

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра машиноведения

О.А. Фролова

РАСЧЕТ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика, 24.03.04 Авиастроение, 15.04.01 Машиностроение

Оренбург
2018

УДК 669.15
ББК 34.5
Ф 22

Рецензент – доктор технических наук, профессор Ю.А. Чирков

Фролова, О.А.

Ф 22 Расчет оболочек под действием внутреннего давления: методические указания / О.А. Фролова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 30 с.

В методических указаниях рассмотрены основные вопросы теории расчета оболочек под действием внутреннего давления. Приведен алгоритм проектировочного расчета емкости давления. Представлены варианты заданий для самостоятельной работы.

Методические указания предназначены для выполнения заданий на практических занятиях и для самостоятельной работы. Рекомендовано обучающимся по образовательным программам высшего образования направлений подготовки 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика по дисциплине «Конструкции скоростных летательных аппаратов и особенности их прочностных расчетов», 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика, 24.03.04 Авиастроение по дисциплине «Прочность конструкций», 15.04.01 Машиностроение по дисциплине «Расчет пластин и оболочек».

Методические указания подготовлены в рамках реализации проектов по совершенствованию содержания и технологий целевого обучения студентов в интересах организаций оборонно-промышленного комплекса («Новые кадры ОПК–2016»).

УДК 669.15
ББК 34.5

© Фролова О.А., 2018
© ОГУ, 2018

Содержание

Введение	4
1 Основные сведения из теории	6
1.1 Конструктивно-силовые схемы оболочечных конструкций, находящихся под действием внутреннего давления	6
1.2 Сопряжение оболочек различных очертаний	12
1.3 Отверстия в оболочках	20
2 Задание для самостоятельного решения «Проектировочный расчет емкости давления»	22
3 Алгоритм расчета	25
Список использованных источников	30

Введение

Тонкостенные оболочки вращения являются составляющей частью конструкций авиационной и ракетно-космической техники. В качестве емкостей давления широко используются сферические (шар-баллоны), торовые емкости, цилиндрические емкости с различными очертаниями днищ.

Самой распространенной формой оболочки, работающей под внутренним давлением жидкости или газа, является цилиндрическая, которая входит составной частью в виде патрубков в криволинейные трубопроводы, цилиндрические баллоны и корпуса твердотопливных двигателей. Емкости давления применяются в качестве сосудов и баллонов для хранения и транспортировки сжатых (воздух, пропан, бутан, пентан, аммиак) и сжиженных (азот, кислород, водород, гелий) газов, применяемых в регенеративных подогревателях высокого и низкого давления, в бойлерах, в сосудах для производства аммиака, в теплообменниках, в топливных и окислительных баках двигательных установок, в системах наддува.

В конструктивно-силовую схему емкостей давления входят: обечайка, днище, шпангоуты и узлы крепления. Обечайки подкрепляют при необходимости силовым набором (продольным в виде стрингеров, поперечным в виде шпангоутов или продольно-поперечным в виде вафельной конструкции). Большинство емкостей изготавливают сваркой, поэтому в расчетах необходимо учитывать ослабляющее влияние сварного шва.

Материалы, применяемые для изготовления емкостей давления, должны обеспечивать их надежную работу в течение расчетного срока службы с учетом заданных условий эксплуатации, состава и характера среды (коррозионная активность, взрывоопасность, токсичность) и влияния температуры окружающего воздуха. Материалы для емкостей большого давления должны иметь высокую удельную прочность на растяжение.

Для изготовления обечайки и днищ применяют углеродистые и низколегированные стали (например, Ст3, 09Г2С), хромистые стали (например, 12ХМ), аустенитные стали (например, 08Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т). С целью

снижения массы используют высокопрочные стали, титановые или алюминиевые сплавы, обладающие высокими значениями удельной прочности, а также композиционные материалы. Распорные шпангоуты изготавливают из алюминиевых сплавов (например, АМгб) и композитных материалов.

Коэффициент безопасности по условиям компоновки рекомендуется назначать $f > 2$ для обеспечения высокой надежности конструкции.

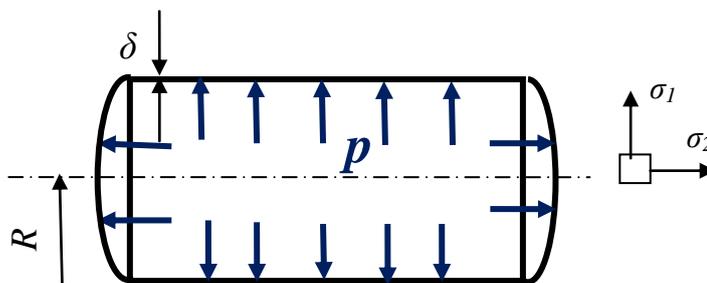
Основной нагрузкой, определяющей толщину оболочки и, следовательно, вес конструкции, является внутреннее давление. Для баллонов, работающих в атмосферных или космических условиях, необходимы высокие значения прочности при растяжении. Сосредоточенные нагрузки вызывают изгибные напряжения, которые значительно снижают массовую эффективность. Причинами возникновения изгибных напряжений является форма оболочки, конструктивные особенности, вызывающие нарушение сплошности (люки, отверстия). Для усиления оболочки в этих местах применяют шпангоуты и накладки.

1 Основные сведения из теории

1.1 Конструктивно-силовые схемы оболочечных конструкций, находящихся под действием внутреннего давления

Цилиндрическая оболочка

Схема нагружения цилиндрической оболочки внутренним давлением p представлена на рисунке 1.1.



R – радиус оболочки; δ – толщина оболочки;
 p – внутреннее давление; σ_1, σ_2 – главные напряжения.

Рисунок 1.1–Схема нагружения цилиндрической оболочки со сферическим днищем

Продольные (меридиональные) напряжения σ_1 , Па, возникают от сил давления, приложенных к днищам, и определяются по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2\delta}. \quad (1.1)$$

Кольцевые напряжения σ_2 , Па, определяются по формуле:

$$\sigma_2 = \frac{pR}{\delta}. \quad (1.2)$$

В емкостях без днищ возникают только кольцевые напряжения σ_2 . Таким образом, основными напряжениями являются кольцевые напряжения.

Требуемая минимальная толщина цилиндрической оболочки δ , м, определяется по формуле:

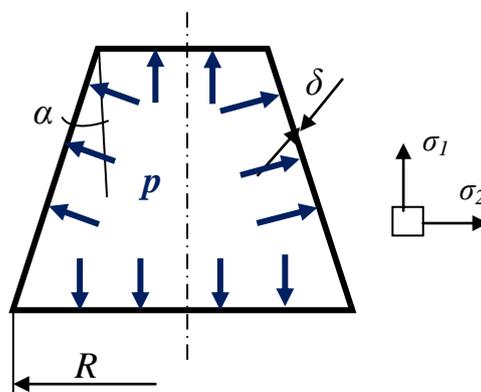
$$\delta = \frac{R}{\sigma_{adm} \cdot c}, \quad (1.3)$$

где σ_{adm} – допускаемое напряжение материала оболочки, Па;

c – коэффициент прочности сварного шва.

Коническая оболочка

Схема нагружения конической оболочки внутренним давлением p представлена на рисунке 1.2.



R – наибольший радиус оболочки; δ – толщина оболочки; α – угол конусности; p – внутреннее давление; σ_1, σ_2 – главные напряжения.

Рисунок 1.2–Схема нагружения конической оболочки

Максимальные продольные (меридиональные) напряжения σ_1 , Па, определяются по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2\delta \cos \alpha}. \quad (1.4)$$

Максимальные кольцевые напряжения σ_2 , Па, определяются по формуле:

$$\sigma_2 = \frac{pR}{\delta \cos \alpha}. \quad (1.5)$$

Требуемая толщина конической оболочки δ , м, определяется по формуле:

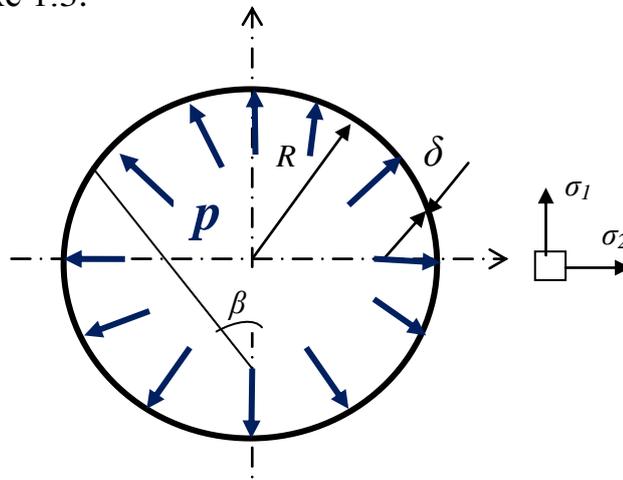
$$\delta = \frac{R}{c \cdot \sigma_{adm} \cdot \cos \alpha}, \quad (1.6)$$

где σ_{adm} – допускаемое напряжение материала оболочки, Па;

c – коэффициент прочности сварного шва.

Сферическая оболочка

Схема нагружения сферической оболочки внутренним давлением p представлена на рисунке 1.3.



R – радиус оболочки; δ – толщина оболочки; β – угол полураствора сферического сегмента; p – внутреннее давление; σ_1 , σ_2 – главные напряжения.

Рисунок 1.3–Схема нагружения сферической оболочки

В сферических оболочках продольные (меридиональные) напряжения σ_1 , Па, и кольцевые напряжения σ_2 , Па, равны между собой и определяются по формуле:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pR}{\delta}. \quad (1.7)$$

Требуемая минимальная толщина сферической оболочки δ , м, определяется по формуле:

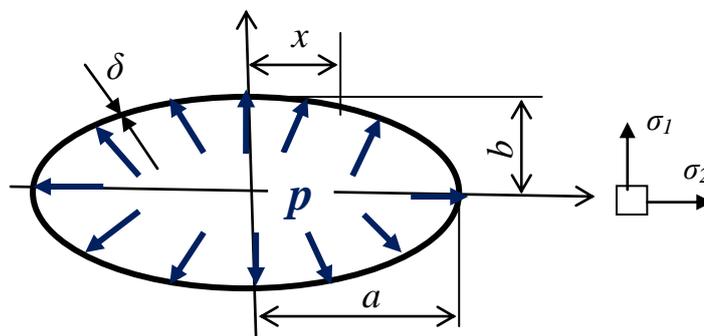
$$\delta = \frac{pR}{2\sigma_{adm} \cdot c}, \quad (1.8)$$

где σ_{adm} – допускаемое напряжение материала оболочки, Па;

c – коэффициент прочности сварного шва.

Эллипсоидная оболочка

Схема нагружения эллипсоидной оболочки внутренним давлением p представлена на рисунке 1.4.



a, b – радиусы эллипса; δ – толщина оболочки; p – внутреннее давление;
 σ_1, σ_2 – главные напряжения.

Рисунок 1.4 – Схема нагружения эллипсоидной оболочки

В точках радиуса $r=x$ на поверхности вращения возникают напряжения:

– продольные (меридиональные) напряжения σ_1 , Па

$$\sigma_1 = \frac{pd^2}{2\delta b}, \quad (1.9)$$

где b – наименьший радиус эллипса, м;

$d^2 = \sqrt{a^4 - x^2(a^2 - b^2)}$ – соотношение радиусов эллипса, м;

– кольцевые напряжения σ_2 , Па

$$\sigma_2 = \frac{pc^2}{2\delta b} \left[2 - \left(\frac{a}{d} \right)^4 \right]. \quad (1.10)$$

Максимальные напряжения возникают в полюсе при $x=0$:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pa^2}{2\delta \cdot b}. \quad (1.11)$$

В экваториальной зоне (при $x=a$) напряжения равны:

– продольные (меридиональные) напряжения σ_1 , Па

$$\sigma_1 = \frac{pa}{2\delta}; \quad (1.12)$$

– кольцевые напряжения σ_2 , Па

$$\sigma_2 = \frac{pa}{2\delta} \left[2 - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]. \quad (1.13)$$

Кольцевые напряжения будут сжимающими во всех точках области, ограниченной параллельным кругом радиуса:

$$x = \frac{a^2}{\sqrt{2(a^2 - b^2)}}. \quad (1.14)$$

Сжимающие напряжения приводят к потере устойчивости в экваториальной зоне. При $a = b\sqrt{2}$ кольцевые напряжения на экваторе равны нулю и, следовательно, при условии $a \leq b\sqrt{2}$ кольцевые сжимающие напряжения не возникают.

Требуемая минимальная толщина эллипсоидной оболочки δ , м, определяется по формуле:

$$\delta = \frac{pa}{2c \cdot \sigma_{adm}} \left[2 - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right], \quad (1.15)$$

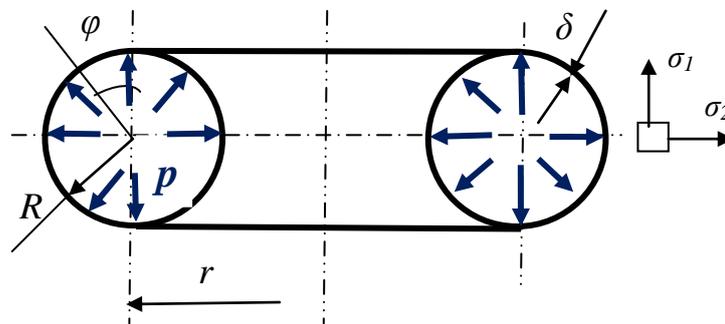
где σ_{adm} – допускаемое напряжение материала оболочки, Па;

c – коэффициент прочности сварного шва.

Оболочки эллиптического сечения не дают выигрыша в массе по сравнению с тороидальными, но имеют технологические преимущества. Эллиптические днища рассчитывают как сплюснутый эллипсоид.

Тороидальная оболочка

Схема нагружения тороидальной оболочки радиуса r и радиусом сечения R внутренним давлением p представлена на рисунке 1.5 (рекомендуется соотношение $r \geq 2R$).



R – радиус сечения оболочки; r – радиус оболочки; δ – толщина оболочки;
 φ – угол между нормалью к поверхности оболочки и осью вращения;
 p – внутреннее давление; σ_1, σ_2 – главные напряжения.

Рисунок 1.5 – Схема нагружения тороидальной оболочки

Продольные (меридиональные) напряжения σ_1 , Па, определяются по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2\delta}. \quad (1.16)$$

Кольцевые напряжения σ_2 , Па, определяются по формуле:

$$\sigma_2 = \frac{pR}{\delta} \cdot \frac{r + \frac{R}{2} \sin \varphi}{r + R \sin \varphi}. \quad (1.17)$$

На внутреннем экваторе тора при $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ (рисунок 1.5) возникают наибольшие кольцевые напряжения:

$$\sigma_2 = \frac{pR}{\delta} \cdot \frac{r - \frac{R}{2}}{r - R}. \quad (1.18)$$

Требуемая минимальная толщина тороидальной оболочки δ , м, определяется по формуле:

$$\delta = \frac{pR}{c \cdot \sigma_{adm}} \cdot \frac{r - \frac{R}{2}}{r - R}, \quad (1.19)$$

где σ_{adm} – допускаемое напряжение материала оболочки, Па;

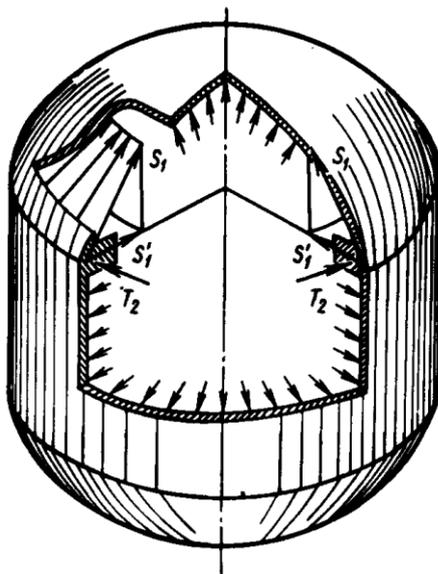
c – коэффициент прочности сварного шва.

1.2 Сопряжение оболочек различных очертаний

Расчет сопряжений оболочек сводится к установлению внутренних усилий и последующей оценки прочности при выполнении условий совместности деформаций сопрягаемых оболочек и шпангоутов (рисунок 1.6).

Места стыка (сопряжения) днищ и обечаек характеризуются изменением кривизны обечаек и возникновением распорных усилий от меридиональных усилий. Распорные усилия сжимают одну из сопряженных оболочек. Меридиональные усилия (равные или неравные в сопрягаемых оболочках) различно направлены. Тангенциальные напряжения и перемещения оболочек также различны, что вызывает появление перерезывающей силы и момента. Для компенсации распорной силы, снижения эффекта изгиба оболочек (для компенсации больших сжимающих напряжений) в местах их соединения устанавливают распорные шпангоуты, которые испытывают подкрепляющее влияние оболочек. Плавный переход от днища к обечайке снижает величину распорного усилия (наибольшее распорное усилие возникает в полусферической оболочке). Если в расчетах распорных колец

не учитывать присоединенные оболочки, то расчет будет идти в запас прочности, так как не учитывается подкрепляющее влияние примыкающих оболочек, которые эффективно участвуют в работе шпангоута на прочность. Неучет примыкающих оболочек приводит к завышению площади распорного шпангоута от 20 % до 50 %.



p – внутреннее давление; S_1 – меридиональное усилие в сферическом днище; S_1' – распорное усилие; T_2 – кольцевая сила, возникающая в сечении шпангоута от распорного усилия.

Рисунок 1.6– Схема нагружения оболочки

Конструкция распорных шпангоутов определяется размерами емкости и величиной действующих напряжений. На рисунке 1.7 представлены характерные сечения распорных шпангоутов.

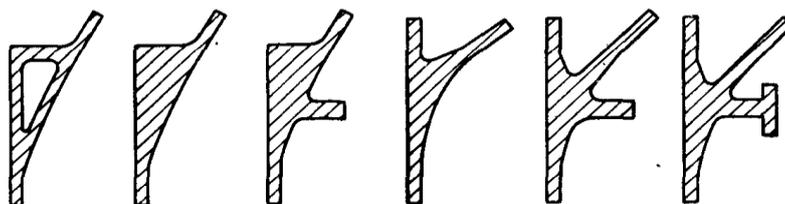


Рисунок 1.7–Сечения распорных шпангоутов

От погонных (меридиональных) усилий S_1 в днище (рисунок 1.6) на распорный шпангоут будет действовать распределенная, сжимающая сила S_1' , от которой в шпангоуте возникают кольцевые напряжения σ_2 , Па:

$$\sigma_2 = \frac{T_2}{F}, \quad (1.20)$$

где F – площадь распорного шпангоута, м^2 .

Кольцевые силы T_2 определяются методом площадей давления. Данный метод основан на выполнении условия равновесия безмоментного состояния элементов емкостей давления и дает наглядное представление о напряженном состоянии всех конструктивных элементов емкостей давления с оболочками различных очертаний.

Кольцевые силы T_2 , Н, возникающие в сечении распорного шпангоута от распорного усилия (рисунок 1.6), определяются по формуле:

$$T_2 = Ap, \quad (1.21)$$

где A – абсолютная величина алгебраической суммы площадей давления, которая ограничивается эффективными дугами, нормальными, проведенными из концов эффективных дуг, и осью вращения оболочки, м^2 .

Условие прочности распорного шпангоута имеет вид:

$$\sigma_2 = \frac{T_2}{F} = \frac{Ap}{F} \leq \sigma_{adm}, \quad (1.22)$$

σ_{adm} – допускаемое напряжение материала шпангоута, Па.

Расчет распорного шпангоута без учета присоединенных оболочек

Из условия прочности распорного шпангоута (1.22) требуемая площадь сечения распорного шпангоута F , м^2 , определяется по формуле:

$$F = \frac{Ap}{\sigma_{adm}}. \quad (1.23)$$

Расчет распорного шпангоута с учетом присоединенных оболочек

Условие прочности распорного шпангоута (1.22) имеет вид:

$$\sigma_2 = \frac{T_2}{F_{\text{эф}}} = \frac{Ap}{F_{\text{эф}}} \leq \sigma_{adm}. \quad (1.24)$$

Эффективная площадь сечения распорного шпангоута $F_{\text{эф}}$, м^2 , равна сумме необходимой площади шпангоута и площадей присоединенных эффективных дуг:

$$F_{\text{эф}} = F + \sum_{i=1}^n k\delta_i \sqrt{L_i \delta_i}, \quad (1.25)$$

где F – требуемая площадь сечения распорного шпангоута, м^2 ;

L – длина нормали, проведенной из концов сопряжения, м;

K – коэффициент, учитывающий эффективность оболочек, примыкающих к распорному шпангоуту;

$k\sqrt{L\delta}$ – ширина эффективной зоны оболочки, м.

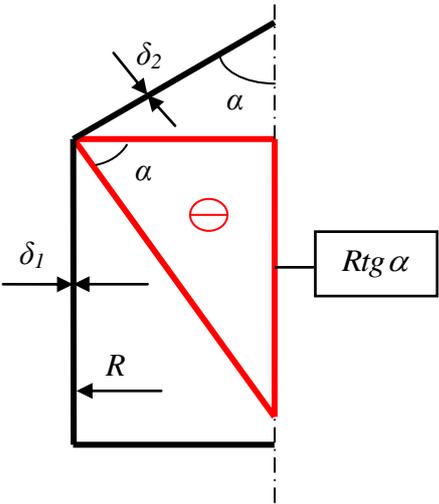
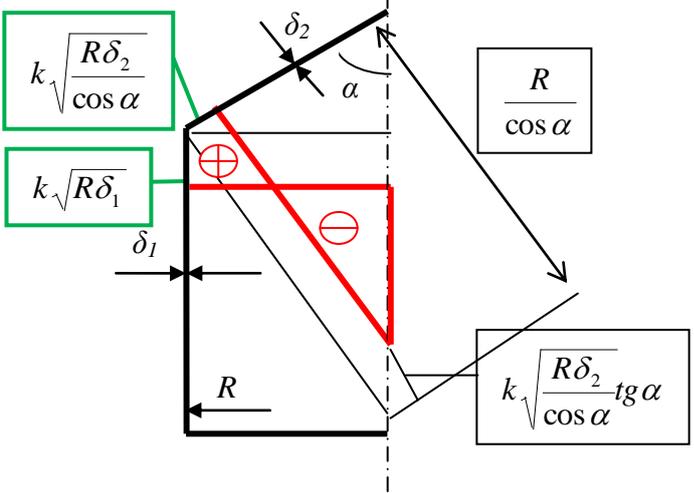
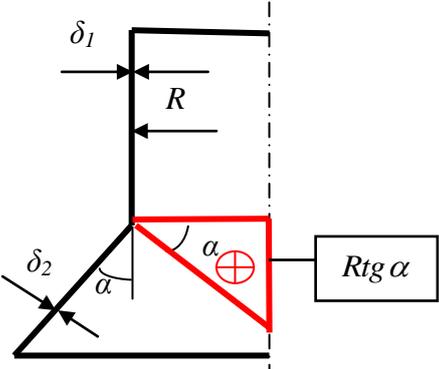
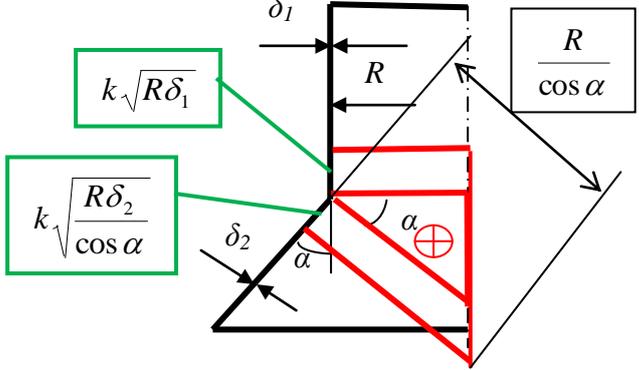
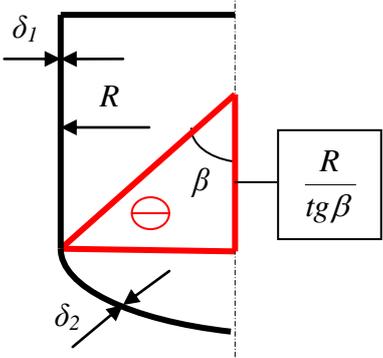
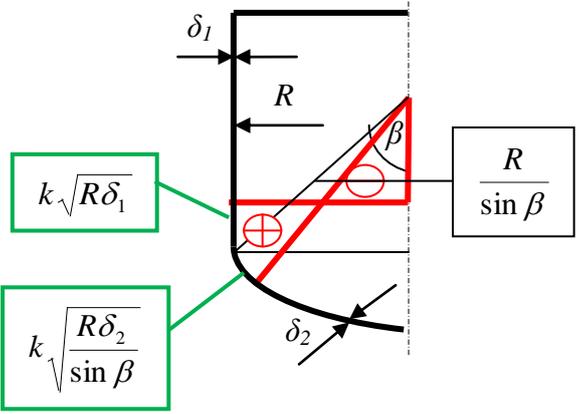
Тогда из формул (1.22) и (1.25) необходимая площадь сечения распорного шпангоута равна:

$$F = \frac{pA}{\sigma_{adm}} - \sum_{i=1}^n k\delta_i \sqrt{L_i \delta_i}. \quad (1.26)$$

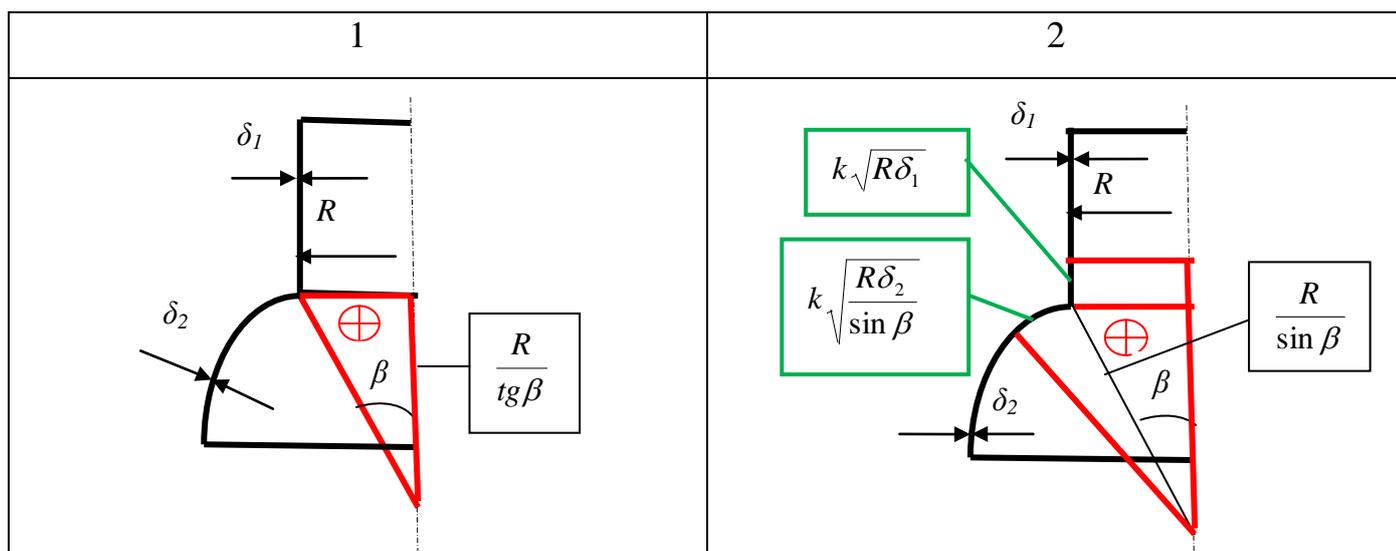
В таблице 1.1 для некоторых видов сопряжений оболочек представлены схемы расчета площадей давления (площадей выделенных фигур) в распорных узлах без учета и с учетом присоединенных оболочек.

Если прямые углы, образованные образующей оболочки и ее нормалью, накладываются друг на друга, то сила, возникающая в сечении шпангоута от распорного усилия, будет отрицательной (сжатие), если не накладываются – положительной (растяжение).

Таблица 1.1 – Схемы расчета площадей давления в распорных узлах без учета и с учетом присоединенных оболочек

Схемы сопряжений без учета присоединенных оболочек	Схемы сопряжений с учетом присоединенных оболочек
<p style="text-align: center;">1</p> 	<p style="text-align: center;">2</p> 
	
	

Продолжение таблицы 1.1

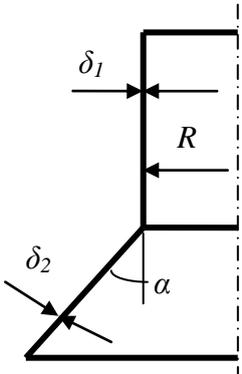
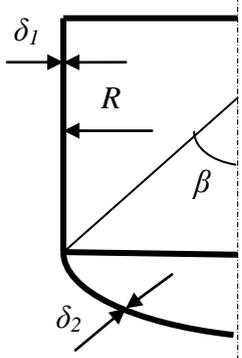


Формулы для расчета необходимых площадей сечений распорных шпангоутов без учета и с учетом присоединенных оболочек для некоторых видов сопряжений приведены в таблице 1.2.

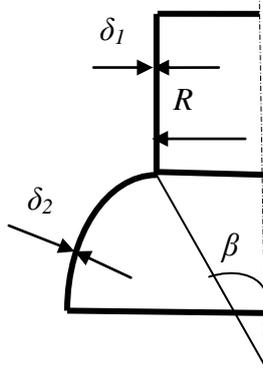
Таблица 1.2– Площади сечений распорных шпангоутов в местах сопряжения оболочек

Схема сопряжения оболочек	Площадь сечения шпангоута без учета присоединенных оболочек, $F, \text{м}^2$	Площадь сечения шпангоута с учетом присоединенных оболочек, $F, \text{м}^2$
1	2	3
<p>Сопряжение цилиндрической оболочки с конической</p> <p>$d = \sqrt{\frac{\delta_2}{\delta_1}}; c = \frac{2k}{\text{tg } \alpha} \sqrt{\frac{\delta_1}{R} \left(a + \frac{\sigma_{adm} \cdot \delta_1}{pR} b \right)}$ – коэффициент, учитывающий эффективность присоединенных оболочек</p>		
	$F = \frac{pR^2}{2\sigma_{adm}} \text{tg } \alpha$	$\delta_1 = \frac{pR}{\sigma_{adm}}; \quad \delta_2 = \frac{pR}{\sigma_{adm} \cdot \cos \alpha};$ $a = 1 + \frac{d}{\sqrt{\cos^3 \alpha}};$ $b = 1 + \frac{d^3}{\sqrt{\cos \alpha}}.$

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3
		<p>Тогда</p> $F = \frac{pR^2}{2\sigma_{adm}} \operatorname{tg} \alpha (1 - c),$ <p>где $c = \frac{4k}{\operatorname{tg} \alpha} \sqrt{\frac{\delta_1}{R}} \left(1 + \frac{1}{\cos^2 \alpha} \right)$</p>
	$F = \frac{pR^2}{2\sigma_{adm}} \operatorname{tg} \alpha$	$\delta_1 = \frac{pR}{\sigma_{adm}}; \quad \delta_2 = \frac{pR}{\sigma_{adm} \cdot \cos \alpha};$ $a = 1 + \frac{d}{\sqrt{\cos^3 \alpha}} + \frac{kd^2 \operatorname{tg} \alpha}{2 \cos \alpha} \sqrt{\frac{\delta_1}{R}};$ $b = -1 - \frac{d^3}{\sqrt{\cos \alpha}}.$ <p>Тогда</p> $F = \frac{pR^2}{2\sigma_{adm}} \operatorname{tg} \alpha (1 + c),$ <p>где $c = \frac{k^2 \delta_1}{R \cos^2 \alpha}$</p>
<p>Сопряжение цилиндрической оболочки со сферической</p> <p>$d = \sqrt{\frac{\delta_2}{\delta_1}}; c = 2k \cdot \operatorname{tg} \beta \sqrt{\frac{\delta_1}{R}} \left(a + \frac{\sigma_{adm} \cdot \delta_1}{pR} b \right)$ – коэффициент, учитывающий эффективность</p> <p>присоединенных оболочек</p>		
	$F = \frac{pR^2}{2\sigma_{adm} \cdot \operatorname{tg} \beta}$	$\delta_1 = \frac{pR}{\sigma_{adm}}; \quad \delta_2 = \frac{pR}{2\sigma_{adm} \cdot \sin \beta};$ $a = 1 + \frac{d}{2\sqrt{\sin^3 \beta}},$ $b = 1 + \frac{d^3}{\sqrt{\sin \beta}}.$

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3
		<p>Тогда</p> $F = \frac{pR^2}{2\sigma_{adm} \cdot \operatorname{tg} \beta} (1 - c),$ <p>где $c = 4k \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sqrt{\frac{\delta_1}{R}} \cdot \left(1 + \frac{0,353}{\sin^2 \beta}\right)$</p>
	$F = \frac{pR^2}{2\sigma_{adm} \cdot \operatorname{tg} \beta}$	<p>Тогда</p> $\delta_1 = \frac{pR}{\sigma_{adm}}; \quad \delta_2 = \frac{pR}{2\sigma_{adm} \cdot \sin \beta};$ $a = 1 + \frac{d}{2\sqrt{\sin^3 \beta}},$ $b = -1 - \frac{d^3}{\sqrt{\sin \beta}}.$ <p>Тогда</p> $F = \frac{pR^2}{2\sigma_{adm} \cdot \operatorname{tg} \beta}$

Требуемая площадь сечения распорного шпангоута размещается наиболее рационально, когда передача сил с днища на цилиндр через шпангоут осуществляется без «закручивания» шпангоута. Это обеспечивается, когда центр тяжести площади сечения кольца находится на диагонали параллелограмма, образованного усилиями S_1 и S_2 , т.е. когда моменты этих усилий уравновешены $S_1c_1=S_2c_2$ (рисунок 1.8).

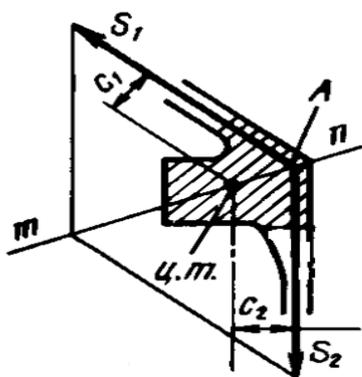
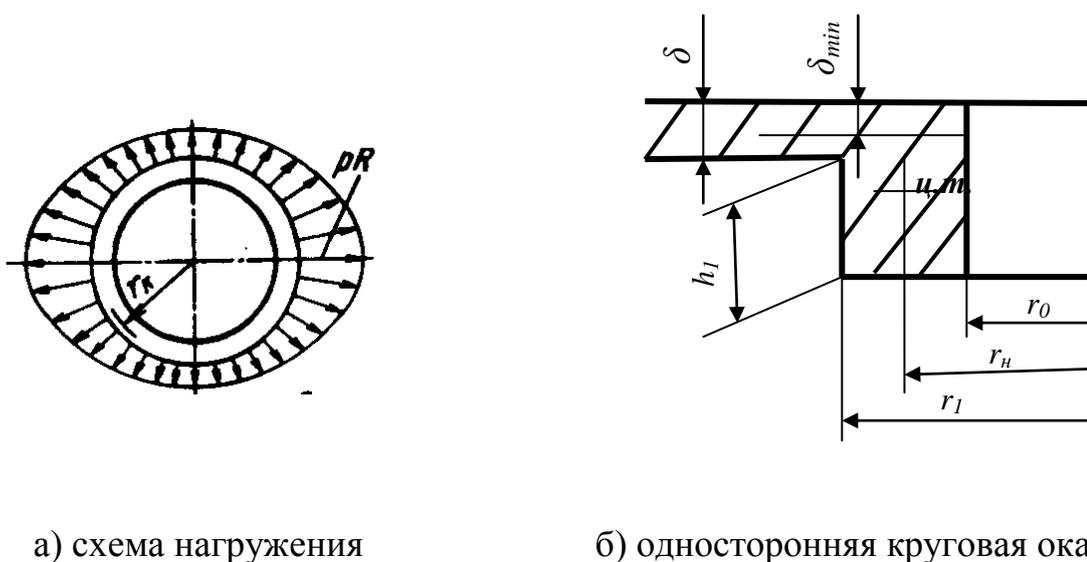


Рисунок 1.8 – Расчетная схема распорного шпангоута

1.3 Отверстия в оболочках

Наличие отверстий в емкостях давления значительно снижает сопротивляемость неподкрепленных стенок оболочки, вблизи которых возникает концентрация напряжений. Вырезы выполняются для установки различных конструктивных элементов (трубопроводы, штуцеры). Для компенсации ослабления и уменьшения концентрации напряжений отверстие окантовывается добавочным материалом. Материал переходной детали эффективно участвует в работе окантовки. Окантовка выполняется в виде цельной детали, которая приваривается в оболочку, или в виде приварных накладок (рисунок 1.9). Следует отметить, что сварные соединения, снижают конструктивную прочность и надежность сборного узла.



p – внутреннее давление; δ – толщина оболочки, в которой выполнено отверстие;
 R – радиус кривизны оболочки; r_0 – радиус отверстия; r_1 – радиус окантовки
отверстия; h_1 – высота окантовки отверстия; r_n – радиус кривизны нейтральной оси
окантовки отверстия; δ_{min} – минимальная толщина оболочки.

Рисунок 1.9–Отверстие в оболочке

Минимальную толщину оболочки δ_{min} рассчитывают по наименьшему допускаемому напряжению для материала окантовки или материала оболочки в

районе сварного шва. Если назначаемая толщина оболочки $\delta=2\delta_{\min}$, то добавочного подкрепления не требуется, так как $h_1=0$.

Площадь сечения окантовки F , м^2 , определяется по формуле:

–односторонняя круговая окантовка

$$F = h_1(r_1 - r_0), \quad (1.30)$$

где $h_1 \leq 2,5\delta$;

$$r_1 \leq 2r_0;$$

– односторонняя окантовка с одной трубой (штуцером)

$$F = h_1(r_1 - r_0) + c_1s_1, \quad (1.31)$$

где $h_1 + c_1 \leq 2,5\delta$;

$$c_1 \leq 2,5s_1.$$

Напряжения в окантовке.

Цилиндрическая оболочка:

– меридиональное напряжение σ_1 , Па

$$\sigma_1 = \frac{pRr_n}{2F}, \quad (1.32)$$

где $r_n = \frac{r_1 + r_0}{2}$;

– кольцевое напряжение σ_2 , Па

$$\sigma_2 = \frac{pRr_n}{F}. \quad (1.33)$$

Сферическая оболочка:

– меридиональное и кольцевое напряжения σ_1, σ_2 , Па

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pRr_n}{2F}. \quad (1.34)$$

2 Задание для самостоятельного решения «Проектировочный расчет емкости давления»

Емкость с отверстием радиуса r_0 , состоящая из сопряженных оболочек, находится под действием внутреннего давления p_3 . Требуется выполнить:

- проектировочный расчет обечайки и плоского днища;
- проектировочный расчет распорных шпангоутов без учета и с учетом присоединенных оболочек;
- проектировочный расчет односторонней круговой окантовки отверстия;
- начертить схемы емкости давления, сечения в месте установки распорного шпангоута, отверстия.

Принять:

- предел текучести материала емкости $\sigma_{и}=380$ МПа;
- допускаемое напряжение материала емкости $\sigma_{adm}=196$ МПа;
- предел текучести материала распорного шпангоута $\sigma_{и}=320$ МПа;
- допускаемое напряжение материала распорного шпангоута $\sigma_{adm}=150$ МПа;
- коэффициент безопасности $f=2,5$;
- коэффициент прочности сварного шва $c=0,9$;
- коэффициент, учитывающий эффективность оболочек, примыкающих к распорному шпангоуту, $k=0,6$.

Исходные данные и схемы нагружения емкостей давления в зависимости от варианта задания представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1– Исходные данные

№	p_3 , МПа	R , м	H , м	r_0 , м	α , град	β , град	Схема нагружения емкости
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,1	0,10	0,31	0,03	40	50	
2	0,2	0,11	0,32	0,031	35	55	
3	0,3	0,12	0,33	0,032	40	60	
4	0,4	0,13	0,34	0,033	45	50	
5	0,5	0,14	0,35	0,034	50	55	
6	0,6	0,20	0,36	0,035	45	60	
7	0,7	0,21	0,37	0,036	35	50	
8	0,8	0,22	0,38	0,037	40	55	
9	0,9	0,23	0,39	0,039	45	60	
10	0,1	0,24	0,40	0,039	50	55	

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
11	0,1	0,30	0,21	0,02	40	50	
12	0,2	0,35	0,22	0,021	35	55	
13	0,3	0,45	0,23	0,022	40	60	
14	0,4	0,55	0,24	0,023	45	50	
15	0,5	0,65	0,25	0,024	50	55	
16	0,6	0,45	0,26	0,024	45	60	
17	0,7	0,55	0,27	0,025	35	50	
18	0,8	0,65	0,28	0,026	40	55	
19	0,9	0,75	0,29	0,027	45	60	
20	0,1	0,85	0,30	0,028	50	55	

3 Алгоритм расчета

1. Определить величину разрушающей нагрузки p , МПа:

$$p = f \cdot p_э,$$

где f – коэффициент безопасности;

$p_э$ – эксплуатационная нагрузка, МПа.

2. Расчет обечайки и плоского днища.

2.1 Определить геометрические параметры обечайки и днищ согласно расчетной схемы:

– радиус цилиндрической оболочки $R_{ц}$, м;

– радиус конической оболочки $R_{к}$, м;

– радиус сферической оболочки $R_{сф}$, м;

– радиус плоского днища $R_{дн}$, м.

2.1 Определить минимальные толщины δ , м, стенок обечайки и днищ:

– цилиндрическая оболочка

$$\delta_{ц} = \frac{pR_{ц}}{c \cdot \sigma_{adm}},$$

– коническая оболочка

$$\delta_{к} = \frac{pR_{к}}{c \cdot \sigma_{adm} \cdot \cos \alpha},$$

– сферическая оболочка

$$\delta_{сф} = \frac{pR_{сф}}{2c \cdot \sigma_{adm} \cdot \sin \beta},$$

– плоское днище

$$\delta_{дн} = 1,12R_{дн} \sqrt{\frac{p}{\sigma_{adm}}},$$

где σ_{adm} – допускаемое напряжение материала емкости, Па.

2.2 Определить безмоментные усилия в обечайке и днищах S , кН, и краевой момент M_0 , кН·м, в днищах:

– цилиндрическая оболочка

$$S_2 = \frac{pR_y}{2};$$

– коническая оболочка

$$S_1 = \frac{pR_k}{2 \sin \alpha};$$

– сферическая оболочка

$$S_1 = \frac{pR_{сф}}{2 \sin \beta};$$

– плоское днище

$$S = pR_{дн};$$

$$M_0 = 0,258 pR_{дн} \delta \beta,$$

$$\text{где } \beta = \frac{1 + 0,96 \left(\frac{\delta}{\delta_{дн}} \right)^3 \left(\frac{R_{дн}}{\delta} \right)^{3/2}}{1 + 2 \left(\frac{\delta}{\delta_{дн}} \right)^3 \cdot \sqrt{\frac{R_{дн}}{\delta}}};$$

δ – толщина оболочки, сопряженной с днищем, м.

2.3 Определить напряжения в обечайке и днищах.

Цилиндрическая оболочка:

– продольные (меридиональные) напряжения σ_1 , МПа

$$\sigma_1 = \frac{pR_y}{2\delta_y};$$

– кольцевые напряжения σ_2 , МПа

$$\sigma_2 = \frac{pR}{\delta_u}$$

Коническая оболочка:

– максимальные продольные (меридиональные) напряжения σ_1 , МПа

$$\sigma_1 = \frac{pR_k}{2\delta_k \cos \alpha};$$

– максимальные кольцевые напряжения σ_2 , МПа

$$\sigma_2 = \frac{pR_k}{\delta_k \cos \alpha}.$$

Сферическая оболочка:

– продольные (меридиональные) напряжения σ_1 , МПа, и кольцевые напряжения σ_2 , МПа

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pR_{cf}}{\delta_{cf}}.$$

Плоское днище:

– максимальные напряжения изгиба (в центре тяжести днища) σ , МПа

$$\sigma = \pm 1,24 p \left(\frac{R_{\text{дн}}}{\delta_{\text{дн}}} \right)^2;$$

– продольные напряжения σ_1 , МПа, в местах сопряжения днища со стенкой обечайки

$$\sigma_1 = \frac{S}{\delta_{\text{дн}}} \pm \frac{6M_0}{\delta_{\text{дн}}^2}.$$

2.4 Определить коэффициент запаса прочности n :

$$n = \frac{\sigma_u}{\sigma_1(\sigma_2)},$$

где σ_u – предел текучести материала емкости, МПа.

3. Расчет распорного шпангоута.

3.1 Определить площади давления A_1 , м², без учета и A_2 , м², с учетом присоединенных оболочек. Для расчета воспользоваться схемами из таблицы 1.1.

3.2 Определить требуемые площади сечения распорных шпангоутов без учета $F_{ш1}$, м² и с учетом $F_{ш2}$, м², присоединенных оболочек в зависимости от вида сопряжения по формулам из таблицы 1.2.

3.3 Определить величину завышения площадей распорных шпангоутов n :

$$n = \frac{F_{ш1}}{F_{ш2}}.$$

3.4 Определить кольцевые напряжения σ_2 , МПа, в распорных шпангоутах без учета присоединенных оболочек:

$$\sigma_2 = \frac{pA_1}{F_{ш1}}.$$

3.5 Определить кольцевые напряжения σ_2 , МПа, в распорных шпангоутах с учетом присоединенных оболочек:

$$\sigma_2 = \frac{pA_2}{F_{ш2}}.$$

3.6 Определить коэффициент запаса прочности n :

$$n = \frac{\sigma_u}{\sigma_2},$$

где σ_u – предел текучести материала распорного шпангоута, МПа.

4. Расчет односторонней круговой окантовки отверстия.

4.1 Принять высоту окантовки отверстия h_1 , м, из условия:

$$h_1 \leq 2\delta .$$

4.2 Определить радиус окантовки отверстия r_1 , м:

$$r_1 = r_0 \left(1 + \frac{\delta}{h_1} \right),$$

где δ – толщина оболочки, в которой выполнено отверстие, м.

4.3 Определить радиус кривизны нейтральной оси окантовки отверстия r_n , м:

$$r_n = \frac{r_1 + r_0}{2}.$$

4.4 Определить эффективную площадь сечения односторонней круговой окантовки $F_{ок}$, м²:

$$F_{ок} = h_1(r_1 - r_0).$$

4.5 Определить напряжения в окантовке отверстия.

Цилиндрическая оболочка:

– меридиональное напряжение σ_1 , МПа

$$\sigma_1 = \frac{pR_{ц}r_n}{2F_{ок}};$$

– кольцевое напряжение σ_2 , МПа

$$\sigma_2 = \frac{pR_{ц}r_n}{F_{ок}}.$$

Сферическая оболочка:

– меридиональное и кольцевое напряжения σ_1 , σ_2 , МПа

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pR_{сф}r_n}{2F_{ок}}.$$

Список использованных источников

1. Лизин, В.Т. Проектирование тонкостенных конструкций / В.Т. Лизин, В.А. Пяткин. – М.: Машиностроение, 2003. – 384 с.
2. Погорелов, В.И. Строительная механика тонкостенных конструкций / В.И. Погорелов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2007.– 430 с.
3. Мазин, А.П. Расчет пластин и оболочек авиационных конструкций / А.П. Мазин, О.С. Гоголева. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. – 363 с.
4. Кан, С.Н. Строительная механика оболочек / С.Н. Кан. – М.: Машиностроение, 1991.– 482 с.
5. Оболенский, Е.П. Прочность летательных аппаратов и их агрегатов / Е.П. Оболенский, Б.И. Сахаров, В.А. Сибиряков. – М.: Машиностроение, 1995. – 504 с.
6. Авдонин, А.С. Расчет на прочность летательных аппаратов / А.С. Авдонин, В.И. Фигуровский. – М.: Машиностроение, 1995. – 504 с.
7. Голубев, И.С. Проектирование конструкций летательных аппаратов: учебник для ВТУЗов / И.С. Голубев. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
8. Моссаковский, В.И. Прочность ракетных конструкций: учебное пособие для машиностроительных специальностей ВУЗов / В.И. Моссаковский. – М.: Высшая школа, 1990. – 358 с.