

**Тема: Общие сведения о листовых конструкциях. Методика расчета тонких оболочек**

**Задание для студентов**

- 1 Ознакомиться с теоретическим материалом
- 2 Ознакомиться с видеоматериалом по ссылкам:

Производство листового проката	<a href="https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&amp;v=N8sfN2wcgHw&amp;feature=emb_logo">https://www.youtube.com/watch?time_continue=2&amp;v=N8sfN2wcgHw&amp;feature=emb_logo</a>
Производство профилированного листа	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=gZYs-aOBg2g&amp;feature=emb_logo">https://www.youtube.com/watch?v=gZYs-aOBg2g&amp;feature=emb_logo</a>
Производство алюминиевых листов	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=rAkOvvhXf5U&amp;feature=emb_logo">https://www.youtube.com/watch?v=rAkOvvhXf5U&amp;feature=emb_logo</a>
Расчет тонкостенных оболочек	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=f7cnqvs-lGk&amp;feature=emb_logo">https://www.youtube.com/watch?v=f7cnqvs-lGk&amp;feature=emb_logo</a>
Устойчивость оболочки	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=Sc6kbMmG3V0&amp;feature=emb_logo">https://www.youtube.com/watch?v=Sc6kbMmG3V0&amp;feature=emb_logo</a>

- 3 Составить конспект лекции (объем 4-5 страниц).
- 4 Заполнить таблицу определения нормальных напряжений при расчете тонкой оболочки

Условия работы конструкции	Формула			
	Цилиндрическая оболочка		Сферическая оболочка	
	Вдоль образующей	В кольцевом направлении	Вдоль образующей	В кольцевом направлении
Равномерное внутреннее давление				
Гидростатическое давление				

- 5 Предоставить конспект лекции и ответы на контрольные вопросы в электронном виде на проверку в течение трех дней со дня выдачи задания.

С уважением, *Гнатюк Ирина Николаевна*.

При необходимости вопросы можно задать по телефону: 072-136-54-46

Работы отправлять на электронную почту [ira.gnatyuk.60@inbox.ru](mailto:ira.gnatyuk.60@inbox.ru)

**ЛЕКЦИЯ**

*План*

1. Назначение листовых конструкций
2. Классификация листовых конструкций
3. Особенности изготовления листовых конструкций
4. Особенности и основные несущие элементы листовых конструкций
5. Понятие о безмоментной теории расчета тонкой оболочки
6. Схема напряженного состояния оболочки
7. Типичные случаи нагружения оболочек и основные расчетные формулы

## *Теоретические сведения*

### **Назначение листовых конструкций**

Листовые конструкции представляют собой различные сооружения типа оболочек, основой которых являются плоские или изогнутые металлические листы. Такие конструкции предназначены для хранения, перегрузки, транспортирования, технологической переработки жидкостей, газов и сыпучих материалов. Листовые конструкции широко применяются во всех отраслях промышленности.

### **Классификация листовых конструкций**

#### **По назначению**

- **Резервуары** для хранения и технологической обработки жидкостей (нефти, нефтепродуктов, масел, сжиженных и сжатых газов, аммиака и др.).
- **Газгольдеры** для хранения, смешивания и выравнивания состава газов, для регулирования их расхода и давления.
- **Бункеры и силосы** для хранения и перегрузки сыпучих материалов (руды, угля, песка, гравия, щебня);
- **Конструкции доменных цехов** (кожухи доменных печей, воздухонагревателей, пылеуловителей);
- **Конструкции специальных технологических установок** химических и нефтеперерабатывающих заводов;
- **Трубопроводы большого диаметра** (более 600 мм) для транспортирования воды и газов, используемые на гидроэлектростанциях, металлургических, нефтехимических и иных предприятиях.

#### **По характеру работы :**

- надземные,
- наземные ;
- подземные;

#### **По условиям эксплуатации:**

- наливные и работающие под внутренним давлением или вакуумом;
- находящиеся под действием высокой, нормальной или низкой температуры;
- работающие на статическую, знакопеременную и ударную нагрузки;
- работающие в условиях нейтральных или агрессивных сред.

#### **По виду несущего элемента:**

- **Оболочки** - корпуса различных газгольдеров, резервуаров, котлов, трубопроводы больших диаметров, кожухи доменных печей.
- **Пластинки** - листовые настилы, плоские переборки (решетки), стенки бункеров, плоские днища сосудов.

## Особенности изготовления листовых конструкций

1. Соединения листовых конструкций должны удовлетворять не только требованиям прочности, но и плотности. При этом протяжённость сварных швов листовых конструкциях примерно в 2 раза больше, чем в стержневых конструкциях
2. Основным типом соединений листовых конструкций является сварное соединение встык, которое обуславливает наименьший расход наплавленного металла и высокую надёжность соединения.
3. Для негабаритных листовых конструкций характерно широкое использование автоматической и полуавтоматической сварки как при изготовлении, так и при монтаже.
4. Для контроля качества сварных швов используют физические методы.
5. При изготовлении листовых конструкций применяют специальные операции:
  - фасонный раскрой листового проката;
  - вальцовку цилиндрических, конических оболочек и колец;
  - штамповку и отбортовку оболочек двойкой кривизны;
  - отбортовку и строжку выпуклых днищ и др.
6. Листовые конструкции работают, как правило, в более тяжёлых условиях по сравнению с другими типами металлических конструкций:
  - они почти постоянно испытывают значительные напряжения, близкие к расчётным сопротивлениям;
  - в зонах сопряжений их элементов возникают значительные местные напряжения, обусловленные краевым эффектом, температурными воздействиями, а также большим числом сварных швов;
  - в условиях двухосного напряжённого состояния, которое ограничивает возможность свободной деформации металла, особую остроту приобретает проблема хрупкого разрушения, в связи с чем стали, применяемые для большинства листовых конструкций, должны удовлетворять дополнительным требованиям по ударной вязкости.

Для листовых конструкций во многих случаях экономически оправдано применение высокопрочных сталей.

В резервуарах для хранения агрессивных жидкостей целесообразно применение алюминиевых сплавов или биметаллов – стальных листов, плакированных со стороны агрессивной среды нержавеющей сталью или никелем. При отсутствии такой возможности внутреннюю поверхность резервуаров из обычной стали защищают от коррозии перхлорвиниловым или другим видом покрытия.

## Методика расчета тонких оболочек

Основными несущими элементами листовых конструкций являются оболочки и пластинки. Так, например, корпуса различных газгольдеров, резервуаров, котлов, трубопроводы больших диаметров, кожухи доменных печей обычно являются оболочками. Листовые настилы, плоские переборки, стенки бункеров, плоские днища сосудов являются пластинками. Толщина оболочек и пластинок, применяемых в листовых конструкциях, обычно мала по сравнению с другими их габаритными размерами. Это дает возможность при расчете листовых конструкций рассматривать их напряженное состояние не как объемное (трехосное), а как плоскостное (двухосное). Такое допущение является справедливым в случаях, когда толщина оболочки не превосходит  $1/20$  от величины ее радиуса кривизны, а толщина пластинки не превосходит  $1/5$  от наименьшего размера в ее плоскости.

Расчет тонкостенных оболочек основывается на безмоментной теории, построенной на предположениях о том, что оболочки являются гибкими и не могут оказывать сопротивления действию изгибающих и крутящих моментов. Предполагается, что напряжения в такой безмоментной оболочке (рисунок 1, а) распределяются равномерно по толщине. Это справедливо для участков оболочки, удаленных от мест, где возможна концентрация напряжений.

Рассматривая условия равновесия бесконечно малого элемента, вырезанного из оболочки (рисунок 1, б), можно, спроектировав все действующие силы на нормаль к поверхности, составить следующее уравнение:

$$p ds_1 ds_2 = \sigma_1 s ds_2 \frac{ds_1}{r_1} + \sigma_2 s ds_1 \frac{ds_2}{r_2},$$

откуда получим

$$\frac{\sigma_1}{r_1} + \frac{\sigma_2}{r_2} = \frac{p}{s}.$$

- где  $p$  — расчетное давление на единицу поверхности оболочки;  
 $\sigma_1$  — напряжение вдоль образующей (меридиональное) напряжение;  
 $\sigma_2$  — напряжение в кольцевом направлении (или кольцевое);  
 $r_1$  и  $r_2$  — радиусы кривизны срединной поверхности оболочку;  
 $s$  — толщина оболочки.

Полученное уравнение называется уравнением Лапласа. Оно содержит две неизвестные величины  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . Второе уравнение, необходимое для их определения, может быть получено при рассмотрении условий равновесия по параллельному кругу радиуса  $r$  (сечение а-а рис. 1, а).

Проектируя все силы на ось вращения оболочки будем иметь

$$2\pi r s \sigma_1 \sin \beta = \pi r^2 p.$$

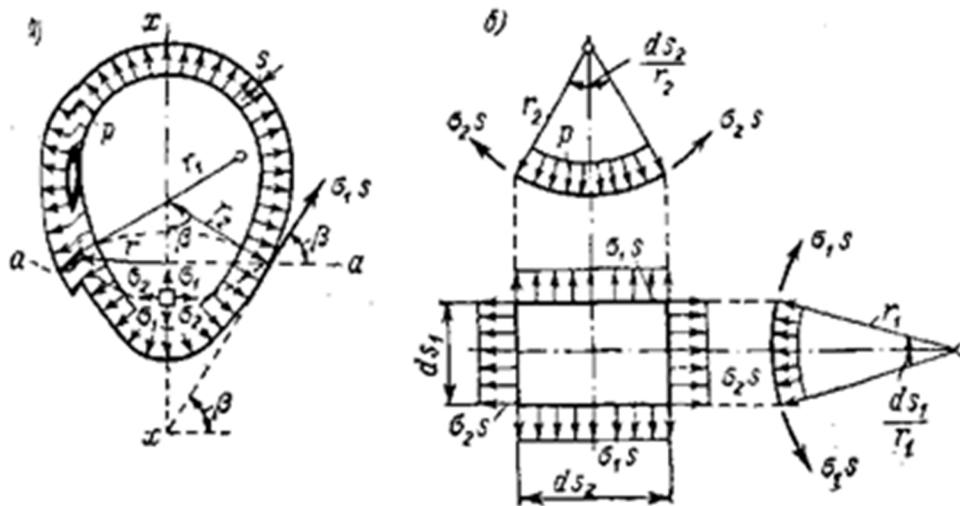


Рисунок 1 – Схема напряженного состояния оболочки:  
 а – схема оболочки, б – схема нагрузки элемента

Выражая радиус параллельного круга через радиус кривизны поверхности,

$$r = r_2 \sin \beta,$$

после подстановки и преобразований получим

$$\sigma_1 = \frac{pr_2}{2s}.$$

Из этих двух уравнений можно найти напряжение в кольцевом направлении

$$\sigma_2 = \sigma_1 \left( 2 - \frac{r_2}{r_1} \right).$$

Уравнения являются основными и используются для расчета оболочек любой формы.

Наиболее широкое распространение в листовых конструкциях получила цилиндрическая оболочка. Это связано с сравнительной простотой технологии ее изготовления. Другие, более сложные формы оболочек применяются несколько реже. В днищах и других отдельных элементах различных сосудов применяются сферические, конические, эллипсоидальные оболочки. За последние годы получили распространение шаровые резервуары. Появляются каплевидные и многоторовые резервуары.

Ниже приводятся формулы для определения напряжений в оболочках простейшего типа для наиболее распространенных случаев нагрузки.

Для цилиндрической оболочки имеем:  $r_1 = \infty$ ;  $r_2 = r$ .

При равномерном внутреннем давлении  $p$  (рисунок 2) напряжения вдоль образующей

$$\sigma_1 = \frac{pr}{2s}.$$

Напряжение в кольцевом направлении

$$\sigma_2 = \frac{pr}{s}.$$

При гидростатическом давлении (рисунок 2, б) напряжение вдоль образующей в точке  $m$ :

$$\sigma_1 = \frac{\gamma r H}{2s}.$$

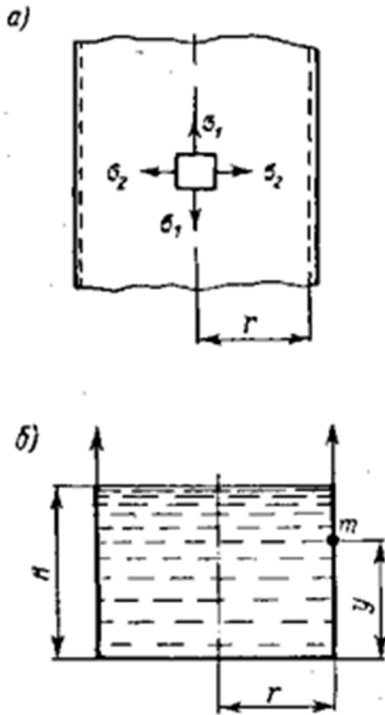


Рисунок 2 – К расчету цилиндрической оболочки

Напряжение в кольцевом направлении в точке :

$$\sigma_2 = \frac{\gamma r (H - y)}{s}.$$

Для сферической оболочки имеем:  $r_1 = r_2 = r$ . При равномерном внутреннем давлении  $p$  (рисунок 3,а) напряжения вдоль образующей и напряжения в кольцевом направлении равны

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pr}{2s}.$$

При гидростатическом давлении (рисунок 3,б) наибольшие напряжения в нижней точке днища

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{\gamma r (H + r)}{2s}.$$

При равномерном внутреннем давлении  $p$  (рисунок 4,а) напряжения вдоль образующей

$$\sigma_1 = \frac{pr}{2s \cos \alpha}.$$

Напряжения в кольцевом направлении

$$\sigma_2 = \frac{pr}{s \cos \alpha}.$$

При гидростатическом давлении (рисунок 4,б) напряжения вдоль образующей в точке т

$$\sigma_1 = \frac{\gamma \operatorname{tg} \alpha \left( H - \frac{2y}{3} \right) y}{2s \cos \alpha}$$

Напряжения в кольцевом направлении в точке т

$$\sigma_2 = \frac{\gamma \operatorname{tg} \alpha (H - y) y}{s \cos \alpha}$$

При работе оболочек на сжатие они должны быть проверены еще и на устойчивость.

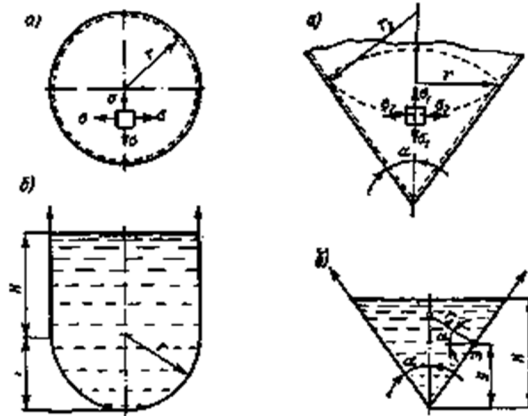


Рисунок 3 – К расчету сферической и конической оболочки

Ниже приведены расчетные формулы для проверки устойчивости замкнутой круговой цилиндрической оболочки при некоторых типичных случаях нагружения.

При равномерном сжатии параллельно образующей (рисунок 5,а) условие обеспечения местной устойчивости стенок имеет следующий вид:

$$\sigma_1 \leq \sigma_{01}$$

где  $\sigma_1$ — осевое напряжение в оболочке;

$\sigma_{01}$ — расчетное критическое напряжение, определяемое как меньшее из величин:

$$\sigma_{01} = \varphi^* R;$$

$$\sigma_{01} = c \frac{Es}{r}.$$

Здесь  $E$ —модуль упругости стали;

$R$  — расчетное сопротивление стали;

$r$ — радиус срединной поверхности оболочки;

$b$ — толщина оболочки;

$\varphi^*$  и  $c$  — коэффициенты, принимаемые по таблицам 1 и 2.

При внешнем равномерном давлении (рисунок 5) условие обеспечения устойчивости имеет следующий вид:

$$\sigma_2 \leq \sigma_{02},$$

где  $\sigma_2$ — напряжение в оболочке в кольцевом направлении,

$\sigma_{02}$ — расчетное критическое напряжение, определяемое следующими зависимостями:

при  $0,5 \leq \frac{l}{r} \leq 10$

$$\sigma_{02} = 0,55E \frac{r}{l} \left( \frac{s}{r} \right)^{\frac{5}{2}};$$

$$\text{при } \frac{l}{r} \geq 20 \quad \sigma_{02} = 0,17E \left( \frac{s}{r} \right)^2.$$

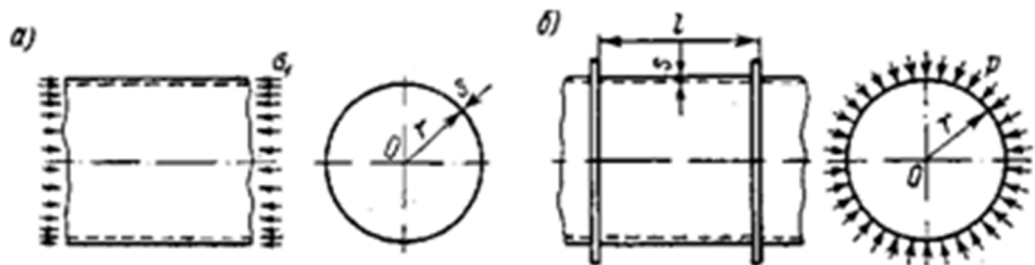


Рисунок 5 - Схема действия сжимающих нагрузок на цилиндрическую оболочку:  
 а – равномерное сжатие параллельно образующей;  
 б – внешнее равномерное давление

Таблица 1

Значение $\varphi^*$							
$\frac{r}{s}$	0	25	50	100	150	200	250
$\varphi^*$	1,00	0,94	0,85	0,71	0,60	0,53	0,47

Таблица 2

Значение С									
$\frac{r}{s}$	50	100	150	200	250	500	750	1000	1500
с	0,3	0,22	0,2	0,18	0,16	0,12	0,10	0,08	0,07

Для значений  $10 < 1/r < 20$  напряжение  $\sigma_{02}$  определяется по линейной интерполяции.

Здесь  $l$  — длина цилиндрической оболочки между опорными кольцами или кольцами жесткости.

При одновременном действии продольного сжатия и внешнего нормального к боковой поверхности равномерного давления замкнутая круговая цилиндрическая оболочка проверяется на устойчивость по формуле

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{01}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{02}} \leq 1.$$

### Контрольные вопросы:

7. Как получают листовой прокат для изготовления сварных конструкций?
8. Какие трубопроводы не относятся к листовым металлическим конструкциям?
9. К какому виду листовых конструкций относится металлическая лестница?
10. Почему в резервуарах для хранения агрессивных жидкостей целесообразно применение алюминиевых сплавов?
11. Можно ли использовать сварку под флюсом при изготовлении листовых конструкций?
12. Почему стали для производства листовых конструкций должны обладать достаточной пластичностью?
13. Какие виды конструкций относятся к оболочковым?
14. На какой теории основан расчет тонкостенных оболочек?
15. Какие виды напряжений возникают в цилиндрической части резервуара?
16. В каких случаях проводится проверка тонкостенных конструкции на устойчивость?