

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
Кафедра «Строительная механика и теория сооружений»

## **Практикум**

по дисциплине «Теория расчета пластин и оболочек»

## **Методические указания**

по выполнению расчетно – графической  
работы на тему

**«Расчет тонкой цилиндрической  
оболочки под воздействием  
давления жидкости и газа  
(Безмоментная теория)»**

Авторы  
Кадомцева Е.Э.,  
Стрельников Г.П.

Ростов-на-Дону, 2024

## Аннотация

Расчет тонкой цилиндрической оболочки под воздействием давления жидкости и газа (Безмоментная теория): методические указания для самостоятельного выполнения студентами расчетно – графической работы и индивидуальных (домашних) заданий по дисциплине «Теория расчета пластин и оболочек».

Предназначены для обучающихся по специальности 08.05.01 – «Строительство уникальных зданий и сооружений» (очной и заочной форм обучения). Могут быть использованы студентами других направлений подготовки.

Методические указания содержат основные теоретические положения, пример решения типовой задачи и порядок выполнения студентами расчетно – графической работы на тему «Расчет тонкой цилиндрической оболочки под воздействием давления жидкости и газа (Безмоментная теория)».

## Авторы

к.т.н., доцент кафедры  
«Сопротивление материалов»  
Кадомцева Е.Э.

к.ф.-м.н., доцент кафедры  
«Сопротивление материалов»  
Стрельников Г.П.



## Оглавление

<b>1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК.....</b>	<b>4</b>
1.1. Основные положения теории тонких оболочек .....	4
1.2. Линии и радиусы поверхности оболочки.....	6
1.3. Тонкостенная осесимметричная оболочка .....	7
1.4. Безмоментная теория осесимметрично нагруженных оболочек. Уравнение Лапласа.....	8
<b>2. ПРИМЕР РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ШАРНИРНО-ОПЕРТОГО ТОНКОСТЕННОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЖИДКОСТИ И ДАВЛЕНИЯ ГАЗА.....</b>	<b>11</b>
2.1. Построение эпюры окружных и меридиональных нормальных напряжений (вдоль меридиана) .....	12
2.2. Определение толщины стенки резервуара, изготовленного из стали .....	15
2.3. Определение толщины стенки резервуара, изготовленного из бетона .....	17
2.4. Проверка прочности стального цилиндра при подобранной толщине для жидкостей с другой плотностью ....	17
<b>3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ НА ТЕМУ «РАСЧЕТ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ГАЗА (БЕЗМОМЕНТНАЯ ТЕОРИЯ)» .....</b>	<b>18</b>
<b>4. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>19</b>

## 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК

### 1.1. Основные положения теории тонких оболочек

Совершенствование инженерных конструкций привело к необходимости разработки методов расчета на прочность оболочек.

**Оболочкой называется тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями, расстояние между которыми незначительно по сравнению с размерами поверхностей.**

Геометрическое место точек, равноотстоящих от обеих поверхностей оболочки, носит название **срединной поверхности**.

Если срединная поверхность оболочки образует поверхность вращения в форме цилиндра, то оболочку называют **цилиндрической**.

К схеме *осесимметричной* цилиндрической оболочки сводится очень много инженерных конструкций, в том числе: котлов, баков, нефтепроводов, газопроводов, деталей машин и др.

Задача о расчете тонкостенных оболочек вращения наиболее просто решается в том случае, когда возможно принять, что напряжения, возникающие в оболочке, постоянны по толщине и, следовательно, изгиб оболочки отсутствует.

Теория оболочек, построенная в этом предположении, **называется безмоментной теорией оболочек**.

Если оболочка имеет резкий переход и жесткие защемления и, кроме того, нагружена сосредоточенной силой и моментами, то в местах крепежа оболочки, резких изменений формы, и в местах действия сосредоточенных сил и моментов возникают интенсивные напряжения, обусловленные *изгибным эффектом*. Учет изгибных эффектов можно получить в рамках *моментной теории оболочек*.

Следует отметить, что чем меньше отношение толщины  $h$  оболочки к ее радиусу  $R$ , тем точнее выполняется предположение о постоянстве напряжений

по толщине и тем более точно выполняются расчеты по безмоментной теории.

Отметим, что оболочка считается *тонкой*, если

$$\frac{h}{R} \leq \frac{1}{20}.$$

Следовательно, при расчете на прочность тонких оболочек в зависимости от характера распределения внешних нагрузок, опорных закреплений, применяется или безмоментная или моментная теория. При этом предполагается равномерное распределение напряжений по продольным и поперечным сечениям оболочек (отсутствие в этих сечениях изгибающих, крутящих моментов и поперечных сил).

При осесимметричной нагрузке отсутствуют также сдвигающие силы. Определение усилий по безмоментной теории производится достаточно точно на расстоянии, превышающем величину **(3**

**÷ 5)**  $\sqrt{Rh}$  от мест скачкообразного изменения формы или площади сечения, жестких контурных закреплений или от места приложения внешних сосредоточенных сил и моментов. Вблизи указанных мест возникают дополнительные напряжения от изгибного эффекта.

Моментная и безмоментная теория тонких оболочек или, так называемая *техническая теория оболочек*, состоящих в резком различии их толщины и габаритных размеров, влечет за собой возможность упрощения теории путем некоторой схематизации действительной работы конструкций.

Эта схематизация формируется в используемых гипотезах, аналогичных гипотезам в теории стержней, т.е. гипотезам плоских сечений и гипотезам “не надавливания” слоев оболочки друг на друга.

Эти гипотезы позволяют свести трехмерную задачу механики сплошной среды к двумерной, подобно тому, как в теории стержней трехмерная задача сведена к одномерной.

Далее в технической теории тонких оболочек пренебрегают членами  $h/R$  по сравнению с единицей.

Оболочки, к которым применимы упомянутые выше гипотезы, называются **тонкими**, а те, к которым эти гипотезы не применимы, называются **толстыми**.

Граница между тонкими и толстыми оболочками условна и определяется отношением

$$\frac{h}{R} \approx \frac{1}{20}$$

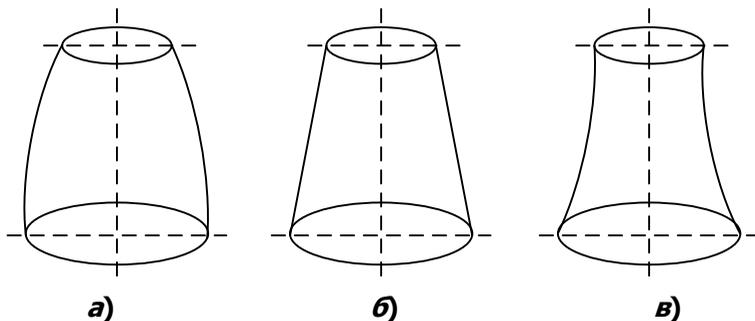
$$\frac{h}{R} > \frac{1}{20}$$

В тех случаях, когда  $\frac{h}{R} > \frac{1}{20}$ , для получения приемлемых результатов по точности применяется аппарат механики сплошной среды, в частности теории упругости или пластичности в зависимости от постановки задачи.

## 1.2. Линии и радиусы поверхности оболочки

Плоскость, пересекающая поверхность оболочки и проходящая через ось вращения, образует меридиональную линию или меридиан. Линии, перпендикулярные меридианам и оси вращения называют параллелями. Поверхность, равноудаленная от внешней и внутренней поверхностей оболочки, называют срединой.

Радиус кривизны меридиана –  $\rho_m$ , радиус кривизны параллели –  $\rho_t$ . Радиусы  $\rho_m$  и  $\rho_t$  – главные радиусы кривизны поверхности вращения. Важное значение при изучении свойств поверхности имеет гауссова кривизна  $K = \frac{1}{\rho_m \rho_t}$ . На рис. 1 даны некоторые формы меридианов при соответствующих  $K$ .

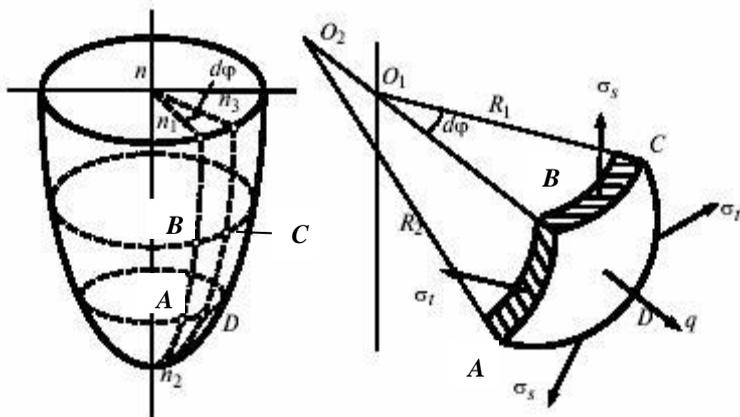


**Рис. 1. Оболочки: а) – с положительной; б) – с нулевой; в) – с отрицательной кривизной меридиана**

При  $K \geq 0$  – меридианы выпуклые (рис. 1,а);  $K = 0$  – меридианы прямые линии (рис. 1,б);  $K \leq 0$  – меридианы вогнутые (рис. 1,в), при этом, если  $\rho_t \geq 0$ , то  $\rho_m \leq 0$ .

### 1.3. Тонкостенная осесимметричная оболочка

Тонкостенной осесимметричной называется оболочка, имеющая форму тела вращения, толщина которой мала по сравнению с радиусами кривизны ее поверхности (рис.2).



**Рис.2. Элемент оболочки вращения с радиусами кривизны  $R_1, R_2$**

При расчете тонкостенных оболочек все нагрузки, действующие на них, прикладывают к *срединной поверхности* оболочки.

К тонким оболочкам могут быть отнесены такие часто встречающиеся элементы конструкций как резервуары, цистерны, газовые баллоны, корпуса аппаратов химических агрегатов и др.

При расчете таких элементов конструкций используется *безмоментная теория оболочек*, основные положения которой заключаются в следующем:

1. Нагрузки, действующие на поверхности оболочки, могут считаться перпендикулярными им и симметричными относительно оси вращения оболочки.

2. Вследствие малой толщины оболочки сопротивление изгибу отсутствует (изгибающий момент не возникает).

3. Напряжения по толщине стенки оболочки распределены равномерно.

Из оболочки, изображенной на рис. 2, выделим двумя меридиональными плоскостями  $n_1 n_2$  и  $n_3 n_2$ , (т.е. плоскостями проходящими через ось симметрии оболочки), с углом  $d\varphi$  между

ними и двумя плоскостями, перпендикулярными оси симметрии оболочки  $BC$  и  $AD$ , элемент  $ABCD$ .

Радиусы кривизны  $O_2 A$  и  $O_2 B$  элемента  $ABCD$  в меридиональной плоскости обозначим через  $R_2$ , а радиусы кривизны  $O_1 B$  и  $O_1 C$  в плоскости, перпендикулярной меридиану, обозначим через  $R_1$ .

Нормальные напряжения, действующие по боковым граням  $AB$  и  $CD$ , соприкасающимся с меридиональными плоскостями, называются окружными напряжениями  $\sigma_t$ .

Нормальные напряжения, действующие по боковым граням  $BC$  и  $AD$ , называются меридиональными напряжениями  $\sigma_s$ .

Кроме напряжений  $\sigma_s$  и  $\sigma_t$  на элемент оболочки действует нагрузка в виде давления  $q$ , перпендикулярная поверхности  $ABCD$ .

Прежде чем перейдем к рассмотрению различных вариантов определения напряжений в оболочках остановимся на некоторых различиях, вызванных наличием газа или жидкости внутри оболочки.

В случае газового давления величина давления  $q$  постоянная во всех точках поверхности оболочки. Для резервуаров, наполненных жидкостью, значение  $q$  по их высоте переменное.

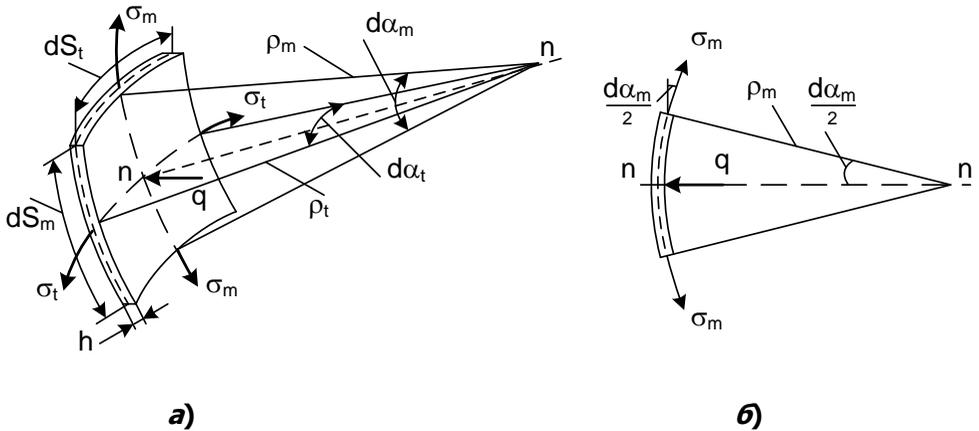
Для случая наполнения резервуара жидкостью необходимо учитывать, что если на какую-либо поверхность действует давление жидкости, то вертикальные составляющие сил давления равны весу жидкости в объеме, расположенном над поверхностью. Поэтому давление жидкости в различных сечениях оболочки будет различным, в отличие от давления газа.

Определим напряжения в сферических и цилиндрических оболочках так как они наиболее часто используются в промышленности.

### 1.4. Безмоментная теория осесимметрично нагруженных оболочек. Уравнение Лапласа

Примером безмоментного состояния служит напряженное состояние, возникающее в оболочке под действием равномерного внутреннего давления. Оболочка испытывает только растяжение. В этом заключается ее преимущество как конструктивного элемента.

В стенках оболочки возникают нормальные меридиональные  $\sigma_m$  и окружные  $\sigma_t$  напряжения (рис. 3, а).



**Рис. 3. Элемент оболочки вращения под действием меридиональных и тангенциальных нормальных напряжений**

Основным признаком безмоментного состояния будет

$$\varepsilon > \chi \frac{h}{2},$$

где  $\varepsilon$  – относительное удлинение срединной поверхности;  
 $\chi$  – относительное изменение кривизны;  
 $h$  – толщина стенки.

Так как напряжение растяжения равно

$$\sigma_p = E \cdot \varepsilon,$$

а напряжение изгиба

$$\sigma_u = E \cdot \chi \cdot \frac{h}{2},$$

то, в виду незначительности величины  $\chi \cdot \frac{h}{2}$ , напряжением  $\sigma_u$  можно пренебречь.

Рассмотрим равновесие сил, возникающих от действия внутреннего давления  $q$  на элементарной площади  $dA = dS_m \cdot dS_t$  и усилий от напряжений меридионального  $\sigma_m$  и тангенциального  $\sigma_t$  с площадями  $dS_t \cdot h$  и  $dS_m \cdot h$ .

На рис. 3.б показана меридиональная плоскость. Спроецируем все усилия на общую нормаль  $n-n$

$$2\sigma_m \cdot h \cdot dS_t \cdot \sin \frac{d\alpha_m}{2} + 2\sigma_t \cdot h \cdot dS_m \frac{d\alpha_t}{2} - q \cdot dS_t \cdot dS_m = 0. \quad (1)$$

Заменив синус его аргументом, ввиду малости угла, и разделив выражение (1) на  $h \cdot dS_t \cdot dS_m$ , получим

$$\sigma_m \cdot \frac{d\alpha_m}{dS_m} + \sigma_t \cdot \frac{d\alpha_t}{dS_t} = \frac{q}{h},$$

или, с учетом равенства

$$\frac{d\alpha_m}{dS_m} = \frac{1}{\rho_m}; \quad \frac{d\alpha_t}{dS_t} = \frac{1}{\rho_t};$$

окончательно определим

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{q}{h}. \quad (2)$$

*Зависимость (2) называют уравнением Лапласа.*

Если принять

$$dS_t = dS_m = 1,$$

то

$$N_m = \sigma_m \cdot h \cdot 1; \quad N_t = \sigma_t \cdot h \cdot 1$$

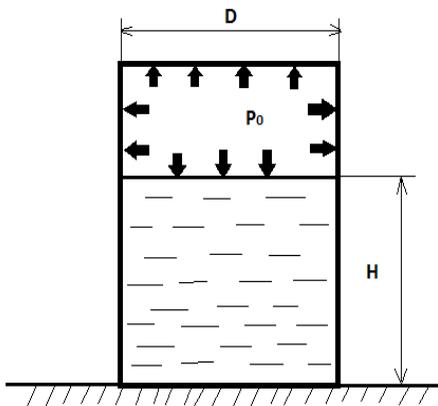
и уравнение (2) можно представить как

$$\frac{N_m}{\rho_m} + \frac{N_t}{\rho_t} = q. \quad (2a)$$

В уравнение входят два неизвестных напряжения  $\sigma_m$  и  $\sigma_t$ . Определим сначала  $\sigma_m$ , используя уравнение равновесия согласно рис. 3. Затем из уравнения Лапласа (2) определяем напряжение  $\sigma_t$ .

## 2. ПРИМЕР РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ ШАРНИРНО-ОПЕРТОГО ТОНКОСТЕННОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЖИДКОСТИ И ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

Тонкостенный цилиндрический резервуар (рис.4) диаметром  $D$  заполнен на высоту  $H$  жидкостью (водой), плотность которой  $\rho = 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . В резервуаре над жидкостью создано избыточное давление  $P_0$ .



**Рис.4. Шарнирно-опертый тонкостенный цилиндрический резервуар**

Требуется:

1. Построить эпюры окружных и меридиональных нормальных напряжений (вдоль меридиана).
2. Определить толщину стенки резервуара, изготовленного из стали с допускаемым нормальным напряжением  $[\sigma] = 160 \text{ Мпа}$ . Использовать четвертую теорию прочности.
3. Определить толщину стенки резервуара, изготовленного из бетона с допускаемым нормальным напряжением на растяжение  $[\sigma] = 0,7 \text{ Мпа}$ . Использовать четвертую теорию прочности.
4. Проверить прочность стального цилиндра при подобранной толщине для жидкостей с другой плотностью. Плотность жидкости выбрать из таблицы 1.

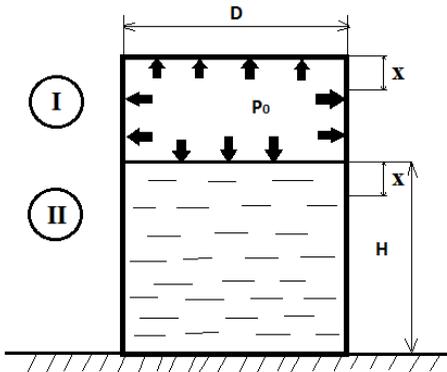
**Таблица 1.**

Номер строки	$H$ (м)	$D$ (м)	$P_0$ (МПа)	$\rho$ ( $10^3$ кг/м <sup>3</sup> )
<b>01</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,7</b>

### Решение

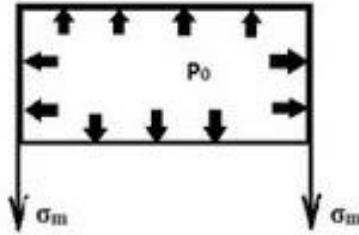
#### 2.1. Построение эпюры окружных и меридиональных нормальных напряжений (вдоль меридиана)

Верхняя часть цилиндра (**I участок**) подвергается действию внутреннего давления, нижняя часть (**II участок**) находится под действием жидкости и давления газа (рис.5).



**Рис.5. Схема расчета шарнирно-опертого тонкостенного цилиндрического резервуара**

I участок: рассмотрим отсечённую часть I - ого участка (рис.6).



**Рис.6. Схема расчета I участка**

(2) Определим окружное напряжение  $\sigma_t$  из уравнения Лапласа

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{q}{h}.$$

Учитывая, что главные радиусы кривизны цилиндрической поверхности заданной оболочки соответственно равны

$$\rho_m = R_m = \infty; \quad \rho_t = R_t = R = D/2; \quad q = P_0,$$

получим выражение для окружных напряжений

$$\frac{\sigma_m}{\infty} + \frac{\sigma_t}{R} = \frac{P_0}{h} \rightarrow \sigma_t = \frac{P_0 R}{h}.$$

Меридиональные нормальные напряжения найдём из уравнения равновесия

$\sum z = 0$  (проекция всех сил на ось, параллельную образующей, равна нулю):

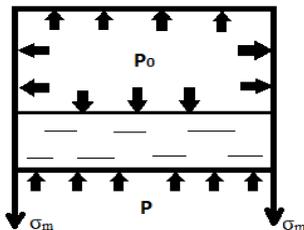
$$-\sigma_m \cdot 2\pi R h + P_0 \cdot \pi R^2 = 0 \rightarrow \sigma_m = \frac{P_0 R}{2h}$$

Для I участка

$$\sigma_t = \frac{P_0 R}{h} = \frac{0,1 \text{ МПа} \cdot 0,5 \text{ м}}{h} = \frac{0,05 \text{ МПа} \cdot \text{м}}{h};$$

$$\sigma_m = \frac{P_0 R}{2h} = \frac{0,1 \text{ МПа} \cdot 0,5 \text{ м}}{2 \cdot h} = \frac{0,025 \text{ МПа} \cdot \text{м}}{h}$$

II участок: (рис. 7):  $0 \leq x \leq H$



**Рис.7. Схема расчета II участка**

Учитывая, что

$$\rho_m = R_m = \infty; \quad \rho_t = R_t = R = D/2, \quad q = P_0 + \rho x$$

из уравнения Лапласа определим окружное напряжение  $\sigma_t$

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{q}{h} \rightarrow \frac{\sigma_m}{\infty} + \frac{\sigma_t}{R} = \frac{(P_0 + \rho x)}{h} \rightarrow \sigma_t = \frac{(P_0 + \rho x) \cdot R}{h}.$$

Меридиональные нормальные напряжения найдём из уравнения равновесия

$\Sigma z=0$  (проекция всех сил на ось, параллельную образующей, равна нулю):

$$\begin{aligned} -\sigma_m \cdot 2\pi R h + (P_0 + \rho \cdot x) \cdot \pi R^2 - \rho \cdot x \cdot \pi R^2 &= 0, \\ -\sigma_m \cdot 2\pi R h + P_0 \cdot \pi R^2 &= 0 \rightarrow \sigma_m = \frac{P_0 \cdot \pi R^2}{2\pi R h} = \frac{P_0 R}{2h}. \end{aligned}$$

Подставляя в полученные выражения значения

$$\rho = 1 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 10 \cdot 10^{-3} \frac{\text{МПа}}{\text{м}},$$

$P_0 = 0,1 \text{ МПа};$

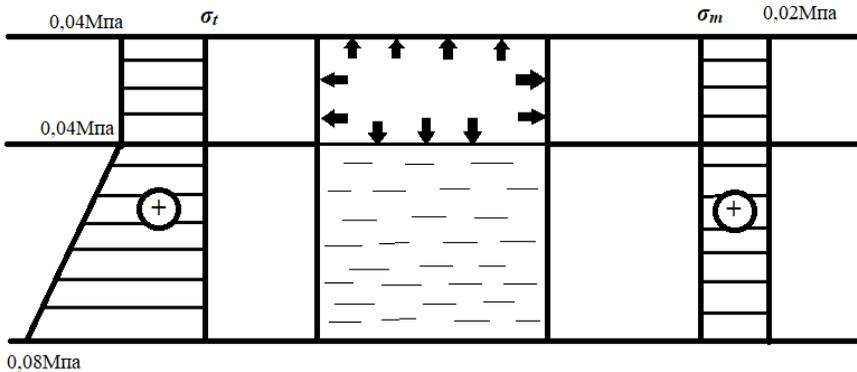
получим для II участка

$$\sigma_{t1}(0) = \frac{\left(0,1 \text{ МПа} + 10 \cdot \frac{10^{-3} \text{ МПа}}{\text{м}} \cdot 0\right) \cdot 0,5 \text{ м}}{h} = \frac{0,05 \text{ МПа} \cdot \text{м}}{h};$$

$$\sigma_{t2}(1\text{м}) = \frac{\left(0,1\text{МПа} + 10 \cdot \frac{10^{-3}\text{МПа}}{\text{м}} \cdot 1\text{м}\right) \cdot 0,5\text{м}}{h} = \frac{0,055\text{МПа} \cdot \text{м}}{h};$$

$$\sigma_m = \frac{0,1\text{МПа} \cdot 0,5\text{м}}{2 \cdot h} = \frac{0,025\text{МПа} \cdot \text{м}}{h}.$$

Эпюры  $\sigma_m$  и  $\sigma_t$  показаны на рис. 8.



**Рис. 8. Эпюры тангциального и меридиального нормальных напряжений**

## 2.2. Определение толщины стенки резервуара, изготовленного из стали

Определим толщину стенки резервуара, изготовленного из стали с допускаемым нормальным напряжением  $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$ , используя четвертую теорию прочности.

Расчётное напряжение по четвёртой теории прочности имеет вид

$$\sigma_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]}$$

Пусть

$$\sigma_1 = \sigma_t; \quad \sigma_2 = \sigma_m; \quad \sigma_3 = 0,$$

тогда

## Теория расчета пластин и оболочек

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{расч}} &= \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_t - \sigma_m)^2 + \sigma_t^2 + \sigma_m^2]} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2}[\sigma_t^2 - 2\sigma_t\sigma_m + \sigma_m^2 + \sigma_t^2 + \sigma_m^2]} = \sqrt{\sigma_t^2 - \sigma_t\sigma_m + \sigma_m^2}\end{aligned}$$

Подставляя

$$\sigma_t = \frac{(P_0 + \rho \cdot H) \cdot R}{h}; \quad \sigma_m = \frac{P_0 R}{2h},$$

получим

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{расч}} &= \sqrt{\frac{(P_0 + \rho \cdot H)^2 \cdot R^2}{h^2} + \frac{P_0^2 R^2}{4h^2} - \frac{(P_0 + \rho \cdot H) \cdot R}{h} \cdot \frac{P_0 R}{2h}} = \\ &= \frac{R}{h} \sqrt{P_0^2 + 2P_0\rho H + \rho^2 H^2 + \frac{P_0^2}{4} - \frac{P_0^2}{2} - \frac{\rho P_0 H}{2}} = \\ &= \frac{R}{h} \sqrt{\frac{3}{4}P_0^2 + 1,5P_0\rho H + \rho^2 H^2}\end{aligned}$$

В нашем случае условие прочности по четвёртой теории прочности имеет вид

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{расч}} &= \frac{R}{h} \sqrt{\frac{3}{4}P_0^2 + 1,5P_0\rho H + \rho^2 H^2} \leq [\sigma] \rightarrow h \\ &= \frac{R}{[\sigma]} \sqrt{\frac{3}{4}P_0^2 + 1,5P_0\rho H + \rho^2 H^2}. \\ h &= \frac{R}{[\sigma]} \sqrt{\frac{3}{4}0,1^2 + 1,5 \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 + 1^2 \cdot 1 \cdot 10^{-4}} \text{ МПа} = \\ &= \frac{0,5\text{М}}{160} \sqrt{91 \cdot 10^{-4}} = 0,0297\text{см}\end{aligned}$$

### 2.3. Определение толщины стенки резервуара, изготовленного из бетона

Определим толщину стенки резервуара, изготовленного из бетона с допускаемым нормальным напряжением на растяжение  $[\sigma] = 0,7 \text{ МПа}$ , используя четвертую теорию прочности.

$$h = \frac{R}{[\sigma]} \sqrt{\frac{3}{4} 0,1^2 + 1,5 \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 + 1^2 \cdot 1 \cdot 10^{-4}} =$$

$$= \frac{\sqrt{91 \cdot 10^{-4}} \cdot 0,5 \text{ м}}{0,7} = 6,8 \text{ см.}$$

### 2.4. Проверка прочности стального цилиндра при подобранной толщине для жидкостей с другой плотностью

Проверим прочность стального цилиндра при подобранной толщине для жидкости с плотностью  $\rho = 0,75 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$ .

Для стали

$$h = \frac{0,5}{160} \sqrt{\frac{3}{4} 0,1^2 + 1,5 \cdot 0,18 \cdot 0,75 \cdot 10^{-2} \cdot 1 + 1^2 \cdot 0,75 \cdot 10^{-4}} = 0,0291 \text{ см}$$

Для бетона

$$h = \frac{0,93 \cdot 0,5 \cdot 0,1}{0,7} = 6,6 \text{ см}$$

### **3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ НА ТЕМУ «РАСЧЕТ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ГАЗА (БЕЗМОМЕНТНАЯ ТЕОРИЯ)»**

1. Какое тело называется оболочкой?
2. При каком соотношении размеров (радиуса кривизны и толщины) оболочка считается тонкой? Толстой?
3. Назовите гипотезы Кирхгофа – Лява, на которых основывается вывод основных уравнений расчёта тонких оболочек.
4. Какие оболочки называются оболочками вращения?
5. Какая оболочка называется круговой цилиндрической оболочкой?
6. Какая координатная сетка принята при расчёте круговых цилиндрических оболочек?
7. Что называется главными кривизнами и как они определяются?
8. Чему равны главные радиусы кривизны круговой цилиндрической оболочки?
9. Что называется ортогональной системой координат?
10. Запишите коэффициенты первой и второй форм круговой цилиндрической оболочки.
11. Чему равна проекция равнодействующей сил давления на заданную ось?
12. Чему равна вертикальная составляющая давления жидкости на поверхность?
13. Запишите уравнение Лапласа.
14. Назовите, что означают параметры НДС, входящие в уравнение Лапласа.
15. Запишите выражение расчётного напряжения по четвёртой теории прочности.

#### **4. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Александров А.В., Потапов В.Д. Сопротивление материалов. Основы теории упругости и пластичности. М: Высшая школа.2002, 400 с.
2. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М: Высшая школа.1990, 399 с.
3. Самуль В.И., Основы теории упругости и пластичности. М: Высшая школа.1982, 288с.