{-3} n_2^{-1} n_3^2 n_5^{-1} n_8^{-1} n_{10} = \frac{1}{12} R^{-3} L^{-1} \delta^2 \mu^1 \Omega^{-1} F.$$

Обозначим седьмой критерий $\bar{F} = \frac{\delta^2 F}{12 \mu \Omega R^3 L}$ и назовем его безразмерной гидродинамической силой.

В дальнейшем безразмерные критерии подобия будем называть безразмерными параметрами. Определяемыми параметрами в демпфере явля-

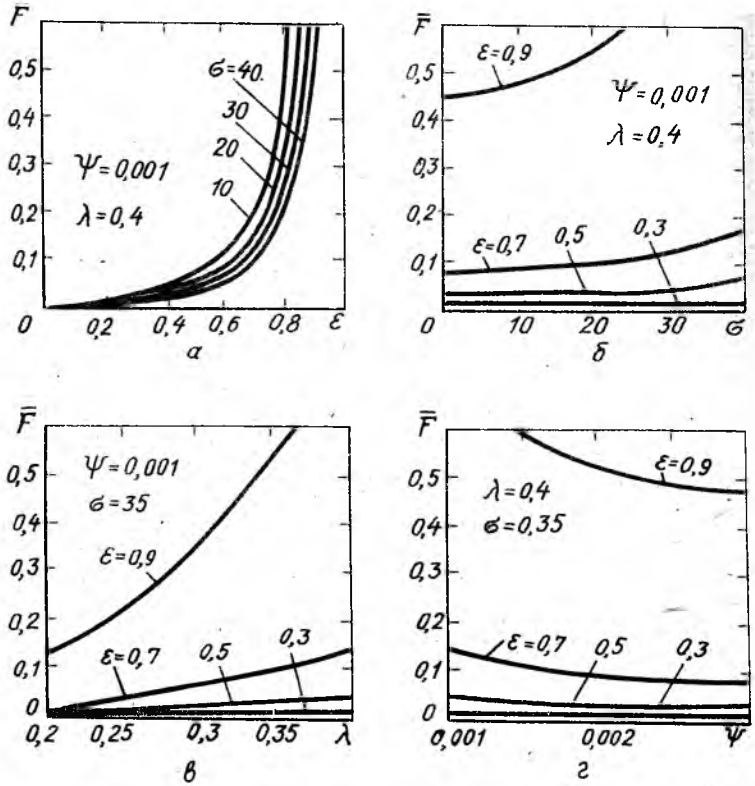
ются безразмерное динамическое давление P и безразмерная гидродинамическая сила $\bar{F}$. Остальные пять безразмерных параметров $\lambda, \psi, \varepsilon$, P_K и σ – определяющие. Для изучения процессов, происходящих в демпферном зазоре, необходимо найти зависимости определяемых параметров P и $\bar{F}$ от определяющих. Исследования желательно проводить во всем диапазоне изменения всех определяющих параметров. Однако в зависимости от конструктивных особенностей ГДД и условий их работы определяющие параметры в различной степени влияют на динамические характеристики. Поэтому необходимо выявить параметры, оказывающие наиболее сильное влияние на эти характеристики. Например, параметр λ не влияет на безразмерное динамическое давление P в длинном ГДД, так как течением смазки в осевом направлении пренебрегают. В этом случае безразмерную длину демпфера можно рекомендовать принимать равной $\lambda = 4$ [1], что характеризует течение лишь в окружном направлении. Давление подачи P_K не влияет на гидродинамическую силу при полном охвате вибратора смазкой.

Найдем пределы изменения определяющих параметров в демпферах роторов ГТД. В реальных опорах величины, характеризующие демпфер и его работу, принимают значения R = 70...120 мм; L = 20...40 мм; δ =0,1...0,3 мм; μ =$1\cdot10^{-3}...5\cdot10^{-3}$ Н·с/м^2; ρ =720...750 кг/м^3; P_K =0...0,5 МПа; Ω = 0...2000 с$^{-1}$, что соответствует практическим значениям безразмерных параметров в пределах λ = =0,2...0,4; ψ = 0,001...0,003; σ = 0 ...40. Относительный эксцентриситет теоретически может изменяться от 0 до 1, однако значения параметра $\varepsilon > 0{,}7$ реализуется крайне редко, а при $\varepsilon > 0{,}9$ происходит касание вибратора о статор, так как рабочий демпферный зазор становится соизмеримым с допусками на диаметральные размеры демпфера.

Таким образом, ε = 0...0,9. Параметр P_K теоретически может изменяться от 0 до ∞, однако реально P_K = 0...1.

Эти пределы изменения определяющих параметров необходимо использовать при анализе влияния различных факторов на динамические характеристики ГДД.

Для удобства анализа в ряде задач вместо одного из определяющих безразмерных параметров можно использовать комплекс из безразмерных критериев, включающий отбрасываемый параметр. Например, при исследовании влияния турбулизации смазки [2] вместо безразмерной длины λ



Р и с. 2. Зависимости безразмерной гидродинамической силы $\bar{F}$ от безразмерных параметров $\varepsilon; \sigma; \lambda; \psi$

используют параметр $Re = \sigma \varepsilon \lambda / \psi$. Для ГДД авиационных ГТД пределы изменения параметра Re составляют 0...15000.

Влияние процессов, происходящих в демпферном зазоре, на динамическое поведение ГДД удобно оценивать по распределению динамического давления, так как оно является дифференциальной характеристикой, исходной для определения интегральных динамических параметров. В этом случае, как показано в [3], значительно упрощается экспериментальная проверка полученных теоретических закономерностей. При проектировании же ГДД для опор роторов определяемым параметром является гидродинамическая сила, которая оказывает влияние на амплитудно-частотную характеристику роторной системы. Гидродинамическая сила F может быть представлена в виде двух взаимно перпендикулярных составляющих F_τ и F_R (рис. 1).

Аналитические выражения для безразмерных определяемых параметров P и $\bar{F}$ были получены в работе [5] для случая полного охвата короткого непроточного ГДД смазкой с учетом ее турбулизации. Функциональные зависимости безразмерной гидродинамической силы от определяющих параметров для этого случая приведены на рис. 2. Из графиков видно, что наибольшее влияние на безразмерную силу $\bar{F}$ оказывает безразмерный эксцентриситет ε. Полученные зависимости значительно облегчают проектирование ГДД, позволяя целенаправленно выбирать их параметры.

Библиографический список

1. Сергеев С.И. Демпфирование механических колебаний. - М.: Физматгиз, 1959. - 408 с.

2. Nelson C.C. The effect of turbulence and fluid inertia in a squeeze film bearing damper.-AIAA Pep.-1980.-1262 p.

3. Белоусов А.И., Балякин В.Б., Новиков Д.К. Экспериментальное исследование распределения давления в слое смазки короткого гидродинамического демпфера //Трение и износ. - 1985. - Т. VI, № 4. - С. 648-652.

4. Алабужев П.М., Минкевич Л.М. Основы теории подобия и моделирования. - Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1966. - 83 с.

5. Белоусов А.И., Балякин В.Б. Линеаризованная теория короткого гидродинамического демпфера с полным охватом /Куйбыш. авиац. ин-т. - Куйбышев, 1985. - 17 с. - Деп. в ВИНИТИ 25.03.1985, № 2076.