

РАСЧЕТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛЬФОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЕКРЕМЕНТОВ КОЛЕБАНИЙ

Итбаев В.К., Карасев С.В., Мухамадеев В.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Ключевые слова: колебания; резонанс; диссипация; рассеяние; декремент; форма колебаний частоты; амплитудно-частотная характеристика; пик резонанса; гофрированная оболочка; сильфонный компенсатор.

Аннотация. Приведены результаты экспериментального определения декрементов колебаний на 78 образцах гофрированных оболочек (сильфонных) и на 22 образцах серийных сильфонных компенсаторов. Построены зависимости декрементов колебаний от амплитуды в области резонанса, подобрана аппроксимирующая функциональная зависимость, коэффициенты регрессии которой определялись при обработке соответствующих экспериментальных данных по методу наименьших квадратов с помощью зависимостей декрементов колебаний рассчитывались и строились амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) сильфонных компенсаторов.

CALCULATION OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS BELLWS COMPENSATORS USING EXPERIMENTAL VIBRATION DECREMENT CONSTRAINTS

Itbaev V.K., Karasev S.V., Mukhamadeev V.R.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa

Keywords: fluctuations; resonance; dissipation; scattering; decrement; the form of frequency fluctuations; amplitude-frequency response; resonance peak; corrugated shell; bellows compensator.

Abstract. Results of experimental determination of oscillation decrements on 78 samples of corrugated shells (bellows) and on 22 samples of serial bellows compensators are given. Dependencies of oscillation decrements on amplitude in resonance region are constructed, approximating functional dependence is selected, regression coefficients of which were determined during processing of corresponding experimental data by least squares method using dependencies of oscillation decrements are calculated and amplitude-frequency characteristics (ACF) of bellows compensators are built.

Для возможности расчета амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) сильфонных компенсаторов было проведено исследование их демпфирующих свойств при поперечных колебаниях.

В силу особенностей поперечных колебаний сильфонных компенсаторов, экспериментальное исследование высоких форм ($j > 1$) колебаний оказалось недоступным из-за ограниченных возможностей технического оборудования. В первую очередь – это измерение амплитуд колебаний компенсаторов; во вторую – создание приспособлений, не имеющих резонансов собственной конструкции в исследуемых диапазонах частот. Тем не менее, удалось исследовать поперечные колебания опытных и серийных компенсаторов трубопроводных систем ДЛА,

Dy 32, 40, 70, 80, 90, 100, различного конструктивного исполнения по основному тону ($j=1$) поперечных колебаний.

В результате обработки экспериментальных АЧХ поперечных колебаний компенсаторов были получены зависимости декрементов колебаний. На рисунках 1, 2 представлены зависимости декрементов от амплитуды при различных величинах внутреннего давления.

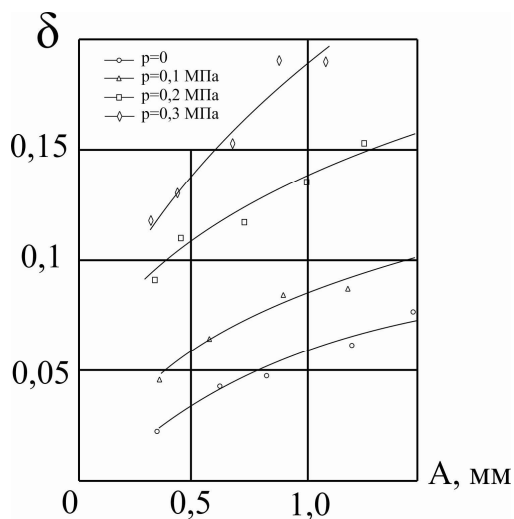


Рис. 1. Декременты поперечных колебаний по первой форме компенсаторов Dy 80, $n_T=22$, с трехслойной оболочкой $S_0=3*1,5$ мм

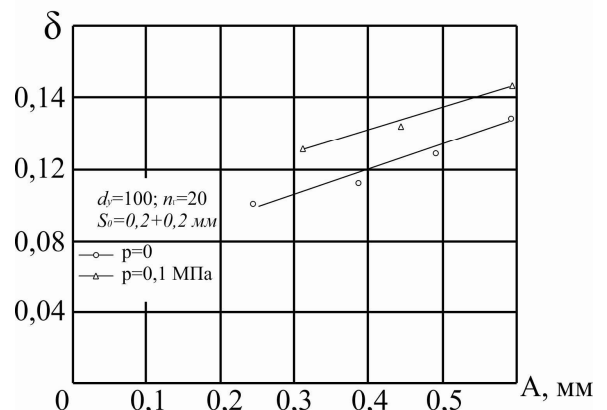
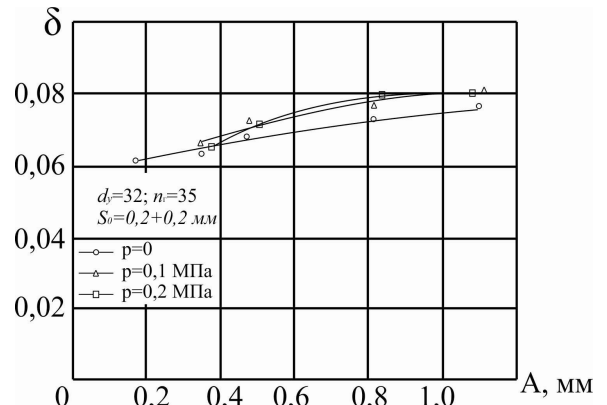


Рис. 2. Декременты поперечных колебаний компенсаторов Dy 32, Dy 100 по первой форме

По полученным в ходе экспериментов была подобрана аппроксимирующая функциональная зависимость вида

$$\delta = \delta_0 + C_p \left(0,01 \frac{A}{A_0} \right)^\chi, \quad (1)$$

где δ_0 , C_p , χ – коэффициенты регрессии, определялись при обработке соответствующих экспериментальных данных по методу наименьших квадратов; A – максимальная по длине оболочки амплитуда поперечных колебаний (в пучности формы); $A_0=10$ мкм – минимальная амплитуда, имеющая смысл в практических расчетах. В таблице 1 приведены коэффициенты регрессии для ряда испытанных компенсаторов.

На основе экспериментальных значений и зависимостей декрементов колебаний, для расчета АЧХ вновь проектируемых компенсаторов предлагаются следующие эмпирические зависимости для расчета коэффициентов:

$$\delta_0 = 7,2 \cdot 10^{-8} \left(\frac{l_{ГЧ}}{t} \right)^2 \frac{d_y h}{S_0 t} (k-1)^2,$$

$$C_p = 2,2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{t}{l_{ГЧ}} \right) \left(1 + \frac{p}{p_0} \right)^{1,5 \cdot 10^{-3} n_T^2 (k-1)^{0,6}}, \quad (2)$$

$$\chi = 0,35 \left(\frac{r_1 + r}{2S_0} \right).$$

Здесь: p – давление внутри компенсатора; p_0 – давление окружающей среды, но не менее 0,05 МПа.

Первое слагаемое (1) сохраняется только для многослойных компенсаторов.

Табл. 1. Значения коэффициентов аппроксимирующей функции

№ п/п	dy , мм	n_T	S_0 , мм	p , МПа	Коэффициенты		
					δ_0	C_p	χ
1	32	35	2*0,2	0	0,059	0,016	0,819
2				0,1	0,061	0,017	0,817
3				0,2	0,06	0,019	0,94
4	80	32	2*0,2	0	0,054	0,021	0,953
5				0,1	0,048	0,964	0,96
6				0,2	0,043	0,101	0,964
7				0,3	0,048	0,156	0,965
8				0,4	0,055	0,268	0,968
9				0,5	0,005	0,57	0,989
10	80	22	2*0,2м	0	0,002	0,073	0,942
11				0,1	0,061	0,004	0,94
12				0,2	0,05	0,016	0,943
13				0,3	0,004	0,078	0,968
14				0,4	0,017	0,077	0,979
15	80	22	2*0,2	0	0,024	0,045	0,857
16				0,1	0,018	0,074	0,898
17				0,2	0,017	0,093	0,923
18				0,3	0,031	0,118	0,93
19				0,4	0,082	0,08	0,941
20	80	22	3*0,2	0	0,063	0,026	0,96
21				0,1	0,081	0,052	0,967
22				0,2	0,115	0,067	0,965
23				0,3	0,106	0,128	0,989
24	100	20	2*0,2	0	0,07	0,114	0,971
25			2*0,2	0,1	0,167	0,047	0,987

Экспериментальные исследования испытываемых образцов показали, что для компенсаторов, имеющих оплетение, соотношение декрементов колебаний

оплетенного и неоплетенного компенсаторов ($\bar{\delta} = \delta_{on}/\delta$) составляет величину 2,37-2,7. Такие относительно стабильные значения относительных декрементов объясняются: 1) особенностью гистерезисных потерь энергии колебаний в оплетке конденсатора; 2) тем, что по условиям эксплуатации величины рабочих давлений в компенсаторах невелики, по сравнению с рабочими давлениями в гибких металлических рукавах.

Расчет амплитуд при поперечных вынужденных колебаниях сильфонных компенсаторов в области резонанса производится по методу, аналогично изложенному [3]. Сила неупругого сопротивления учитывается по способу Сорокина Е.С. (1, 2).

Уравнение вынужденных поперечных колебаний компенсатора с учетом неупругого сопротивления имеет вид

$$m_p \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \left(1 + i \frac{\delta}{\pi}\right) EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = F(x) e^{-i\omega_b t}. \quad (3)$$

Решение такого уравнения излагается в работах [1, 2], поэтому, опуская промежуточные выкладки, выражение для расчета АЧХ при поперечных колебаниях компенсатора, возбуждаемых одновременно перемещением опор (концов) компенсатора (инерционное возбуждение), имеет вид

$$A_{jn} = \frac{b_{jn}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_{bn}^2}{\omega_{jn}^2}\right)^2 + \frac{\Psi^2}{4\pi^2}}}, \quad (4)$$

где $\Psi = 2\delta$ – коэффициент рассеяния энергии колебаний;

n – индекс, означающий поперечные колебания.

Коэффициенты b_{jn} для нечетных форм имеют следующие значения:

$$b_{1n} = 0,81351 \frac{A_b \cdot \omega_{bn}^2}{\omega_{1n}^2};$$

$$b_{3n} = 0,36375 \frac{A_b \cdot \omega_{bn}^2}{\omega_{3n}^2};$$

$$b_{5n} = 0,23148 \frac{A_b \cdot \omega_{bn}^2}{\omega_{5n}^2}.$$

В связи с зависимостью декрементов колебаний от амплитуды, уравнение (4) решается методом последовательных приближений, т.е. так же, как для продольных колебаний. Поэтому, при построении АЧХ колебаний, для каждого задаваемого значения ω_b , вводится первоначальное значение амплитуды A_{j1} , для которого по формулам (1), (2) или из экспериментальных кривых определяется величина декремента колебаний $\delta(A_{j1})$, соответствующая амплитуде A_{j1} . Для данного значения декремента $\delta(A_{j1})$ по уравнению (4) находится величина амплитуды A_{j2} , которая сравнивается с амплитудой A_{j1} , и при необходимости производится корректировка величины декремента, и вновь определяется значение амплитуды A_{j3} . Процесс продолжается до тех пор, пока разница между двумя соседними значениями амплитуды $\Delta A = |A_j, i - A_j, i+1|$ не будет менее

наперед заданной величины. Поскольку такой расчет производится для каждой точки АЧХ, то лучше всего начать с пикового значения амплитуды при резонансе.

Таким образом, используя выражение (1), (2) для расчета декрементов колебаний, или экспериментальные зависимости декрементов колебаний для конкретных компенсаторов, с помощью уравнения (4) можно построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в области резонанса или просто определить резонансную амплитуду A_{jp} при $\omega_b = \omega_j$. Степень расхождения расчетной и экспериментальной (рисунок 3) АЧХ исключительным образом зависит от точности определения значения декремента и точности расчета собственной частоты колебаний. Погрешность в декременте определяет точность АЧХ по амплитуде, а погрешность по частоте – величину сдвига по оси абсцисс резонансного пика относительно истинного положения. Расчет АЧХ для компенсаторов при подстановке в уравнение (4) экспериментальных значений собственной частоты колебаний (f_3) и декремента колебаний (δ_3) показал точное совпадение расчетных и экспериментальных АЧХ.

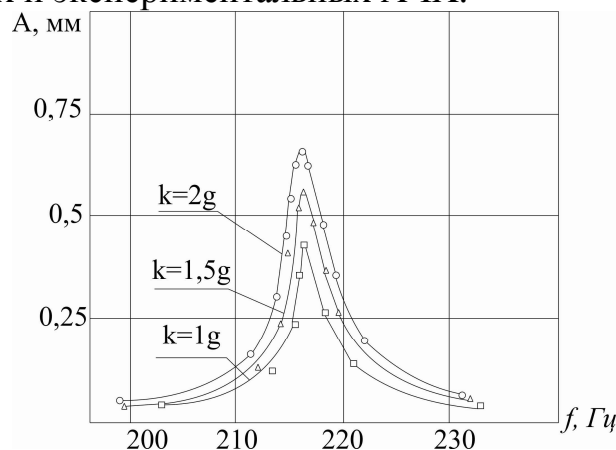


Рис. 3. АЧХ компенсатора Dy 80 при поперечных колебаниях: $n_T=22$; $S_0=3*0,15$ мм

Имея резонансную амплитуду и форму колебаний, можно определить смещение в двух соседних сечениях, в наиболее напряженной области компенсатора. При колебаниях это будет в узле формы, т.е. в области заделки компенсатора. Сечения выбирают таким образом: чтобы первое совпало с заделкой, а второе находилось на расстоянии, равном половине шага гофрировки ($t/2$), – т.е. между сечениями укладывается один полугофр. Смещение во втором сечении при колебаниях определяет деформацию полугофра, в дальнейшем с помощью известных методов и рассчитываются напряжения в полугофре. При использовании метода суперэлементов [3], напряжения необходимо рассчитывать как минимум в двух крайних от заделки полугофра, т.к. максимум напряжений (эквивалентных) оказывается в зоне второго полугофра.

На основе имеющихся кривых усталости для материала гофрированной оболочки компенсатора [4], и, используя соотношения по расчету σ_{-1} для конструкции, определяется число циклов или время до разрушения. Отметим, что предел выносливости сталей зависит от частоты нагружения, поэтому необходимо вносить корректировку [4], при определении числа циклов до разрушения.

В уравнении (3) рассматривается нагружение гармонической возбуждающей силой, однако общий случай периодической нагрузки при помощи разложения в ряд Фурье может быть сведен к серии случаев нагружения вида (3). Расчет числа циклов до разрушения компенсаторов в этом случае может быть произведен по формулам скорректированной линейной гипотезы суммирования повреждений [3]. Последнее относится к расчету долговечности компенсаторов, как при поперечных, так и при продольных колебаниях.

Заключение. Исследование диссипативных свойств сильфонных компенсаторов при поперечных колебаниях выявило заметное влияние на них внутреннего давления и амплитуды колебаний. Обработка экспериментальных значений декрементов колебаний позволила установить вид аппроксимирующей функции, которой можно пользоваться при расчете вынужденных поперечных колебаний компенсаторов при резонансе и в области резонанса.

Список литературы

1. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. – М.: Госстройиздат, 1960. – 131 с.
2. Сорокин Е.С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания // Исследование прочности сооружений. – М., 1951. – С. 5-90.
3. Итбаев В.К., Карасев С.В. Колебания сильфонных компенсаторов авиационных газотурбинных двигателей // Проблемы прочности двигателей: Тезисы докладов XXII Всесоюзного совещания 24-26 апреля 1990г. – Москва, 1990. – С. 100-101.
4. Прошенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. – Ч. 1, 1. – Киев: Наукова думка, 1987. – 1302 с.

Сведения об авторах:

Итбаев Валерий Каюмович – д.т.н., профессор, УГАТУ, г. Уфа;

Карасев Сергей Викторович – к.т.н., доцент, УГАТУ, г. Уфа;

Мухаммадеев Венер Рифкатович – старший преподаватель, УГАТУ, г. Уфа.