

5. А.с. № 1280358 СССР, МКИ С01М03/02. Стенд для криогенных испытаний уплотнений на герметичность / В.А.Борисов, Ф.В.Паровай, В.Э.Кулев и др. - Оpubл. 30.12.1986; Бюл.№ 48 // Открытия. Изобретения. - № 3936534; Заявл. 6.08.1985.

УДК 621.643.4

И.С.Ракитина, А.А.Сидоренко, Ф.С.Хусаинов

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУКАВОВ И СИЛЬФОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ГТД

В турбопроводных коммуникациях современных ГТД и летательных аппаратов широко применяются гибкие металлические рукава (ГМР) и сильфонные компенсаторы (СК), имеющие в качестве герметизирующего элемента металлическую гофрированную оболочку - сильфон [1]. Постоянным сопутствующим фактором эксплуатации ГМР и СК является вибрация, уровень которой во многом зависит от рассеяния энергии в этих элементах.

Для решения нелинейных задач динамики рукавов и компенсаторов необходимо знать статические упругофрикционные характеристики ГМР, а также амплитудно-частотные характеристики и зависимость декремента колебаний δ от амплитуды колебаний СК.

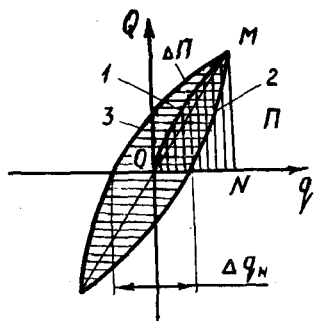
Упругофрикционные характеристики ГМР определяли из петель гистерезиса (рис.1), полученных экспериментально при статическом циклическом деформировании рукава на специальном стенде.

Экспериментальные линии первого нагружения удовлетворительно аппроксимируются зависимостью [2]

$$Q = [A + B/q^S]q, \quad (1)$$

где Q - сила, приложенная к ГМР; q - перемещение ГМР; S - постоянная; A и B - параметры.

Р и с. 1. Зависимость между усилием и перемещением за цикл нагружения: 1-линия первого нагружения; 2-разгрузка; 3 - нагрузка



Коэффициенты, входящие в выражение (1), зависят от условий закрепления рукава, его диаметра, конструкции, числа оплеток, величины внутреннего давления и определяются расчетно-экспериментальным путем.

Для ГМР без давления $S = -0,985$ (одна оплетка) и $S = -0,95$ (две оплетки). При наличии давления в рукаве $S = -0,3$ (для любого числа оплеток).

Для расчета динамических характеристик ГМР принята расчетная модель в виде эквивалентного стержня, состоящего из двух соосных оболочек - внутренней (гофрированной металлической) и внешней (оплетки). Для внутренней оболочки выполняется закон Гука. Для внешней оболочки окружное напряжение определим по безмоментной теории:

$$\sigma_0 = \frac{p D_H}{2\delta},$$

где p - давление в рукаве; D_H - наружный диаметр рукава; δ - толщина внешней оболочки.

Окружное напряжение во внешней силовой оболочке можно выразить, учитывая его неупругую составляющую, связанную с рассеянием энергии, аналогично зависимости (1):

$$\sigma_0 = [C + D|\epsilon|^S] \epsilon, \quad (2)$$

где C и D - коэффициенты, зависящие от условий закрепления рукава, его конструкции и величины внутреннего давления; ϵ - деформация. Связь между коэффициентами C и D в выражении (2) и параметрами A и B в уравнении (1) устанавливается из закона сохранения энергии

$$\int_0^l Q dq = \Pi, \quad (3)$$

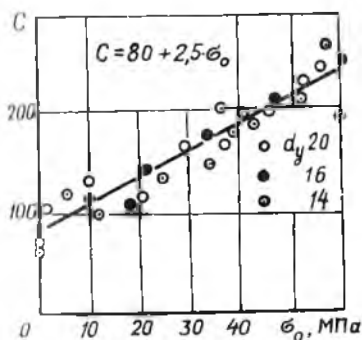
где l - длина рукава; Π - потенциальная энергия эквивалентного стержня.

Для эквивалентного коаксиального стержня потенциальную энергию деформации выразим в виде суммы:

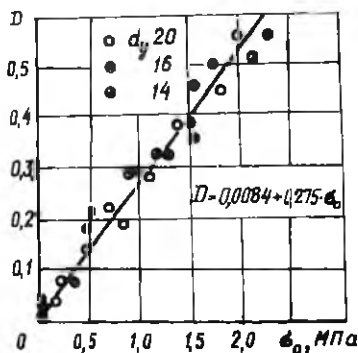
$$\Pi = \int_0^l \int_0^{\epsilon} \int_0^F E_{0\delta} \epsilon d\epsilon dF dx + \int_0^l \int_0^{\epsilon} \int_0^F [C + D|\epsilon|^S] \epsilon d\epsilon dF dx,$$

где $E_{0\delta}$ - модуль упругости гофрированной оболочки; F - площадь ее поперечного сечения; x - текущая координата.

Таким образом, используя соотношение (3), можно экспериментально определить коэффициенты C и D . На рис. 2 и 3 представлены графики зависимостей коэффициентов C и D от напряжения σ_0 для



Р и с. 2. Зависимость коэффициента C от окружного напряжения и оплетке



Р и с. 3. Зависимость коэффициента D от окружного напряжения в оплетке

рукавов с условными диаметрами $d_y = 14, 16, 20$ мм и одной оплеткой. Они удовлетворительно аппроксимируются выражениями

$$C = 80 + 2,5 \sigma_0 ;$$

$$D = 0,0084 + 2,75 \sigma_0 .$$

Для подтверждения полученных закономерностей составлена программа на ЭВМ и просчитаны амплитудно-частотные характеристики шестнадцати металлических рукавов различной конструкции с соотношением $\frac{L}{d_y} \leq 25$.

В качестве примера в таблице приведены результаты расчетного и экспериментального определения резонансных частот и амплитуд колебаний металлического рукава НвД0449032-2-20-2Ю-0,45 диаметром 20 и длиной 292 мм. внутреннее давление было принято равным 10,5 МПа, а виброускорение - 30 м/с².

Параметры	Расчет	Эксперимент
Резонансная амплитуда A_p , мм	0,611	0,65
Резонансная частота f_p , Гц	181,6	179

Экспериментальные частотные зависимости продольных колебаний СК с учетом нелинейности можно аппроксимировать следующим выражением:

$$f = f_0 K_w. \quad (4)$$

Здесь f - частота колебаний при заданном виброускорении; f_0 - собственная частота колебаний;

$$K_w = 1 - 0.1 \left(\frac{d_y}{90} \right)^{0.5} \left(\frac{z}{3} \right)^{0.8} \left(\frac{11}{n_r} \right)^{0.85} \frac{1}{j} \lg w, \quad (5)$$

где z - число слоев гофрированной оболочки; n_r - количество гофров; j - номер форм колебаний ($w \gg 1$ м/с²).

Как видно из выражения (5), СК является системой с "мягкой" нелинейностью.

демпфирующие свойства СК оцениваются коэффициентом поглощения

$$\psi = \frac{\Delta \Pi}{\Pi},$$

где $\Delta \Pi$ - энергия, необратимо рассеянная за цикл колебаний (площадь петли гистерезиса); Π - амплитудное значение потенциальной энергии (площадь треугольника OMN , см. рис. 1).

Коэффициент ψ связан с логарифмическим декрементом колебаний σ соотношением [3]

$$\psi = 2\sigma. \quad (6)$$

Экспериментальное определение декрементов колебаний σ СК проводилось на электродинамическом вибростенде ВЭС-400А. Декремент колебаний можно вычислить по формуле

$$\sigma = \frac{w}{4\pi f_p^2 A_p}. \quad (7)$$

Универсальность и удобство выражения (7) заключается в том, что для определения декремента необходимо знать только резонансные частоту f_p и амплитуду A_p .

аналитическая зависимость декремента от амплитуды колебаний и конструктивных параметров имеет следующий вид:

$$\sigma = B_1 (z-1)^{0.5} d_y + B_2 \left(1 + \frac{22}{n_r} \right) A_p^\sigma, \quad (8)$$

где $B_1 = 7 \cdot 10^{-5}$ для $d_y = 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$ мм и высоты гофра $H = 7,2$ мм; $B_1 = 4,5 \cdot 10^{-5}$ для $d_y = 32, 40, 50, 60$ и $H = 4,2$ мм; $B_2 = 0,012 \left(\frac{100}{d_y}\right)^{0,2}$; $\gamma' = \left(\frac{d_y}{100}\right)^{0,4}$.

Соотношения (4), (5), (6), (8) позволяют выполнить расчет около-резонансных амплитуд вынужденных колебаний СК с учетом рассеяния энергии при колебаниях.

Библиографический список

1. Крюков А.И., Глинкин И.М., Фисинин В.И. Гибкие металлические рукава. - М.: Машиностроение, 1970. - 204 с.
2. Меерсон М.Г. исследование статических и динамических характеристик гибких фторопластовых трубопроводов двигателей летательных аппаратов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Уфа, 1973. - 21 с.
3. Итоаев В.К., Хусайнов Ф.С. Демпфирующие характеристики компенсаторов // Тр. НИИД. - М., 1984. - Ч. П. - С. 116-122.

УДК 621.431.75:534

В.К.Семеновичев, В.И.Костин, А.А.Бокша

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ГТД ПО ОТСЧЕТАМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

Опыт вибрационных исследований ГТД указывает на важное значение для оценки их технического состояния таких характеристик его элементов, как добротность Q и резонансная частота f_0 [1-3]. При измерениях Q и f_0 допустимо использование гипотез о линейности анализируемых механических конструкций и неперекрывании энергетических полос резонансных кривых [1,2]. Рассмотрим получение динамических характеристик при кинематическом характере возбуждения колебаний.

Предполагая постоянной спектральную плотность мощности сигнала возбуждения $S_x(f)$ в занимаемой конструкцией полосе частот, для спектральной плотности мощности $S_y(t)$ анализируемого сигнала $y(t)$ (перемещения, скорости или напряжения) в выбранной точке ГТД будем иметь

$$S_y(f) = |H(f)|^2 S_x(f). \quad (1)$$