

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

: В.А. Жаров

ИССЛЕДОВАНИЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧКОВЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 9
по курсу
«Основы конструирования приборов»

Земель А.И.

Москва

2001 г.

ТРУБЧАТЫЕ ПРУЖИНЫ

Трубчатые пружины с линейной характеристикой применяют в качестве приемников (датчиков) манометров — приборов измерения давления сжатых газов. Они представляют собой полые металлические трубки некруглого сечения (обычно эллиптического или овального), изогнутые по окружности (рис. 19.26, а), спирали или винтовой линии (рис. 19.27). Свободный конец трубки закрыт наглухо (герметически), а неподвижный соединяется с емкостью измеряемого давления p , под влиянием которого свободный конец получает некоторое перемещение $\lambda = \sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_t^2}$, передаваемое отсчетному или записывающему устройству непосредственно или с помощью передаточного механизма.

Сечение трубки может быть различным, но обязательно некруглым (рис. 19.26, б) или круглым, но

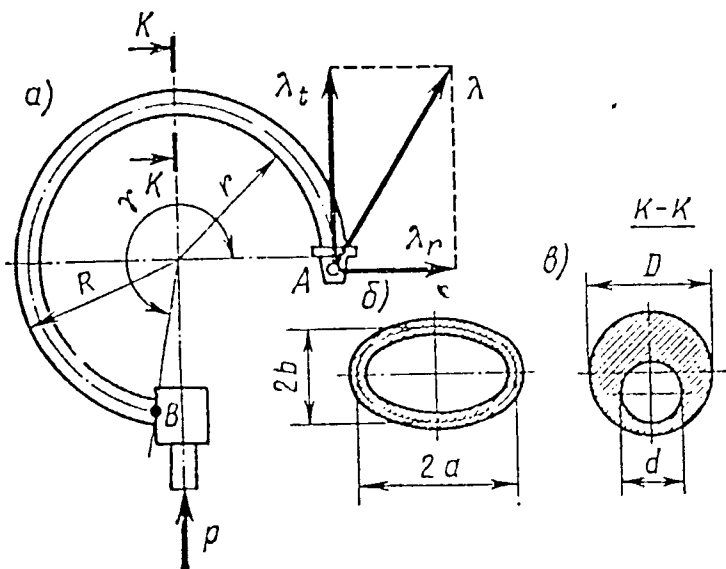


Рис. 19.26

с центром, смещенным относительно контура в сторону оси пружины (рис. 19.26, в). Под влиянием давления p поперечное сечение трубки деформируется, стремясь при этом принять круглую форму (малая ось увеличивается, а большая — уменьшается). В волокнах материала трубки, расположенных относительно нейтральной оси к центру, возникают напряжения сжатия, а в наружных волокнах — напряже-

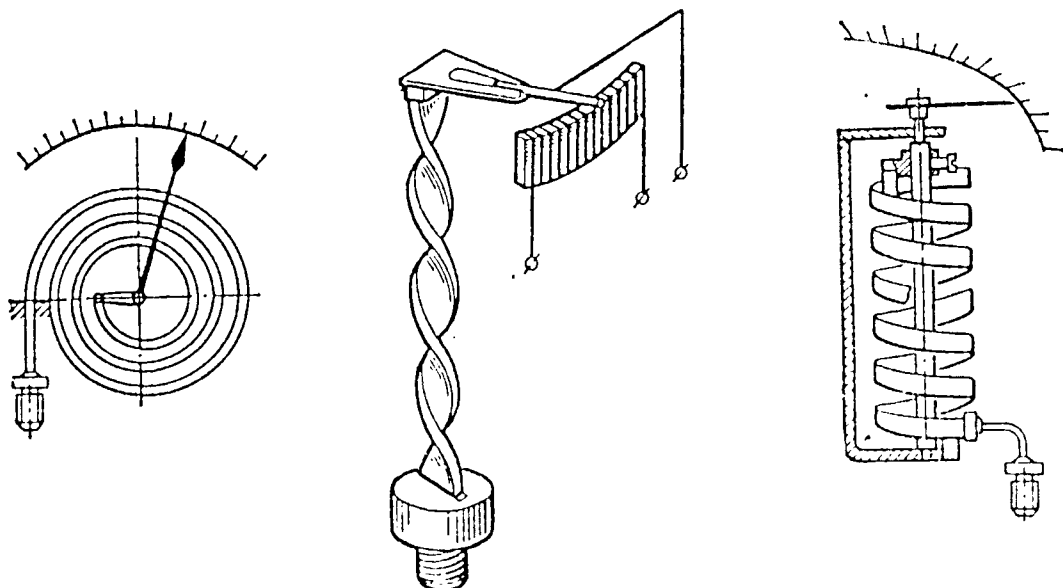


Рис. 19.27

ния растяжения. Под влиянием этих напряжений трубка стремится выпрямиться, создавая на свободном конце A тяговое усилие: радиальное Q_r и тангенциальное Q_t .

Значения этих усилий:

$$Q_r = 2M(1 - \cos \gamma) / [R(\gamma - \cos \gamma \sin \gamma)]$$

и
$$Q_t = 2M(\gamma - \sin \gamma) / [R(3\gamma - 4 \sin \gamma + \cos \gamma \sin \gamma)],$$

где $M = 24\rho ab(1 - b^2/a^2)\zeta / (\xi - \delta^2)$ — момент, создаваемый пружиной; ζ и ξ — коэффициенты, зависящие от отношения a/b :

a/b	4	5	6	7	8	9	10
α	0,437	0,408	0,388	0,372	0,360	0,350	0,343
β	0,121	0,121	0,121	0,120	0,119	0,119	0,118
ζ	0,069	0,065	0,062	0,060	0,058	0,057	0,056
ξ	0,552	0,524	0,504	0,488	0,476	0,467	0,459

Радиальная и тангенциальная составляющие перемещения конца пружины A равны соответственно

$$\lambda_r = (\Delta\gamma/\gamma)R(1 - \cos \gamma) \text{ и } \lambda_t = (\Delta\gamma/\gamma)R(1 - \sin \gamma),$$

где $\Delta\gamma/\gamma = \rho[(1 - \mu^2)/E][R^2/(bh)](1 - b^2/a^2)\alpha/(\beta + \delta^2)$;

ρ — измеряемое давление; $\delta = Rh/a^2$ — главный параметр пружины; α и β — коэффициенты.

Чувствительность трубчатых пружин зависит от угла γ . В пружинах, изогнутых по окружности (см. рис. 19.26), этот угол равен 270° . Значительно большей чувствительностью обладают спиральные пружины (рис. 19.27), в которых угол $\gamma > 2\pi$.

При отсутствии жестких требований к стабильности характеристики трубчатые пружины изготавливают из латуни Л62, Л68 или из фосфористой бронзы Бр.ОФ4-2,5. В ответственных случаях при повышенных давлениях и жестких требованиях к стабильности характеристики применяют бериллиевые бронзы (Бр.Б2,5 и БНТ1,9) и марганцевый мельхиор МНМц20-20. Пружины высокого давления изготавливают из сталей 50ХФА и 18ХНВА. Сплавы НЗ6ХТЮ и Н41ХТ применяют для трубок, работающих в агрессивных средах при $t = 200 \dots 300^\circ \text{C}$.

МЕМБРАНЫ

Мембранами называются гибкие тонкие, равномерно зажатые по периметру металлические и неметаллические пластины, воспринимающие внешние усилия и получающие под их влиянием значительные упругие деформации λ . Мембраны выполняют круглыми ($\varnothing 10 \dots 300$ мм) и в зависимости от формы пластины (плоская или гофрированная) они могут иметь линейную и нелинейную характеристики.

Плоские мембраны с нелинейной характеристикой (рис. 19.28, а) применяют в качестве преобразователей измеряемого давления p в усилие Q , воспринимаемое различными датчиками (например, емкостными). Под воздействием давления p мембрана прогибается. Так как при малых прогибах λ перемещения мембраны возникают в основном вследствие изгиба (рис. 19.28, б, в), а нейтральная плоскость мембраны ab почти не изгибается, то характеристика мембраны на заштрихованном участке (рис. 19.28, в) близка к линейной.

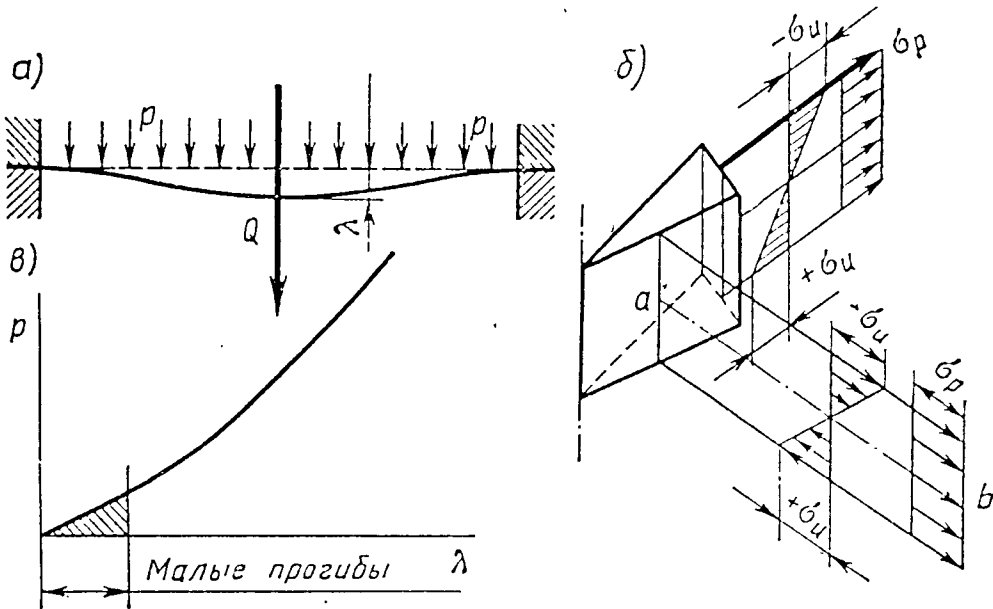


Рис. 19.28

При значительных нагрузках, когда прогиб плоской мембраны становится соизмеримым с ее толщиной, средняя нейтральная плоскость мембраны получает значительные удлинения. Это приводит к возникновению в мембране дополнительных напряжений растяжения, соизмеримых с напряжениями изгиба. Расчет таких пружин основан на нелинейной теории, учитывающей как изгиб, так и растяжение.

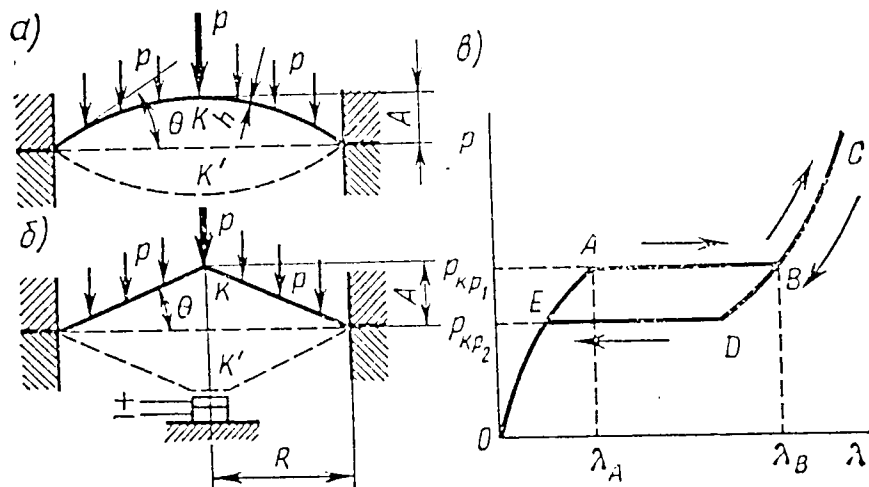


Рис. 19.29

При дальнейшем увеличении нагрузки деформация мембраны (прогиб λ) происходит главным образом вследствие растяжения. В этом случае расчет мембран производится по теории абсолютно гибких пластин, без учета их изгибной жесткости.

В электроконтактных устройствах автоматических систем часто применяют хлопающие мембраны (рис. 19.29), имеющие сферическую (а) или коническую (б) выпуклость. Под влиянием давления p со стороны выпуклости прогиб λ мембраны сначала нарастает плавно (кривая OA , рис. 19.29, в), а затем при некотором критическом давлении $p_{кр}$ мембрана теряет устойчивость и скачком увеличивает свой прогиб с λ_A до λ_B . При этом точка K мембраны перемещается в положение K' , а точка A характеристики — в положение B . В момент потери устойчивости (хлопка) мембраны происходит замыкание контактов K' , а их прижатие осуществляется дальнейшим повышением давления p и плавным нарастанием прогиба λ в соответствии с кривой характеристики BC .

Размыкание контактов производится разгрузкой мембраны (линия $CDEO$ характеристики) и ее возвращением в исходное положение вследствие давления p , действующего с противоположной стороны.

Значение критического давления и вид характеристики хлопающих мембран зависят от параметра давления $p' = pR^4/(Eh^3)$, где R — радиус проекции диафрагмы; h — толщина диафрагмы.

Для освобождения мембран от растягивающих деформаций им придают волнообразную форму (рис. 19.30, а...е), обеспечивающую при равных условиях нагружения бóльший прогиб без появления остаточных деформаций. Характеристика таких мембран зависит от формы волнистых складок и может быть линейной и нелинейной.

Одиночные, закрепленные по профилю мембраны применяют относительно редко. Чаще две одинаковые мембраны соединяют вместе и образуют мембранную коробку, обладающую вдвое бóльшим ходом. Такие коробки делятся на анероидные и манометрические. Ане-

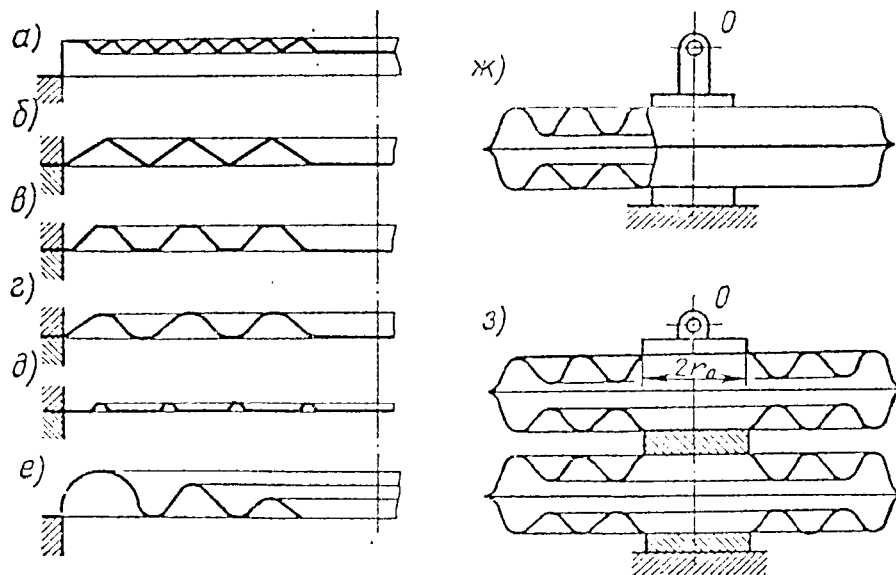


Рис. 19.30

роидные коробки (рис. 19.30, ж), внутри которых создан вакуум, применяют для измерения абсолютного давления. В манометрических коробках внутренняя полость соединяется с областью измеряемого давления. Для увеличения перемещения несколько коробок часто соединяют в блоки (рис. 19.30, з).

Металлические мембраны изготовляют из стали и бронзы, а эластичные неметаллические — из резины и пластмасс. Неметаллические мембраны менее жестки и позволяют получать большие перемещения. Недостатки неметаллических мембран обусловлены отрицательными свойствами их материалов: зависимостью модуля E от температуры, интенсивным старением резины, повышенной склонностью пластмасс к ползучести и др.

Для сообщения движения диафрагмы передаточному механизму прибора ее центральная плоская часть снабжается жестким центром O .

Прогиб плоской мембраны при малых перемещениях ($\lambda \ll h$)

$$\lambda = [3(1 - \mu^2)/16] pR^4/(Eh^3),$$

а при коэффициенте Пуассона $\mu = 0,3$ $\lambda = pR^4/(5,86 Eh^3)$.

При перемещениях, соизмеримых с толщиной пластины, прогиб определяется решением уравнения характеристики мембраны, которое в общем случае имеет вид

$$pR^4/(Eh^4) \approx [16/3(1 - \mu^2) \lambda_0/h] + \{(7 - \mu)/[3(1 - \mu)]\} \lambda_0^3/h^3,$$

а при $\mu = 0,3$ и с учетом некоторых уточнений, относящихся ко второму члену,

$$pR^4/(Eh^4) \approx 5,86 \lambda_0/h + 3,58 \lambda_0^3/h^3, \quad (19.23)$$

где R — рабочий радиус мембраны; h — ее толщина.

Уравнение (19.23) или соответствующая кривая I (рис. 19.31) позволяет по отношению λ_0/h определять допустимое давление для мембраны данных размеров или по известным размерам мембраны R и h — соответствующий прогиб центра мембраны.

Приведенное (эквивалентное) напряжение в сечении заделки мембраны (кривая II , рис. 19.31)

$$\sigma = 0,89 (Eh^2/R^2) (\lambda_0/h) \{ \lambda_0/2h(z + 3) \pm 1/(1 + \mu) \} (1 + z)/(1 - \mu),$$

где z — параметр, определяемый в зависимости от λ_0/h :

λ_0/h	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10
z	3,3	4,0	5,1	6,3	7,8	9,3	12,4	15,7	19,1	22,73	26,36	30,0	36,63

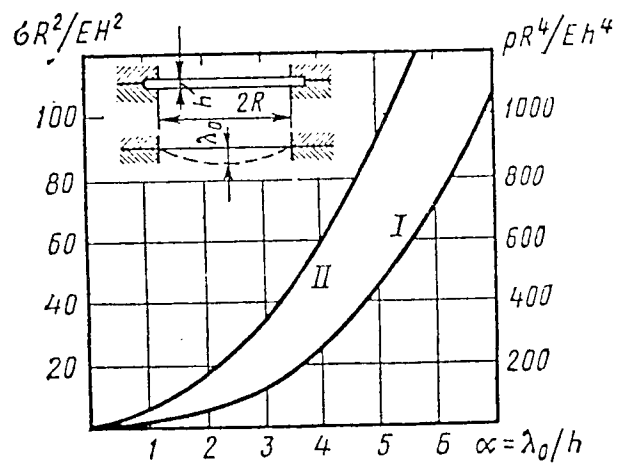


Рис. 19.31

Расчет гофрированных мембран производится на основе следующих зависимостей, справедливых для мембран с различным профилем гофров и широким диапазоном прогиба:

а) уравнение характеристики мембраны без жесткого центра

$$pR^4/(Eh^4) = a\lambda_0/h + b\lambda_0^3/h^3,$$

б) уравнение характеристики мембран с жестким центром

$$pR^4/(Eh^4) = \eta_p a\lambda_0/h + \zeta b\lambda_0^3/h^3.$$

В этих формулах a и b — коэффициенты, зависящие от формы волнистых складок. Коэффициенты ζ и η_p зависят от r/R , где r — радиус жесткого центра. Значения этих коэффициентов приводятся в специальной литературе.

Эффективная площадь гофрированных мембран может быть определена по приближенной формуле

$$F_{\text{эф}} = (\pi/3) (R^2 + Rr + r^2).$$

Погрешность определения $F_{\text{эф}}$ по этой формуле при $r/R < 0,5$ не превышает 6%, а при других значениях этого отношения — 30%. В более точных расчетах эффективную площадь определяют по относительной эффективной площади $F'_{\text{эф}}$:

$$F_{\text{эф}} = F'_{\text{эф}} \pi R^2.$$

На нелинейном участке характеристики эффективная площадь непостоянна: при восходящей характеристике с увеличением прогиба она возрастает, а при затухающей (слабо гофрированные и плоские мембраны) — уменьшается.

Изменение объема камеры при деформации λ_0 гофрированной мембраны

$$\Delta V = \pi R^2 \lambda_0 2(1 + \alpha) / [3(3 + \alpha)].$$

Здесь $\alpha = \sqrt{k_1 k_2}$, где k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от профиля гофров и их размеров.

СИЛЬФОНЫ

Сильфонами называют тонкостенные трубки с глубокими кольцевыми гофрами (рис. 19.32), способные под влиянием внутреннего давления p или осевой нагрузки A получать значительные осевые или угловые перемещения при характеристике, близкой к линейной. Это свойство обеспечило сильфонам широкое применение в качестве чувствительных элементов регулирующих устройств и приборов (манометров, манометрических термометров и др.).

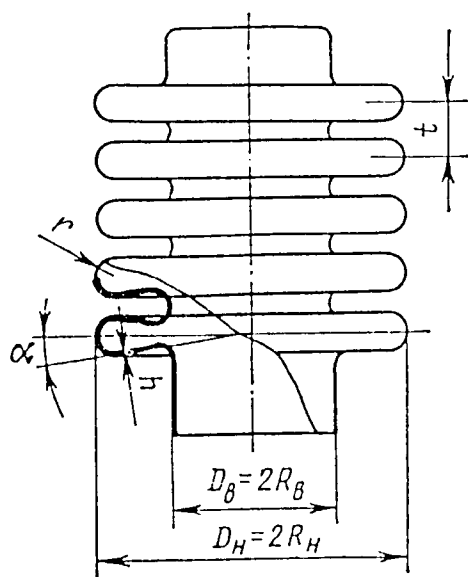


Рис. 19.32

Значительное изменение объема и эластичность стенок позволяют использовать сильфоны в качестве уплотнителей при разделении двух сред и для компенсации температурного расширения жидкостей.

Материалы сильфонов должны обладать высокой упругостью, прочностью при высоких давлениях, жаростойкостью, сопротивляемостью окислительным процессам, малым

гистерезисом. Этим требованиям удовлетворяют латунь Л80; бериллиевые бронзы Бр.Б2, Бр.Б2,5, Бр.БнТ1,9; сплавы НЗ6ХТЮ, НХН60В, ХН38ВТ; нержавеющие стали Х18Н9Т, 1Х14Н182Б и некоторые другие материалы.

При расчете сильфонов определяют осевое перемещение λ , называемое ходом сильфона, эффективную площадь $F_{эф}$ и тяговое усилие Q_T , по которым приближенно оценивают прочность.

По Феодосьеву, ход сильфона, вызываемый внутренним давлением p ,

$$\lambda = Q_T [(1 - \mu^2)/(Eh)] z / (A_0 - \alpha A_1 + \alpha^2 A_2 + B h^2 / R_b^2),$$

где $Q_T = p F_{эф}$ — тяговое осевое усилие; $F_{эф} = (\pi/4)(R_H - R_b)^2$ — эффективная площадь (R_b и R_H — внутренний и наружный радиусы); E и μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала сильфона; h — толщина стенки сильфона; z — полное число рабочих гофров; A_0 , A_1 , A_2 и B — коэффициенты, определяемые по графикам (рис. 19.33) в зависимости от геометрических параметров сильфона $c = R_H/R_b$ и $m = r/R_b$, где r — радиус закругления гофра; α —

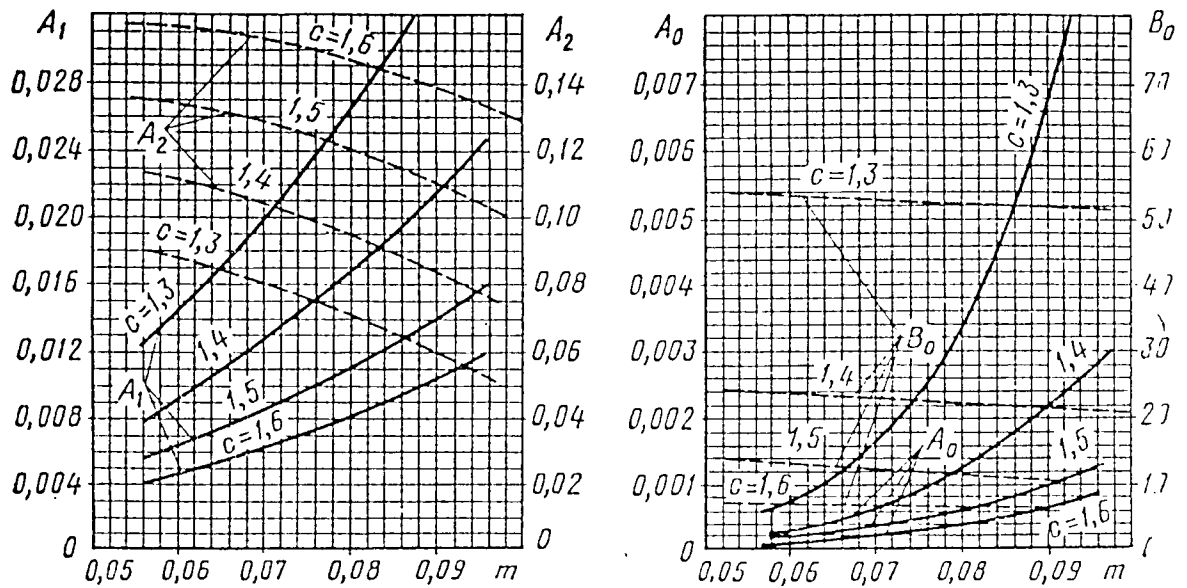


Рис. 19.33

угол уплотнения (угол наклона плоского участка гофра), определяемый по формуле $\alpha = (4r - t) / [2(R_n - R_v - 2r)]$, где t — шаг сильфона.

В тех случаях, когда требуется увеличить жесткость упругой системы и уменьшить влияние упругого гистерезиса в заданном диапазоне давлений, сильфон спаривают с винтовой пружиной, жесткость которой превышает жесткость сильфона.

Цель работы:

1. Практическое ознакомление с оболочковыми упругими элементами и их функционированием
2. Задача лабораторной работы – экспериментальное исследование упругой характеристики оболочкового упругого элемента.

Краткие, теоретические сведения.

Мембраны. Для расчета упругих характеристик исследуемых упругих элементов используются формулы:

$$\frac{p \cdot R^4}{E \cdot h^4} = \eta_p \cdot a_p \frac{\delta_m}{h} + \varphi_p \cdot B_p \frac{\delta_m^3}{h^3}$$

где:

E - модуль упругости первого рода материала трубки (Н/мм^2),

P - давление, действующее на мембрану, (Н/мм^2),

δ_m - перемещение (ход) жесткого центра мембраны, (мм) под действием давления,

h - толщина материала мембраны, (мм),

R - радиус мембраны, (мм),

η_p и φ_p - коэффициенты, зависящие от диаметра жесткого центра (табличные коэффициенты);

a_p и B_p - коэффициенты, зависящие от формы и размеров гофр, рассчитываются по формулам:

$$a_p = \frac{2(3 + \alpha)(1 + \alpha)}{3K_1 \left(1 - \frac{\nu^2}{\alpha^2}\right)} \quad B_p = \frac{32K_1}{\alpha^2 - 9} \left[\frac{1}{6} - \frac{3 - \nu}{(\alpha - \nu)(\alpha + 3)} \right]$$

где: $\alpha = \sqrt{K_1 K_2}$ - безразмерный параметр;

K_1, K_2 - табличные коэффициенты, зависящие от формы и размеров гофр,

ВНИМАНИЕ. Для правильного хода эксперимента давление в испытуемом оболочковом элементе необходимо сначала только повышать до МАКСИМАЛЬНОГО, а затем только снижать до НУЛЕВОГО ЗНАЧЕНИЯ

4.0. Результаты экспериментов оформите в виде таблицы 1 и определите суммарную абсолютную погрешность от гистерезиса и последействия, а также величину гистерезиса перемещения. Определите максимальное значение гистерезиса перемещения.

Давления p		Величина перемещения δ		Абсолютная погрешность от гистерезиса и последействия	Гистерезис перемещения
Число делений манометра	Величина	Повышение давления	Понижение давления		
	кПа	мм	мм	мм	%

5.0. По результатам эксперимента постройте упругую характеристику при повышении и снижении давления в исследуемом оболочковом элементе.

6.0. Используя выражения для расчета упругих характеристик исследуемых оболочковых упругих элементов, рассчитайте значения давления в оболочковом упругом элементе, с которым проводился эксперимент, для значений перемещений δ_{\max} ; $\delta_{\max}/4$, $\delta_{\max}/2$; $3\delta_{\max}/4$ на упругой характеристике $\delta=\delta(p)$, построенной по данным эксперимента при повышении давления. Результаты расчетов оформите в таблицу 2.

Значение перемещений (деформации) найденное на упругой характеристике при повышении давления	Полученное при расчетах значение давления
мм	кПа

Данные, необходимые для проведения расчетов:

а) Для мембранной коробки

$E=0.8 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$, $R=54 \text{ мм}$ ($D=108 \text{ мм}$), $h=0.7 \text{ мм}$, $\eta_p=1.08$, $\varphi_p=1.4$, $K_1=1.156$, $K_2=48.67$

б) Для трубки Бурдона

$E=0.98 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\rho_1=51.5 \text{ мм}$, $\gamma_0=(3\pi)/2$, $\alpha_1=\alpha_2=10 \text{ мм}$
 $\rho_2=46.3 \text{ мм}$, $b_1=2.875 \text{ мм}$, $b_2=3.1 \text{ мм}$, $\beta=0.121$, $h_1=0.42 \text{ мм}$, $h_2=0.47 \text{ мм}$.

Где: индексы соответствуют номерам установок.

эллиптического сечения и давлением, действующим на нее, определяются по формуле:

$$\delta_T = p \frac{1-\nu^2}{E} \frac{\rho^3}{bh} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{a}{\beta + \chi^2} \sqrt{(1 - \sin \gamma_0)^2 + (1 - \cos \gamma_0)^2}$$

где:

- δ_T — перемещение свободного конца трубки, (мм);
- p — давление внутри трубки (Н/мм²);
- γ_0 — начальный центральный угол трубки (когда она ненагружена измераемым давлением), (радиан);
- $\chi = \rho h / a^2$ — главный параметр трубки;
- ρ — начальный радиус кривизны трубки (не нагруженной измераемым давлением), (мм);
- а) h — толщина стенок трубки, (мм),
- a и b — большая и малая полуоси сечения трубки, (мм);
- α и β — коэффициенты, зависящие от отношения a/b (табличные коэффициенты).

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОЛОЧКОВЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

К основным характеристикам оболочковых упругих элементов относятся:

- упругая характеристика;
- чувствительность;
- жесткость;
- нелинейность упругой характеристики;
- тяговое усилие;
- силовая характеристика;
- упругое последствие и упругий гистерезис.

Упругая характеристика. У каждого оболочкового упругого элемента в его конструкции есть определенная точка (площадка), получающая наибольшее перемещение при воздействии на этот элемент нагрузки (давления, усилия). Такую точку (площадку) обычно используют для передачи данного перемещения на вторичные преобразователи. У мембраны, мембранной коробки, сильфона это — жесткий центр, у трубчатой манометрической пружины это — свободный конец. Упругой характеристикой оболочкового упругого элемента называется зависимость $\delta = \delta(P)$ между перемещением этой точки (площадки) и вызывающей это перемеще-

ние нагрузкой Δp , представляющей собой разность давлений, действующих изнутри и снаружи оболочкового элемента.

Упругие характеристики могут быть линейными и нелинейными (Рис 1).

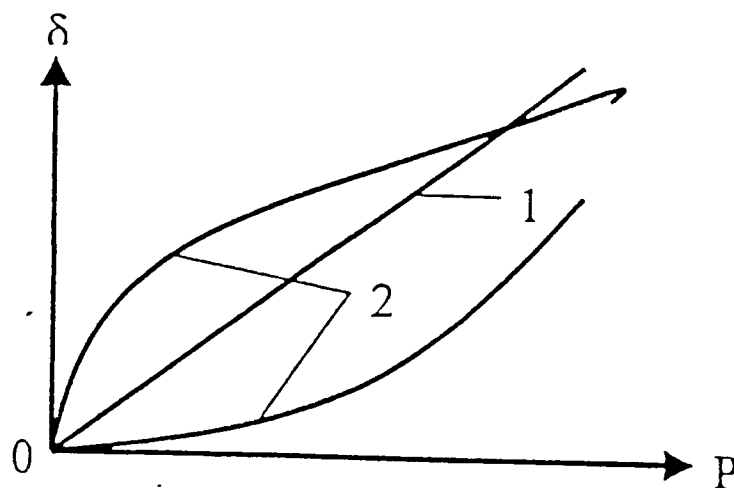


Рис.1

Используя оболочковый упругий элемент в приборе для измерения не давления, а некоторого другого параметра, связанного с воздействующим на оболочку давлением, стремятся к тому, чтобы упругая характеристика была линейной по данному параметру, так как в этом случае можно легко получить у прибора линейную шкалу по измеряемому параметру.

Вид упругой характеристики определяется в основном формой, глубиной, расположением гофр и толщиной оболочки.

Чувствительность и жесткость. Если оболочковый упругий элемент используется в приборе в качестве чувствительного элемента, то его основной характеристикой является чувствительность.

Чувствительность S оболочкового упругого элемента — это предел отношения приращения (изменения) выходной величины перемещения $\Delta \delta$ - (линейного или углового) к вызвавшему это приращение изменению входной величины давления Δp :

$$S = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{\Delta \delta}{\Delta p} = \frac{d\delta}{dp}$$

Чувствительность определяет прогиб (перемещение, ход), получаемый упругим элементом под действием давления. Чем больше чувствительность, тем больший прогиб получает упругий элемент.

Трубчатые пружины по сравнению с мембранными коробками и сильфонами обладают обычно значительно меньшей чувствительностью.

Жесткость K , представляя собой величину, обратную чувствительности, есть предел отношения приращения нагрузки (давления p) к соответствующему приращению перемещения:

$$K = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta \delta} = \frac{dp}{d\delta}$$

Понятие жесткость чаще используют по отношению к оболочковым элементам, которые должны при работе обеспечить определенное усилие.

Если упругая характеристика оболочкового элемента линейна, то его чувствительность и жесткость постоянны и могут быть найдены как:

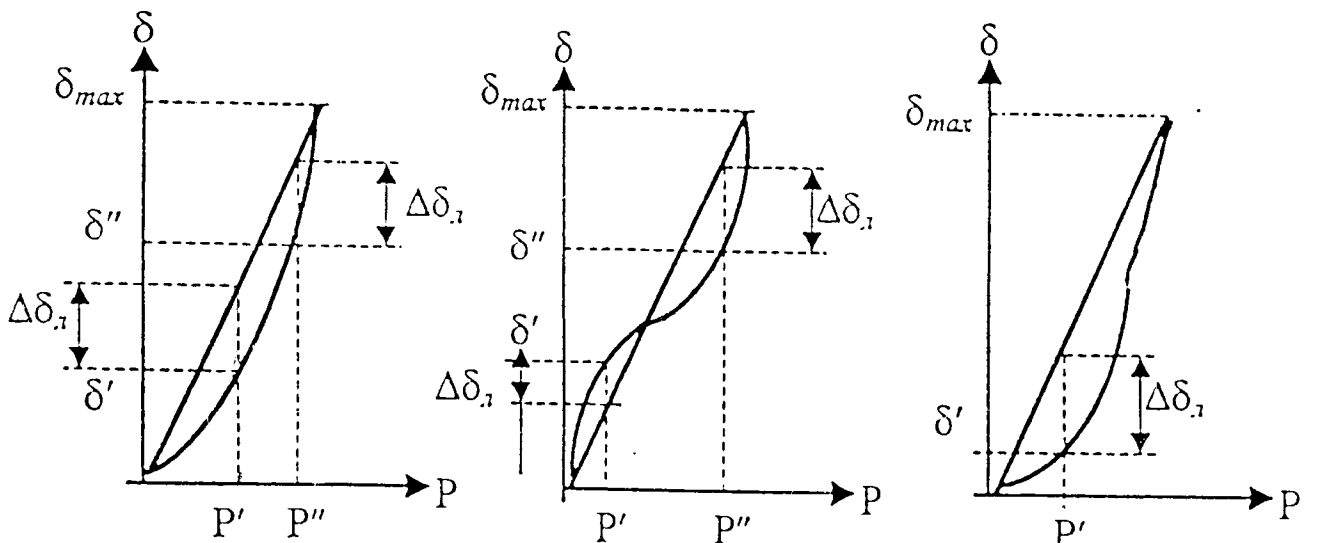
$$S = \delta/p \quad \text{и} \quad K = p/\delta$$

Графически чувствительность и жесткость в некоторой точке упругой характеристики могут быть определены через значения тангенсов углов наклона касательной, проведенной в этой точке, к соответствующим осям координат.

Чувствительность и жесткость оболочкового упругого элемента определяются его размерами, особенностями конструкции (форма гофра у мембраны, форма профиля у трубки и др.) и упругими константами материала.

Нелинейность упругой характеристики Отклонение упругой характеристики от линейной оценивается величиной нелинейности. Различают абсолютную нелинейность и относительную нелинейность.

Абсолютная нелинейность $\Delta\delta_n$ — представляет собой отклонение фактической упругой характеристики от линейной зависимости при наличии у них общих начальной и конечной точек (рис 2).



Абсолютная нелинейность может быть определена для любого значения давления на имеющейся нелинейной упругой характеристике.

Относительная нелинейность - это отношение абсолютной нелинейности к значению полного перемещения упругого элемента, при котором она измерена ε_n :

$$\varepsilon = \frac{\Delta\delta_l}{\delta} 100 \%$$

Обычно пользуются величиной:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta\delta_{l\max}}{\delta_{\max}} 100 \%$$

где:

$\Delta\delta_{l\max}$ максимальная абсолютная нелинейность упругой характеристики;

δ_{\max} наибольшее допустимое значение перемещения упругой характеристике.

При нелинейной характеристике упругого элемента его жесткость и чувствительность изменяются по мере возрастания перемещения.

Тяговое усилие - усилие Q , которое развивает оболочковый упругий элемент в определенной его точке (например на жестком центре мембраны и мембранной коробки или на свободном конце трубчатой пружины) при воздействии на него давления p .

В измерительных приборах с механическим преобразованием это усилие действует на входе механической передачи, преобразующей перемещение чувствительного оболочкового упругого элемента в перемещение указателя отсчетного устройства прибора.

Силовая характеристика - это зависимость тягового усилия от давления P , т.е. $Q=Q(p)$. Характер зависимости близок к характеру зависимости $\delta=\delta(p)$.

Упругое последствие и упругий гистерезис. После того, как нагрузка перестала изменяться (при нагружении) или уменьшилась до нуля (при разгрузке) оболочковый упругий элемент еще продолжает некоторое время деформироваться. Это явление называется упругим последствием (рис. 3а).

Отрезок OB показывает величину упругого последствия, исчезающего с течением времени, отрезок CD - показывает величину упругого последствия при постоянной нагрузке. Если допустить, что упругое последствие отсутствует, то тогда будет расхождение в величинах деформаций, соответствующих одной и той же нагрузке при нагружении и раз-

гружений. Несовпадение упругих характеристик при нагружении и разгрузении называется упругим гистерезисом (рис 36).

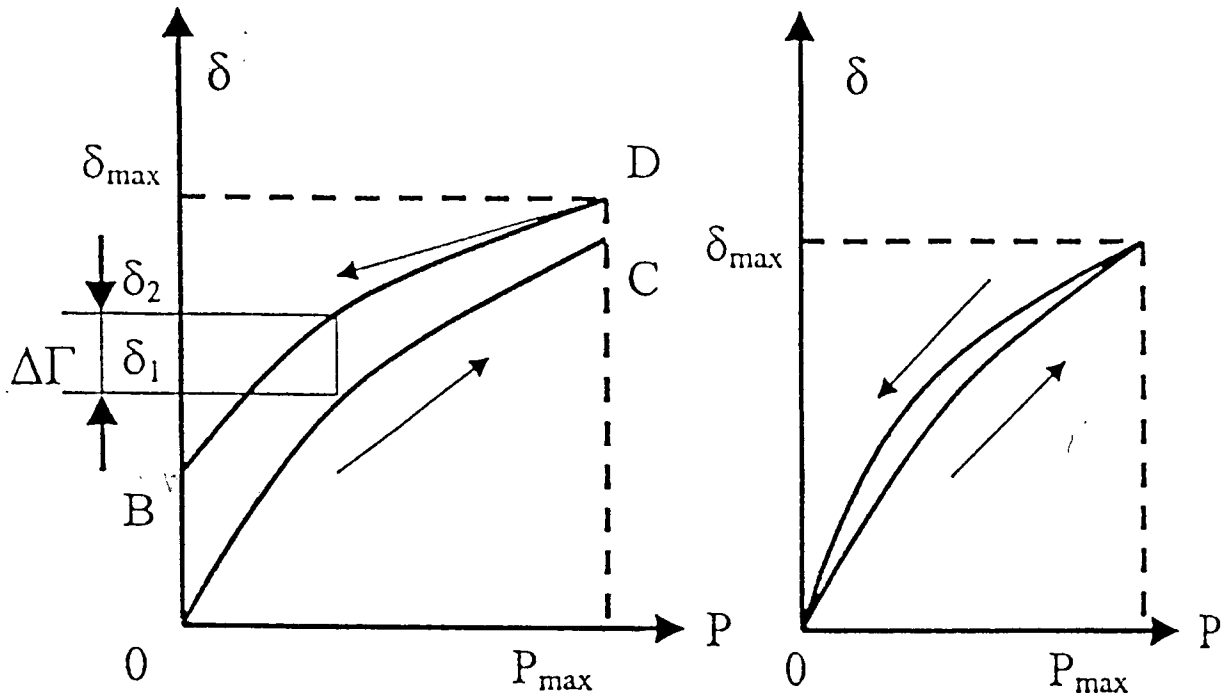


Рис 3

а) - упругое последствие

б) • упругий гистерезис.

При работе упругого элемента упругий гистерезис и упругое последствие возникают и появляются одновременно. Отрезок $\Delta\Gamma$ на рис 3а показывает суммарную абсолютную погрешность от гистерезиса и последствия при определенном режиме нагружения и разгрузки оболочкового упругого элемента:

$$\Delta\Gamma = \delta_2 - \delta_1 \quad \text{где: } \delta_1 - \text{перемещение при нагружении,} \\ \delta_2 - \text{перемещение при разгрузении}$$

На практике же для оценки погрешности от упругого последствия и гистерезиса обычно пользуются относительной величиной, которая называется гистерезисом перемещения ε_Γ :

$$\varepsilon_\Gamma = \frac{\Delta\Gamma}{\delta_{\max}} 100 \% = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_{\max}} 100 \%$$

где: δ_{\max} - максимальная величина перемещения на упругой характеристике.

Величины упругого последствия и упругого гистерезиса зависят от упругих свойств, применяемого материала и максимальной величины прикладываемой нагрузки. Кроме того, на упругое последствие оказывает влияние скорость изменения приложенной нагрузки и время ее дей-

ствия. Явления гистерезиса и последействия объясняются тем, что часть энергии расходуется на преодоление внутренних сил трения в материале.

Величина гистерезиса перемещения в упругих чувствительных элементах в зависимости от свойств материала и от величины напряжения в нем, вызываемых нагрузкой, может колебаться в широких пределах (0.02%....1.5%).

Описание лабораторной установки.

Схема лабораторной установки изображена на рисунке №-4. Лабораторная установка состоит из следующих основных узлов:

- а) гидравлического пресса с устройством для измерения создаваемого прессом давления;
- б) испытуемого оболочкового упругого элемента;
- в) устройства для измерения прогиба (перемещения) испытываемого оболочкового упругого элемента;
- г) бачка для рабочей жидкости (масла).

Гидравлический пресс представляет собой помещенный внутри корпуса 4 рабочий цилиндр 18, в котором с помощью ходового винта 19 перемещается поршень 17. Ходовой винт приводится во вращение вручную маховичком 1. В корпусе пресса также находится игольчатый клапан 16, открывающий доступ рабочей жидкости во внутреннюю полость испытуемого оболочкового упругого элемента 14 (такими элементами на одних установках являются мембранные коробки, а на других - манометрические трубки - трубки Бурдона) Клапан 16, студент выполняющий лабораторную работу закрывает или открывает вручную с помощью винта 15.

Устройством для измерения создаваемого гидравлическим прессом давления, воздействующего на испытуемый манометрический элемент, служит манометр 3.

Устройство измерения прогиба (перемещения) испытуемого оболочкового упругого элемента состоит из индикатора перемещения 10, установленного на кронштейне 11, который с помощью винта 13 фиксируется на стойке 12 Ножка 9 индикатора упирается штифт 8 в оболочкового элемента, мембранную коробку, либо трубку Бурдона, который передает перемещение. Бачок 5 рабочей жидкости имеет запорный игольчатый клапан 6, открывающий доступ жидкости (масла) в рабочую полость гидравлического пресса (открывает и закрывает клапан 6 выполняющий работу студент с помощью винта 7).

Кроме того, в бачке имеются: шариковый предохранительный клапан (на схеме не показан), отрегулированный на предельную максимальную величину давления в прессе и испытуемом оболочковом упругом элементе, а также сливной штуцер (на схеме не показан) для слива рабочей жидкости (масла) из бачка.

Внутренние полости испытуемого оболочкового элемента 14, бачка 5 и чувствительного элемента манометра 3 соединены с рабочей полостью пресса штуцерами 2.

Сведения по технике безопасности.

Рабочей жидкостью, воздействующей на оболочковый упругий элемент, является машинное масло. Оно подается в оболочковый элемент под давлением, которое создает выполняющий работу студент вручную при помощи гидравлического пресса. В связи с этим основную опасность представляет выплёскивание и выбрызгивание масла под давлением из лабораторной установки. Чтобы этого не произошло:

1. Запрещается вращать маховичок гидравлического пресса по часовой стрелке при закрытых клапанах 6, 16. Вращать маховичок можно только, внимательно ознакомившись с работой лабораторной установки, руководствуясь настоящим описанием и ее схемой, представленной на рис №.

2. Запрещается повышать давление масла в испытуемом чувствительном элементе выше отмеченного красной чертой предельного значения на шкале манометра.

3. Нужно внимательно и бережно относиться к испытуемым чувствительным элементам (мембранным коробкам и трубкам Бурдона), не допускать механических и других воздействий, приводящих к повреждению их оболочек - это не только выводит из строя лабораторную установку, но и приводит к вытеканию и разбрызгиванию масла из нее.

ВНИМАНИЕ! Масло является едкой, трудно удаляемой и воспламеняемой жидкостью.

Порядок выполнения лабораторной работы

Внимательно ознакомьтесь с основными теоретическими сведениями, описанием лабораторной установки, сведениями по технике безопасности, а также порядком выполнения работы.

1.0. Для проведения экспериментов с оболочковыми упругими элементами (мембранной коробкой или трубкой Бурдона) подготовьте лабораторную установку к работе.

- 1.1. Откройте клапан **6** вращением соответственно винтов 7 против часовой стрелки.
- 1.2. Клапан 16 закрыть.
- 1.3. Заполните рабочий цилиндр 18 рабочей жидкостью (маслом), перемещая поршень 17 вправо (15 - 20 оборотов) вращением маховичка 1 против часовой стрелки.
- 1.4. Подождите 10 - 15 секунд до полного заполнения рабочего цилиндра 18. Клапаны 6 - закрыть, 16 - открыть.
- 1.5. Проследите, чтобы ножка (9) индикатора 10 касалась исследуемого оболочкового упругого элемента (штифта 8).
- 1.6. Вращением шкалы индикатора 10 совместите ее нулевую отметку со стрелкой индикатора 10,
- 1.7. Закройте клапан 6 вращением винта 7 по часовой стрелке.
- 2.0. Определите цену деления (образцового манометра 3, для чего максимальную величину давления, для измерения которой может быть использован данный прибор (эта величина давления приведена на его шкале), нужно разделить на число делений всей шкалы (максимальное численное значение по шкале).
- 3.0. Снимите упругую характеристику $\delta = \delta(p)$ исследуемого оболочкового элемента.

Плавным вращением маховичка 1 по часовой стрелке переместите поршень 17 в рабочем цилиндре пресса влево, повышая тем самым давление в исследуемом оболочковом элементе от нуля до некоторой максимальной величины (не превышающей предельного значения, отмеченного на шкале манометра 3 красной чертой). При этом снимайте показания величины давления, создаваемого в оболочковом элементе, по шкале манометра 3 через $0.2 \text{ кгс/см}^2 \approx 20 \text{ кПа}$. Одновременно для каждого отмеченного показания величины давления по шкале индикатора 10 снимите значение величины перемещения (деформации) испытуемого оболочкового элемента.

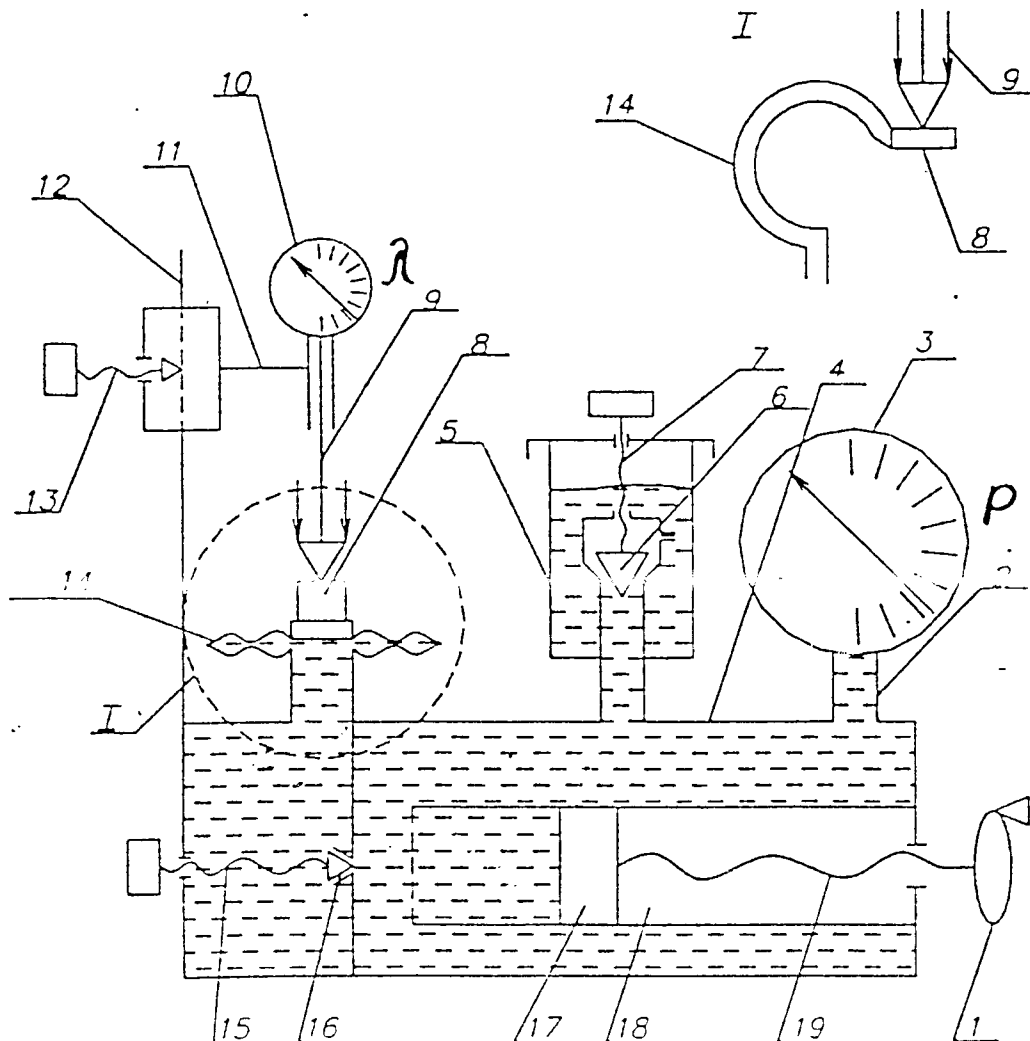
При достижении максимальной величины давления (не выходящей за красную черту по шкале манометра 3) в испытуемом оболочковом элементе отметьте соответствующее значение его перемещения (деформации). Затем, не изменяя величины давления, через несколько минут (через 2-3 минуты) сделайте вторую отметку значения перемещения оболочкового элемента по шкале индикатора 30.

После этого снижайте давление до нуля, также снимая показания по шкале манометра 3 через $0.2 \text{ кгс/см}^2 \approx 20 \text{ кПа}$ и соответствующее значение перемещения (деформации) испытуемого оболочкового элемента по шкале индикатора 10.

- 7.0. По результатам расчетов постройте упругую характеристику на том же графике, где уже построена упругая характеристика, полученная по результатам эксперимента.
- 8.0. Сравните по графику ход экспериментальной и расчетной упругой характеристики исследуемого оболочкового элемента. Проанализируйте результаты эксперимента и расчетов.
- 9.0. Оформите отчет.

Содержание отчета

Наименование и цель работы. Схема экспериментальной установки. Основные формулы, используемые при выполнении работы. Таблицы с результатами эксперимента и расчетов. График с упругими характеристиками полученными по результатам эксперимента и расчетов.



Пример использования манометрических датчиков.

На рисунке представлена схема указателя воздушной скорости летательных аппаратов (ЛА) с неполной температурной компенсацией. В ней применен кривошипшатунный механизм для передачи хода манометрической коробки 1 стрелке 11.

Введение неполной температурной компенсации основано на предположении, что температура, так же как и давление, изменяется с высотой по стандартному закону. Следовательно, температура и давление функционально связаны между собой. Поэтому, вместо того чтобы вводить температурную поправку путем непосредственного измерения температуры, можно учитывать изменение температуры с высотой, измеряя статическое давление. Естественно, что такой способ компенсации дает точные результаты только в случае, когда давление и температура изменяются с высотой по стандартному закону. При отклонении от стандартного закона в показаниях такого прибора появятся ошибки, но значительно меньшие, чем если бы в приборе вовсе не учитывалось изменение температуры.

Прибор работает следующим образом. Динамическое давление воздействует на манометрическую коробку 1, которая при перемещении жесткого центра поворачивает через тягу 2 кривошип 3 вокруг оси 4. На оси 4 укреплен ведущий кривошип 5, соединенный тягой 12 с ведомым кривошипом 6, плечо которого изменяется в зависимости от величины статического давления, воспринимаемого анероидной коробкой 7, укрепленной на оси 8.

При повороте кривошипа 6 вместе с осью 8 поворачивается зубчатый сектор 9 и трибка 10, на оси которой установлена стрелка 11. Сектор представляет собой урезанное зубчатое колесо, большая часть которого не входит в зацепление с трибкой. Такой прибор может быть выполнен с равномерной шкалой.

Величина динамического давления зависит от скорости движения ЛА относительно воздуха:

$$P_{дин} = f(v)$$

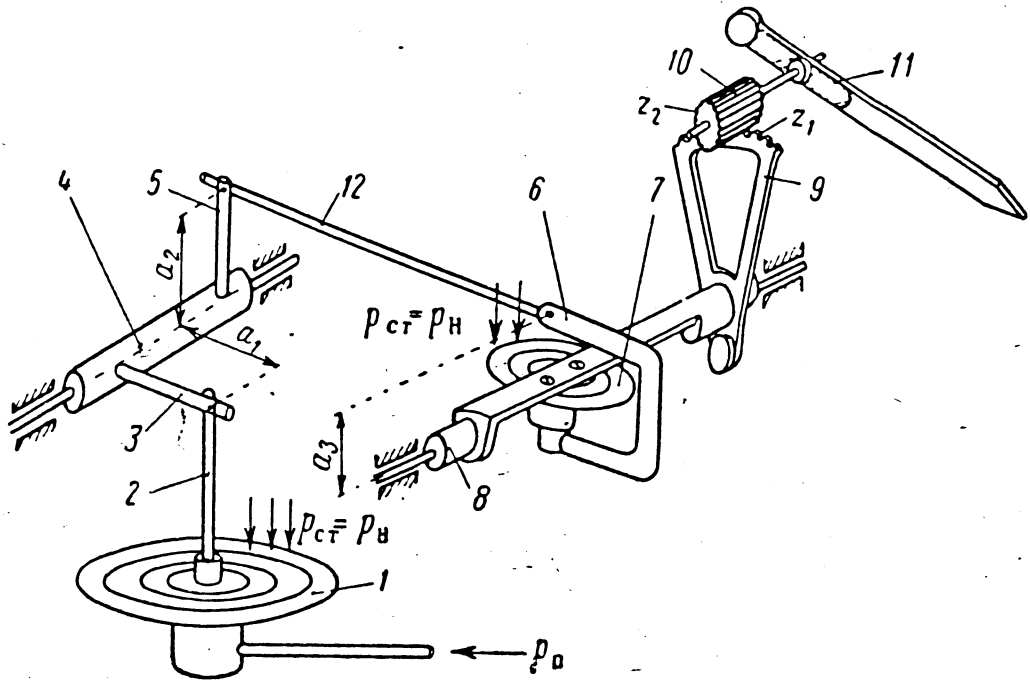
где, v - скорость ЛА,

$$P_{дин} = P_n - P_{ст}$$

P_n - полное давление, воспринимаемое трубкой 1.

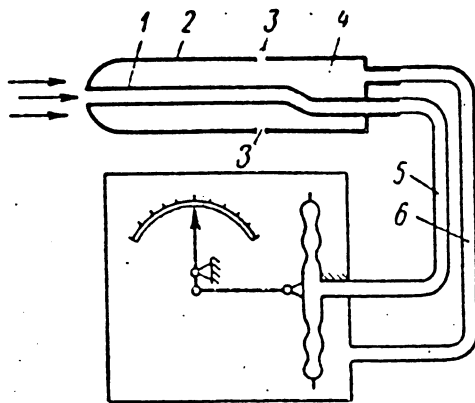
$P_{ст}$ - статическое давление поступающее через отверстия 3

рис. 4



Кинематическая схема указателя ИВС.

1—манометрическая коробка; 2—тяга; 3—кривошип; 4—ось; 5 и 6—кривошипы; 7—анероидная коробка; 8—ось; 9—сектор; 10—трибка; 11—стрелка; 12—тяга.



Принципиальная схема указателя скорости с комбинированным приемником воздушного давления (ПВД).

1—трубка полного давления; 2—цилиндрический чехол; 3—отверстия для отбора статического давления; 4—камера статического давления; 5—трубопровод динамического давления; 6—трубопровод статического давления.