

СЗ44.19

П-49

118/1-41

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13-5393



И. Полах, А.И. Филиппов, В.А. Шамина

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

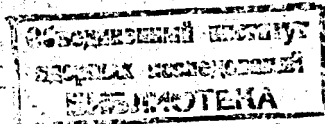
ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОРООБРАЗНЫХ
СИЛЬФОНОВ

1970

13-5393

И. Полах, А.И. Филиппов, В.А. Шамина

**ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТОРООБРАЗНЫХ
СИЛЬФОНОВ**



В В Е Д Е Н И Е

Возможность обеспечить значительную подвижность соединения отдельных элементов конструкции как в статическом, так и в динамическом режимах работы, при сравнительно небольшой жесткости, открывает для торообразных сифонов хорошие перспективы при использовании их в качестве связывающего герметичного подвижного элемента.

В ряде конструкций криогенных пузырьковых камер, созданных и разрабатываемых за последнее время, широкое применение получили торообразные сифоны /Г-3/. Их применение позволяет создать замкнутый рабочий объем камеры, обеспечить очень хорошую равномерность его расширения, а также улучшить другие рабочие характеристики прибора. Такие сифоны с успехом могут быть использованы в качестве гибкого компенсатора между отдельными элементами камеры.

Так как торообразный сифон обычно является одним из ответственных элементов конструкции, то возникает необходимость в обеспечении высокой степени надежности его работы при водородных температурах, в условиях знакопеременных нагрузок и сильных неоднородных магнитных полей. Естественно, для того, чтобы обеспечить необходимую работоспособность сифона, нужно иметь достаточно хорошее представление о напряжениях, которые возникают в оболочке при работе.

Методы расчета на прочность геометрически правильных торообразных оболочек достаточно хорошо разработаны /4-7/. Однако торообразные сильфоны, полученные методом гидропрессования, имеют довольно значительные отступления от правильной формы.

Целью данной работы было выяснить, в какой степени наблюдается отклонение реальных напряжений, возникающих в стенках оболочки под действием нагрузки, от вычисленных при определенных усреднениях формы и других характеристик сильфона.

Изучаемые сильфоны были изготовлены из нержавеющей стали марки ЭИТ методом гидропрессования. Вследствие недостаточно хорошо отработанной технологии изготовления имели место отклонения геометрических размеров от заданных: отклонения формы поперечного сечения тора от круговой, разнотолщинность оболочки и т.п., а также изменение механических свойств материала оболочки вследствие наклепа.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ КРУГОВОГО ТОРОИДАЛЬНОГО СИЛЬФОНА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ЕГО ОСЕВОЙ СИЛОЙ

Исследование напряженного состояния рассматриваемого сильфона (рис. 1) проводится на основании соотношений, полученных из работ [4, 5].

Оболочка вращения, нагруженная осевой силой P , деформируется симметрично. Поэтому в ней возникают лишь нормальные меридиальные σ_1 и окружные σ_2 напряжения, действующие на площадках (рис. 1-а; б), перпендикулярных соответственно меридианам и параллелям.

Величины σ_1 и σ_2 определяются тангенциальными σ_1^t , σ_2^t и изгибными σ_1^x , σ_2^x напряжениями на внешней поверхности оболочки, т.к.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_1^t + \frac{2t}{h} \sigma_1^x \\ \sigma_2 &= \sigma_2^t + \frac{2t}{h} \sigma_2^x \end{aligned} \quad -\frac{h}{2} \leq t \leq \frac{h}{2}, \quad (I)$$

где

h - толщина оболочки;

t - расстояние некоторой точки от средней поверхности по толщине оболочки.

Если обозначить через $\sigma_1^{нар}$, $\sigma_2^{нар}$ и $\sigma_1^{вн}$, $\sigma_2^{вн}$ напряжения соответственно на наружной ($t = \frac{h}{2}$) и внутренней ($t = -\frac{h}{2}$) поверхностях оболочки, то, исходя из равенства (I), получим:

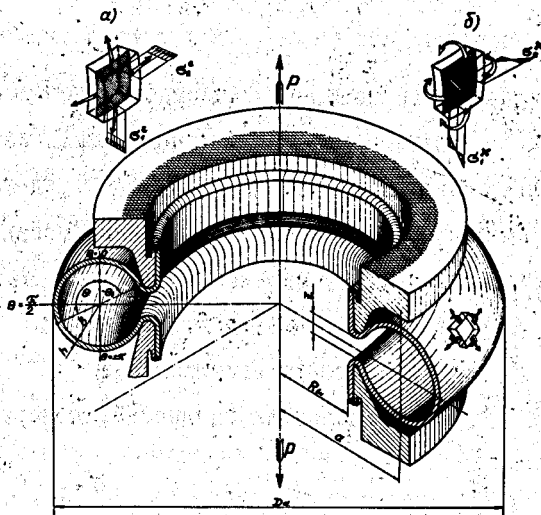


Рис. 1. Сечение торообразной оболочки

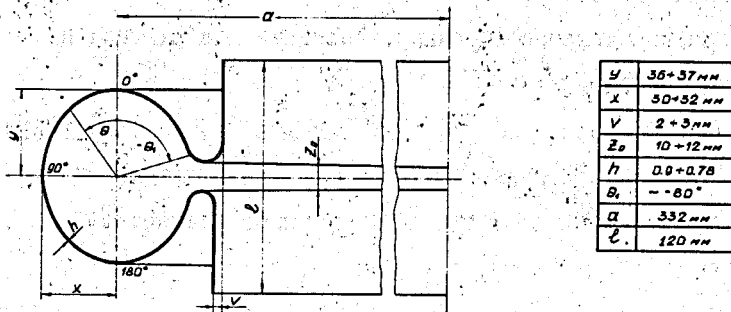


Рис. 2. Основные размеры испытанного тороидального силфона

$$\sigma_1^{нор} = \sigma_1^E + \sigma_1^X \quad \sigma_2^{нор} = \sigma_2^E + \sigma_2^X \quad (I')$$

$$\sigma_1^{6H} = \sigma_1^E - \sigma_1^X \quad \sigma_2^{6H} = \sigma_2^E - \sigma_2^X \quad (II')$$

Напряжения σ_1^E , σ_2^E , σ_1^X , σ_2^X вычисляем по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_1^E &= \sigma_1^{0E} + \sigma_1^{KE} & \sigma_2^E &= \sigma_2^{0E} + \sigma_2^{KE} \\ \sigma_1^X &= \sigma_1^{0X} + \sigma_1^{KX} & \sigma_2^X &= \sigma_2^{0X} + \sigma_2^{KX} \end{aligned} \quad (2)$$

В соотношениях (2) слагаемые с индексом "0" представляются в виде следующих выражений:

$$\sigma_{1(\theta)}^{0E} = \frac{P}{2\pi ah} \left\{ \frac{1}{\sin\theta(1+\alpha\sin\theta)} + \frac{\varphi(\theta)\cos\theta}{1+\alpha\sin\theta} \left[\lambda \operatorname{Im} e_0 [i\lambda\omega(\theta)] - \frac{1}{\omega(\theta)} \right] \right\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{1(\theta)}^{0X} &= \frac{P}{2\pi ah} \frac{3\lambda}{\alpha\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left\{ \frac{\lambda}{\varphi(\theta)(1+\alpha\sin\theta)} \operatorname{Im} e_0' [i\lambda\omega(\theta)] + \right. \\ &\quad \left. + \left[\varphi'(\theta) + \nu \frac{\alpha\cos\theta}{1+\alpha\sin\theta} \varphi(\theta) \right] \operatorname{Re} e_0 [i\lambda\omega(\theta)] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{2(\theta)}^{0E} &= \frac{P}{2\pi ah} \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{\lambda^2}{\varphi(\theta)(1+\alpha\sin\theta)} \operatorname{Re} e_0' [i\lambda\omega(\theta)] + \lambda\varphi(\theta) \operatorname{Im} e_0 [i\lambda\omega(\theta)] - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\sin^2\theta} - \frac{\varphi(\theta)}{\omega(\theta)} + \frac{1}{\varphi(\theta)\omega^2(\theta)(1+\alpha\sin\theta)} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{2(\theta)}^{0X} &= \frac{P}{2\pi ah} \frac{3\lambda}{\alpha\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left\{ \nu \frac{\lambda}{\varphi(\theta)(1+\alpha\sin\theta)} \operatorname{Im} e_0' [i\lambda\omega(\theta)] + \right. \\ &\quad \left. + \left[\nu\varphi'(\theta) + \frac{\alpha\cos\theta}{1+\alpha\sin\theta} \varphi(\theta) \right] \operatorname{Re} e_0 [i\lambda\omega(\theta)] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где:

P - осевая растягивающая сила;

θ - угол между радиусом тора и осью вращения (рис. I);

ν - коэффициент Пуассона

$$\alpha = \frac{b}{a} \quad \beta = \frac{b}{h};$$

b - радиус поперечного сечения тора;
 a - радиус осевой линии тора (рис. I).

$$\lambda^3 = \sqrt{12(1-\mu^2)} \alpha B; \quad i = \sqrt{-1}$$

$$\omega(\theta) = \text{sign } \alpha \left[\frac{3}{2} \int_0^{\theta} \frac{\sqrt{\sin|\theta|}}{1 + \alpha \sin\theta} d|\theta| \right]^{2/3}$$

$$\varphi(\theta) = \frac{1}{\sqrt{\omega'(\theta)(1 + \alpha \sin\theta)}}; \quad \omega'(\theta) = \frac{d\omega}{d\theta}$$

$$\varphi'(\theta) = \frac{d\varphi}{d\theta}; \quad e_0'[-i\lambda\omega(\theta)] = \frac{de_0}{d[-i\lambda\omega(\theta)]}$$

Для слагаемых с индексом "К" имеем:

$$e_{1K}^{KE} = \frac{\varphi(\theta) \cos\theta}{1 + \alpha \sin\theta} \text{Im} \left\{ \tilde{C}_1 h_1[-i\lambda\omega(\theta)] + \tilde{C}_2 h_2[-i\lambda\omega(\theta)] \right\} \quad (7)$$

$$e_{1K}^{KX} = \frac{3\lambda}{2\sqrt{3(1-\mu^2)}} \text{Re} \left\{ \tilde{C}_1 \left[-\frac{\lambda}{\varphi(\theta)(1 + \alpha \sin\theta)} h_1'[-i\lambda\omega(\theta)] + \right. \right.$$

$$+ \frac{1}{\lambda} \left[\varphi'(\theta) + \mu \frac{\alpha \cos\theta}{1 + \alpha \sin\theta} \varphi(\theta) \right] h_1[-i\lambda\omega(\theta)] \left. + \right.$$

$$+ \tilde{C}_2 \left[-\frac{\lambda}{\varphi(\theta)(1 + \alpha \sin\theta)} h_2'[-i\lambda\omega(\theta)] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\lambda} \left[\varphi'(\theta) + \mu \frac{\alpha \cos\theta}{1 + \alpha \sin\theta} \varphi(\theta) \right] h_2[-i\lambda\omega(\theta)] \right\} \quad (8)$$

$$e_{2K}^{KE} = \frac{\lambda}{\alpha} \text{Im} \left\{ \tilde{C}_1 \left[-\frac{\lambda}{\varphi(\theta)(1 + \alpha \sin\theta)} h_1'[-i\lambda\omega(\theta)] + \frac{1}{\lambda} \varphi(\theta) h_1[-i\lambda\omega(\theta)] \right] + \right.$$

$$\left. + \tilde{C}_2 \left[-\frac{\lambda}{\varphi(\theta)(1 + \alpha \sin\theta)} h_2'[-i\lambda\omega(\theta)] + \frac{1}{\lambda} \varphi(\theta) h_2[-i\lambda\omega(\theta)] \right] \right\} \quad (9)$$

$$e_{2K}^{KX} = \frac{3\lambda}{2\sqrt{3(1-\mu^2)}} \text{Re} \left\{ \tilde{C}_1 \left[-\mu \frac{\lambda}{\varphi(\theta)(1 + \alpha \sin\theta)} h_1'[-i\lambda\omega(\theta)] + \right. \right.$$

$$+ \frac{1}{\lambda} \left[\mu \varphi'(\theta) + \frac{\alpha \cos\theta}{1 + \alpha \sin\theta} \varphi(\theta) \right] h_1[-i\lambda\omega(\theta)] \left. + \right.$$

$$+ \tilde{C}_2 \left[-\mu \frac{\lambda}{\varphi(\theta)(1 + \alpha \sin\theta)} h_2'[-i\lambda\omega(\theta)] + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\lambda} \left[\mu \varphi'(\theta) + \frac{\alpha \cos\theta}{1 + \alpha \sin\theta} \varphi(\theta) \right] h_2[-i\lambda\omega(\theta)] \right\}, \quad (10)$$

где: $h_1[-i\lambda\omega(\theta)]$, $h_2[i\lambda\omega(\theta)]$ - функции Эйри и их производные

$$h'_m [i\lambda\omega(\theta)] = \frac{dh_m}{d[i\lambda\omega(\theta)]},$$

где $m = 1; 2$;

\tilde{C}_1, \tilde{C}_2 - произвольные комплексные постоянные, которые определяются из условий закреплений кромки сиффона.

Функции $\omega(\theta)$; $\epsilon_0[-i\lambda\omega(\theta)]$; $\epsilon'_0[-i\lambda\omega(\theta)]$; $h_m [i\lambda\omega(\theta)]$; $h'_m [i\lambda\omega(\theta)]$ /4,7,8,9/ и ряд других величин, входящих в (3) ÷ (10), затабулированы

Для сиффона, форма которого симметрична относительно плоскости $\theta = \frac{\pi}{2}$ и оба края заделаны (края не деформируются), имеем:

$$\tilde{C}_1 = \frac{P}{2\pi ch} \frac{\frac{L}{\omega(\frac{\pi}{2})} - \lambda \epsilon_0[-i\lambda\omega(\frac{\pi}{2})]}{h_1[-i\lambda\omega(\frac{\pi}{2})]} \sim \tilde{C}_2 \frac{h_2[-i\lambda\omega(\frac{\pi}{2})]}{h_1[-i\lambda\omega(\frac{\pi}{2})]} \quad (11)$$

$$\tilde{C}_2 = A_2 + i B_2 \quad (12)$$

$$A_2 = \epsilon_2^*(\theta_1) \frac{(Ehr)^2 \beta_{22}}{ha} \left[-V_1 + \frac{\alpha a}{r} \frac{\beta_{12}}{\beta_{22}} V_2 \right] +$$

$$+ \psi^*(\theta_1) \frac{(Ehr)^2 \beta_{12}}{ch} \left[V_1 - \frac{\alpha}{r} \frac{\beta_{11}}{\beta_{12}} V_2 \right]$$

$$B_2 = \epsilon_2^*(\theta_1) \frac{(Ehr)^2 \beta_{22}}{ha} \left[-V_3 + \frac{\alpha a}{r} \frac{\beta_{12}}{\beta_{22}} V_4 \right] +$$

$$+ \psi^*(\theta_1) \frac{(Ehr)^2 \beta_{12}}{ch} \left[V_3 - \frac{\alpha}{r} \frac{\beta_{11}}{\beta_{12}} V_4 \right]$$

$$\epsilon_2^*(\theta_1) = \frac{\epsilon_2^{\text{oe}}(\theta_1) - r \sigma_1^{\text{oe}}(\theta_1)}{E}, \quad r = \frac{h}{\sqrt{12(1-\nu^2)}}$$

$$\psi^*(\theta_1) \approx \frac{P}{2\pi ch} \frac{\alpha}{Er} \lambda \psi(\theta_1) Re \epsilon_0[-i\lambda\omega(\theta_1)]$$

$$\beta_{11} \approx \frac{1}{Eh\alpha} \frac{[Im \beta_2(\theta_1)]^2 + [Re \beta_2(\theta_1)]^2}{Re \beta_1(\theta_1) Re \beta_2(\theta_1) + Im \beta_1(\theta_1) Im \beta_2(\theta_1)}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{12} &\approx \frac{1}{Ehr} \frac{Re f_1(\theta_1) \operatorname{In} f_2(\theta_1) - \operatorname{In} f_1(\theta_1) Re f_2(\theta_1)}{Re f_1(\theta_1) Re f_2(\theta_1) + \operatorname{In} f_1(\theta_1) \operatorname{In} f_2(\theta_1)} \\ B_{22} &\approx \frac{\alpha d}{Ehr^2} \frac{[Re f_1(\theta_1)]^2 + [\operatorname{In} f_1(\theta_1)]^2}{Re f_1(\theta_1) Re f_2(\theta_1) + \operatorname{In} f_1(\theta_1) \operatorname{In} f_2(\theta_1)} \\ V_1 &= \frac{\operatorname{In} [f_2(\theta_1) - (1-\nu) \frac{\alpha \cos \theta_1}{1 + \alpha \sin \theta_1} f_1(\theta_1)]}{Re f_1(\theta_1) Re f_2(\theta_1) + \operatorname{In} f_1(\theta_1) \operatorname{In} f_2(\theta_1)} \\ V_2 &= \frac{Re f_1(\theta_1)}{Re f_1(\theta_1) Re f_2(\theta_1) + \operatorname{In} f_1(\theta_1) \operatorname{In} f_2(\theta_1)} \\ V_3 &= \frac{Re [f_2(\theta_1) - (1-\nu) \frac{\alpha \cos \theta_1}{1 + \alpha \sin \theta_1} f_1(\theta_1)]}{Re f_1(\theta_1) Re f_2(\theta_1) + \operatorname{In} f_1(\theta_1) \operatorname{In} f_2(\theta_1)} \\ V_4 &= \frac{-\operatorname{In} f_1(\theta_1)}{Re f_1(\theta_1) Re f_2(\theta_1) + \operatorname{In} f_1(\theta_1) \operatorname{In} f_2(\theta_1)} \end{aligned}$$

$$f_1(\theta) \approx \psi(\theta) h_2 [-i \lambda \omega(\theta)], \quad f_2(\theta) \approx -i \frac{\lambda}{\psi(\theta)(1 + \alpha \sin \theta)} h_2' [i \lambda \omega(\theta)].$$

При растяжении или сжатии силфона осевой силой преобладающими являются меридиональное изгибное σ_1^{ox} и тангенциальное окружное σ_2^{oe} напряжения.

В прикидочных расчетах можно ограничиться лишь вычислением этих величин. σ_1^{ox} достигает наибольшего значения в точке поперечного сечения:

$$\theta = \theta^* \approx \frac{1,225}{\lambda} \quad (13)$$

и равно

$$\frac{(\sigma_1^{ox})_{\max}}{\sigma_v} \approx \pm 299(1-\nu^2)^{-1/2} \alpha^{-1/3} B^{2/3}, \quad (14)$$

σ_2^{oe} достигает наибольшего значения в точке поперечного сечения

$$\theta = 0$$

$$\frac{(\sigma_2^{loc})_{max}}{\sigma_1} \approx 2,15(1-\mu)^{1/3} \epsilon^{-1/3} \beta^{4/3} \quad (15)$$

$$\sigma_1 = \frac{P}{2\pi rh}$$

В заключение выпишем равенство, связывающее осевую силу и расхождение кромок сальфона и позволяющее определять его жесткость на растяжение.

Когда край симметричного сальфона совпадает с параллелью $\theta, \mp \frac{\sqrt{r}}{2}$, то расхождение кромок z равно:

$$z = 2[U_2^0(-\frac{\sqrt{r}}{2}) - U_2^0(\frac{\sqrt{r}}{2})] \approx \frac{Pb}{Ehr} \quad (16)$$

Формулой (16) можно пользоваться для оценки гибкости сальфона и тогда, когда $\theta, \mp \frac{\sqrt{r}}{2}$, но не слишком близко к нулю ($\theta \leq -40^\circ$).

РАСЧЕТ И ИСПЫТАНИЕ ТОРОИДАЛЬНОГО САЛЬФОНА

ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ЕГО ОСЕВОЙ СИЛОЙ

Расчет напряжений в оболочке проводился на основе усредненных геометрических данных, полученных измерением реального сальфона (рис. 2). Для определения средней толщины "h" оболочки тора, один из сальфонов был разрезан поперек, и его толщина измерена в нескольких сечениях (см. табл. I).

Радиус тора "b" определялся из соотношения

$$b = \frac{x+y}{2},$$

где x и φ показаны на рис. 2.

В расчете было принято:

средняя толщина $h = 0,815$ мм,

радиус тора $b = 34,5$ мм,

радиус осевой линии тора $\Omega = 322$ мм,

модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^6$ кг/см².

Расчет сильфона проводился на ЭВМ по методике, изложенной выше, для параметров $\beta - \frac{b}{h} = 42,5$ и $\alpha - \frac{b}{\Omega} = 0,1039$.

Значения полученных таким образом приведенных напряжений $\epsilon_1(\theta)/\epsilon_1$ и $\epsilon_2(\theta)/\epsilon_1$ в зависимости от угла θ даны в таблице 2.

Испытания проводились при комнатной температуре на специальном стенде, приспособленном для нагружения оболочки осевой силой (рис. 3). С целью усреднения полученных данных тензодатчики с базой 10 мм располагались в кольцевом и меридиональном направлениях в нескольких сечениях сильфона на наружной стороне оболочки (рис. 4).

Напряжения через замеренные деформации в каждой точке подсчитывались по формулам:

$$\epsilon_1(\theta) = \frac{E}{1-\nu^2} [\epsilon_1(\theta) + \nu \epsilon_2(\theta)] - K [\bar{\epsilon}_1(\theta) + \nu \bar{\epsilon}_2(\theta)] = K \Delta_1(\theta) \quad (17)$$

$$\epsilon_2(\theta) = \frac{E}{1-\nu^2} [\epsilon_2(\theta) + \nu \epsilon_1(\theta)] = K [\bar{\epsilon}_2(\theta) + \nu \bar{\epsilon}_1(\theta)] - K \Delta_2(\theta), \quad (18)$$

где

$\nu = 0,3$ - коэффициент Пуассона;

$\epsilon_1(\theta), \epsilon_2(\theta)$ - деформация в меридиальном и окружном направлениях,

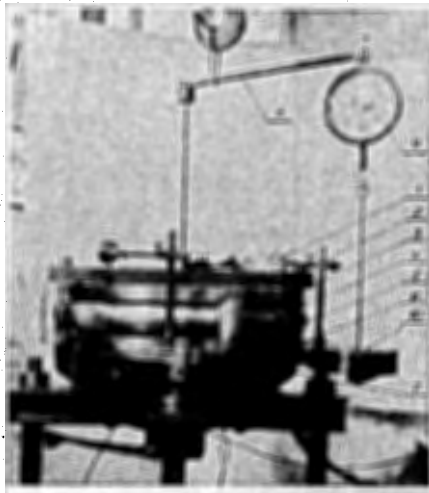


Рис. 3. Установка для испытания тороидального сиффона.

- I - индикаторы; 2 - балка подвески; 3- верхний фланец;
 4 - струбицы; 5 - тороидальный сиффон; 6- нижний фланец;
 7 - плита; 8 - рычаг подвески; 9 - динамометер;
 10- подвеска грузов.

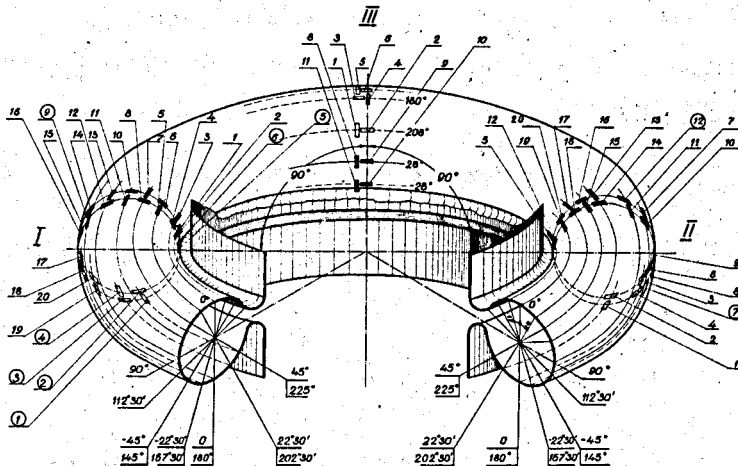


Рис. 4. Расположение тензодатчиков по наружной поверхности тороидального сиффона.

$\bar{\epsilon}_1(\theta)$ - разность между текущими и начальными показаниями прибора ИСД-3 в данной точке для тензодатчика, наклеенного в меридиальном направлении.

$\bar{\epsilon}_2(\theta)$ - разность между текущими и начальными показаниями прибора ИСД-3 в данной точке для тензодатчика, наклеенного по параллели.

$K = 23,8 \text{ кг/см}^2$ - константа, зависящая от модуля Юнга, коэффициента Пуассона, тензодатчиков и цены деления прибора ИСД-3. Значение было получено по проверочной балочке.

Измеренные значения:

$$\Delta_1(\theta) = \bar{\epsilon}_1(\theta) + r\bar{\epsilon}_2(\theta) \quad \text{и} \quad \Delta_2(\theta) = \bar{\epsilon}_2(\theta) + r\bar{\epsilon}_1(\theta)$$

содержатся в таблице 3.

На рис. 5 и 6 приведены соответственно значения отношения меридиального напряжения ($\epsilon_1(\theta)$) к напряжению $\epsilon_v = \frac{p}{2\sigma_0 h}$ и отношения окружного напряжения ($\epsilon_2(\theta)$) к тому же напряжению (ϵ_v) в оболочке тора, полученные как расчетным путем (сплошная кривая), так и экспериментально (точки ∇, \circ, \square в сечениях тора I, II, III, как среднее значение для перемещений $z = 1,02; 1,96; 3,01$ и $3,42 \text{ мм}$) по таблице 3 /10/.

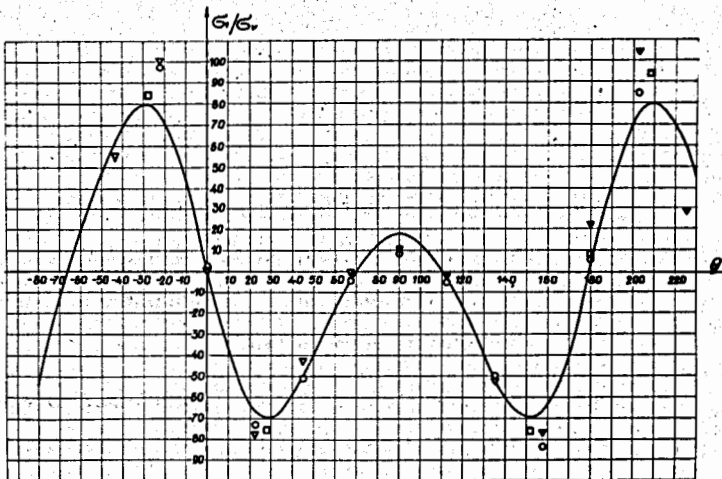


Рис. 5. Изменение отношения меридиального напряжения $\sigma_r(\varphi)$ к напряжению σ в оболочке тора.

— расчетное значение

▽ ○ □ экспериментальные значения в сечениях I, II, III.

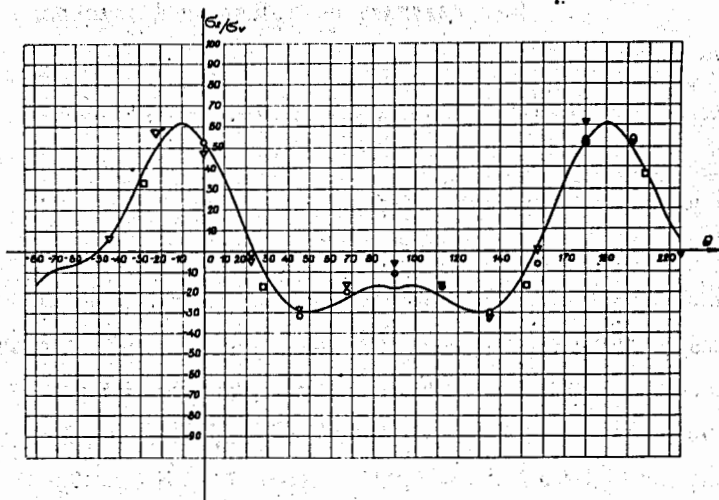


Рис. 6. Изменение отношения окружного напряжения $\sigma_\theta(\varphi)$ к напряжению σ в оболочке тора.

— расчетное значение

▽ ○ □ экспериментальные значения в сечениях I, II, III.

Видно, что расчетные и экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются. Однако в точках с $\theta = -22,5^\circ$; $\theta = 202,5^\circ$ для меридиальных напряжений расхождение между расчетными и экспериментальными данными составляет $\sim 25\%$. По-видимому, это расхождение связано с недостаточной точностью проведенного нами усреднения исходных параметров сильфона.

Расчетная величина отношения окружного напряжения ($\epsilon_z(\theta)$) к напряжению (ϵ_v) хорошо согласуется с экспериментом.

Данная работа позволяет сделать заключение о том, что при проектировании металлических сильфонов, для которых характер и величина отклонений от идеальной геометрической формы имеют тот же порядок, что и для изученного сильфона, могут рассчитываться с достаточной степенью надежности по изложенной выше методике.

В заключение авторы выражают признательность Г.М.Александрову, А.Г.Лавруку, С.К.Багдасарову за участие в разработке оснастки и изготовлении металлического тороидального сильфона, Ю.П.Мерекову за разработку программ для расчета на ЭВМ, А.С.Шкоде за проведенный расчет на ЭВМ и В.Г.Игнатьеву за помощь в проведении испытаний; Е.М.Мельничук, Л.М.Кузнецовой, Н.В.Акментынь за помощь при оформлении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Proposal for the Construction of a 12-ft Bubble Chamber ANL, Title I, report, July 1966; Proc. 1966 Int. Conf on Instrumentation for High Energy Physics, p 104.*
2. *Design Study for a High Magnetic Field Hydrogen Bubble Chamber for use on NIMROD. Report RHEL/s/101, Jan. 1967*
3. Г.М.Александров и др. Пятиметровая жидководородная пузырьковая камера. I ч. Препринт ОИЯИ I3-3322 (1967).
4. К.Ф.Черных. Линейная теория оболочек, ч.2. ЛГУ, (1964).
5. К.Ф.Черных, В.А.Шамина. Расчет торообразных оболочек. Исследования по упругости и пластичности. ЛГУ, Сб.2. (1963).
6. *R. A. Clark, J. Math. and Phys. 29 (1950) p. 146.*
7. Прочность. Устойчивость. Колебания. Под общей редакцией И.А.Биргера и Я.Г.Шановко, том I. Машиностроение (1968).
8. Л.Н.Носова, С.А.Тумаркин. Таблицы обобщенных функций Эйри для асимптотического решения дифференциальных уравнений. Москва, ВЦ АН СССР (1961).
9. Л.Н.Осипова, С.А.Тумаркин. Таблицы для расчета торообразных оболочек, Москва, ВЦ АН СССР (1963).
10. Полах И., Филиппов А.И. Экспериментальное изучение характеристик торообразных сильфонов. Материалы рабочего совещания по технике пузырьковых камер, ОИЯИ, I3-4466, Дубна (1969).

Рукопись поступила в издательский отдел

12 октября 1970 года.