

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям по дисциплине
«Методы оптимизации проектирования технологического
оборудования»
для студентов заочной формы обучения направления подготовки
15.04.02 Технологические машины и оборудование

Невинномысск 2025

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Методы оптимизации проектирования технологического оборудования» разработаны в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта в части содержания и уровня подготовки выпускников по направлению 15.04.02 – Технологические машины и оборудование

Методические указания имеют целью закрепить у студентов теоретически полученные знания по дисциплине, выработать практические навыки конструирования и материального оформления оборудования химических производств и проведения его расчетов на прочность.

Приведены исходные данные и методические указания по выполнению практических заданий, список рекомендуемой литературы.

СОДЕРЖАНИЕ

РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ОБЕЧАЙКИ И ДНИЩА, НАГРУЖЕННЫХ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ.....	4
РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ АППАРАТА, НАГРУЖЕННОГО НАРУЖНЫМ ДАВЛЕНИЕМ, ОСЕВОЙ СЖИМАЮЩЕЙ СИЛОЙ И ИЗГИБАЮЩИМ МОМЕНТОМ.....	8
РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ОБЕЧАЙКА - ДНИЩЕ	11
РАСЧЕТ НА УКРЕПЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ. ВЫБОР ТИПА УКРЕПЛЕНИЯ.....	14

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1

РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ОБЕЧАЙКИ И ДНИЩА, НАГРУЖЕННЫХ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ

По данной теме необходимо рассчитать толщину стенки обечайки и днища тонкостенных сосудов в соответствии с вариантами, приведенными в таблицах 1 и 2.

Нормативные допускаемые напряжения, пределы текучести материалов при заданных температурах, модули упругости, коэффициенты прочности сварных швов указаны в таблицах [1].

При расчете обечаек, которые представляют собой оболочки вращения, находящихся под воздействием равномерно распределенного давления, изгибающие моменты и поперечную силу не учитывают.

Теорию расчета оболочек (рисунок 1), учитывающую только σ_m и σ_k , называют безмоментной теорией оболочек, основным уравнением которой является уравнение Лапласа

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_k}{\rho_k} = \frac{p}{S},$$

где σ_m – меридиональное напряжение;

σ_k – кольцевое напряжение;

ρ_m, ρ_k – радиусы кривизны срединной поверхности оболочки.

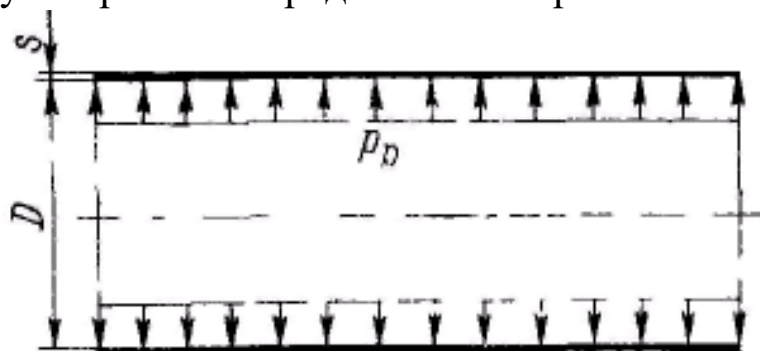


Рисунок 1 – Расчетная схема цилиндрической обечайки

На основе данного уравнения получают основные расчетные зависимости для цилиндрических, конических, сферических и эллиптических оболочек.

Исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки s определяют по формулам:

$$S_p = \max \left\{ \begin{array}{l} p_p \cdot D / (2 \cdot \varphi[\sigma] - p_p) \\ p_u \cdot D / (2 \cdot \varphi[\sigma]_u - p_u) \end{array} \right\};$$

$$S = S_p + c + c_0,$$

где p_p – расчетное давление;

p_u – пробное давление;

φ – коэффициент прочности сварных швов;

D – диаметр аппарата;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение для рабочего состояния;

$[\sigma]_u$ – допускаемое напряжение при испытаниях;

c – прибавка к расчетной толщине обечайки;

c_0 – прибавка на округление размера до стандартного значения.

Расчетную и исполнительную толщину стенки конической обечайки (рисунок 2) определяют по формулам:

$$S_{к.р} = \max \left\{ \begin{array}{l} p_p \cdot D / [(2 \cdot \varphi[\sigma] - p_p) \cdot \cos \alpha] \\ p_u \cdot D / [(2 \cdot \varphi[\sigma]_u - p_u) \cdot \cos \alpha] \end{array} \right\};$$

$$S_k = S_{к.р} + c + c_0,$$

где $S_{к.р}$ – расчетная толщина стенки конической оболочки;

α – угол при вершине конуса, градусы.

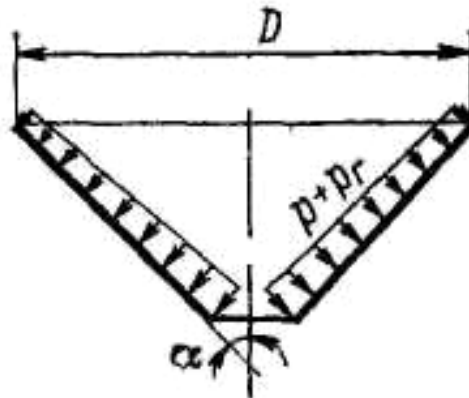


Рисунок 2 – Расчетная схема конического днища

Толщина стенки эллиптической крышки (днища) (рисунок 3):

$$S_{э.р} = \max \left\{ \begin{array}{l} p_p \cdot D / (2 \cdot \varphi[\sigma] - 0,5 \cdot p_p) \\ p_u \cdot D / (2 \cdot \varphi[\sigma]_u - 0,5 \cdot p_u) \end{array} \right\};$$

$$S = S_{э.р} + c + c_0,$$

где $S_{э.р}$ – расчетная толщина стенки эллиптического днища.

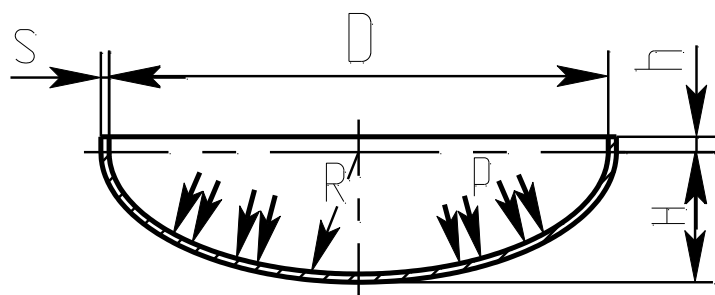


Рисунок 3 – Расчетная схема эллиптического днища

Затем для днищ проводится проверка допускаемого давления как в рабочем состоянии, так и при испытаниях:

$$p_p < [p];$$

$$p_n < [p],$$

Вышеуказанные формулы применимы при условии $\frac{S - c}{D} \leq 0,1$.

Варианты задания представлены в таблицах 1 и 2. Необходимо рассчитать толщину стенки обечайки и днища.

Таблица 1 – Параметры вулканизационного котла

№	Размеры котла		Рабочее давление в котле p , МПа	Температура в котле t_c , °С	Объем котла V , м ³	Марка стали	Скорость коррозии Π , мм/год	Срок эксплуатации τ_b , лет
	Внутренний диаметр D , мм	Длина цилиндрической части $l_{ц}$, м						
1	800	0,9	0,90	180	0,68	10	0,05	15
2	1100	1,5	0,60	160	1,85	20	0,09	12
3	1500	3,0	0,60	160	6,30	ВСт3пс	0,10	10
4	2000	4,0	0,60	160	16,00	ВСт3пс	0,08	12
5	2200	6,0	0,60	160	26,00	ВСт3Гпс	0,06	15
6	2800	6,0	0,40	150	43,20	10	0,05	10
7	2800	8,0	1,25	190	57,00	20	0,07	12
8	2800	16,0	0,60	150	91,00	ВСт3пс	0,09	10
9	3600	8,0	1,00	180	98,00	20	0,04	15

Таблица 2 – Параметры вертикального кожухотрубчатого теплообменника

№	Размеры корпуса		Рабочее давление p , МПа	Температура в межтрубном пространстве t_c , °С	Плотность среды, ρ_c , кг/м ³	Марка стали	Скорость коррозии P , мм/год	Срок эксплуатации τ_B , лет
	Внутренний диаметр D , мм	Высота цилиндрической части $H_{ц}$, м						
1	500	3	6,4	5	1000	ВСт3сп	0,05	10
2	500	6	4,0	30	900	ВСт3сп	0,04	15
3	600	6	2,5	200	1200	16ГС	0,03	10
4	600	9	1,6	320	1160	16ГС	0,06	12
5	800	6	2,0	-5	1300	Двухслойная 16ГС+12Х18Н10Т	0,02	15
6	800	9	3,0	120	1400	Двухслойная 16ГС+12Х18Н10Т	0,03	10
7	1000	6	4,2	20	800	ВСт3сп5	0,07	15
8	1000	9	1,6	-10	1270	16ГС	0,04	12
9	1200	6	2,5	10	1000	16ГС	0,01	18
10	1200	9	6,4	60	1250	Двухслойная 16ГС+12Х18Н10Т	0,02	10
11	1400	6	3,0	100	1100	ВСт3сп5	0,07	12
12	1400	9	2,0	80	950	ВСт3сп5	0,08	15

Примечание: при расчете теплообменника необходимо учесть, что рабочая среда жидкая.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2

РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ АППАРАТА, НАГРУЖЕННОГО НАРУЖНЫМ ДАВЛЕНИЕМ, ОСЕВОЙ СЖИМАЮЩЕЙ СИЛОЙ И ИЗГИБАЮЩИМ МОМЕНТОМ

При расчете толщины стенки необходимо учесть, что тонкостенный цилиндр под внешним давлением находится по сравнению с таким же цилиндром, нагруженным внутренним давлением в худших условиях, это объясняется тем, что нагружается цилиндрическая форма аппарата и появляются дополнительные напряжения.

Внешнее давление, под действием которого первоначальная форма цилиндрической оболочки начинает искажаться, называется критическим (рисунок 4).

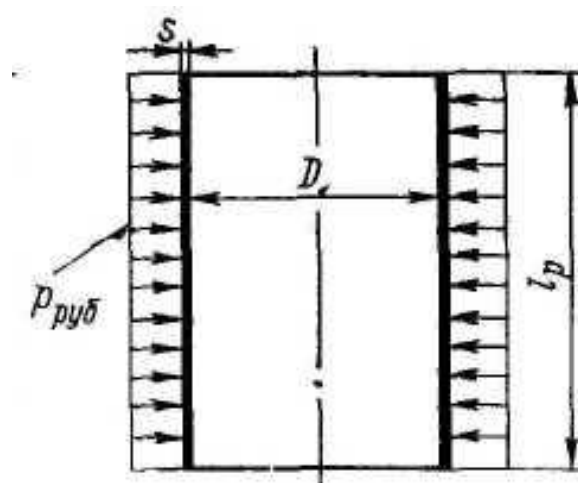


Рисунок 4 – Расчетная схема цилиндрической обечайки, нагруженной наружным давлением

Расчетная и исполнительная толщина стенки определяется по формулам:

$$S_{p=\max} \left\{ \begin{array}{l} K_2 \cdot D \cdot 10^{-2} \\ 1,1 \cdot p_n \cdot D / 2 \cdot [\sigma] \end{array} \right\},$$

$$S = S_p + c + c_0,$$

где K_2 – коэффициент, определяемый по номограммам [1];

$p_{н.р}$ – рабочее давление;

c – прибавка к расчетной толщине обечайки;

c_0 – прибавка на округление размера до стандартного значения.

Пробное давление при гидравлических испытаниях

$$p_{и} = 1,25 \cdot p_{н.р} \cdot [\sigma]_{20} / [\sigma]$$

где $[\sigma]_{20}$ – допускаемое напряжение для заданной марки стали при $t=20^{\circ}\text{C}$;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение для рабочего состояния.

Условие устойчивости цилиндрической обечайки должно выполняться для рабочего состояния аппарата:

$$p_{н.р} < [p_{н}]$$

при испытании

$$p_{и} < [p_{н}]_{и},$$

где $[p_{н}]$ и $[p_{н}]_{и}$ – допускаемое наружное давление соответственно в рабочем состоянии и при испытании с учетом условия прочности в рабочем состоянии и условия устойчивости в пределах упругости, в зависимости от рабочей длины обечайки l_p [1].

Варианты задания представлены в таблицах 3 и 4. Необходимо рассчитать толщину стенки цилиндрической обечайки.

Таблица 3 – Параметры вертикального цельносварного аппарата

№	Внутренний диаметр D, мм	Диаметр нижнего штуцера внутренний D ₀ , мм	Высота цилиндрической части H _ц , м	Остаточное давление в аппарате p _{ост} , МПа	Температура t _c , °C	Марка стали	Прибавка к расчетной толщине с, мм
1	1000	50	2130	0,010	30	09Г2С	1,0
2	1400	80	2220	0,020	40	10Х17Н13М2Т	0,9
3	1400	120	3070	0,015	60	12Х18Н10Т	1,3
4	1800	100	3385	0,010	80	Двухслойная 20К+ 10Х17Н13М2Т	0,6
5	1800	150	3785	0,020	180	ВСт3пс	1,2
6	2200	200	4020	0,015	120	Двухслойная 20К+ 12Х18Н10Т	0,8

Таблица 4 – Параметры вертикального аппарата с перемешивающим устройством

№	Внутренний диаметр D, мм	Высота цилиндрической части H _ц , м	Остаточное давление в аппарате p _{ост} , МПа	Температура t _с , °С	Марка стали	Прибавка к расчетной толщине с, мм	Масса крышки с приводом m, кг
1	1000	1100	0,010	25	ВСт3сп	1,0	730
2	1400	1100	0,009	60	12Х18Н10Т	0,7	1000
3	1600	1200	0,011	80	16ГС	0,9	1270
4	1600	1700	0,018	40	09Г2С	1,1	1770
5	1800	1300	0,021	120	10Х17Н13М2Т	0,6	2150
6	1800	1800	0,012	130	20К	0,8	2300

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ОБЕЧАЙКА - ДНИЩЕ

Расчетные формулы, использованные в предыдущих занятиях, выведены для случая нагружения оболочек равномерно распределенными по поверхности статическими нагрузками и справедливы для оболочек, у которых не закреплены края, а также для участков, удаленных от закрепленных краев оболочки.

В реальных конструкциях машин и аппаратов края оболочек прикрепляются к другим оболочкам и к соответствующим деталям (фланцы, трубные решетки и т.п.). В таких узлах сопряжения возникают дополнительно, так называемые, краевые нагрузки, вызывающие местные напряжения изгиба в материалах сопрягаемых элементов [2].

Краевая сила Q_0 и краевой момент M_0 являются реакциями заделки края оболочки (рисунок 5).

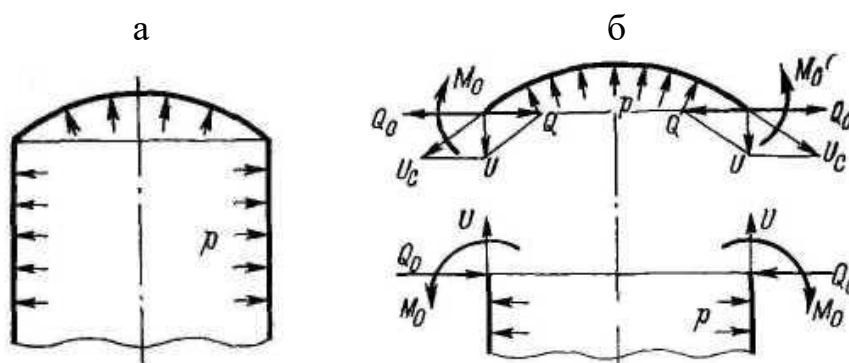


Рисунок 5 – Схема к определению краевых сил и моментов:
 а – соединение сферической и цилиндрической оболочек; б – расчетная схема; U и U_c – меридиональные усилия соответственно цилиндрической и сферической оболочек.

Основными уравнениями для определения напряжений являются уравнения совместности деформаций:

$$\begin{cases} \Delta_p^{\text{Ц}} - \Delta_{Q_0}^{\text{Ц}} + \Delta_{M_0}^{\text{Ц}} = \Delta_p^{\text{С}} + \Delta_{(Q_0-Q)}^{\text{С}} + \Delta_{M_0}^{\text{С}}; \\ \Theta_p^{\text{Ц}} - \Theta_{Q_0}^{\text{Ц}} + \Theta_{M_0}^{\text{Ц}} = -\Theta_p^{\text{С}} - \Theta_{(Q_0-Q)}^{\text{С}} - \Theta_{M_0}^{\text{С}}, \end{cases}$$

где $\Delta_p^{\text{Ц}}$, $\Delta_{Q_0}^{\text{Ц}}$, $\Delta_{M_0}^{\text{Ц}}$, $\Theta_p^{\text{Ц}}$, $\Theta_{Q_0}^{\text{Ц}}$, $\Theta_{M_0}^{\text{Ц}}$ – радиальные, угловые деформации края цилиндрической оболочки под действием нагрузок p , Q_0 , M_0 ;

$\Delta_p^C, \Delta_{(Q_0-Q)}^C, \Delta_{M_0}^C, \Theta_p^C, \Theta_{(Q_0-Q)}^C, \Theta_{M_0}^C$ – то же для сферической оболочки.

Подставляя соответствующие значения деформаций из таблицы [1] в данное уравнение, с учетом известных геометрических размеров аппарата, получим значения Q_0, M_0 .

Суммарные значения напряжений также определяются по таблицам [1].

Максимальные напряжения по краю оболочек должны быть проверены по условию прочности [1].

По данной теме необходимо: рассчитать на прочность соединение цилиндрической и конической обечаек с 1,2 мм по исходным данным таблицы 5.

Таблица 5 – Параметры вертикального колонного аппарата

№	Внутренний диаметр низа аппарата D_0 , мм	Внутренний диаметр верха аппарата D , мм	Угол конуса α °С	Толщина стенки $s=s_k$, мм	Внутреннее давление p_p , МПа	Температура стенки t , °С	Марка стали (меди, латуни, титана)
1	1000	1200	30	8	0,25	100	МЗр (медь)
2	1400	1800	45	12	0,30	50	ЛЖМц (латунь)
3	1200	1200	70	10	0,45	200	08Х22Н6Т
4	2200	2400	45	8	0,20	150	09Г2С
5	1000	2200	30	14	0,80	100	10Х17Н13М2Т
6	1800	2400	30	12	0,75	300	ОТ4 (титан)
7	1600	1800	70	16	1,00	250	08Х18Г8М2Т
8	1200	2400	45	10	1,20	200	ВТ1-0 (титан)
9	2000	2200	70	8	0,60	150	10Х17Н13М3Т
10	1400	2400	30	14	0,90	50	М2 (медь)
11	2200	2400	45	12	1,00	300	08Х22Н6Т
12	1800	2200	45	16	1,40	100	ЛС59-1 (латунь)
13	1600	2000	30	10	1,20	150	08Х21Н6М2Т

Рассчитать на прочность соединение двух цилиндрических обечаек, имеющих разную толщину стенки $s=1$ мм, по данным таблицы 6.

Таблица 6 – Параметры вертикального колонного аппарата постоянно-го сечения

№	Внутренний диаметр аппарата D, мм	Внутреннее давление p _p , МПа	Температура стенки t, °С	Марка стали (медь, латуни, титана)	Толщина стенки, мм	
					s ₁	s ₂
1	1600	0,90	200	08Х18Н10Т	8	16
2	200	0,65	250	ВТ1-1 (титан)	10	18
3	2000	0,85	150	М2 (медь)	12	24
4	2400	1,00	100	16ГС	8	14
5	2000	1,60	100	ЛС59-1 (латунь)	10	20
6	1200	1,00	300	ВСт3сп	14	24
7	1000	0,80	300	20К	12	18
8	2400	1,20	250	МЗр (медь)	12	20
9	1000	1,50	150	08Х18Н12Т	10	18
10	1200	0,75	200	ОТ4 (титан)	8	18
11	1600	0,50	150	ЛЖМц (латунь)	14	24
12	1000	0,60	100	ВСт3сп5	16	24
13	1200	0,35	200	12Х18Н10Т	10	18
14	2000	0,25	300	ВТ1-0 (титан)	12	24
15	2400	0,50	100	08Х18Н10Т	12	18
16	2200	0,40	250	10Х17Н13М3Т	8	14

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4

РАСЧЕТ НА УКРЕПЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ. ВЫБОР ТИПА УКРЕПЛЕНИЯ

В корпусе и днище цилиндрических аппаратов для установки люков и штуцеров вырезают отверстия. Вырезанное отверстие возможно укрепить: за счет увеличения толщины стенки штуцера, торообразной вставкой, накладным кольцом. В расчетной практике наибольшее распространение получил способ укрепления отверстия накладным кольцом (рисунок 6).

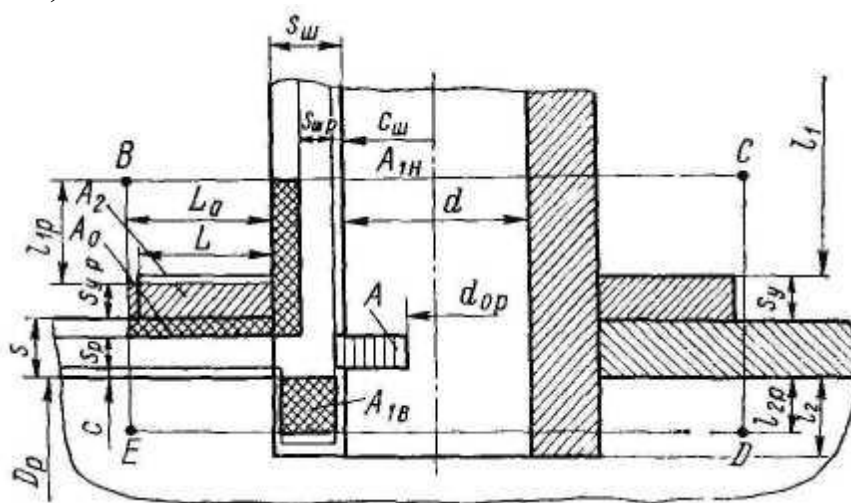


Рисунок 6 – Схема к расчету укрепления отверстия

Расчетный диаметр отверстия, не требующего дополнительного укрепления при отсутствии избыточной толщины стенки укрепленного элемента

$$d_{0p} = 0,4 \sqrt{D_p (s - c)}.$$

Условие укрепления отверстия утолщением стенки аппарата, штуцером, накладным кольцом или комбинированным укреплением.

$$\begin{aligned} & [(l_{1p} + s_{yp} + s - s_p - c) \cdot (s_{ш} - s_{шp} - c_{ш}) + l_{2p} \cdot (s_{ш} - 2c_{ш})] \cdot \chi_1 + \sqrt{D_p \cdot (s_{yp} + s - c)} \\ & \times (\chi_2 \cdot s_{yp} + s - s_p - c) \geq 0,5 \cdot (d_p - d_{0p}) \cdot s_p, \end{aligned}$$

где l_{1p} – расчетная длина внешней части штуцера;

l_{2p} – расчетная длина внутренней части штуцера;

s_{yp} – расчетная толщина накладного кольца;

l_1 – общая длина штуцера, $l_1 = 200$ мм;

s – исполнительная толщина стенки аппарата;

s_p – расчетная толщина стенки аппарата;

c – прибавка к расчетной толщине стенки аппарата;

$s_{ш}$ – исполнительная толщина стенки штуцера;

$s_{шp}$ – расчетная толщина стенки штуцера;

$c_{ш}$ – прибавка к расчетной толщине стенки штуцера;

$$\chi_1 = [\sigma]_{ш} / [\sigma];$$

$[\sigma]_{ш}$ – допускаемое напряжение материала корпуса;

$$\chi_2 = [\sigma]_y / [\sigma];$$

$[\sigma]_y$ – допускаемое напряжение усиливающего элемента;

d_p – расчетный диаметр отверстия;

d_{op} – расчетный диаметр отверстия, не требующего укрепления.

Расчетная толщина накладного кольца S_{yp} определяется методом последовательных приближений из условия укрепления отверстия.

Исполнительная толщина накладного кольца принимается по конструктивным соображениям [1].

По теме данного занятия необходимо рассчитать укрепление отверстия, предварительно выбрав тип укрепления.

Исходные данные представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры укрепляемых цилиндрических оболочек

№	Внутренний диаметр оболочки (максимальный) D , мм	Марка стали	Расчетное давление, МПа	Расчетная температура t , °С	Длина неукрепленной части оболочки l , мм	Исполнительная толщина стенки оболочки s , мм	Диаметр отверстия d , мм	Длина внешней части штуцера l_1 , мм	Длина внутренней части штуцера l_2 , мм	Прибавка к расчетной толщине стенки c , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2400	ВСтЗсп	0,6	100	2500	7	500	300	15	0,8
2	2400	12X18H10T	1,0	100	2500	10	150	250	5	1,0
3	2400	08X18H10T	1,6	100	2500	18	200	250	5	1,2
4	2800	09Г2С	0,3	200	7200	5	200	150	-	1,0
5	2800	20К	0,8	200	9000	12	300	150	5	0,8
6	2800	10X17H13M2T	1,2	200	1200	16	300	250	5	1,0
7	3000	ВСтЗсп	1,0	300	1300	18	500	250	-	1,2

Продолжение таблицы 7

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
8	2000	ВСтЗсп	0,6	100	2500	8	150	150	-	1,0
9	2800	09Г2С	0,5	150	7200	8	200	150	-	0,8
10	2400	20К	0,5	200	4500	8	250	200	5	1,0
11	2800	10X17H13M2T	0,4	250	9000	8	300	200	-	1,2
12	2800	08X18H10T	0,5	300	7200	10	400	300	10	1,0
13	2000	08X18H10T	1,6	20	2500	16	200	200	5	1,2
14	1800	20К	0,6	20	2800	6	180	200	-	1,0
15	1000	12X18H10T	1,2	20	1800	8	120	150	10	1,0
16	1000	ВСтЗсп	1,0	20	2000	8	150	250	-	1,2
17	1200	12X18H10T	0,6	20	1500	5	200	250	-	1,0
18	1800	12X18H10T	0,8	20	2800	7	100	120	-	1,0
19	1800	12X18H10T	0,8	20	2500	7	200	200	10	1,0
20	1200	09Г2С	0,8	100	2500	6	150	200	-	1,2