

СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУКАВОВ ПРИ ИХ ИЗГИБЕ

Итбаев В.К., Ахматвалиев Р.Г.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

Изгибная жесткость и силовые характеристики гибких металлических рукавов (ГМР) [1] при их изгибах зависят от механических характеристик материала (σ_T , E), геометрических параметров и типа гофрированной оболочки (d_y , h , t , r , r_l , s_0), конструктивных параметров оплетки (d_{np} , n , z , T , i , α) и эксплуатационных параметров (p , $R_{изг}$).

Металлический рукав заменяется эквивалентным стержнем, состоящим из двух коаксиальных оболочек, одна из которых (внутренняя) наделяется характеристиками гофрированной оболочки, а другая (наружная) наделяется характеристиками силовой оплетки.

Значения приведенных параметров жесткости необходимы для расчетов потребного момента при изгибе ГМР, определения реакции опор в месте крепления рукавов к агрегатам или опорам, перемещающимся в процессе эксплуатации, для расчета колебаний ГМР и т.д.

В работе [1] предлагается следующее выражение для определения приведенного значения изгибной жесткости ГМР.

$$(EI)_{прив} = \frac{E_{об} \pi D_{сп}^3 \sum_{j=1}^k S_0^3(j) \mathcal{U}}{16 h^3} + [C_o + (1,35 + 0,0046 R_{изг}) \sigma_0] J_{он} \quad (1)$$

Здесь величины δ (толщина наружной силовой оболочки), $J_{он}$ (момент инерции сечения), σ_0 (окружное напряжение от давления) определяются выражениями

$$\delta = \frac{\sqrt{D^2 + \sum_{i=1}^v \frac{n_i z_i d_{np,i}^2}{\sin \alpha_i}} - D}{2},$$

где i – порядковый номер оплетки;

$$\alpha_i = \arctg \frac{T_{он,i}}{\pi [D + (\sum_{i=1}^v 2d_{np,i}) + d_{np,i}]}$$

- угол подъема винтовой линии

проволок оплетения;

$D_H = D + 2\delta$ – наружный диаметр силовой оболочки, которой аппроксимируется вся оплетка;

$D_{сп,он} = D + \delta$ – средний диаметр силовой оболочки;

$J_{on} = \frac{\pi}{64} [(D_H')^4 - D^4]$ - экваториальный момент инерции поперечного сечения силовой оболочки;

$\sigma_o = \frac{PD_{cp.on}}{2\delta}$ - окружное напряжение в силовой оболочке.

Значения коэффициентов C_o выбираются по графику $C_o = f(d_y)$, приведенному на рис. 1.

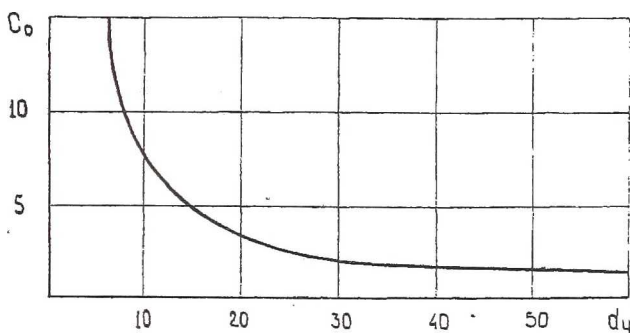


Рис. 1 Зависимость коэффициента C_o от внутреннего диаметра рукава

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, волокнами 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 реакций в точках крепления рукавов при больших изгибах в процессе эксплуатации, а также определения необходимого изгибающего момента.

Как показали проведенные авторами данной статьи экспериментальные исследования, 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) 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. Это явление впервые было отмечено в работе Крюкова А.И. [2].

Для изучения силовой характеристики рукавов при различных величинах прогиба авторами были экспериментально исследованы 48 рукавов D_y 6; 8; 10; 12; 14; 16; 32; 40 с гофрированными оболочками типа РГТА, СРГС, РГТ с одной и двумя оплетками.

На рис. 2, 3, 4 представлены типичные экспериментальные петли гистерезиса для рукавов при различных относительных величинах давления $\bar{p} = \frac{P}{P_{раб}}$. Типичная силовая характеристика рукавов $F=f(y)$ при деформировании имеет вид, представленный на рис. 5, которая разделяется на три зоны. Зона первоначального деформирования I ($\bar{y} \leq \bar{y}_1$), характеризуется «мягкой» нелинейностью.

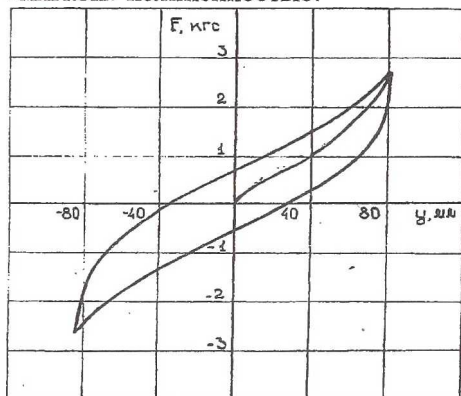


Рис. 2. Петля гистерезиса для рукава без внутреннего давления

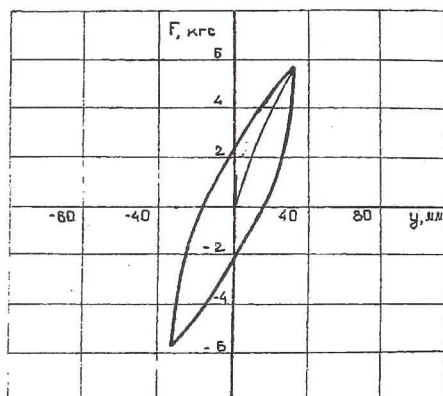


Рис. 3. Петля гистерезиса при внутреннем давлении в рукаве $p=0,5 p_{раб}$

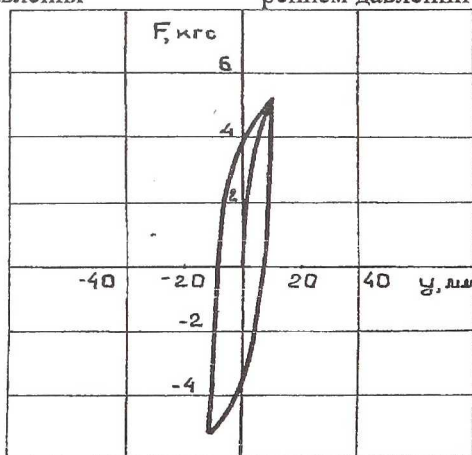


Рис. 4. Петля гистерезиса при внутреннем давлении в рукаве $p=1,0 p_{раб}$

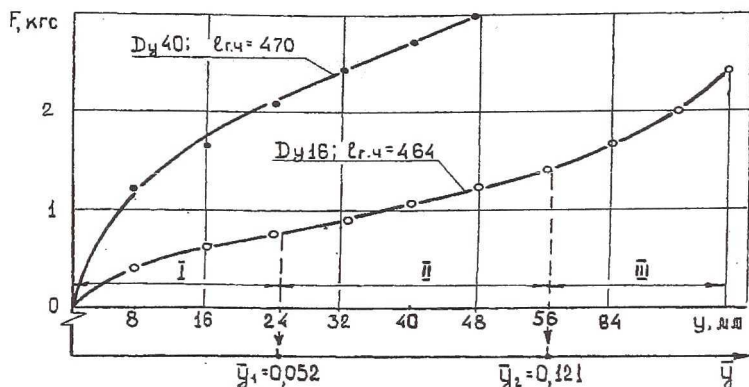


Рис. 5. Силовая характеристика рукавов

В дальнейшем, по мере увеличения деформации рукавов ($y_2 > y > y_1$), практически вся оплетка приходит в движение и освобождается от статических сил трения, этому соответствует зона II, которая характеризуется почти линейной зависимостью $F=f(y)$. При дальнейшем увеличении изгиба (деформаций ГМР) наблюдается «ужесточение» силовой характеристики рукавов $F=f(y)$ и, начиная с $\bar{y} > \bar{y}_2$, она приблизительно определяется полукубической параболой (см. рис. 5, зона 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.

В частности, для исследования поперечных колебаний рукавов, амплитуды перемещения которых соответствуют прогибам зоны I (см. рис. 5) 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 уравнением

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

В уравнении (2) первое слагаемое представляет собой изгибную жесткость гофрированной оболочки, величина $\sum_{i=1}^{\nu} \frac{E_{\text{он}} h_i z_i \pi d_{\text{нр.и}}^4}{64}$, определяет суммар-

ную изгибную жесткость проволок оплетки, множитель $\left(\frac{718,2 d_{np.ср}}{D_H}\right)^{0,2} 6,3 \nu^{0,258}$ - отражает взаимодействие проволок, пряжей, сло-

ев оплетения в зависимости от диаметра рукава. Слагаемое в квадратных скобках уравнения (2) $\frac{\nu^{0,837} 3,4 h}{t} (76 \bar{p}_1 + 34,07 \bar{p}_2^{0,25})$ - учитывает увели-

чение изгибной жесткости ГМР при наличии внутреннего давления. Здесь, при величине относительного давления $\bar{p} = \frac{P}{P_{р\text{аб}}}$ в интервале $0 \leq \bar{p} \leq 0,3$

в уравнении (2) используется только слагаемое $76 \bar{p}_1$, а при величине относительного давления в интервале $1,0 > \bar{p}_2 > 0,3$ используются оба слагаемых $(76 \bar{p}_1 + 34,07 \bar{p}_2^{0,25})$. Таким образом, в уравнении (2) учитывается

нелинейная зависимость изгибной жесткости $(EJ)_{np}$ от внутреннего давления. На рис. 6 представлены некоторые экспериментальные значения коэффициентов $K_{p.эксп}$, представляющие собой отношение изгибной жесткости рукава без внутреннего давления. Для сравнения, на рис. 7 приведены диапазоны расчетных значений коэффициентов, учитывающих влияние внутреннего давления на изгибную жесткость рукавов

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

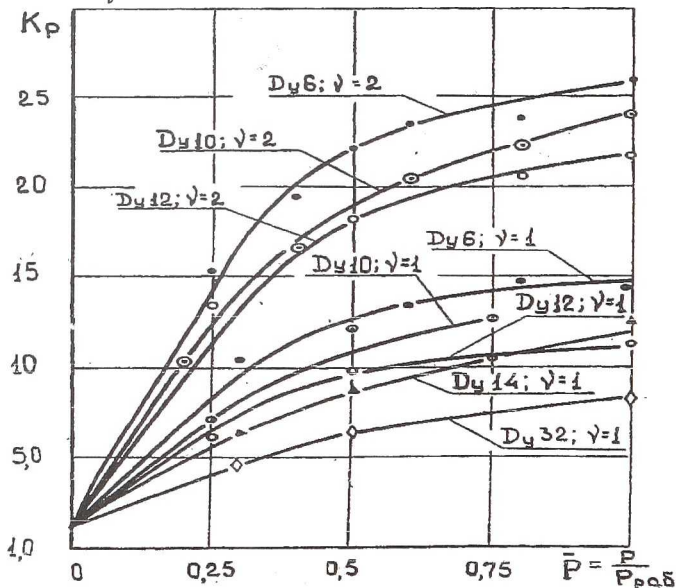


Рис.6. Экспериментальные значения коэффициента K_p

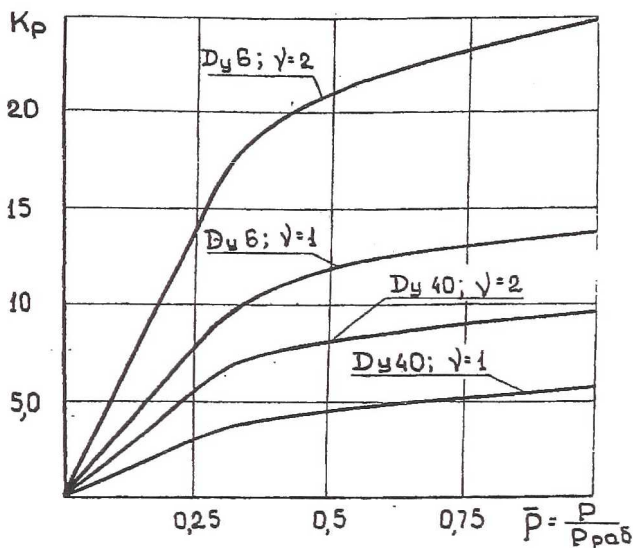


Рис.7 Диапазоны расчетных значений K_p для наиболее употребительных рукавов

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

- 1) Анализ результатов большого объема экспериментальных исследований позволил определить общие закономерности в диаграммах «напряжение – перемещение» ГМР.
- 2) Установлено, что при изгибе ГМР, по мере уменьшения 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 малых прогибов.

Список литературы

1. Гусенков А.П. Унифицированные гибкие элементы трубопроводов. – М.: Изд – во стандартов, 1988, 296 с.
2. Крюков А.И., Глинкин И.М., Фионин В.И. Гибкие металлические рукава. – М.: Машиностроение, 1970.-204 с.