

ДЕМПФИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТОРОПЛАСТОВОГО ШЛАНГА

Фторопластовые шланги широко используются в трубопроводных коммуникациях авиационных двигателей и летательных аппаратов. Обладая хорошей податливостью к изгибным деформациям, шланги обеспечивают соединение подвижных элементов и агрегатов самолета и двигателя, позволяют резко снизить уровень монтажных и температурных напряжений в жестких трубопроводах, что увеличивает надежность трубопроводных систем.

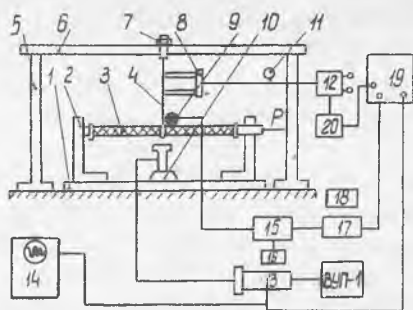
Шланг представляет собой гладкостенную фторопластовую камеру, обеспечивающую герметизацию рабочей жидкости или газа, покрытую снаружи проволоочной оплеткой, которая является силовым элементом и воспринимает все возникающие усилия. Гибкая часть шланга заделывается в концевую арматуру.

При вынужденных колебаниях шланга в системе коммуникаций решающую роль для его вибрационной прочности играют резонансные амплитуды. При определении этих амплитуд необходимо учитывать демпфирующие свойства фторопластового шланга, которые изучены недостаточно.

В настоящей работе установлено, что основным источником диссипативных сил фторопластового шланга является конструкционное демпфирование в проволоочной оплетке. Оплетка, выполняя свое основное назначение — повышение прочности шланга — одновременно участвует и в демпфировании колебаний. Между многочисленными проволочками и прядями оплетки по контактным поверхностям развиваются силы сухого трения, которые при колебаниях совершают необратимую работу, что и является главной причиной рассеяния энергии в колеблющемся шланге.

В качестве характеристики демпфирующих свойств фторопластового шланга, обладающего сильными диссипативными свойствами, был выбран логарифмический декремент колебаний, который определялся по осциллограмме свободных затухающих колебаний шланга. Логарифмический декремент, в отличие от коэффициента рассеяния, является универсальной характеристикой как слабо, так и сильно затухающих колебаний.

Демпфирующие характеристики фторопластовых шлангов исследовались на экспериментальной установке, блок-схема которой представлена на рис. 1. Установка работает по принципу сообщения упругой системе (шлангу) начальной энергии с последующим мгновенным удалением деформирующей связи, в результате чего шланг совершает затухающие колебания.



Р и с. 1. Блок-схема экспериментальной установки и измерительной аппаратуры для исследования демпфирующих характеристик фторопластового шланга

Шланг 3 подсоединяется к сменной арматуре, закрепляемой в опорах 2, которые установлены на плите I. Через штуцер в правой опоре поступает жидкость под давлением P . Статическая деформация гибкого шланга осуществляется с помощью тонкой проволоки 4, закрепленной в середине гибкой части специальным натяжным устройством 7. Оно установлено на балке 6, опирающейся на стойки 5. Проволока пережигается электрическим током, поступающим к электродам 8 от магнитного пускателя 12. В момент включения тока зажигается лампочка 11. Затухающие колебания шланга регистрируются емкостным 10 и фотооптическим 9 датчиками, установленными под серединой гибкой части шланга. Сигнал с емкостного датчика преобразуется усилителем 13, питаемым от выпрямителя ВУП-1, и записывается на пленку шлейфового осциллографа 19. Одновременно сигнал подается на экран электронного осциллографа 14 для визуального наблюдения. Сигнал с фотодатчика 9 усиливается аппаратурой, состоящей из усилителя 15 с батарейкой питания 16 и катодного повторителя 17 с источником питания 18, и также записывается на пленку осциллографа 19. Для синхронизации момента пережога проволоки 4 и записи затухающих колебаний на пленку применяется реле 20.

На экспериментальной установке было записано и расшифровано более 500 осциллограмм затухающих колебаний фторопластовых шлангов. При обработке опытных виброграмм для расчета декремента использовались размахи колебаний, которые можно точно замерить на осциллограмме, а не амплитуды, измеряемые с погрешностью. Для участка

осциллограммы, где записано K размахов, декремент δ вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{2}{K} \ln \frac{A_J}{A_{J+K}},$$

где A - размах колебаний, т.е. расстояние между вершиной и впадиной кривой затухания за половину периода $T/2$; J - порядковый номер размахов A ; K - число размахов.

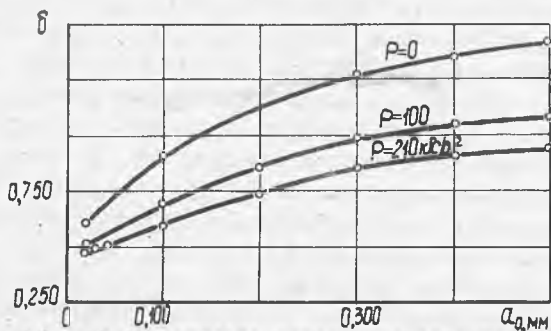
Полученный логарифмический декремент колебаний приписывается половине среднего размаха на участке

$$\frac{A_{Jcp}}{2} = \frac{A_J + A_{J+K}}{4}.$$

Таким образом, в нашем случае за величину, аналогичную амплитуде колебаний шланга a_0 выбрав половинный средний размах $A_{Jcp}/2$.

Расшифровка опытных осциллограмм позволила установить зависимости логарифмического декремента колебаний фторопластового шланга от различных параметров. Наиболее важными являются зависимости декремента δ от амплитуды колебаний и от внутреннего давления.

На рис. 2 в качестве примера приведен график зависимости декремента δ от амплитуды колебаний для двухоплеточного шланга ($Z = 2$ - число оплеток) с внутренним диаметром $d_y = 16$ мм при трех значениях давления P (0, 100 и 210 кгс/см²).



Р и с.2. Зависимость декремента от амплитуды колебаний для шланга с параметрами $Z=2$, $d_y=16$

Аналогичный вид имеют зависимости $\delta = f(a_0)$ для шлангов других диаметров. Из графиков $\delta = f(a_0)$ видно, что декремент растет при увеличении амплитуды колебаний a_0 . Такой характер зависимости объясняется следующим. Силы трения, развивающиеся по контактными поверхностям между проволочками и прядями оплетки, совершают работу лишь в том случае, когда происходит местное проскальзывание проволочек. С ростом амплитуды колебаний шланга местное проскальзывание между проволочками увеличивается, силы трения совершают большую необратимую работу, что и обуславливает рост декремента δ .

В таблицах I и 2 приведены значения логарифмического декремента одно- и двухоплеточного шланга при различных амплитудах ко-

Т а б л и ц а I

Значения логарифмического декремента при различных амплитудах колебаний и внутренних давлениях для однооплеточного фторопластового шланга ($Z = 1$)

d _y , мм	Давление в шланге p, кгс/см ²	Логарифмический декремент колебаний -δ					
		a ₀ ($\frac{A_{доп}}{2}$), мм - амплитуда колебаний					
		0,020	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500
10	0	0,200	0,390	0,550	0,670	0,755	0,825
	50	0,145	0,230	0,320	0,395	0,475	0,525
	110	0,100	0,160	0,220	0,270	0,320	0,355
12	0	0,235	0,460	0,630	0,735	0,820	0,890
	50	0,190	0,280	0,380	0,475	0,550	0,600
	110	0,145	0,200	0,270	0,320	0,365	0,410
16	0	0,295	0,520	0,710	0,835	0,930	0,990
	50	0,230	0,330	0,460	0,565	0,650	0,720
	110	0,170	0,260	0,360	0,445	0,500	0,550
20	0	0,355	0,670	0,840	0,960	1,040	1,095
	30	0,250	0,450	0,650	0,750	0,820	0,840
	50	0,200	0,375	0,550	0,645	0,700	0,725
25	0	0,395	0,715	0,960	1,100	1,190	1,250
	30	0,290	0,530	0,760	0,870	0,930	0,970
	50	0,235	0,445	0,655	0,755	0,800	0,835

Значения логарифмического декремента
для двухоплеточного фторопластового шланга ($z = 2$)

$d_{ш}$, мм	Давление в шланге P , кгс/см ²	Логарифмический декремент колебаний δ					
		$a_0 \left(\frac{A_{зср}}{2} \right)$, мм - амплитуда колебаний					
		0,020	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500
10	0	0,240	0,465	0,635	0,760	0,855	0,925
	100	0,175	0,290	0,400	0,495	0,560	0,600
	210	0,140	0,225	0,315	0,370	0,420	0,450
12	0	0,290	0,550	0,755	0,870	0,965	1,020
	100	0,220	0,350	0,500	0,610	0,670	0,710
	210	0,175	0,270	0,370	0,460	0,520	0,555
16	0	0,350	0,630	0,870	1,000	1,105	1,155
	100	0,260	0,440	0,605	0,720	0,780	0,830
	210	0,215	0,335	0,490	0,595	0,655	0,695
20	0	0,410	0,730	1,010	1,170	1,250	1,300
	50	0,320	0,550	0,770	0,905	0,970	1,015
	110	0,255	0,440	0,630	0,740	0,800	0,830

лебаний и давлениях внутри шланга, полученные при обработке опытных осциллограмм. На основе данных таблиц 1 и 2 можно построить экспериментальную зависимость $\delta = f(a_0)$ для любого шланга. Это дает возможность решить задачу нахождения резонансных амплитуд шланга при вынужденных колебаниях.

Известно, что при резонансе колебания носят практически монохроматический характер, т.е. происходят по гармоническому закону с частотой возбуждающей силы ω . К таким колебаниям применимо известное правило Видлера, согласно которому форма колебаний может приниматься такой, как если бы демпфирование полностью отсутствовало. При таком подходе во всех случаях вынужденных колебаний система с распределенными параметрами (шланг) обладает как бы одной степенью свободы. Поэтому при выводе расчетных формул можно воспользоваться известными результатами для колебаний систем с одной

степень свободы. При колебаниях шланга по I-й форме за обобщенную координату удобнее всего принять перемещение середины гибкой части.

Рассмотрим вынужденные колебания шланга от действия гармонической возмущающей силы

$$q(t) = q_0 \sin \omega t,$$

где q_0 - амплитуда возмущающей силы; t - время.

Стационарная незатухающая часть вынужденных колебаний описывается таким слагаемым [1]:

$$y = a_0 \sin(\omega t - \gamma),$$

где амплитуда колебаний a_0 шланга определяется формулой

$$a_0 = \frac{q_0}{c_{шл} \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\rho^2}\right)^2 + \left(\frac{2n}{\rho}\right)^2 \frac{\omega^2}{\rho^2}}}. \quad (1)$$

Здесь γ - сдвиг фазы; $c_{шл}$ - жесткость шланга, определяемая из его упругой характеристики; $2n$ - коэффициент силы неупругого сопротивления; y - перемещение; ρ - частота собственных колебаний шланга.

Для условий резонанса справедливо следующее равенство [2]:

$$\frac{2\pi}{\rho} = \frac{\delta}{\pi}. \quad (2)$$

Подставляя в формулу (1) условия резонанса $\omega = \rho$ и учитывая равенство (2) получим:

$$a_0 = \frac{q_0 \pi}{c_{шл} \delta}.$$

Отсюда находим значение логарифмического декремента δ , являющегося, в свою очередь, функцией амплитуды колебаний a_0

$$\delta(a_0) = \frac{\pi q_0}{c_{шл} a_0}. \quad (3)$$

Необходимо подчеркнуть, что соотношение (3) справедливо только для условий резонанса.

Наиболее распространенной причиной поперечных колебаний фторопластового шланга в системе коммуникаций двигателя или летательного аппарата является кинематическое возбуждение его опор крепления. Как известно [3], при кинематическом возбуждении роль амплитудного значения силы q_0 выполняет произведение заданной амплитуды смещения опоры $B_{оп}$ на жесткость шланга:

$$q_0 = C_{шл} B_{оп} \quad (4)$$

Подстановка выражения (4) в формулу (3) приводит к следующему соотношению:

$$\delta(a_0) = \frac{\pi B_{оп}}{a_c} \quad (5)$$

При работе фторопластового шланга на двигателе или летательном аппарате, а также при испытаниях шланга на вибростенде обычно контролируется заданная величина перегрузки n_g , представляющая собой отношение ускорения опоры к нормализованному ускорению силы тяжести. Связь величины амплитуды опоры с перегрузкой выражается формулой (3)

$$B_{оп} = \frac{248,49 n_g}{f^2} \quad (6)$$

где линейная частота колебаний f связана с угловой частотой ω известным соотношением

$$\omega = 2\pi f.$$

Подстановка формулы (6) в соотношение (5) приводит к следующему расчетному уравнению:

$$\delta(a_0) = 780,65 \frac{n_g}{f_{рез}^2} \frac{1}{a_0} \quad (7)$$

Здесь $f_{рез}$ - резонансная (собственная) частота колебаний шланга, так как выражение (7) справедливо только в условиях резонанса.

Используя уравнение (7) и экспериментальные зависимости $\delta = f(a_0)$, можно определить резонансную амплитуду шланга a_0 . Ввиду того, что обе части равенства (7) зависят от искомой величины a_0 , удобнее всего находить резонансную амплитуду графическим путем. В системе координат $\delta - a_0$, где представлена экспериментальная зависимость $\delta(a_0)$, аналогичная зависимости на рис. 2, строится кривая.

$$z(a_0) = 780,65 \frac{n_g}{f_{рез}^2} \frac{1}{a_0},$$

отражающая правую часть равенства.

(7). Очевидно, что абсцисса точки пересечения обеих кривых определяет резонансную амплитуду колебаний a_0 фторопластового шланга. На рис. 3 представлен пример графического решения уравнения (7) для однооплеточного фторопластового шланга ($z = 1$) при трех величинах перегрузки. Максимальные амплитуды колебаний указанного шланга находятся в пределах 0,202–0,428 мм.

Были проведены контрольные испытания шлангов на вибростенде с замером величины резонансных амплитуд a_0 . Отклонения экспериментальных значений a_0 от теоретических, полученных с использованием уравнения (7), не превышали 10%, что говорит о правильности разработанной методики.

Полученные в работе демпфирующие характеристики и расчетные формулы позволяют рассчитать резонансные амплитуды фторопластовых шлангов и оценить их вибрационную прочность при работе в системе коммуникаций двигателей и летательных аппаратов.

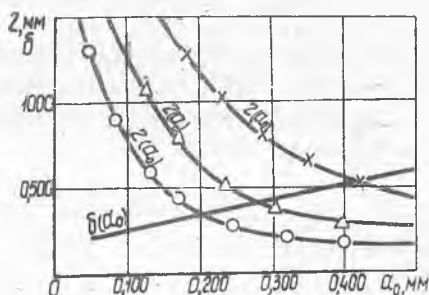


Рис. 3. Определение резонансной амплитуды шланга ($d_y = 16$, $z = 1$, $t = 30$ см, $P = 110$ кгс/см²) при различных величинах перегрузки n_g : —×— $n_g = 9$; —△— $n_g = 5$; —○— $n_g = 3$; — зависимость декремента от амплитуды δ

1. П а н о в к о Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара.-М.: Машиностроение, 1976.

2. П а н о в к о Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем.-М.: Физматгиз, 1960.

3. Х р о н и н Д.В. Теория и расчет колебаний в двигателях летательных аппаратов.-М.: Машиностроение, 1970.

УДК 621.438-621. 532-181.4

А.Н.Тихонов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ ВЫСОТ ЛОПАТОК РАБОЧЕГО КОЛЕСА НА ВХОДЕ И ВЫХОДЕ ДЛЯ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ВОЗДУШНОЙ МИКРОТУРБИНЫ С ПОЛНЫМ ПОДВОДОМ

В центростремительных микротурбинах (ЦС МТ) движение газа от периферии к центру рабочего колеса (РК) обуславливает необходимость увеличения высот лопаток от входа h_1 к выходу h_2 . Если это увеличение недостаточно, то произойдет снижение внутреннего к.п.д. ступени η_r вследствие неполного использования располагаемой степени расширения π_r . Если увеличение h_2 больше необходимого для прохода рабочего тела, то η_r также снижается, что объясняется значительной величиной осевой составляющей относительной скорости движения рабочего тела в каналах рабочих лопаток и возможностью появления зон отрыва потока. Чрезмерное увеличение h_2 связано, в частности, с возможностью появления вибрации при эксплуатации и деформации выходной кромки при изготовлении. Следовательно, должно быть такое соотношение $\frac{h_2}{h_1}$, при котором при прочих равных условиях ступень дает наибольшее значение η_r , а вибрация и деформация выходных кромок маловероятны.

Известны работы [1] и [2], где даны рекомендации по выбору отношения $\frac{h_2}{h_1}$. В работе [1] рекомендуется принимать $\frac{h_2}{h_1} = 2,17$, это отношение определялось путем измерения статического давления в конце косога срез соплового аппарата (СА). При постоянном зна-