

BENDING VIBRATIONS OF FLEXIBLE METAL HOSES AND EVALUATION OF THEIR OPERABILITY

V. K. Itbaev, V. R. Mukhamadeev ^a

Ufa State Aviation Technical University (UGATU)

^a *vener_muhamadeev@mail.ru*

Submitted 2022, June 10

Abstract. The results of theoretical and experimental studies of vibrations of flexible metal hoses (GMR) are presented. The previously performed analysis of experimental hysteresis loops showed that the GMR is a dissipative system with nonlinear characteristics of resistance forces and a nonlinear restoring force. The energy dissipation coefficients were determined by static hysteresis loops. In parallel, the estimation of oscillation decrements by the dynamic gain coefficient was carried out on the basis of experimental amplitude-frequency characteristics (frequency response) of the sleeves. Developed: a method for calculating the decrements of vibrations and the frequency response of the sleeves; according to the known shape of vibrations and amplitude, the deformations of the sleeve elements are calculated and then, based on the known fatigue curves, the number of cycles before the destruction of the GMR is determined.

Keywords: flexible metal sleeves (FMS); corrugated shell with screw corrugations; corrugated shell with parallel corrugations; wire mesh braid; strands of braid; power characteristics of FMS; hysteresis loop FMS; bending stiffness.

ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГИБКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУКАВОВ И ОЦЕНКА ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

В. К. Итбаев, В. Р. Мухамадеев ^a

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

^a *vener_muhamadeev@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.06.2022

Аннотация. Представлены результаты теоретического и экспериментального исследований колебаний гибких металлических рукавов (ГМР). Ранее выполненный анализ экспериментальных петель гистерезиса показал, что ГМР представляет собой диссипативную систему с нелинейными характеристиками сил сопротивления и нелинейной восстанавливающей силой. Коэффициенты рассеяния энергии определялись по статическим петлям гистерезиса. Параллельно велась оценка декрементов колебаний по коэффициентам динамического усиления на основе экспериментальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) рукавов. Разработаны: методика расчета декрементов колебаний и АЧХ рукавов; по известной форме колебаний и амплитуде рассчитываются величины деформаций элементов рукава и затем, на основе известных кривых усталости, определяются числа циклов до разрушения ГМР.

Ключевые слова: гибкие металлические рукава (ГМР); петля гистерезиса статического деформирования; демпфирование; диссипация; рассеяние энергии колебаний; декремент колебаний; затухающие колебания; амплитудно-частотная характеристика; коэффициент динамического усиления; пик резонансной кривой.

ВВЕДЕНИЕ

Колебания гибких металлических рукавов (ГМР) характеризуются высоким уровнем диссипации (рассеяния) энергии. Если рассмотреть петлю гистерезиса статического деформирования ГМР [1], то обнаруживается, что ГМР представляет собой диссипативную систему с нелинейными характеристиками сил сопротивления и нелинейной восстанавливающей силой [2].

Количественная оценка демпфирующих свойств в виде декрементов колебаний δ или коэффициентов рассеивания ψ подобных систем может быть определена следующими методами:

а) обработкой экспериментально полученных виброграмм затухающих колебаний [2];

б) по экспериментальной петле гистерезиса [3]. Приблизленно декременты колебаний для пика резонансной кривой можно оценить, исходя из величины коэффициента динамического усиления [4–6].

При проведении экспериментальных исследований затухающих колебаний ГМР оказалось, что затухающие колебания как таковые практически не удается реализовать (рис. 1), что удалось сделать на фторопластовых рукавах [7, 8]. Это связано с большими величинами потерь энергии при колебаниях ГМР, а также невозможностью приложить достаточно большую величину статической нагрузки к гибкой части ГМР без ее повреждения. Поэтому коэффициенты рассеяния энергии определялись по статическим петлям гистерезиса. Параллельно велась оценка декрементов по коэффициентам динамического усиления Q на основе экспериментальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), полученных при инерционном возбуждении ГМР, таким образом, что:

$$Q = \frac{A_{\max}}{A_b}; \quad \delta = \frac{\pi}{Q}, \quad (1)$$

где A_{\max} – максимальная амплитуда колебаний ГМР в пучности формы; A_b – амплитуда перемещения стола вибростенда.

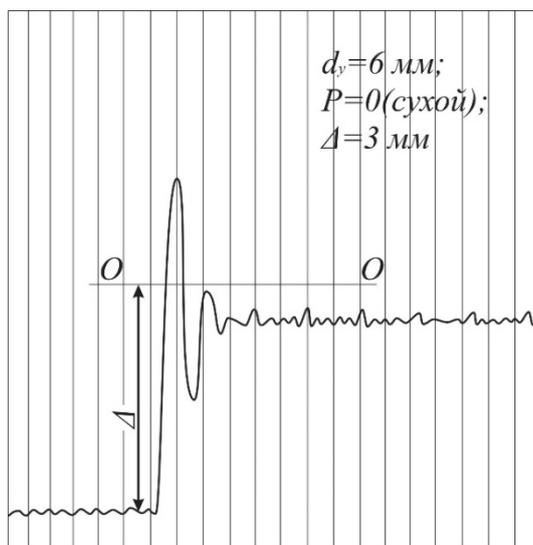


Рис. 1. Оциллограмма затухающих поперечных колебаний ГМР

На рис. 2–4 в качестве примера приведены АЧХ некоторых рукавов при испытаниях на поперечные колебания в области резонанса.

Исследования АЧХ образцов ГМР, обладающих нелинейностью силовой характеристики и большим уровнем рассеяния энергии колебаний, производились при инерционном возбуждении ГМР. Величина возбуждающей силы (коэффициент перегрузки K стола вибростенда) для конкретной кривой АЧХ сохранялась постоянной, обычно снималось не менее трех кривых АЧХ при разных K ($K = 3g, K = 5g, K = 8g$). АЧХ ГМР снимались при прямом и обратном ходе изменения частоты колебаний в околорезонансной области, при этом особое внимание уделялось возможности возникновения срывов амплитуд, появления супер- и субгармонических колебаний.

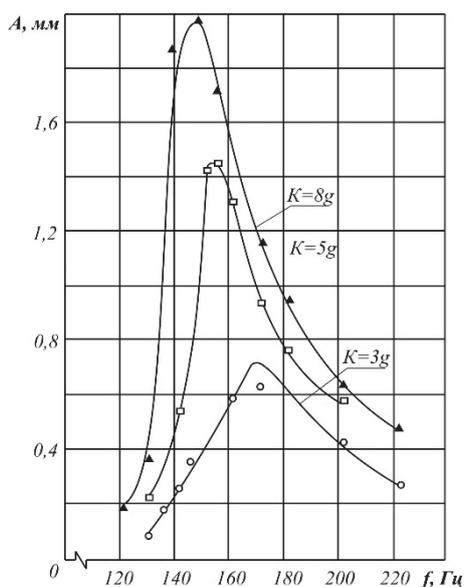


Рис. 2. АЧХ рукава $D_y = 20, l_{Г.ч.} = 163$ мм с маслом при $p = 0$

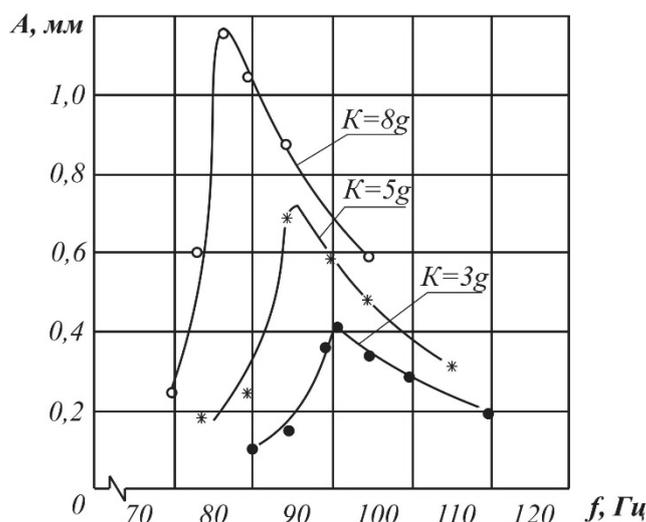


Рис. 3. АЧХ рукава $D_y = 20, l_{Г.ч.} = 510$ мм при $p = 0,5p_{раб}$

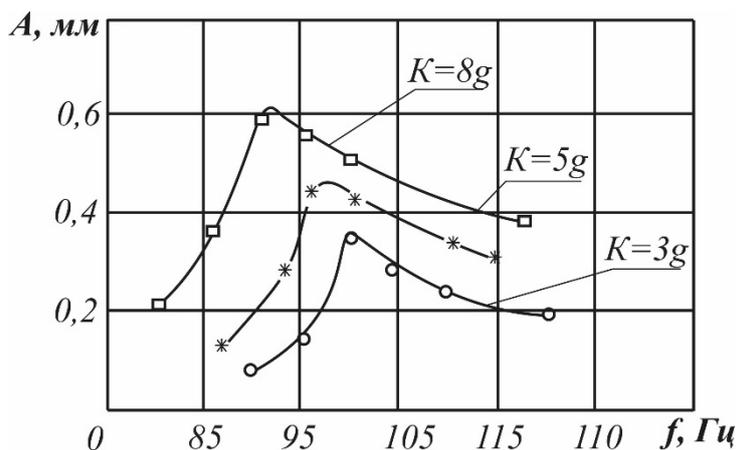


Рис. 4. АЧХ рукава $D_y = 20$, $l_{Г.ч.} = 510$ мм при $p = p_{раб}$

В целом экспериментальные исследования показали следующее:

а) рассеяние энергии в ГМР имеет достаточно нестабильный характер даже в пределах одной партии рукавов, что объясняется сложной картиной взаимодействия прядей оплетки между собой и с гофрированной оболочкой, зависящей от многих технологических факторов;

б) коэффициенты рассеяния энергии зависят от амплитуды колебаний и от величины внутреннего давления рабочей среды;

в) из конструктивных параметров наиболее существенное влияние оказывают количество слоев оплетки, длина и внутренний диаметр рукава.

Поскольку металлические рукава характеризуются нестабильностью и отличиями упругих и диссипативных свойств, то была произведена обработка результатов испытаний рукавов, на основе которой выведена аппроксимирующая зависимость для расчета декрементов колебаний рукавов вида

$$\delta = 7,4 \cdot 10^{-2} \cdot \nu^{0,7} \left(\frac{l}{d_y} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{A}{A_0} \right)^{0,35} \cdot \frac{1}{(1 + \bar{p})^{2,16}}, \quad (2)$$

здесь A_0 – минимальная амплитуда колебаний, которая могла быть надежно экспериментально зафиксирована и имеет практический смысл в инженерных расчетах, принята $A_0 = 10$ мкм;

$\bar{p} = \frac{p}{p_{раб}}$ – относительная величина внутреннего давления; $p_{раб}$ – максимальное рабочее давление внутри рукава, допускаемое согласно техническому паспорту; p – давление внутри рукава.

Отметим, что в соответствии с принятой $A_0 = 10$ мкм минимальное определяемое значение декремента $\delta(A)$ также соответствует $A = A_0 = 10$ мкм.

На рис. 5 представлены зависимости декрементов поперечных колебаний от амплитуды нескольких гибких металлических рукавов с диаметрами, наиболее употребительными в двигателях летательных аппаратов (ДЛА) и ЛА. На рис. 6 представлена зависимость декрементов поперечных колебаний ГМР от величины внутреннего давления, рассчитанная по формуле (2) при постоянной амплитуде колебаний $A = 0,8$ мм. Здесь же приведены значения декрементов колебаний для такого же рукава, определенные экспериментально.

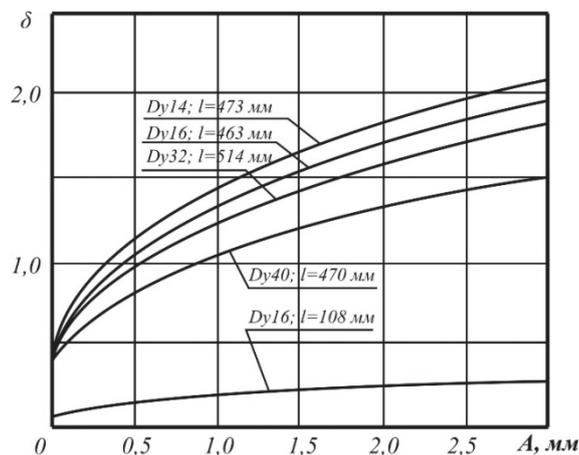


Рис. 5. Зависимость декрементов колебаний ГМР от амплитуды

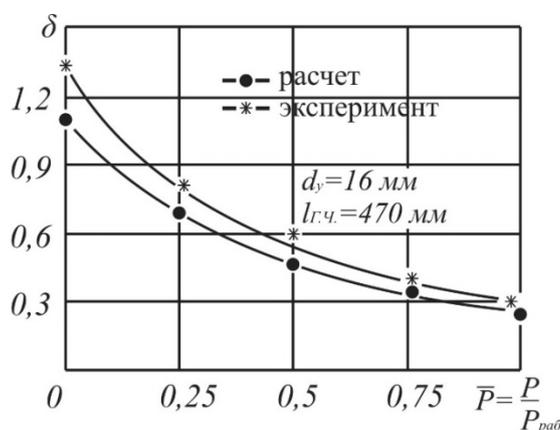


Рис. 6. Зависимость декрементов колебаний ГМР от давления

Таким образом, установлены зависимости декрементов поперечных колебаний рукавов $\delta = f(A, p, l_{г.ч}, \nu, d_y)$ от эксплуатационных факторов (A, p) и основных конструктивных (l, ν, d_y) параметров гибкого металлического рукава.

Анализ экспериментальных характеристик силы сопротивления при деформировании гибких металлорукавов и зависимостей декрементов от амплитуды показывает, что нелинейность ГМР связана с упругой нелинейностью и механическим гистерезисом.

Как известно [2], характерной практической задачей исследования нелинейных неавтономных систем, совершающих установившиеся вынужденные колебания, является: построение амплитудно-частотной характеристики, определение резонансных амплитуд и выявление условий срыва амплитуд, определение возможности появления супер- и субгармонических колебаний.

Из анализа возможных гистерезисных зависимостей [9, 10] следует, что в обобщенном виде напряжения в материале можно представить как сумму упругой и неупругой составляющей, определяющих нелинейность и неоднозначность уравнения восходящей (\rightarrow) и нисходящей (\leftarrow) ветвей петель гистерезиса

$$\bar{\sigma}_{(\epsilon)} = \sigma_y + \bar{\sigma}_{(s)} = E\epsilon + \bar{E}f(\epsilon, \epsilon_0), \tag{3}$$

где ϵ_0, ϵ – амплитудное и текущее значения деформаций. При этом разность интегралов от неупругой составляющей восходящей и нисходящей ветвей в пределах цикла деформирования определяет площадь петли гистерезиса,

$$\Delta W_{(\varepsilon_0)} \approx E \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \vec{f}(\varepsilon, \varepsilon_0) d\varepsilon - E \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \vec{f}(\varepsilon, \varepsilon_0) d\varepsilon, \quad (4)$$

которая выражается через декремент колебаний

$$\Delta W_{(\varepsilon_0)} \approx \Psi_{\varepsilon_0} \cdot W_{(\varepsilon_0)} = E \cdot \delta_{(\varepsilon_0)} \varepsilon_0^2, \quad (5)$$

где $\delta_{(\varepsilon_0)}$ – декремент, зависящий от амплитуды деформации.

При рассмотрении ГМР в виде эквивалентного стержня изгибающий момент во внутреннем сечении ГМР можно в целом представить как функцию поперечного перемещения с учетом несовершенной упругости материала

$$\vec{M} = M_y + \vec{M}_s = (EJ)_{\text{пр}} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \overline{\int \sigma_s \cdot y dF}, \quad (6)$$

где M_y, M_s – упругая и неупругая составляющие момента. Такого рода зависимостью можно описать несовершенную упругость колебательной системы, обусловленную не только рассеянием энергии в материале ее деформируемых элементов, но и относительным перемещением контактирующих поверхностей различного рода сочленений (конструкционный гистерезис) и сопротивлением, обтекающим систему среды, определяющим аэрогидродинамическое демпфирование колебаний, а также их совместным проявлением.

Дифференциальное уравнение вынужденных установившихся колебаний ГМР в виде эквивалентного стержня с учетом несовершенной упругости имеет вид

$$(EJ)_{\text{пр}} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_p \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\varepsilon \Phi \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) \right] = \varepsilon q(x) \cos \omega_b t, \quad (7)$$

где $\varepsilon q(x)$ – амплитуда распределенной возмущающей силы; ω_b – круговая частота возмущающей силы; m_p – распределенная масса ГМР; ε – малый параметр. Величина в квадратных скобках выражения (7) представляет собой функционал, характеризующий нелинейную упругость и механический гистерезис.

При анализе колебаний нелинейно-гистерезисных систем используется асимптотический метод нелинейной механики Крылова – Боголюбова [10]. Согласно [10], выражение для расчета амплитудно-частотных характеристик ГМР при инерционном возбуждении приводится к виду

$$\omega_b = \omega(A) \pm \frac{1}{2} \omega_0 \sqrt{\left[\frac{A_b \int_0^{\varepsilon} Y(x) dx}{A \int_0^{\varepsilon} Y(x) dx} \right]^2 - \left(\frac{\delta(A)}{\pi} \right)^2}, \quad (8)$$

здесь $\omega_0, Y(x)$ – собственная частота и форма колебаний ГМР в нулевом приближении, частота ω_0 означает собственную частоту системы при отсутствии демпфирования и в самый начальный момент деформирования при $A \rightarrow 0$. Последнее обстоятельство связано с нелинейностью упругости ГМР. Собственная частота ω_0 и форма колебаний определяются из уравнения

$$(EJ)_{\text{пр}} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_p \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (9)$$

т.е.

$$\omega_0 = \frac{\kappa^2}{2\pi l_{г.ч}^2} \sqrt{\frac{(EJ)_{пр}}{m_p}}, \quad (10)$$

где κ – частотный параметр, который зависит от условий закрепления концов ГМР. Величина приведенной изгибной жесткости определяется по формуле

$$(EJ)_{пр} = \frac{E_{об} \pi D_{ср}^3 t \sum_{i=1}^k S_0^3(i)}{16h^3} + \left(\frac{718,2 d_{пр.ср}}{D_H} \right)^{0,2} \cdot 6,3 \nu^{0,258} \cdot \left(\sum_{i=1}^v \frac{E_{он} n_i z_i \pi d_{пр.i}^4}{64} \right) \left[1 + \nu^{0,837} \cdot 3,4 \frac{h}{t} (76 \bar{p}_1 + 34,07 \bar{p}_2^{0,25}) \right]$$

(более подробно см. [1]). Распределенная масса ГМР m_p рассчитывается по [11]. Форма колебаний определяется из условий закрепления концов ГМР известными методами [12].

Значение мгновенной собственной частоты колебаний $\omega(A_i)$, соответствующей амплитуде A_i , определяется на основе нелинейной зависимости упругости ГМР, которая получена путем обработки экспериментальных кривых статического нагружения $F(y)$ и удовлетворительно аппроксимируется в области небольших прогибов функцией вида

$$F = \frac{K}{l_{г.ч}^3} (EJ)_{пр} \left[y - 0,449 \left(\frac{y}{d_y} \right)^{-1,6} \cdot \left(\frac{d_y}{t} \right)^{-3} \right], \quad (11)$$

где K зависит от условия закрепления концов ГМР, в частности, при шарнирном закреплении концов $K = 48$, а при жестком закреплении $K = 196$.

Величина декремента $\delta(A_i)$, входящая в выражение (8) для рассматриваемой амплитуды колебаний A_i , определяется по формуле (2).

Форма колебаний $Y(x)$ для случая шарнирного закрепления концов ГМР представляется синусоидой и интегралы под корнем выражения (8) определяются в конечном виде. Если закрепление концов ГМР жесткое, то формы колебаний являются более сложной функцией и указанные интегралы выражения (8) определяются численным методом. При подстановке всех членов выражения (8) оно распадается на два, каждое из которых описывает левую и правую ветви АЧХ соответственно

$$\omega_{в.лев} = \omega(A_i - \Delta\omega(A_i)),$$

$$\omega_{в.пр} = \omega(A_i + \Delta\omega(A_i)).$$

По приведенным формулам были рассчитаны АЧХ ГМР без давления и при наличии внутреннего давления рабочей среды. В частности на рис. 7–10 представлены расчетные и экспериментальные семейства АЧХ ГМР, а в табл. 1 – расчетные данные АЧХ ГМР с параметрами: $d_y = 14$ мм; $\nu = 2$; $l_{г.ч} = 320$ мм; $p_{раб} = 21$ МПа; $(EJ)_{пр} = 48,183$ Н · м²; $m_p = 1,652$ кг; $f_0 = 186,1$ Гц; при постоянной амплитуде возбуждающей силы.

Таблица 1. Результаты расчета АЧХ ГМР

№ п/п	A , мм	$(EJ)_{\text{пр}}$, Н · м ²	$\delta(A)$	$f(A)$, Гц	$f_{\text{лев}}$, Гц	$f_{\text{пр}}$, Гц
1	0,5	43,417	0,228	176,00	96,5	255,0
2	1,0	40,095	0,290	171,57	132,0	210,0
3	1,5	38,963	0,370	167,34	142,0	191,7
4	2,0	36,618	0,400	162,23	145,0	178,7
5	2,5	35,654	0,426	160,00	149,0	170,7
6	3,0	34,209	0,450	156,80	—	—

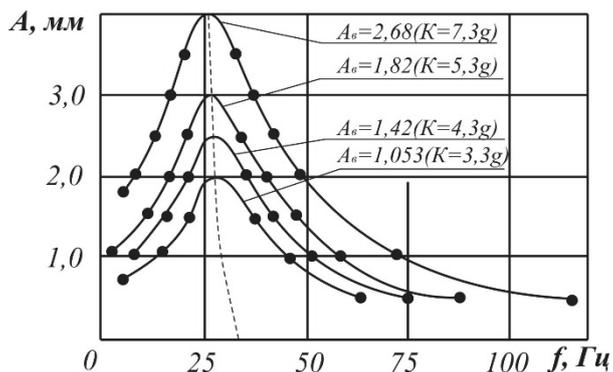


Рис. 7. Семейство расчетных АЧХ рукава $d_y = 14$ мм, $\nu = 2$, $l_{\text{грч}} = 320$ мм, $m_p = 1,652 \cdot 10^{-3}$ кг/м при $p = 0$ МПа

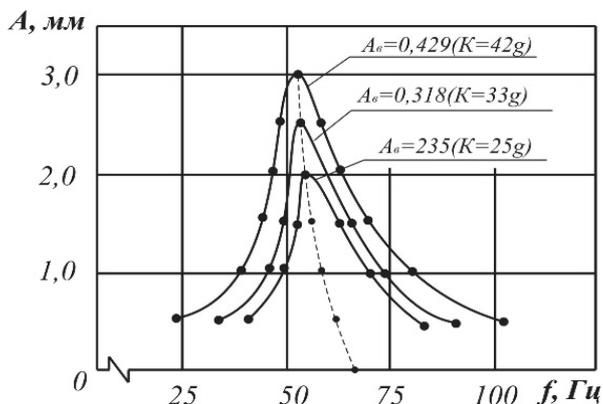


Рис. 8. Семейство расчетных АЧХ рукава $d_y = 14$ мм, $\nu = 2$, $l_{\text{грч}} = 320$ мм, $m_p = 1,652$ кг/м при $p = 21$ МПа

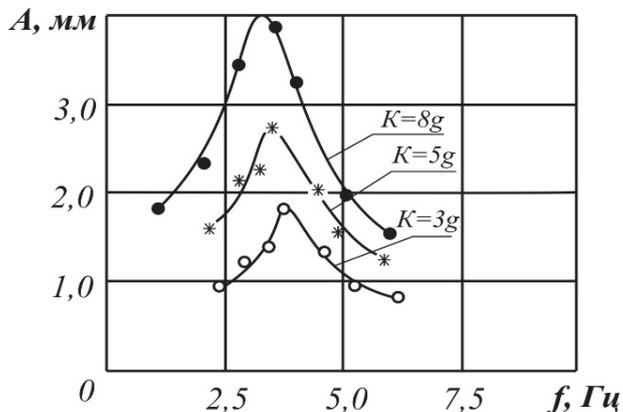


Рис. 9. Экспериментальные АЧХ рукава $d_y = 14$ мм, $\nu = 2$, $l_{\text{грч}} = 320$ мм при $p = 0$

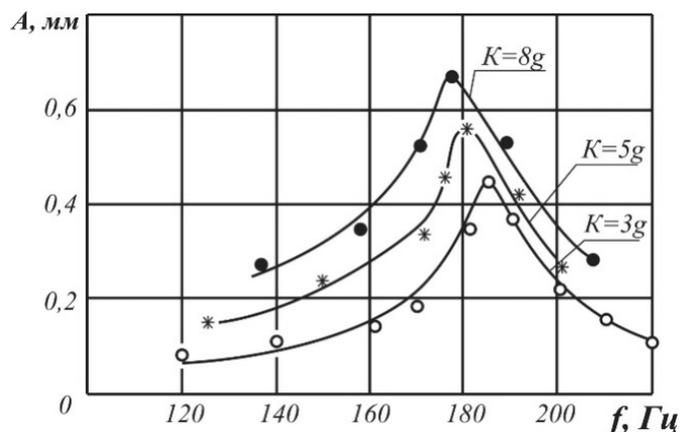


Рис. 10. Экспериментальные АЧХ рукава $d_y = 14$ мм, $\nu = 2$, $l_{гч} = 320$ мм при $p = 21$ МПа

Экспериментальные исследования показали, что при инерционном возбуждении поперечных колебаний ГМР до уровня виброускорений 150 м/с^2 стола вибростенда, явных срывов амплитуд колебаний ГМР не происходит. Небольшие срывы амплитуд отмечались на некоторых ГМР при виброускорениях стола вибростенда более 150 м/с^2 ; срывы незначительные и их величину трудно определить при прямом и обратном изменении частоты (см. рис. 11).

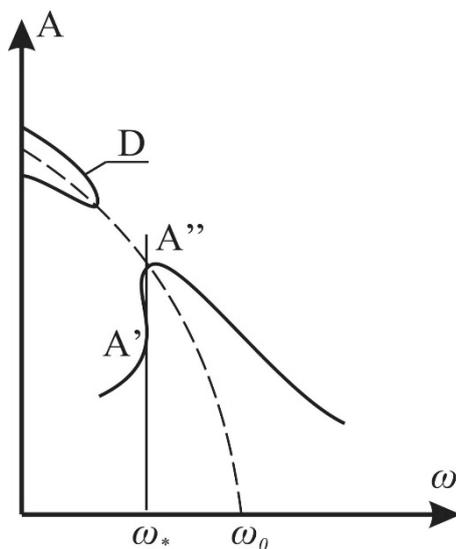


Рис. 11. К анализу АЧХ гибких металлорукавов

Это объясняется высоким уровнем демпфирования колебаний ГМР, что согласуется с общими положениями теории колебаний нелинейных систем [2]. Исследование вынужденных колебаний ГМР путем нанесения ударов по колеблющемуся гибкому металлическому рукаву на столе вибростенда не выявило наличия изолированных участков на АЧХ (см. рис. 11, область D).

При проведении испытаний металлорукавов с $d_y = 8 - 40$ мм и длиной гибкой части более полуметра наблюдались субгармонические колебания в основном с соотношениями частот $\omega_b / \omega_0 = 3$. Супер гармонические колебания ГМР различных d_y и разных длин обнаружены не были, что также объясняется высоким уровнем демпфирования колебаний ГМР [2].

Оценка вибропрочности гибких металлических рукавов при колебаниях в резонансной области производится в следующей последовательности:

1. На основе данных технического задания или анализа спектров колебаний изделия определяются гармоники возбуждающих колебаний (частоты, амплитуды).
2. Исходя из условий закрепления концов ГМР, определяются его собственная частота в нулевом приближении и форма колебаний.
3. Рассчитываются амплитудно-частотные характеристики при заданном уровне возмущающих сил (амплитуда, виброскорость или виброускорение).
4. По известной форме и амплитуде рассчитываются максимальные (амплитудные) значения деформаций гофрированной оболочки ГМР.
5. По вероятностным кривым усталости металлорукавов, приведенным в работе [13], для рассчитанного значения интенсивности деформаций определяется число циклов до разрушения ГМР при обычной или повышенной [13] температурах среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка результатов экспериментальных исследований поперечных колебаний ГМР позволила установить, что ГМР является нелинейной колебательной системой с большим рассеянием энергии. Было установлено, что декременты колебаний ГМР в первую очередь зависят от величины внутреннего давления, а затем уже от амплитуды колебаний и конструктивных параметров рукава. Предлагаемый метод расчета колебаний с использованием асимптотического метода Крылова – Боголюбова, разработанный академиком Г. С. Писаренко и его учениками, применительно к нелинейным системам с механическим гистерезисом, позволил получить удовлетворительные результаты для расчета АЧХ ГМР. Работоспособность ГМР при колебаниях оценивается путем расчета, исходя из построенной АЧХ, деформаций в наиболее напряженной области гофрированной оболочки ГМР и определения количества циклов до разрушения по вероятностным кривым усталости ГМР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Итбаев В. К.** Силовые характеристики металлических рукавов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: матер. докл. междунауч.-техн. конф. (24–26 июня 2009 г.). Ч. 1. Самара: СГАУ, 2009. С. 42–44. [V. K. Itbaev, "Power characteristics of metal sleeves", (in Russian), in *Problems and prospects of engine building development: materials of the reports of the international scientific and technical conference, Samara, 2009*, pp. 42-44.]
2. **Вибрации** в технике. Справочник в 6-ти томах. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / под ред. И. И. Блехмана. М.: Машиностроение, 1979. 351 с. [I. I. Blechman (ed.), *Vibrations in technology. Reference book in 6 volumes. Vol. 2. Oscillations of nonlinear mechanical systems*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1979.]
3. **Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.** Вибропоглощающие свойства конструкционных 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.]
4. **Вялышев А. И., Тартаковский Б. Д.** О колебаниях систем с большими потерями // Колебания, излучение и демпфирование упругих структур. М.: Наука, 1973. С. 27–43. [A. I. Vyalyshev, B. D. Tartakovsky, "About fluctuations of systems with large losses", (in Russian), in *Vibrations, radiation and damping of elastic structures*. Moscow: Nauka, 1973.]
5. **Колебания**, излучение и демпфирование упругих структур / под ред. А. В. Римского-Корсакова. М.: Наука, 1973. 237 с. [A. V. Rimsky-Korsakov (ed), *Vibrations, radiation and damping of elastic structures*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1973.]
6. **Тюленев В. Н.** Определение рассеяния энергии в материалах при установившихся резонансных колебаниях // Прочность и динамика авиац. двигателей. М.: Машиностроение, 1970. Выпуск 5. С. 169–193. [V. N. Tyulenev, "Determination of energy dissipation in materials at steady-state resonant oscillations", (in Russian), in *Strength and dynamics of aircraft engines*. Moscow: Mashinostroenie, 1970. Iss. 5.]
7. **Меерсон М. Г., Глинкин И. М.** Исследование демпфирующих характеристик фторопластовых рукавов // Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. Киев: Наукова Думка, 1972. С. 251–259. [M. G. Meerson, I. M. Glinkin, "Investigation of damping characteristics of fluoroplastic hoses", (in Russian), in *Energy dissipation during vibrations of mechanical systems*. Kiev: Naukova Dumka, 1970.]
8. **Сираев Э. З., Итбаев В. К.** Демпфирующие характеристики фторопластового шланга // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Труды КуАИ. 1983. С. 57–60. [E. Z. Siraev, V. K. Itbaev, "Damping characteristics of the fluoroplastic hose", (in Russian), in *Vibration strength and reliability of engines and systems of aircraft: Trudy KuAI*, pp. 57-60, 1983.]

9. **Матвеев В. В.** Демпфирование колебаний деформируемых тел. Киев: Наукова думка, 1985. 264 с. [V. V. Matveev, *Damping of vibrations of deformable bodies*, (in Russian). Kiev: Naukova Dumka, 1985.]

10. **Писаренко Г. С.** Колебания механических систем с учетом несовершенства упругости материала. Киев: Наукова думка, 1970. 380 с. [G. S. Pisarenko, *Vibrations of mechanical systems taking into account the imperfection of the elasticity of the material*, (in Russian). Kiev: Naukova Dumka, 1970.]

11. **Сираев Э. З., Итбаев В. К., Зиновьев В. А.** Основные результаты теоретического и экспериментального исследований колебаний гибких металлических рукавов и компенсаторов // Проектирование и производство гибких трубопроводов и сильфонов: Труды НИИД. 1984. Выпуск 2. С. 104–116. [E. Z. Siraev, V. K. Itbaev, V. A. Zinoviev, "The main results of theoretical and experimental studies of vibrations of flexible metal hoses and compensators", (in Russian), in *Design and manufacture of flexible pipelines and bellows: Trudy NIID*, iss. 2, pp. 104-116, 1970.]

12. **Хронин Д. В.** Теория и расчет колебаний в двигателях летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 407 с. [D. V. Chronin, *Theory and calculation of vibrations in aircraft engines*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1970.]

13. **Гусенков А. П., Лукин Б. Ю., Шустов В. С.** Унифицированные гибкие элементы трубопроводов: Справочное пособие. М.: Издательство стандартов, 1988. 266 с. [A. P. Gusenkov, B. U. Lukin, V. S. Shustov, *Unified flexible pipeline elements: Reference manual*, (in Russian). Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1988.]

ОБ АВТОРАХ

ИТБАЕВ Валерий Каюмович, проф. каф. механики и цифрового проектирования. 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.

МУХАМАДЕЕВ Венер Рифкатович, ст. преп. каф. механики и цифрового проектирования. Дипл. магистра техники и технологии (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. взаимодействия наноструктурных покрытий с поверхностью нанесения.

ИТБАЕВ, Valery Kayumovich, Prof., Dept. of mechanics and digital design. Dipl. 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.

MUHAMADEEV, Vener Rifkatovich, senior lecturer, Dept. of mechanics and digital design of USATU. Dipl. Mag.-ing. (USATU, 2007).

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 2 (96), pp. 71-81, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).