

POWER CHARACTERISTICS FLEXIBLE METAL SLEEVES WHEN BENDING

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

Ufa State Aviation Technical University (UGATU)

^a *vener_muhamadeev@mail.ru*

Submitted 2022, June 10

Abstract. The bending stiffness of flexible metal sleeves depends on the properties of the material, the geometric parameters of the corrugated shell, the design parameters of the wire braid and operational factors (pressure in the sleeve, the bending radius of the sleeve). The results of experimental and computational studies of the power characteristics of 48 serial flexible metal hoses with internal diameters from 6 to 40 mm of various designs, at different values of internal pressure, different schemes and bending methods, different bending radii are presented. Hysteresis loops were constructed and analyzed at different values of the operating pressure inside the GMR. It is established that the typical force characteristic as the sleeve is loaded during bending consists of three regions: the first region is characterized by "soft" nonlinearity, the second region is an almost linear deformation region, the third region is a "hard" force characteristic, described by a semicubic parabola. A method for calculating the bending stiffness of metal hoses is developed, a comparison of calculated and experimental stiffness values is given.

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.

СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУКАВОВ ПРИ ИЗГИБЕ

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. Изгибная жесткость гибких металлических рукавов (ГМР) зависит от свойств материала, геометрических параметров гофрированной оболочки, конструктивных параметров проволоочной оплетки и от эксплуатационных факторов (давления в рукаве, радиуса изгиба рукава). Представлены результаты экспериментального и расчетного исследований силовых характеристик 48 серийных гибких металлических рукавов с внутренними диаметрами от 6 до 40 мм различного конструктивного исполнения, при разных величинах внутреннего давления, разных схемах и способах изгиба, разных радиусах изгиба. Были построены и проанализированы петли гистерезиса при разных величинах рабочего давления внутри ГМР. Установ-

лено, что типичная силовая характеристика по мере нагружения рукава при изгибе состоит из трех областей: первая область характеризуется «мягкой» нелинейностью, вторая область – практически линейная область деформирования, третья область – «жесткая» силовая характеристика, описывается полукубической параболой. Разработан метод расчета изгибной жесткости металлорукавов, приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений жесткостей.

Ключевые слова: гибкие металлические рукава (ГМР); гофрированная оболочка с винтовыми гофрами; гофрированная оболочка с параллельными гофрами; проволоочная сетчатая оплетка; пряди оплетки; силовые характеристики ГМР; петля гистерезиса ГМР; изгибная жесткость.

ВВЕДЕНИЕ

Изгибная жесткость гибких металлических рукавов (ГМР) зависит: от механических характеристик материала (σ_T, E); геометрических параметров, типа гофрированной оболочки и способа ее изготовления (d_y, h, t, r_1, r, S_0); конструктивных параметров оплетки ($d_{оп}, n, z, T, i, \alpha$); эксплуатационных факторов ($p, R_{изг}$). Обычно при силовых расчетах и расчетах на колебания ГМР заменяют эквивалентным стержнем с приведенным (условным) значением изгибной жесткости $(EJ)_{пр}$ [1]. Значение изгибной жесткости ГМР необходимо не только для расчета колебаний, но и для определения величин потребных изгибающих моментов [2], расчета реакций в месте присоединения ГМР к агрегату или к трубопроводу.

В работе [1] гибкий металлический рукав заменяется эквивалентным стержнем, состоящим из двух коаксиальных оболочек, одна из которых (внутренняя) наделяется характеристиками гибкой гофрированной оболочки, а вторая (наружная) наделяется характеристиками силовой оплетки.

После ряда преобразований предлагается следующее выражение для определения значения приведенной изгибной жесткости ГМР:

$$EJ_{пр} = \frac{E_{об}\pi D_{сп}^3 \sum_{j=1}^k S_0^3(j) \cdot t}{16h^3} + [c_0 + (1,35 + 0,0045R_{изг})\sigma_0] \cdot J_{оп}, \quad (1)$$

в котором первое слагаемое представляет собой изгибную жесткость гофрированной оболочки, а второе слагаемое (в квадратных скобках) – изгибную жесткость проволоочной оплетки под давлением рабочей среды. Значение коэффициента c_0 выбирается по графику, приведенному на рис. 1.

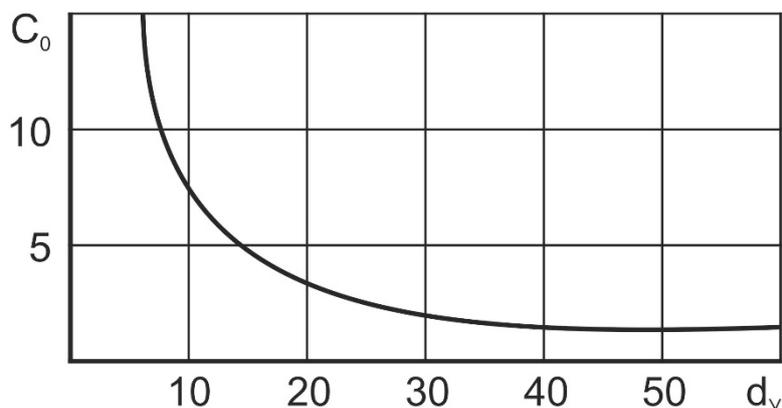


Рис. 1. Зависимость коэффициента c_0 от диаметра рукава

Расчет изгибной жесткости рукавов по формуле (1) справедлив в области больших изгибов, при $R_{изг} \leq (5 - 19)d_y$, т.е. в тех условиях, когда статические силы трения между прядями, проволочками оплетки, между оплеткой и гофрированной оболочкой преодолены, и все элементы рукава деформируются с минимальными силами трения. Поэтому формула (1) наиболее применима для расчета моментов и сил реакции в точках крепления рукавов при больших изгибах в процессе эксплуатации, а также расчета потребного изгибающего момента.

Как показали проведенные в отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Гибкие трубопроводы» (ОНИЛ ГТ) кафедры АД [2] эксперименты, при небольших прогибах рукава, когда относительная величина прогиба $\bar{y}_{max} = \frac{y_{max}}{l}$ составляет в среднем величину 0,01 и менее, силовая характеристика (зависимость силы от вызванного ею прогиба [3] имеет «мягкую» нелинейность. Нелинейность обуславливается тем, что в первоначальный момент времени рукав обладает максимальной изгибной жесткостью, из-за статических сил трения в элементах оплетки, а также между оплеткой и наружными закруглениями гофров. По мере изгиба рукава элементы оплетки постепенно, отдельными областями, начинают преодолевать статические силы трения и изменять ориентацию. В области сжатия, при изгибе рукава, происходит уменьшение угла оплетения, а на растянутой стороне – увеличение угла оплетения. Это явления впервые было отмечено в работах А. И. Крюкова [4].

Для изучения силовой характеристики рукавов при различных величинах прогиба были экспериментально исследованы 48 рукавов D_y ; 8; 10; 12; 14; 16; 32; 40; с гофрированными оболочками типа РГТА, СРГС, РГТ, с одной и двумя оплетками.

Экспериментальные исследования силовых характеристик ГМР производились при «U»-образном изгибе, консольном изгибе, поперечном нагружении ГМР по схеме горизонтальной балки с шарнирным креплением концов и одной перемещающейся опоры в горизонтальном направлении. Схемы установок приведены на рис. 2 – 4.

Установка для испытания рукавов при «U»-образном изгибе (рис. 2) представляет собой конструкцию шарнирного параллелограмма, которая включает неподвижную 1 и перемещающуюся параллельно ей, подвижную 2, планки. Планки соединены шарнирными тягами 3, в наконечниках которых установлены шарикоподшипники, внутренние кольца шарикоподшипников напрессованы на оси 4, 5. К верхней и нижней планкам механизма крепятся сменные ложементы 6, 7, в пазы которых за нейтральные участки рукавов хомутами 8, 9 крепится испытуемый рукав 10. До монтажа рукава масса всех элементов параллелограммного механизма уравнивается с помощью балансировочных грузов 11. Нагружение рукава при изгибе производится грузами 12, прикладываемыми к грузовой площадке 13.

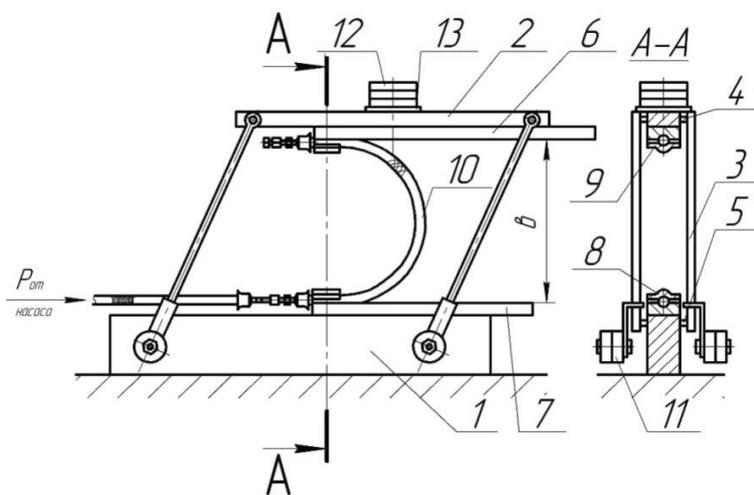


Рис. 2. Установка для исследования гибких металло рукавов при «U»-образном изгибе

На рис. 3 представлена схема установки для консольного изгиба металлорукатов. К стенке 1 крепится угольник 2, в котором с помощью переходника 3 монтируется испытуемый рукав 4, нагружение рукава производится следящей нагрузкой Q при помощи динамометра 5. Следящая нагрузка в данном случае означает что вектор Q всегда перпендикулярен первоначальной оси недеформированного рукава. Усилие прикладывается через динамометр 5, тросик 6 к обойме 7, закрепленной на арматуре рукава. Отсчет положений рукава производится по острию указателя 8, который скользит по стеклянному экрану 9. К нижней поверхности экрана приклеена координатная сетка с линиями значений коэффициентов силового подобия ($\beta_1 = \text{const}$, $\beta_2 = \text{const}$ и т.д.).

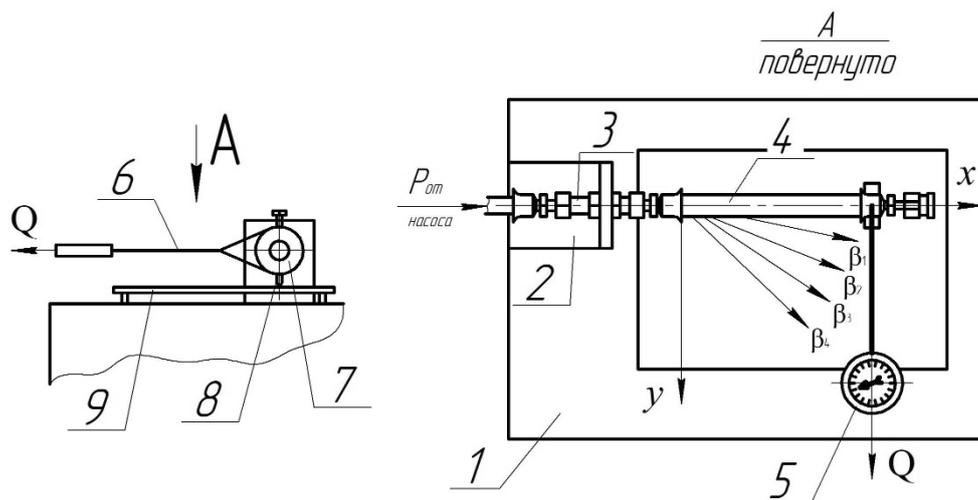


Рис. 3. Установка для исследования гибких металлорукатов при консольном изгибе

Принципиальная схема установки для изгиба рукавов в виде двухопорной балки представлена на рис. 4. Испытуемый рукав 1 устанавливается свободными концами в подшипники качения 2 и 3, причем опора 2 установлена на каретке 4 с элементами качения,двигающимися в направляющих. Установка снабжена устройством 5 для непрерывного поперечного нагружения рукава по середине его длины, и измерения величины прогиба при нагружении в прямом и обратном направлениях.

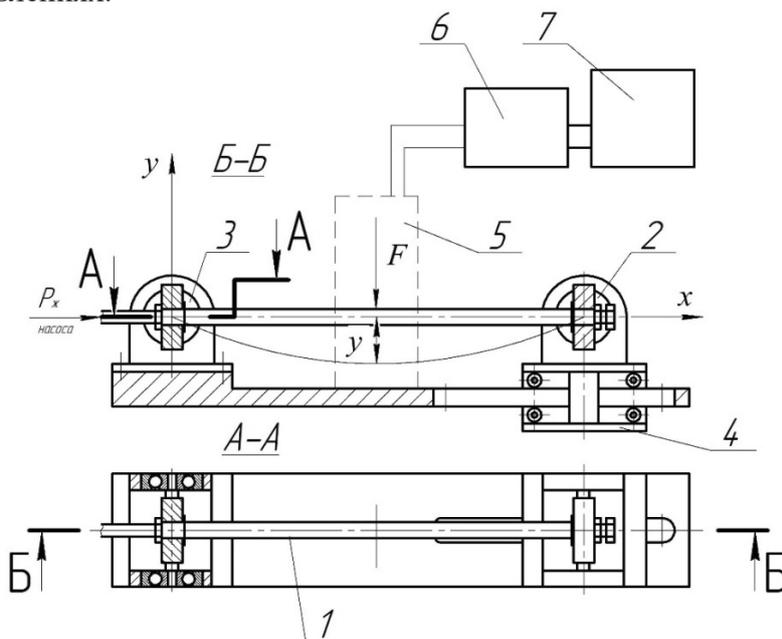


Рис. 4. Установка для исследования силовых характеристик и петель гистерезиса ГМР

На рис. 5–7 представлены типичные экспериментальные петли гистерезиса для рукавов

при различных величинах давления $\bar{p} = \frac{p}{p_{\text{раб}}}$.

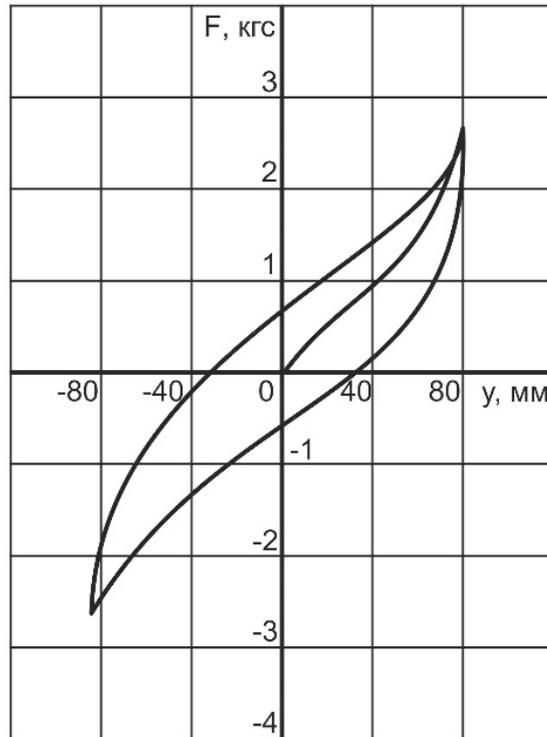


Рис. 5. Петля гистерезиса для рукава без внутреннего давления

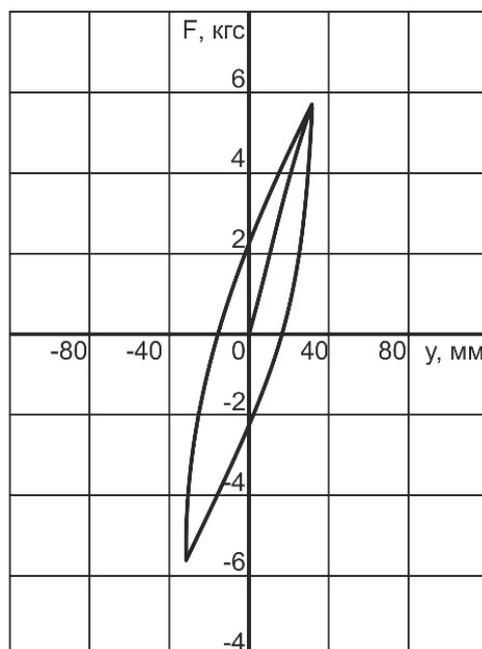


Рис. 6. Петля гистерезиса при внутреннем давлении $P = 0,5P_{\text{раб}}$

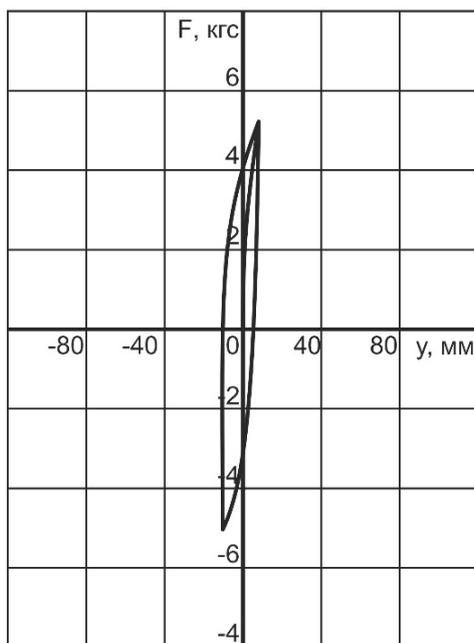


Рис. 7. Петля гистерезиса при внутреннем давлении $P = P_{\text{раб}}$

Типичная силовая характеристика рукавов $F = f(y)$ при деформировании имеет вид, представленный на рис. 8, которая разделяется на три области. Область I при $\bar{y} \leq \bar{y}_1$ первоначального деформирования характеризуется «мягкой» нелинейностью. В дальнейшем, по мере увеличения деформации рукавов ($\bar{y}_2 > \bar{y} > \bar{y}_1$), практически вся оплетка приходит в движение и освобождается от статических сил трения, этому соответствует область II, которая характеризуется почти линейной зависимостью $F = f(y)$. При дальнейшем увеличении деформации рукавов наблюдается «ужесточение» силовой характеристики рукавов $F = f(y)$, и, начиная с $\bar{y} > \bar{y}_2$, она приблизительно определяется полукубической параболой (см. рис. 8, область III). «Жесткая» силовая характеристика рукавов при больших прогибах или малых радиусах изгиба объясняется тем, что перемещение оплетки стеснено, и перераспределения углов оплетения на сжатой и растянутой стороне рукава не происходит.

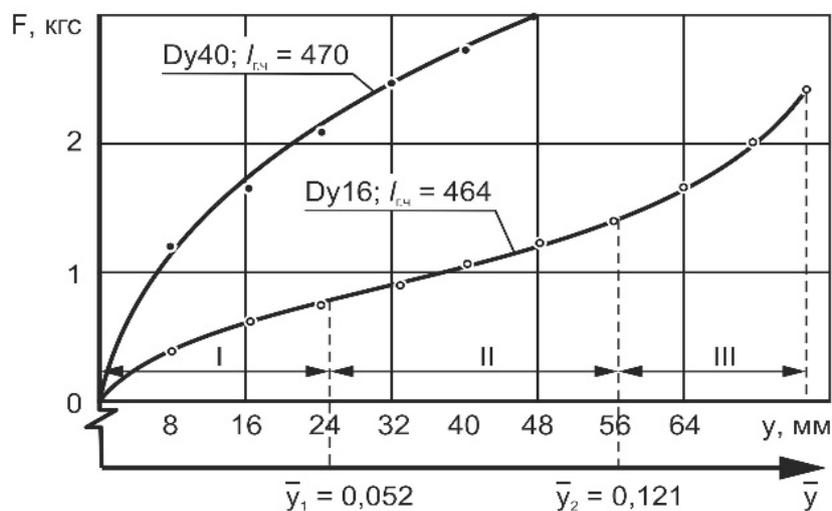


Рис. 8. Силовая характеристика рукавов

Для исследования поперечных колебаний рукавов, амплитуды перемещения которых соответствуют прогибам области I (см. рис. 8), важное значение имеет определение величины изгибной жесткости рукава в первоначальный момент деформирования и силовой характеристики рукава при дальнейшем деформировании.

Обработка экспериментальных данных по деформированию рукавов в области малых прогибов показала, что изгибная жесткость металлорукавов, соответствующая началу деформирования, определяется выражением

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

В выражении (2) первое слагаемое представляет собой изгибную жесткость гофрированной оболочки, величина

$$\sum_{i=1}^v \frac{E_{\text{оп}i} \cdot n_i \cdot z_i \pi \cdot d_{\text{пр},i}^4}{64}$$

определяет суммарную изгибную жесткость проволок оплетки, множитель

$$\left(\frac{718,2 d_{\text{пр,ср}}}{D_H} \right)^{0,2} \cdot 6,3 \nu^{0,258}$$

отражает взаимодействие проволок, прядей, слоев оплетения в зависимости от диаметра рукава. Слагаемое в квадратных скобках выражения (2)

$$\frac{\nu^{0,837} \cdot 3,4h}{t} (76 \bar{p}_1 + 34,07 \bar{p}_2^{0,25})$$

учитывает увеличение изгибной жесткости рукава при наличии внутреннего давления. Здесь, при величине относительного давления $\bar{p} = \frac{P}{P_{\text{раб}}}$ в интервале $0 \leq p \leq 0,3$ в формуле (2) используется только слагаемое $76 \bar{p}_1$, а при величине относительного давления в интервале $1,0 > P_2 > 0,3$ используются оба слагаемых $(76 \bar{p}_1 + 34,07 \bar{p}_2^{0,25})$. Таким образом, в формуле (2) учитывается нелинейная зависимость изгибной жесткости $(EJ)_{\text{пр}}$ от внутреннего давления. На рис. 9 представлены некоторые экспериментальные значения коэффициентов $K_{\text{р.эксп}}$, представляющие собой отношение изгибной жесткости рукава при действии внутреннего давления к изгибной жесткости рукава без внутреннего давления. Для сравнения, на рис. 10 приведены диапазоны расчетных значений коэффициентов

$$K_p = \frac{\nu^{0,837} \cdot 3,4h}{t} (76 \bar{p}_1 + 34,07 \bar{p}_2^{0,25}),$$

учитывающих влияние внутреннего давления на изгибную жесткость рукавов.

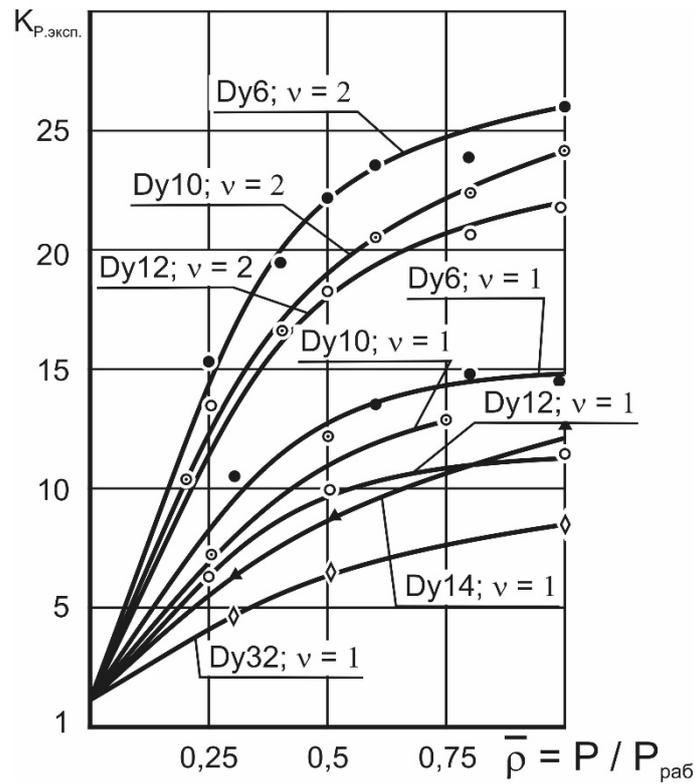


Рис. 9. Экспериментальные значения $K_{P,exp}$.

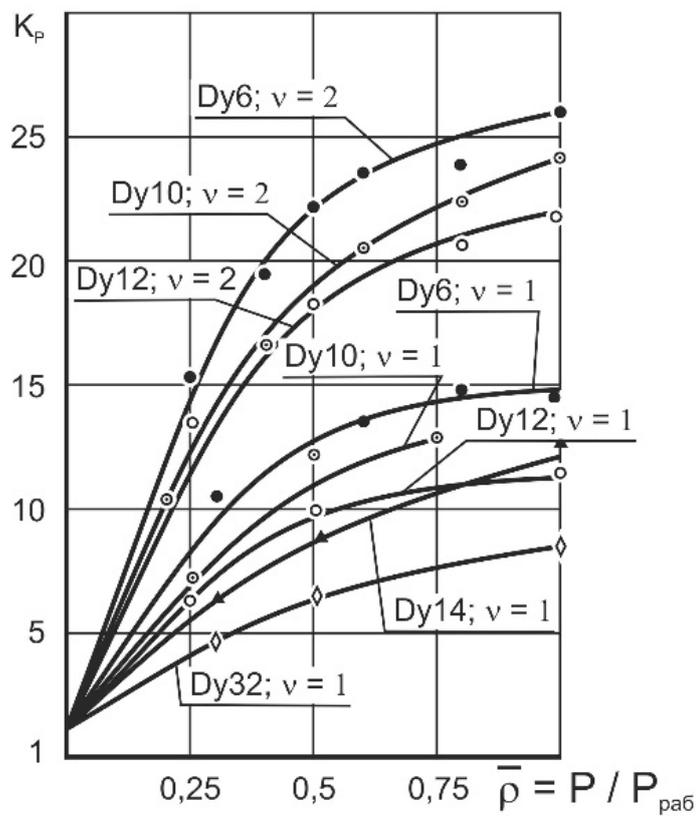


Рис. 10. Диапазоны расчетных значений K_p для наиболее употребительных рукавов

В табл. 1 представлены расчетные и экспериментальные значения изгибной жесткости рукавов различных типоразмеров в первоначальный момент деформирования. Здесь под порядковыми номерами 1–6 приведены параметры оплеток рукавов, а под номерами 7–9 – основные параметры профиля гофрированных оболочек рукавов. Расчетные изгибные жесткости оплетки $(EJ)_{оп}$ гофрированной оболочки $(EJ)_{об}$ и рукава $(EJ)_{пр}$ представлены соответственно под порядковыми номерами 10–12. Под порядковым номером 13 приведены экспериментально полученные значения изгибных жесткостей $(EJ)_{пр.э}$ при минимальных перемещениях, т.е. возможно близкие к первоначальному моменту деформирования рукавов.

Таблица 1. Основные параметры гибких металлических рукавов

№ п/п	Параметры рукава	Типоразмер рукава (D_v , тип)					
		6, РГТЦ		8, РГТЦ		10, РГТЦ	
1	ν	1	2	1	2	1	2
2	$d_{пр}$, мм	0,3	0,3 0,3	0,3	0,3 0,3	0,3	0,3 0,3
3	n	24	24 24	32	32 32	32	32 32
4	z	5	5 6	5	5 6	8	8 8
5	$t_{оп}$, мм	31	31 36	45	45 45	50	50 50
6	α , град	45°47'	45°47' 48°19'	50°59'	50°59' 49°34'	44°19'	44°19' 43°16'
7	h , мм	1,8	1,8	1,8	1,8	3	3,0
8	t , мм	1,3	1,3	1,3	1,3	2	2,0
9	$S_{оп}$, мм	0,12	0,12	0,12	0,12	0,3	0,30
10	$(EJ)_{опл.} \cdot 10^2$, Нм ²	11,23	29,38	14,62	34,63	22,45	53,63
11	$(EJ)_{об} \cdot 10^2$, Нм ²	0,738	0,738	1,373	1,373	14,88	14,88
12	$(EJ)_{пр} \cdot 10^2$, Нм ²	11,97	32,12	15,99	36	37,33	68,51
13	$(EJ)_{пр.э} \cdot 10^2$, Нм ²	11,29	25,3	14,28	33,05	–	–
		12, РГТЦ		14, РГТЦ		16, РГТЦ	
1	ν	1	2	1	2	1	2
2	$d_{пр}$, мм	0,3	0,3 0,3	0,4	0,4 0,4	0,5	0,5 0,4
3	n	32	32 32	32	32 32	32	32 32
4	z	8	8 5	7	7 7	7	7 7
5	$t_{оп}$, мм	70	70 45	70	70 70	96	96 70
6	α , град	49°7'	49°7' 35°45'	46°9'	46°9' 45°6'	46°59'	46°59' 37°91'
7	h , мм	3,5	3,5	3,5	3,5	6	6
8	t , мм	2,5	2,5	2,5	2,5	3,9	3,9
9	$S_{оп}$, мм	0,35	0,35	0,35	0,35	0,5	0,5
10	$(EJ)_{опл.} \cdot 10^2$, Нм ²	21,92	42,34	58,75	139,8	139,1	234,9
11	$(EJ)_{об} \cdot 10^2$, Нм ²	32,01	32,01	45,93	45,93	84,8	84,8
12	$(EJ)_{пр} \cdot 10^2$, Нм ²	53,93	74,34	104,71	185,7	223,9	319,7
13	$(EJ)_{пр.э} \cdot 10^2$, Нм ²	–	–	86,35	152,2	179,3	285,4

Окончание таблицы 1

№ п/п	Параметры рукава	Типоразмер рукава (D_v , тип)						
		20, РГТЦ		16, РГТА	20, СРГС	32, РГТ	40, РГТ	40, РГТ
1	ν	1	2	1	1	1	1	1
2	d_{np} , мм	0,5	0,5 0,5	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5
3	n	32	32 32	32	32	32	32	48
4	z	8	8 8	7	12	12	12	9
5	$t_{оп}$, мм	96	96 96	70	96	133	182	180
6	α , град	43°14'	43°16' 42°22'	44°50'	49°16'	46°3'	49°50'	49°45'
7	h , мм	6	6	3	3	4,2	4,2	4,0
8	t , мм	3,9	3,9	1,7	2,3	3,0	3,0	6,5
9	S_0 , мм	0,5	0,5	0,25	0,15	0,2 + 0,2	0,2 + 0,2	0,2
10	$(EJ)_{опл.} \cdot 10^2$, Нм ²	163,3	391,9	60,33	29,98	87,45	174,6	255,1
11	$(EJ)_{об} \cdot 10^2$, Нм ²	139,5	139,5	6,073	3,15	114,6	211,4	1,47
12	$(EJ)_{np} \cdot 10^2$, Нм ²	199,0	427,6	66,4	33,13	202,0	386,0	256,6
13	$(EJ)_{нп.э} \cdot 10^2$, Нм ²	–	321,5	–	–	172,0	350,0	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов большого объема экспериментальных исследований позволил определить общие закономерности в диаграммах «нагружение–перемещение» ГМР. Установлено, что при изгибе ГМР, по мере увеличения радиуса изгиба, наблюдаются три основные зоны: «мягкой», линейной, и «жесткой» силовой характеристики рукава. Предлагаемая методика расчета позволяет определить приведенное значение изгибной жесткости в наиболее важной для колебаний зоне – зоне малых прогибов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.]
2. Крюков А. И., Итбаев В. К. Определение усилий, возникающих при изгибе металлорукавов // Вопросы расчета и проектирования газотурбинных двигателей. Уфа: УАИ, 1975. Выпуск 46. С. 29–41. [A. I. Krukov, V. K. Itbaev, "Determination of forces arising during bending of metal sleeves", (in Russian), in *Proceedings UAI "Issues of calculation and design of gas turbine engines"*. Ufa: UAI, 1975. Iss. 46.]
3. 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.]
4. Крюков А. И., Глинкин И. М., Фионин В. И. Гибкие металлические рукава. М.: Машиностроение, 1970. 204 с. [A. I. Krukov, I. M. Glinkin, V. I. Fionin, *Flexible metal sleeves*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1970.]

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. 115-125, 2022.
ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).