ГЛАВА IV

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ (ПРУЖИННЫЕ) МАНОМЕТРЫ

Наиболее распространенным видом приборов для измерения давления являются деформационные (пружинные) манометры. Ими охватывается диапазон измерения от одного десятка мм вод. ст., т. е. от 100 Па (10^{-3} кгс/см²) (ГОСТ 2648—69) до 1000 МПа (10 000 кгс/см²) (ГОСТ 2405—72). Погрешности деформационных приборов составляют от $\pm 0{,}16\%$ (ГОСТ 6521—60) до $\pm 4\%$, а в отдельных случаях и $\pm 6\%$ (в процентах от верхнего предела измерений). Они выпускаются не только в обыкновенном исполнении, но и в виброустойчивом, антикоррозийном, пыле-, брызго- и взрывозащищенном исполнениях.

В корпусе этих приборов, отвечающем тем или иным специфическим требованиям исполнения, кроме основного узла — упругого чувствительного элемента, имеется также передаточный механизм.

Упругий чувствительный элемент представляет собой мембрану, коробку или трубку, способную деформироваться упруго под влиянием разности между внутренним и внешним давлениями. Величина этой деформации служит мерой разности упомянутых давлений.

Деформация упругого элемента обычно не может достигать сколько-нибудь значительной величины и ограничена пределами от долей до нескольких миллиметров. Чтобы сделать деформацию наглядной, а показания прибора удобными для пользования, манометры снабжены *передаточными механизмами*. Последние служат для передачи деформации упругого элемента, увеличенной в необходимое число раз, к движущемуся по шкале указателю.

21. УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТИПА ТРУБЧАТЫХ ПРУЖИН

Наибольшее распространение в настоящее время получили упругие элементы типа трубчатых пружин. Трубчатая одновитковая пружина — это сплющенная трубка чаще всего *эллиптического* (*овального*) или овального с прямолинейными участками поперечного сечения (рис. 30, *а*, *б* и *в*), изогнутая по дуге окружности так, чтобы большая ось сечения была перпендикулярна к плоскости изгиба. Один конец трубки закреплен неподвижно в цоколе манометра, через штуцер которого в трубку подается измеряемое давление. Другой свободный конец трубки запаян. Под влиянием избыточного внутреннего давления трубка несколько

раскручивается. Перемещения свободного конца трубки, увеличенные передаточным механизмом, дают информацию о величине давления в измеряемом пространстве.

Трубчатая пружина была предложена французом *Бурдоном* в 50-х годах прошлого столетия. Возможность применения металлической трубки для измерения давлений была открыта им случайно. По его сообщению Обществу гражданских инженеров в 1851 г. Бурдону понадобился змеевик, но мастер, которому было поручено изогнуть цилиндрическую трубку по винтовой линии, неудачно произвел операцию: он сплющил значительную часть трубки. Чтобы ее выправить, один конец трубки закрыли, а другим концом соединили ее с нагнетательным насосом. При повышении давления увидели, что трубка сама собой развертывается на некоторый угол. В результате явилась мысль использовать замеченное свойство трубки для устройства прибора, который служил бы для измерения давлений.

Несмотря на давность применения эллиптической трубки для измерения давления, очень долго не было дано объяснения, почему такая трубка под влиянием внутреннего давления раскручивается.

В течение продолжительного времени можно было встретить в литературе такое объяснение. Раскручивание трубки происходит вследствие того, что площадь верхней стенки трубки больше нижней и, следовательно, силы, действующие на них, различны. Поэтому при внутреннем давлении больше атмосферного трубка должна раскручиваться, а при разрежении внутри трубки, наоборот — скручиваться.

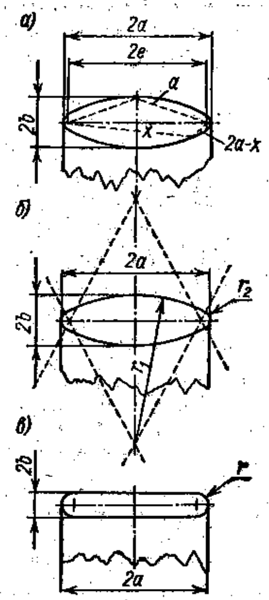

Рис. 30. Поперечные сечения трубчатых пружин: *а* — эллиптическое; *б* — овальное; *в* — овальное с прямолинейными участками

Простота и внешняя логичность этого рассуждения подкупают, однако оно ошибочно. Действительно, основываясь на указанном рассуждении, необходимо заключить, что тонкостенная трубка круглого сечения, согнутая по дуге, тоже должна под влиянием внутреннего давления раскрутиться, так как налицо те же условия. Однако опыт этого не подтверждает: такая трубка не раскручивается при любых давлениях. Причину этого следует видеть в том, что разница площадей (верхней и нижней) настолько ничтожна, что внутреннее давление, действующее на нее, не в состоянии создать момент сил, способный вызвать заметное раскручивание достаточно жесткой изогнутой трубки.

В 1872 г. появилось более правдоподобное объяснение, которое дал Хилл. В основу было положено, что под влиянием внутреннего давления малая ось поперечного сечения трубки увеличивается, но длина трубки остается неизменной и что трубка, будучи до деформации согнута по дуге окружности, после деформации также сохраняет форму дуги окружности.

Пусть через γ (рис. 31) будет обозначен угол между радиусами, проведенными к центрам поперечных сечений в начале и в конце длины трубки (центральный угол трубки), через R — размеры этих радиусов, а через b — размер малой полуоси среднего контура поперечного сечения трубки, имевшиеся до деформации и, соответственно, через γ', R' и b' — те же величины после деформации.

Из условия неизменности длины трубки до и после деформации следует, что ее наружная часть, имевшая вначале радиус $R+b$, так же, как и внутренняя с радиусом $R-b$, сохраняют первоначальную длину. Тогда будем иметь:

$$\gamma(R+b)=\gamma'(R'+b'); \quad (40)$$

$$\gamma(R-b)=\gamma'(R'-b'). \quad (41)$$

Вычитая из первого уравнения второе и разделив обе части полученного уравнения на два, имеем

$$\gamma b=\gamma' b'. \quad (42)$$

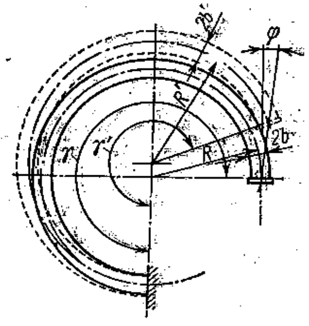

Рис. 31. Трубчатая пружина до и после деформации

Полученный результат является объяснением, почему трубчатая пружина разгибается под влиянием внутреннего давления: если поперечный размер трубки $2b$ увеличивается, то центральный угол ее γ должен уменьшиться, т. е. трубка должна разогнуться. Положим, что в результате деформации, увеличение малой полуоси поперечного сечения b равно Δb. Чтобы удовлетворить уравнению (42), угол γ должен уменьшиться на некоторую величину $\Delta\gamma$, т. е.

$$\gamma b=(\gamma-\Delta\gamma)(b+\Delta b) \text{ или } (\Delta\gamma-\gamma)/\gamma=-b/(b+\Delta b).$$

Прибавив по единице к правой и левой частям последней пропорции, получим окончательно

$$\Delta\gamma/\gamma=\Delta b/(b+\Delta b). \quad (43)$$

Пользуясь выведенным соотношением (43) и определив увеличение малой полуоси Δb, теперь легко найти и величину относительной угловой деформации трубки $\Delta\gamma/\gamma$, происходящей в плоскости ее симметрии.

Величина Δb может быть найдена как деформация эллиптического кольца, испытывающего внутреннее давление p. Однако результат, полученный таким образом, не может быть правильным.

Для иллюстрации этого положения выделим (рис. 32) двумя поперечными сечениями BE и CH кольцевой, имеющий эллиптическую или овальную форму, элемент трубчатой пружины $BCHE$, сечения которого плоскостью симметрии представлены на рисунке фигурами $ABCD$ и $EFGH$.

Если в основу вывода равенства (42) было положено упрощение — неизменность длины продольных волокон материала трубки, то на самом деле увеличение оси $2b$ на $2\Delta b$ и связанное с этим уменьшение угла BOC имеет следствием появление сил P и Q, растягивающих стенку трубки $ABCD$, и сил R и S, сжимающих $EFGH$. Вызванные ими реакции разгибают трубку, что не учитывалось при выводе формулы (43). Помимо того, силы упругости, противодействующие разгибанию трубки, будут уменьшать полученную без учета их действия величину деформации полуоси сечения Δb. Таким образом, в действительности трубчатая пружина испытывает деформации $\Delta\gamma$ значительно меньшие по величине, нежели значения, полученные упрощенным путем.

Рис. 32. Реакции, вызванные деформацией малой полуоси поперечного сечения трубчатой пружины

Приведенный анализ показывает, что внутреннее избыточное давление $p_{изм}$ вызывает в рассматриваемой трубчатой пружине усилия и деформации, которые имеют место как в плоскости симметрии пружины, так и в перпендикулярных к ней поперечных плоскостях и в значительнейшей степени взаимно связаны. Поэтому формулы, описывающие зависимость деформаций и внутренних напряжений от давления p, от свойств материала и от размеров трубчатых пружин, приведенные, например, в [1], все же недостаточно точны. Тем не менее практика изготовления и выбор типа манометров значительно облегчаются в том случае, если известны основные закономерности и тенденции, обусловливающие их конструктивные и эксплуатационные свойства. Это оправдает применение приведенных ниже формул.

Относительная угловая деформация $\Delta\gamma/\gamma$ тонкостенной трубчатой пружины ($b/h > 7$) под влиянием внутреннего избыточного давления p по Феодосьеву выражается формулой

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma}=p\,\frac{1-\mu^2}{E}\,\frac{R^2}{bh}\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\frac{\alpha}{\beta+\varkappa^2}, \quad (44)$$

где $\varkappa$ — главный параметр трубчатой пружины, $\varkappa=Rh/a^2$; μ — коэффициент Пуассона, $\mu=0{,}3$ для большинства металлов; для бронзы $\mu = 0,4$; E — модуль упругости материала пружины: для латуни Л-68 $E = 10^6$ кгс/см²; для бронзы $E = 1,35 \cdot 10^6$ кгс/см²; для стали $E = 2 \cdot 10^6$ кгс/см²; R — радиус изгиба центральной оси трубки в плоскости ее симметрии; h — толщина стенки трубки; a — большая полуось среднего контура сечения трубки; b — малая полуось среднего контура сечения; α и β — безразмерные коэффициенты, значение которых приведено в табл. 9 в зависимости от формы поперечного сечения и отношения полуосей a/b.

Перемещение конца трубки по направлению касательной к оси трубки в ее конце равно

$$w_t = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} R(\gamma - \sin\gamma). \qquad (45)$$

Перемещение по радиусу трубки

$$w_r = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} R(1 - \cos\gamma). \qquad (46)$$

Полное перемещение определяется, как

$$w = \sqrt{w_t^2 + w_r^2}, \qquad (47)$$

а направление полного перемещения образует острый угол φ, отсчитываемый от касательной, проведенной к дуге изгиба пружины в точке, соответствующей ее свободному концу,

$$\varphi = \operatorname{arc\,tg} \frac{1 - \cos\gamma}{\gamma - \sin\gamma}, \qquad (48)$$

где γ — центральный угол трубчатой пружины.

При угле $\gamma = 270°$, применяемом чаще всего в приборах с одновитковой пружиной, полное перемещение $w = 5,8R\Delta\gamma/\gamma$ направлено во внешнюю сторону под углом $\varphi = 10°$ к касательной к оси трубки в ее конце. Согласно уравнениям (45) и (46), перемещения свободного конца трубчатой пружины происходят по прямой линии и прямо пропорциональны величине γ, т. е. согласно формуле (44), пропорциональны измеряемому избыточному давлению $p_{изм}$.

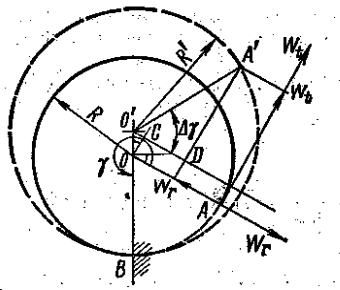

Рис. 33. К выводу закона перемещений свободного конца трубчатой пружины

Выражения (45) и (46) получены упрощением довольно громоздких более точных формул. Для вывода этих формул необходимо рассмотреть (рис. 33) перемещения точки A срединной линии (оси) трубчатой пружины, расположенной на свободном конце пружины. При выводе имеется в виду, что осевая линия трубки сохраняет неизменными свою длину и форму дуги окружности, а точка B противоположного защемленного конца пружины и касательная к окружности в этой точке неподвижны.

Центр окружности перемещается из точки O в точку O' на величину $R' - R$.

Так как $R' = R\gamma/(\gamma - \Delta\gamma)$, то, произведя вычитание, получим

$$R' - R = \frac{R\,\Delta\gamma/\gamma}{1 - \Delta\gamma/\gamma}.$$

Из рис. 33 видно, что

$$w_t = (R' - R)\cos\left(\gamma - \frac{3}{2}\pi\right) + R'\sin\Delta\gamma = \frac{\sin\Delta\gamma - (\Delta\gamma/\gamma)\sin\gamma}{1 - \Delta\gamma/\gamma} R.$$

Для радиальной составляющей

$$w_r = R'\cos\Delta\gamma - R - (R' - R)\sin\left(\gamma - \frac{3}{2}\pi\right) =$$

$$= \left[\frac{\cos\Delta\gamma - (\Delta\gamma/\gamma)\cos\gamma}{1 - \Delta\gamma/\gamma} - 1\right] R.$$

Так как $\Delta\gamma$ весьма мало по сравнению с γ и никогда не превышает 4°, то, не совершая большой ошибки, можно пренебречь величиной $\Delta\gamma/\gamma$ по сравнению с единицей и считать $\sin\Delta\gamma = \Delta\gamma$, а $\cos\Delta\gamma = 1$. В этом случае выведенные точные формулы для w_t и w_r превращаются в выражения (45) и (46).

Исследование точных формул показывает, что одинаковым уменьшениям центрального угла $\Delta\gamma$, т. е. одинаковым приращениям измеряемого давления соответствуют увеличивающиеся (по мере увеличения давления) линейные перемещения свободного конца трубчатой пружины. Мерой подобного отклонения от пропорциональной зависимости может служить увеличение $dw/d\gamma$, характеризующее предел отношения бесконечно малого перемещения свободного конца трубчатой пружины Δw к соответствующему $\Delta\gamma$. Оно составляет около 3,0% при изменении угла γ от 270° до 266°, т. е. на 4°. Причиной этого является увеличение расстояния между ее закрепленным и свободным концами, т. е. увеличение радиуса перемещения свободного конца пружины. Характер изменения в этом случае величин w_t и w_r (мм) при $R =$ = 100 мм показан в табл. 8.

Таблица 8

Координаты перемещений свободного конца трубчатой пружины

$\gamma - \Delta\gamma$	270°	269°	268°	267°	266°
w_t	0	2,124	4,262	6,416	8,584
w_r	0	0,356	0,685	0,985	1,256

Приведенная закономерность показывает, что перемещения свободного конца пружины на рассматриваемом участке движения очень близки к прямолинейным. При длине порядка 8,7 мм максимальное отклонение от средней части прямой, соединяющей концы рассматриваемого участка траектории и представляющей стягивающую этот участок хорду, составляет не более 0,06 мм.

В материале трубчатой пружины при этого рода деформациях возникают напряжения σ_1, перпендикулярные к поперечному сечению пружины, и напряжения σ_2 в поперечном сечении, которые в зависимости от давления p определяются формулами:

$$\sigma_1 = p\frac{R^2}{a^2}\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right)\frac{3}{\beta+\varkappa}\left(\frac{2}{\varkappa}\Phi \pm \mu\Omega\right); \quad (49)$$

$$\sigma_2 = p\frac{R^2}{a^2}\left(1-\frac{b^2}{a^2}\right). \quad (50)$$

Знак плюс соответствует наружному, а знак минус внутреннему контуру сечения пружины. Численные значения безразмерных коэффициентов Φ и Ω приведены в табл. 9 для середин широких и узких участков поперечного сечения в зависимости от вида и степени сплющенности сечения.

Таблица 9

Коэффициенты α, β, Φ и Ω к расчету трубчатых пружин

Вид сечения	Расчетные коэффициенты	a/b								
		1	1,5	2	3	4	5	6	8	10
Эллиптический	α	0,750	0,636	0,566	0,493	0,452	0,430	0,416	0,400	0,390
	β	0,083	0,062	0,053	0,045	0,044	0,043	0,042	0,042	0,042
	$\Phi_{шир}$	—	0,034	0,030	0,027	0,025	0,025	0,024	0,024	0,023
	$\Phi_{узк}$	—	−0,031	−0,029	−0,025	−0,023	−0,022	−0,022	−0,021	−0,021
	$\Omega_{шир}$	—	0,045	0,042	0,039	0,037	0,037	0,036	0,035	0,035
	$\Omega_{узк}$	—	−0,055	−0,058	−0,061	−0,063	−0,064	−0,065	−0,065	−0,066
Плоскоовальный	α	0,637	0,594	0,548	0,480	0,437	0,408	0,388	0,360	0,343
	β	0,096	0,110	0,115	0,121	0,121	0,121	0,121	0,119	0,118
	$\Phi_{шир}$	0,053	0,053	0,053	0,052	0,049	0,048	0,047	0,045	0,044
	$\Phi_{узк}$	−0,060	−0,060	−0,060	−0,060	−0,060	−0,060	−0,060	−0,060	−0,060
	$\Omega_{шир}$	—	0,56	0,51	0,46	0,42	0,40	0,40	0,38	0,37
	$\Omega_{узк}$	—	−0,45	−0,49	−0,45	−0,58	−0,60	−0,60	−0,62	−0,63

Действуя одновременно в разных направлениях в одной и той же точке материала трубки, осевое и поперечное напряжения образуют эквивалентное напряжение, согласно энергетической теории прочности равное

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1\sigma_2}. \quad (51)$$

Полученное эквивалентное напряжение должно обеспечивать нормальную работу прибора, т. е. не превышать предел пропорциональности материла трубки. Для латуни это ориентировочно от 250 до 450 кгс/см², для бронзы — от 350 кгс/см² до 700 кгс/см²,

для стали — от 1500 до 3000 кгс/см², в зависимости от легирующих примесей и обработки.

Для удобства пользования прибором желательно, чтобы деформации упругого элемента были как можно точнее, прямо пропорциональны давлению.

Закон Гука, гласящий, что под влиянием нагрузки упругие тела испытывают деформацию, пропорциональную величине нагрузки (в нашем случае величине давления), как известно, справедлив только до определенного предела увеличения нагрузки, называемого *пределом пропорциональности*. Механические свойства

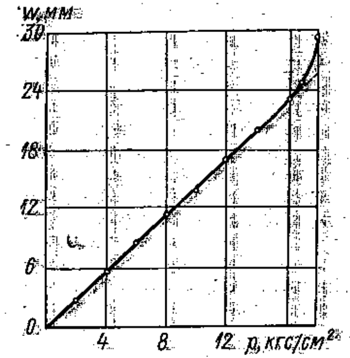

Рис. 34. График зависимости перемещений w конца трубчатой пружины от давления p.

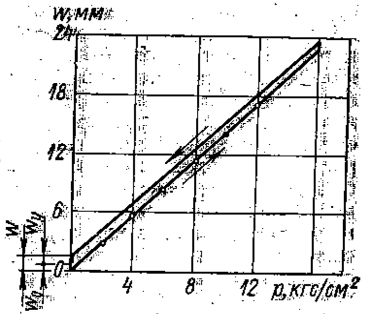

Рис. 35. График упругого последействия w_y и остаточной деформации w_0 при гистерезисе

материала пружины зависят от его химического состава, характера механической и термической обработок, которым была подвергнута пружина при изготовлении, а также и от температуры, при которой пружина должна работать.

Сообщая трубчатой пружине постепенно возрастающие давления и измеряя перемещения ее свободного конца, соответствующие каждому давлению, а затем изобразив графически зависимость перемещений от давлений, получим, например, кривую, изображенную на рис. 34. Как видно из рисунка, до давлений примерно в 16 кгс/см² кривая изображается прямолинейным участком, т. е. перемещения конца трубки прямо пропорциональны приложенному давлению. Выше этого предела, являющегося в данном случае пределом пропорциональности, деформация начинает расти быстрее давления и, следовательно, пропорциональность нарушается. Если описанное исследование выполнять весьма тщательно, то обнаруживается, что даже в пределах пропорциональности, после того как деформация быстро достигнет величины, приблизительно соответствующей сообщенному давлению, деформация продолжает медленно возрастать, асимптотически приближаясь к окончательной, предельной величине, хотя давление (рис. 35) не изменяется. Такое постепенное, с течением времени, увеличение деформации получило название *упругого последействия*. Величина упругого последействия тем больше, чем ближе давление подходит к пределу пропорциональности данной трубки. В некоторых случаях при давлении, равном пределу пропорциональности, упругое последействие достигает 2% от соответствующей этому давлению деформации, тогда как при давлении в 50% от предела пропорциональности в этих же упругих элементах упругое последействие составляет всего 0,5%.

Если теперь давление понижать, то конец трубки на величину w не возвратится в то положение, которое он занимал вначале при $p = 0$. Потребуется некоторое время (проявление упругого последействия) прежде, чем конец трубки приблизится на величину w_y к первоначальному положению — для разных пружин от нескольких минут до нескольких часов и даже суток. Точно до первоначального положения конец трубки не дойдет даже по истечении сколь угодно большого промежутка времени. Подобное явление представляет второе отклонение от закона Гука и носит название *остаточной деформации*. При повторных нагрузках величины остаточных деформаций w_0 накапливаются. В результате с течением времени погрешность измерения давления резко возрастает. Изложенным объясняется то, что для технических (рабочих) манометров верхний предел измерения ограничивается половиной давления, соответствующего пределу пропорциональности работающих в них трубчатых пружин. Кроме того, для обеспечения необходимого на практике запаса надежности и достоверности показаний технических манометров ГОСТ 2405—72 допускает, чтобы рабочий предел измерений избыточного давления не превосходил $^3/_4$ верхнего предела измерений манометра при постоянном давлении и $^2/_3$ верхнего предела измерения прибора при переменном давлении.

Для контрольных манометров верхний предел измерений назначается не более трети предела пропорциональности. В образцовых же манометрах остаточные деформации и упругое последействие совершенно не должны быть заметны. Имеется также в виду, что во время поверок давление в образцовых манометрах доводят непосредственно до верхнего предела. Поэтому для них верхний предел измерения ограничивают четвертой частью предела пропорциональности применяемых в них трубчатых пружин.

Трубчатые пружины для давлений до 50 кгс/см² изготовляются из латуни, томпака, лучше — из бронзы (сплавов меди с цинком, свинцом или оловом) либо из более сложных сплавов на медной основе. Особо высоким качеством обладает бериллиевая бронза. Свыше 5 МПа (50 кгс/см²) чаще применяют легированные стали различных составов. В последнее время начато применение сплавов никеля.

С повышением рабочей температуры предел пропорциональности пружин снижается, а упругое последействие и остаточные деформации возрастают. По этой причине, например, манометры, измеряющие давление пара, имеющего температуру, недопустимо высокую для трубчатых пружин, отделяют от пара гидравлическим затвором. Подводящую давление трубку свертывают в виде вертикально расположенных полутора спиральных витков, в которых накапливается конденсат, который и играет роль гидравли-

ческого затвора. В результате манометр всегда имеет температуру окружающей среды.

Температурная погрешность, т. е. изменения показаний с изменением температуры, для трубчатых пружин колеблется в весьма широких пределах (от 0 до 0,00013 на каждый °C и каждый кгс/см²) даже для пружин, изготовленных из одного и того же материала. При промышленных измерениях эти изменения несущественны и вводить на них поправку нет необходимости. При точных же измерениях вводить поправку затруднительно из-за неопределенности температурного коэффициента. Для точного измерения давления при температуре, отличной от нормальной (20 °C), выбирая прибор, следует убедиться в том, что он в этих условиях либо не изменяет заметно своей градуировки, либо если и изменяет, то (для возможности введения поправок) — что эти изменения имеют постоянный и закономерный характер. Вместо этого практичнее в этом случае вывести трубку, передающую измеряемое давление, в контрольное помещение с нормальной температурой (20 °C). Если при этом показания манометра необходимо иметь непосредственно на месте отбора давления, то следует применить дистанционную передачу показаний из контрольного помещения.

По устойчивости к воздействию температуры приборы в настоящее время (ГОСТ 2405—72) начали изготовлять четырех групп: наиболее устойчивые в интервале от —50 до +60 °C и наименее устойчивые от 10 до 35 °C. При этом изменение показаний приборов Δ (в процентах) не превышает значений, определяемых по формуле

$$\Delta = \pm [X + K(t_2 - t_1)],$$

где X — разность между показаниями при прямом и обратном ходе нагружения манометра; K — температурный коэффициент, установленный техусловиями на прибор, но не более 0,04 1/°C; t_1 — температура поверки; t_2 — температура в момент измерения (в допустимых пределах изменения ее).

Как видно из формулы (44), *чувствительность* пружины, т. е. перемещения ее конца, соответствующие единичному изменению измеряемого ею давления, растет с уменьшением толщины ее стенок h, с увеличением отношения a/b осей ее поперечного сечения и с увеличением радиуса R и центрального угла γ ее кривизны.

С увеличением чувствительности (при одном и том же материале) указанное выше изменение параметров h, R и a/b приводит, как это следует из формул (49) и (50), к уменьшению верхнего, допустимого для данной пружины, предела измеряемого ею давления.

При выборе размеров пружины для данных условий применения имеется лишь возможность изменять между собой соотношение отдельных параметров. Например, уменьшать угол γ можно (при небольших давлениях) за счет увеличения отношения a/b, как это делают для таких приборов, как термографы для записи температуры окружающего воздуха, где $\gamma = 90°$, но зато $a/b = 10$. Наоборот, сохраняя a/b небольшим, увеличивают γ (для увеличения работоспособности прибора, т. е. для увеличения перемещения свободного конца, сохраняя при этом неизменными перестановочное усилие и допустимую величину погрешности), доводя величину угла γ до пяти и даже семи витков, расположенных либо в одной плоскости (спиральные пружины), либо на одной цилиндрической поверхности (геликоидальные пружины промышленных самопишущих манометров).

Практика показала, что при достаточно высоких давлениях даже совершенно прямая толстостенная трубка с эксцентричным продольным, не доходящим до конца отверстием, под действием внутреннего давления испытывает некоторый изгиб. Такие неизогнутые трубчатые пружины применяются, например, в качестве чувствительных элементов в новых приборах ГСП (Государственной Системы Приборов) с верхними пределами измерения от 1000 до 10 000 кгс/см². Класс точности этих приборов, правда, не выше 1, тогда как в аналогичных приборах с обычными упругими элементами он может быть доведен до 0,6, из чего можно сделать вывод о незначительных прогибе и работоспособности трубок этого типа.

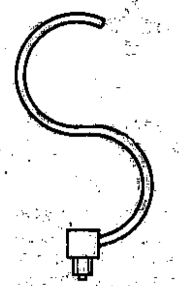

Рис. 36. *S*-образная трубчатая пружина

Изготовление трубчатых пружин для давлений ниже 1000 кгс/см² возможно, например, из лент, обжимаемых сначала на стальной оправке, имеющей в сечении эллипс или овал, спаиваемых затем специальным припоем и изгибаемых по дуге окружности. Затруднительность изготовления этим и любым другим аналогичным способом толстостенных трубок эллиптического или овального сечения, изогнутых по дуге окружности и предназначенных для измерения давления выше 1000 кгс/см², привела к тому, что были предложены и внедрены в производство массивные трубчатые пружины круглого сечения с небольшим эксцентричным продольным отверстием (*трубки Нагаткина*). Чтобы избежать также и трудностей, связанных с изготовлением трубок с эксцентричным продольным отверстием, предложено к обычной толстостенной изогнутой трубке приваривать с внутренней стороны металлическую полосу. Достигаемое таким образом увеличение сечения трубки имеет односторонний характер и равносильно эксцентричности отверстия.

В обоих случаях при увеличении давления внутренняя стенка изогнутой по дуге трубки более массивная, чем наружная стенка, почти не испытывает деформации в плоскости поперечного сечения. Наружная же стенка трубки более тонкая, деформируясь, перемещается по направлению радиуса изгиба трубки, заставляя последнюю разгибаться. В некоторых условиях оказывается удобным придавать трубчатой пружине *S-образную форму* (рис. 36) для сокращения занимаемого ею пространства при сохранении значительных перемещений свободного конца. Такой упругий элемент представляет собой две одновитковые трубчатые пружины, расположенные в одной плоскости и являющиеся продолжением одна другой, но имеющие различные направления витков.

Еще одна разновидность трубчатой пружины появилась в США, а в последнее время начинает изготовляться и в СССР. Это (рис. 37) сплющенная тонкостенная прямая трубка, овальные или эллиптические поперечные сечения которой повернуты в их

плоскостях вокруг центральной оси трубки так, что большие их полуоси образуют *винтовую* поверхность. Один конец трубки запаян, а другой конец закреплен неподвижно. Под влиянием растягивающего усилия такая трубка раскручивается. Указанное растягивающее усилие, если трубке сообщено внутреннее избыточное давление, обусловливается только отчасти действием этого

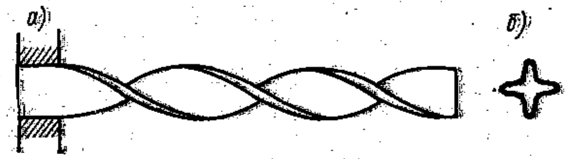

Рис. 37. Винтовая трубчатая пружина: *а* — с овальным сечением; *б* — звездчатого сечения

давления на площадь ее запаянного (свободного) конца, а главным образом тем, что под влиянием внутреннего давления большие полуоси поперечных сечений трубки сокращаются. Образуемые их внешними концами две винтовые линии и прилегающие к ним продольные участки трубки, сохраняя свою длину, становятся более пологими, т. е. выпрямляются и растягивают винтовую трубку.

Несколько лучшие результаты получаются, если вместо овального применяют четырехлучевое, звездчатое сечение. Такое сечение можно представить как слитые между собой два овальных сечения, расположенные под углом 90° одно к другому (рис. 37, *б*). Значительными трудностями изготовления обусловлены сравнительно невысокие механические свойства первых образцов этих упругих элементов.

Угол поворота свободного конца винтовой трубчатой пружины вокруг ее оси может достигать 40—60 °С. В этом случае отпадает необходимость в передаточном механизме, так как стрелка может быть укреплена непосредственно на свободном конце пружины.

22. МЕМБРАННЫЙ УПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ, ЕГО ОСОБЕННОСТИ И ВИДОИЗМЕНЕНИЯ

Мембрана в качестве упругого элемента для измерения давления применяется реже, чем трубчатая пружина. Она представляет гибкую закрепленную по периметру перегородку, замыкающую пространство, в котором газ или жидкость находится под измеряемым давлением. Таким образом, по одну сторону мембраны действует измеряемое давление, а по другую — атмосферное. Линейные перемещения центра мембраны под влиянием разности этих давлений являются мерой измеряемого избыточного давления.