

УДК 534.833

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ОБОЛОЧЕК ГИБКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ И СИЛЬФОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

В. К. ИТБАЕВ

okmim@ugatu.ac.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 19.06.2017

Аннотация. Приведены результаты экспериментального определения диссипативных свойств одно- и многослойных гофрированных оболочек гибких металлических трубопроводов и сильфонных компенсаторов трубопроводных систем ДЛА и ЛА. Экспериментальные исследования проведены на 200 образцах одно-, двух-, трех- и четырехслойных гофрированных оболочках, получены зависимости декрементов колебаний от амплитуды колебаний в области резонанса, количества слоев оболочки, величин внутреннего давления в оболочке. Получены зависимости для расчета декрементов продольных и поперечных колебаний гофрированных оболочек. Аналогичные испытания с целью определения декрементов колебаний проведены с гофрированными оболочками, заполненными жидкостями, испытания проводились с пятью типами жидкостей: вода, керосин ТС-1, трансформаторное масло, моторное масло, глицерин.

Ключевые слова: колебания; резонанс; диссипация; рассеяние; декремент; форма колебаний; амплитуда колебаний; частота; пик резонанса; гофрированная оболочка; гофр; сильфон.

ВВЕДЕНИЕ

Многослойные гофрированные оболочки (сильфоны) являются основным элементом гибких металлических трубопроводов – сильфонных компенсаторов и гибких металлических рукавов. Гибкие металлические трубопроводы широко применяются в трубопроводных коммуникациях двигателей летательных аппаратов и летательных аппаратов.

Из-за высокой податливости в продольном и поперечном направлениях, гофрированные оболочки имеют низкий и плотный спектр собственных частот колебаний, а так же, если не принять специальных мер, легко возбудимы к действию различных периодических возмущений и входят в резонансные колебания. Отстроиться от всех возможных резонансных колебаний так же как убрать источники возмущений не всегда удается, поэтому важ-

ным фактором, обеспечивающим функционирование гофрированных оболочек в составе изделия является демпфирование колебаний. Исследование зависимостей диссипативных (демпфирующих) свойств гофрированных оболочек, с привлечением известных общих закономерностей демпфирования колебаний [1, 2] является важной задачей в деле обеспечения вибропрочности и надежности гофрированных оболочек.

Диссипация или рассеяние энергии колебаний многослойных гофрированных оболочек обусловлено: внутренним трением в материале; конструкционным трением между слоями; аэро или гидродинамическим демпфированием. К сожалению, известные методы теоретического определения количественных характеристик демпфирования, в частности значений логарифмических декрементов (в дальнейшем де-

крементов) колебаний, не позволяют получить надежные для проектирования результаты. В связи с этим большое применение получили экспериментальные исследования конкретных образцов с последующей интерполяцией полученных результатов на вновь проектируемые изделия.

СПОСОБЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ СВОЙСТВ

Исследование диссипативных свойств гофрированных оболочек производилось определением значений декрементов по осциллограммам затухающих колебаний и по амплитудно-частотным характеристикам в области резонанса [3, 4]. На рис. 1 в качестве примера представлены осциллограммы затухающих продольных колебаний неоплетенных компенсаторов ДУ70 по первой форме: на рис. 1, а – с однослойной гофрированной оболочкой $S_0 = 0,2$ мм; на рис. 1, б – с двухслойной гофрированной оболочкой $S_0 = (0,2 + 0,2)$ мм. Из сравнения осциллограмм затухающих колебаний для однослойной оболочки (рис. 1, а) и двухслойной оболочки (рис. 1, б) отчетливо видна разница в темпе затухания колебаний.

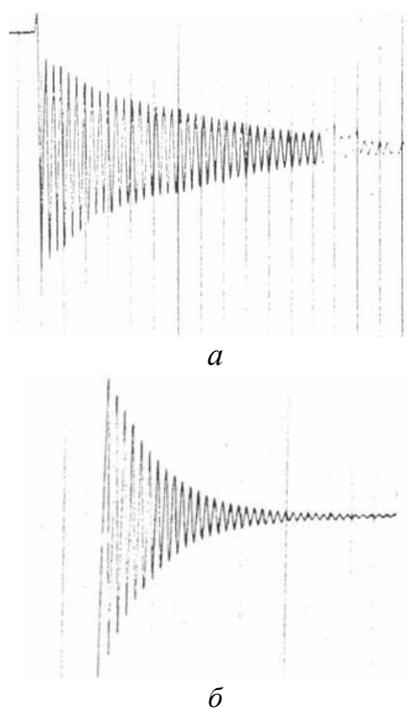


Рис. 1. Осциллограммы затухающих продольных колебаний компенсатора ДУ70 с гофрированной оболочкой: а – однослойной $S_0 = 0,2$ мм; б – двухслойной $S_0 = (0,2 + 0,2)$ мм

На рис. 2 в качестве примера приведена амплитудно-частотная характеристика продольных колебаний неоплетенного компенсатора ДУ80 по первой форме с двухслойной гофрированной оболочкой с толщиной стенки $S_0 = (0,2 + 0,2)$ мм и количеством гофров $n_r = 22$. Амплитудно-частотная характеристика снималась при постоянной перегрузке (постоянном виброускорении) стола электродинамического вибростенда ВЭДС400А, равной $1g, 2g, 3g$.

Как уже было сказано, исследование диссипативных свойств гофрированных оболочек производилось определением значений декрементов колебаний по осциллограммам затухающих колебаний и по амплитудно-частотным характеристикам в области резонанса [3, 4]. С целью исследования влияния конструктивных параметров гофрированных оболочек и эксплуатационных факторов (давление рабочей среды, амплитуда колебаний) на декременты колебаний испытаниям, совместно с Карасевым С. В., было подвергнуто более двухсот одно-, двух-, трех- и четырехслойных оболочек различных типоразмеров.

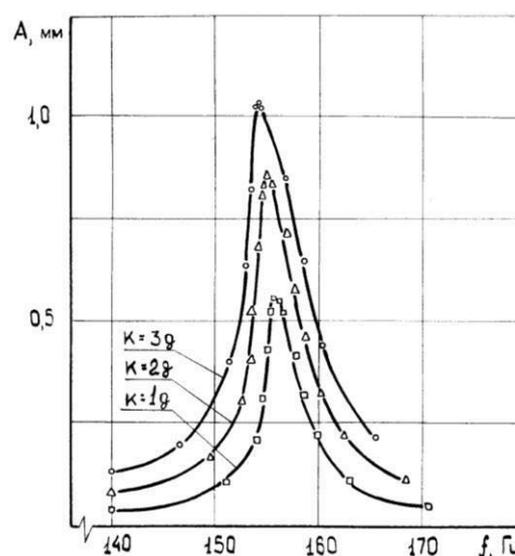


Рис. 2. АЧХ компенсатора ДУ80 при продольных колебаниях, $n_r = 22$, $S_0 = (0,2 + 0,2)$ мм

Было установлено, что из конструктивных параметров (рис. 3) на величины декрементов в первую очередь влияют: внутренний диаметр (d_y) количество слоев оболочек (k); высота гофров (h) и радиусы за-

круглений (r, r_1); толщина стенки заготовки оболочек (S_0). Декременты продольных и поперечных колебаний гофрированных оболочек возрастают с увеличением амплитуды колебаний (рис. 4, 5), здесь n_2 – количество гофров оболочки.

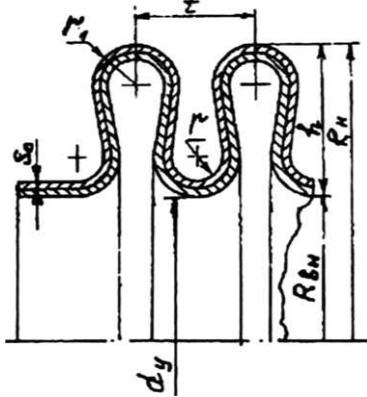


Рис. 3. Продольное сечение гофрированной оболочки

При продольных колебаниях наблюдается незначительное влияние внутреннего давления на величины декрементов (рис. 6). При поперечных колебаниях декременты возрастают с увеличением внутреннего давления (рис. 7).

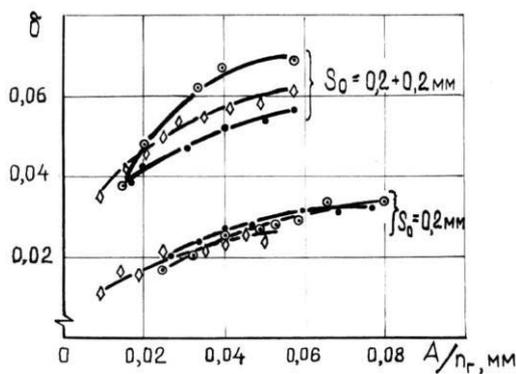


Рис. 4. Зависимости δ декрементов продольных колебаний по первой форме одно- и двухслойных компенсаторов $D_y 40$ с числом гофров $\odot - n_2=30$; $\diamond - n_2=40$; $\bullet - n_2=50$

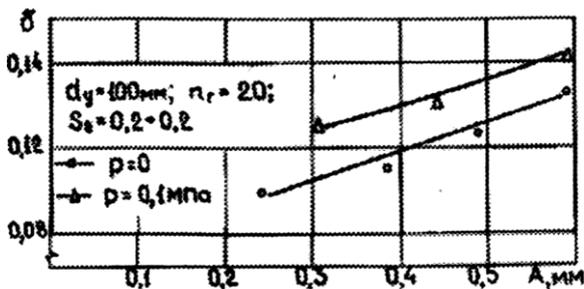


Рис. 5. Декременты поперечных колебаний компенсаторов $D_y 100$ по первой форме

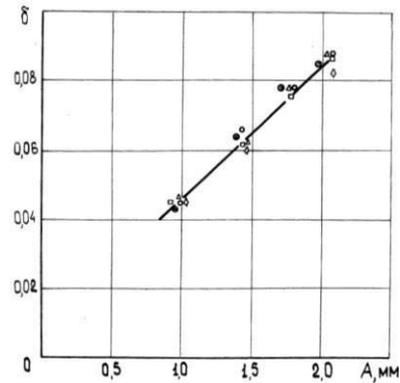


Рис. 6. Декременты продольных колебаний по первой форме компенсаторов $D_y 80, n_2 = 22$, с двухслойной оболочкой $S_0 = 0,2+0,2$ мм при внутренних давлениях: $\circ - (P=0)$;

$\Delta - (P=0,1 \text{ МПа})$; $\square - (P=0,2 \text{ МПа})$;
 $\diamond - (P=0,4 \text{ МПа})$; $\Delta - (P=0,1 \text{ МПа})$; $\odot - (P=0,6 \text{ МПа})$

Для определения величин декрементов вновь проектируемых гофрированных оболочек была предложена зависимость вида

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

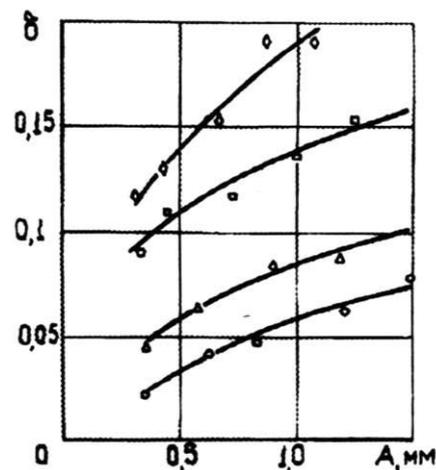


Рис. 7. Декременты поперечных колебаний по первой форме компенсаторов $D_y 80, n_2=22$, с трехслойной оболочкой $S_0=3+0.15$ мм при внутренних давлениях: $\circ - (P=0)$;
 $\Delta - (P=0,1 \text{ МПа})$; $\square - (P=0,2 \text{ МПа})$;
 $\diamond - (P=0,4 \text{ МПа})$; $\Delta - (P=0,1 \text{ МПа})$; $\odot - (P=0,6 \text{ МПа})$

Здесь δ_0, C_p, n – коэффициенты регрессии, которые определялись обработкой результатов испытаний методом наименьших квадратов; A – максимальная по длине оболочки (в пучности формы) амплитуда колебаний; $A_0 = 10$ мкм – минимальная амплитуда колебаний, имеющая смысл в практиче-

ских расчетах. В дальнейшем, коэффициенты δ_0 , C_p , n предлагается рассчитывать с помощью выражений:

- при продольных колебаниях

$$\delta_0 = 10^{-5} \frac{d_y h}{S_0 t} (k-1)^{0,4},$$

$$C_p = \left(1 + \frac{20t}{l_{г.ч.}}\right) 4,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{r_1+r}{2S_0}\right)^{0,3}, \quad (2)$$

$$n = 0,35 \sqrt{\frac{r_1+r}{2S_0}},$$

- при поперечных колебаниях

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

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

$$n = 0,35 \sqrt{\frac{r_1+r}{2S_0}},$$

Здесь $l_{г.ч.} = n_{г} t$ – длина гибкой (гофрированной) части оболочки; $n_{г}$ – количество гофров оболочки; p – давление внутри оболочки; p_0 – давление окружающей среды, но не менее 0,05 МПа.

В табл. 1 в качестве примера приведены коэффициенты регрессии для ряда испытанных компенсаторов.

Исследование декрементов колебаний гофрированных оболочек заполненных различными жидкостями, отличающимися вязкостью, плотностью, и обобщение результатов, позволило рекомендовать для практического использования следующие осредненные значения декрементов продольных колебаний (табл. 2).

Здесь, в таблице $\bar{\delta}$ – относительный декремент колебаний, представляющий отношение декремента колебаний оболочек с жидкостью к декременту колебаний без жидкости, при одинаковых значениях амплитуд колебаний оболочки и одинаковой температуре 20°C.

Для расчета значений декрементов колебаний оболочек с другими жидкостями (отличными от приведенных в таблице) можно рекомендовать следующую зависимость

$$\delta_{ж} = \delta_{в} \left(\frac{\gamma_{ж}}{\gamma_{в}}\right)^{-2,85}, \quad (4)$$

где $\delta_{в} = \delta \cdot \bar{\delta}$ – декремент колебаний оболочки с водой; δ – декремент колебаний оболочки без жидкости; $\bar{\delta}$ – относительный декремент колебаний оболочки с водой (берется из таблицы); $\gamma_{ж}$ – кинематическая вязкость жидкости; $\gamma_{в}$ – кинематическая

вязкость воды. Приведенную зависимость (4) можно использовать для определения декрементов колебаний при различных температурах жидкости.

Таблица 1

Значения коэффициентов аппроксимирующей функции

d_y , мм	$n_{г}$	S_0 , мм	P , МПа	Коэффициенты		
				δ_0	C_p	α
32	35	$2 \times 0,2$	0	0,059	0,016	0,819
			0,1	0,061	0,017	0,817
			0,2	0,060	0,019	0,940
80	32	$2 \times 0,2$	0	0,054	0,021	0,953
			0,1	0,048	0,051	0,960
			0,2	0,043	0,101	0,964
			0,3	0,048	0,156	0,965
			0,4	0,055	0,268	0,968
			0,5	0,005	0,570	0,989
80	22	$2 \times 0,2$	0	0,002	0,073	0,942
			0,1	0,061	0,004	0,940
			0,2	0,050	0,016	0,943
			0,3	0,004	0,078	0,968
			0,4	0,017	0,077	0,979
80	22	$2 \times 0,2$	0	0,024	0,045	0,857
			0,1	0,018	0,074	0,898
			0,2	0,017	0,093	0,923
			0,3	0,031	0,118	0,930
			0,4	0,082	0,080	0,941
80	22	$3 \times 0,2$	0	0,063	0,026	0,960
			0,1	0,081	0,052	0,967
			0,2	0,115	0,067	0,965
			0,3	0,106	0,128	0,989
100	20	$2 \times 0,2$	0	0,070	0,114	0,971
			0,1	0,167	0,047	0,987

Таблица 2

Значения декрементов при различных жидкостях

№ п/п	Жидкость	Вязкость, мм ² /с	$\bar{\delta}$
1	Вода	1,01	1,3970
2	Керосин ТС-1	1,25	1,1855
3	Масло трансформаторное	23,0	1,7011
4	Масло моторное	45,0	3,5680
5	Глицерин	52,0	4,1046

Наличие жидкости во внутренней полости гофрированной оболочки [5] вызывает сдвиг резонансных частот по соответствующим формам колебаний пропорционально плотности и уменьшение амплитуд колебаний пропорционально вязкости жидкости (рис. 8, а, б, в).

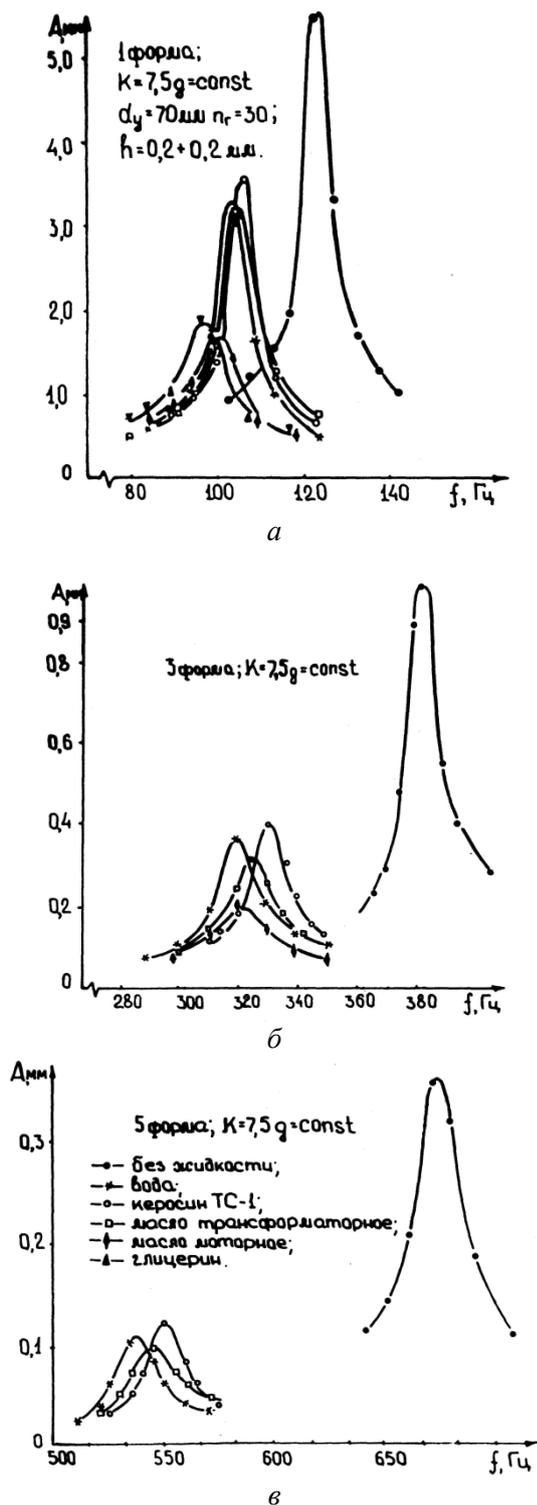


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики двухслойных оболочек компенсаторов с жидкостью при различных формах продольных колебаний

На рис. 9 в качестве примера представлена амплитудно-частотная характеристика компенсатора с трехслойной гофрированной оболочкой при поперечных колебаниях по первой форме для трех различных уровней вибронгрузки стола вибростенда (1,0 д; 1,5 д; 2 д).

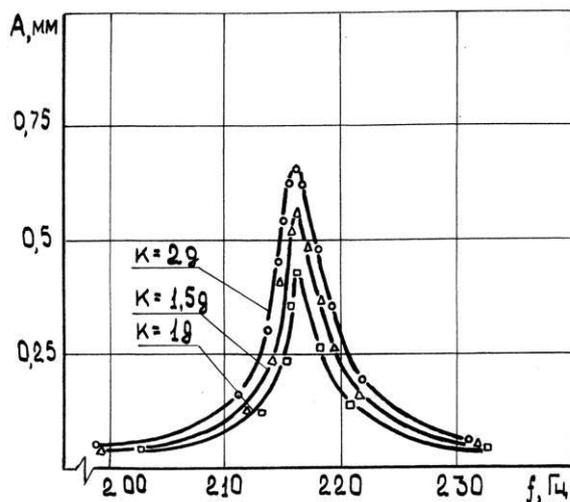


Рис. 9. АЧХ компенсатора $D_y 80$ при поперечных колебаниях; $n_r = 22$; $S_0 = 3 \times 0,15$ мм

Анализ полученных экспериментально амплитудно-частотных характеристик и зависимостей декрементов колебаний гофрированных оболочек позволяет сделать следующие выводы:

1. Давление рабочей среды не оказывает существенного влияния на декременты продольных колебаний и значительным образом влияет на декременты поперечных колебаний.

2. Увеличение амплитуды колебаний гофрированных оболочек приводит к увеличению декрементов как продольных, так и поперечных колебаний.

3. Из конструктивных параметров на значения декрементов продольных и поперечных колебаний в первую очередь влияют количество слоев гофрированной оболочки, внутренний диаметр, толщина стенки и в меньшей степени высота гофров и радиусы закруглений гофров.

4. Наличие жидкости во внутренней полости гофрированной оболочки вызывает сдвиг резонансных частот в область низких частот пропорционально плотности жидкости и уменьшение амплитуд колебаний (увеличение декремента колебаний) пропорционально вязкости жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования с целью определения значений декрементов колебаний одно- и многослойных гофрированных оболочек гибких металли-

ческих трубопроводов и сильфонных компенсаторов позволили с помощью регрессионного анализа получить зависимости декрементов колебаний гофрированных оболочек. Зависимости учитывают влияние конструктивных параметров и эксплуатационных факторов на расчетные значения декрементов продольных и поперечных колебаний с учетом наличия различных жидкостей во внутренних полостях гофрированных оболочек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Вибропоглощающие свойства конструктивных материалов: Справочник. Киев: Наукова думка, 1971. 375 с. [G. S. Pisarenko, A. P. Jakovlev, V. V. Matveev, *Vibration-absorbing properties of constructive materials*, (in Russian). Kiev: Naukova dumka, 1971.]
2. Микишев Г. Н., Рабинович Б. И. Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость. М.: Машиностроение, 1971. 546 с. [G. N. Mikishev, B. I. Rabinovich, *Dynamics of thin-walled designs with the compartments containing liquid*, (in Russian). M.: Mashinostroenie, 1971.]
3. Итбаев В. К., Сираев Э. З. Экспериментальное определение зависимостей декрементов колебаний сильфонов // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Труды КуАИ. Куйбышев, 1983. С. 57–60. [V. K. Itbaev, E. Z. Siraev, "Experimental determination of decrements dependences of sylphons fluctuations", (in Russian). *Vibration strength and reliability of engines and systems of aircraft*: Trudy KuAI. Kujbyshev, pp. 57–60. 1983.]
4. Итбаев В. К., Карасев С. В. Рассеяние энергии при продольных колебаниях многослойных гофрированных оболочек компенсаторов трубопроводных систем летательных аппаратов // Конференция по вопросам рассеяния энергии при колебаниях механических систем: Тез. докл. / Отв. ред. Писаренко Г.С. Киев, Ин-т пробл. Прочности АМ УССР, 1989. С. 51–52. [V. K. Itbaev, S. V. Karasev, "Energy dispersion at axial vibrations of multi-layer corrugated covers of aircraft compensators pipeline systems", (in Russian). *Conference on questions of energy dispersion at fluctuations of mechanical systems*. Kiev, In-t probl. prochnosti AM USSR, pp. 51-52. 1989.]
5. Итбаев В. К. Расчет вынужденных колебаний гибких металлических трубопроводов // Проблемы машиностроения и надежности машин. М., 1996. С. 31–34. [V. K. Itbaev, "Calculation of forced fluctuations of flexible metal lines", (in Russian). *Problems of mechanical engineering and reliability of cars*. M., pp. 31-34. 1996.]

ОБ АВТОРЕ

ИТБАЕВ Валерий Каюмович, проф. каф. основ конструирования механизмов и машин. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по авиац. двигателям (УГАТУ, 1996). Лауреат Премии Правительства РФ. Заслуж. машиностроитель РБ. Иссл. в обл. динамики и прочности авиац. двигателей.

METADATA

Title: Researches of dissipative properties of multilayered corrugated covers of flexible metal pipelines of compensators

Author: V. K. Itbaev

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia

E-mail: okmim@ugatu.ac.ru

Language: Russian

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 3 (77), pp. 26-31, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Results of experimental definition of dissipative properties one and multilayered corrugated mantles of flexible metal lines and bellows-sealed compensator bars of pipeline systems DLA and LA are given. Pilot studies are conducted on 200 samples one, two, three and four-layer corrugated mantles, dependences of decrements of fluctuations on amplitude of fluctuations in the resonance field, quantities of layers of a mantle, sizes of an internal pressure in a mantle are received. By processing of tests results dependences for calculation of decrements of axial and lateral vibrations of corrugated mantles are received. Similar tests for the purpose of decrements definition of fluctuations are carried out with corrugated mantles filled with liquids, tests were carried out with five types of liquids: water, kerosene CU-1, transformer oil, engine oil, glycerin.

Key words: oscillations; resonance; dissipation; dispersion; decrement; form of oscillations; vibration amplitude; frequency; resonance peak; corrugated jacket; corrugation; bellow.

About author:

ИТБАЕВ, Valery Kayumovich, Prof. of the foundations of con-structing of mechanisms and machines. Dip. mechanical engineer on aviation engines (UAI, 1970). Dr. of Tech. Sci. in aviation engines (USATU, 1996). Laureate of the Russian Government. Honored Engineer RB. Research in the field of dynamics and strength of aircraft engines.