

Титул

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Выбор материалов.....	5
1.1 Характеристика стали марки 20К.....	5
2 Расчет.....	12
2.1 Расчетные параметры.....	12
2.2 Толщина стенок.....	13
2.3 Укрепление отверстия.....	17
2.4 Фланцевое соединение корпуса с крышкой.....	19
2.5 Теплообменная рубашка.....	23
2.6 Определение оптимальных размеров корпуса аппарата.....	26
2.7 Опоры.....	26
Заключение.....	29
Список литературы.....	30

## ВВЕДЕНИЕ

Технология химических, нефтехимических и биотехнологических производств характеризуется широкой номенклатурой процессов, свойств сырья и продуктов, режимов и параметров работы машин и аппаратов.

По характеру воздействия на обрабатываемый продукт используемое оборудование принято разделять на машины и аппараты.

В аппаратах происходят физико-механические, тепловые, диффузионные, химические, биохимические, электрические и другие процессы.

В машинах технологические процессы происходят вследствие механического воздействия на обрабатываемый объект. Эти процессы называют механическими.

Деление технологического оборудования на машины и аппараты является условным. Имеются машины, в которых механическая обработка сочетается с нагревом, охлаждением, массообменом, химическими реакциями, и этому термину «технологическая машина» придают расширенное значение, понимая под этим любое техническое устройство, предназначенное для осуществления технологического процесса.

Значительную долю всего оборудования химических нефтехимических и биотехнологических производств составляют емкостная аппаратура, работающая под вакуумом или при избыточном давлении среды. Эти аппараты сложны и потенциально опасны, поэтому им уделяется особое внимание.

Целью курсовой работы является проектирование реактора с рубашкой. Поставленная цель реализуется путем решения следующих задач:

1. Описание выбранных материалов, используемых для изготовления проектируемого аппарата.
2. Прочностный расчет обечайки корпуса, рубашки, днищ и крышек.
3. Расчет укрепления отверстий.
3. Выбор фланцев.
4. Выбор и проверочный расчет опор.

В графической части курсового проекта изображены: сборочный чертеж корпуса аппарата с выносками узлов фланцевого соединения, опорного узла и соединения рубашки с корпусом

## 1 Выбор материалов

По условию аппарат изготавливается из листового проката стали марки 20К.

### 1.1 Характеристика стали марки 20К

Конструкционная качественная углеродистая сталь 20К используется для изготовления деталей сосудов и котлов, работающих при температурах до +450<sup>0</sup>С под давлением – днища, фланцы, барабаны (цельнокованные, сварные) паровых котлов, корпуса аппаратов, полумуфты.

#### Преимущества стали и недостатки

Марка стали 20 имеет основное достоинство – этот высококачественный сплав с хорошими технологическими характеристиками можно приобрести по умеренной цене. При использовании металла для производства продукции отмечаются его преимущества:

- является одновременно пластичным и прочным, устойчивым к истиранию;
- сохраняет необходимые качества при работе в диапазоне температур (-40 — +450 °С);
- имеет низкую флокеночувствительность;
- устойчив к воздействию среды, находящейся под высоким давлением (газ, пар);
- в структуре сплава практически не образуются трещины после его обработки давлением;
- металл обладает высокой свариваемостью (до его термообработки);
- после выполнения сварочных работ швы не требуется закаливать;

При использовании металла необходимо учитывать его главный недостаток – появление признаков коррозии на поверхности. Для недопущения такого процесса необходимо покрытие специальным защитным химсоставом (гальваника).

Сталь 20 — углеродистая. Именно процентное содержание вещества – углерода, определяет название сплава. По ГОСТу 1050-88 его должно быть от 0,17 до 0,24%, или среднее значение – 0,2%. Оно и используется для маркировки металла.

#### Состав и структура

Основна — железо. Дополнительные компоненты:

- Углерод (0,2%). От данного компонента зависит прочность, твердость сплава. Чем его больше, тем выше эти показатели, но при этом снижается пластичность.
- Марганец (0,6%). Это сильный раскислитель. При его добавлении снижается количество серы в составе. Увеличивает показатель прочности, износостойчивости у поверхности структуры сплава. Улучшает ковку, сварку металла.
- Кремний (0,35%). Сильный раскислитель. Добавляется для уменьшения содержания азота, кислорода, водорода. Это снижает количество пор, газовых раковин, которые негативно влияют на прочность.
- Медь (0,3%), хром (0,2%), никель (0,3%). Эти компоненты нужны для повышения устойчивости к образованию ржавчины, увеличения механической стойкости.
- Сера (0,04%), фосфор (0,035%). Вредные компоненты, которые ухудшают его технические характеристики, свойства.

Состав стали представлен в таблице 1.1.

**Таблица 1.1 - Массовая доля элементов стали 20 по ГОСТ 1050-2013**

С (Углерод)	Si (Кремний)	Mn (Марганец)	P (Фосфор)	S (Сера)	Cr (Хром)	Ni (Никель)	Cu (Медь)	Fe (Железо)
0,17 – 0,24	0,17 – 0,37	0,35 – 0,65	< 0,03	< 0,035	< 0,25	< 0,30	< 0,30	остальное

Если массовая доля алюминия не менее 0,02 или вводятся по отдельности или в любом сочетании Ti, V, Nb, Al ( $Ti + V + Nb + Al < 0,015$ ), то содержание азота не нормируется. Допускается снижение уровня содержания кремния при применении других раскислителей, например, Al, Ti, V, Nb. Допускается снижение уровня содержания марганца при удовлетворении всех требований к механическим свойствам.

### Характеристики и свойства

Физические свойства:

- Показатель плотности — 7850 кг/м<sup>3</sup>.
- Начало плавления сплава — от 1500 °С.
- Теплопроводность готовой продукции без увеличенного количества легирующих добавок — 48 Вт/м\*К.
- Теплостойкость — 490 Дж/кг\*К.
- Линейное расширение —  $11.6 \cdot 10^{-6}$  1/град.
- Электрическое сопротивление — 220 Мом\*мм.

Химические свойства:

- Низкая устойчивость к воздействию щелочей, кислот.
- Быстрое образование ржавчины при длительном воздействии влаги.

Чтобы сделать сталь устойчивой к коррозионным процессам, производители наносят гальваническое покрытие, основой которого является хром, цинк.

Механические параметры:

1. Простая механическая обработка.
2. Средние показатели твердости, прочности.
3. Модуль упругости — 200 Мпа.
4. Относительное удлинение на разрыв — 26%.
5. Максимальное сужение структуры — 55%.
6. Предел выносливости металла — 14 кг/мм<sup>2</sup>.
7. Ударная вязкость металлических поверхностей — 780 кДж/м<sup>2</sup>.
8. Прочность структуры на разрыв — до 46 кг/мм<sup>2</sup>.

Металл хорошо проводит электрический ток, является парамагнетиком.

Механические свойства стали приведены в таблице 1.2.

**Таблица 1.2 - Механические свойства при повышенных температурах**

t испытания, °С	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	KCU, Дж/м <sup>2</sup>
		410	25	55	
		490	7	40	
		390	21	50	
		390-490		50	163
		340-440		50	163
		490	7	40	207
		410	25	55	
		340-490	28		127
20	280	430	34	67	218
200	230	405	28	67	186
300	170	415	29	64	188
400	150	340	39	81	100
500	140	245	40	86	88
700		130	39	94	
800		89	51	96	
900		75	55	100	
1000		47	63	100	
1100		30	59	100	
1200		20	64	100	

Физические свойства стали приведены в табл. 1.3.

**Таблица 1.3 - Физические свойства**

Температура испытания, °С	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Модуль нормальной упругости, E, ГПа	212	208	203	197	189	177	163	140		
Модуль упругости при сдвиге кручением G, ГПа	78	77	76	73	69	66	59			
Плотность, $\rho_n$ , кг/см <sup>3</sup>	7859	7834	7803	7770	7736	7699	7659	7917	7624	7600
Коэффициент теплопроводности		51	49	44	43	39	36	32	26	26

Вт/(м · °С)										
Уд. электросопротивление (ρ, НОм · м)		219	292	381	487	601	758	925	1094	1135
Температура испытания, °С	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-700	20-800	20-900	20-1000
Коэффициент линейного расширения (α, 10 <sup>-6</sup> 1/°С)	12.3	13.1	13.8	14.3	14.8	15.1	15.2			
Удельная теплоемкость (С, Дж/(кг · °С))	486	498	514	533	555	584	636	703	703	695

### **Химические свойства**

У материала невысокая химическая устойчивость к большинству кислотных соединений. Если на поверхность попадёт влага, на ней останется ржавчина. Из-за неё сильно ухудшается внешний вид, прочность.

Чтобы защитить материал от коррозии, следует наносить гальванические покрытия (хром, цинк, прочие схожие соединения).

### **Уровень раскисления**

Спокойная сталь 20. За счёт введения кремния и марганца, полностью отсутствует кислород. Оксидов железа также очень небольшое количество. Это и обеспечивает «спокойное» застывание металла в ковше. Однородность, плотность СТ20 на выходе отличные, только сверху формируется газовая раковина.

Кипящая сталь. Образовывается путём раскисления марганца, что ведёт к повышению содержания закиси железа. Соединение образует углекислый газ. В итоге формируются пузыри газа, выглядящие как кипящая масса. Такой металл очень пористый, химические элементы распределены неравномерно, что обуславливает ухудшение механических характеристик, увеличивает опасность появления трещин, ухудшает свариваемость. Но есть и достоинства – невысокая цена, отсутствие небезопасных отходов.

Полуспокойная СТ20. Нечто среднее между предыдущими разновидностями сплава.

### **Особенности термообработки**

Для материала предусмотрена термообработка – закалка, отпуск, отжиг. После их выполнения изменяется ферритно-перлитная структура, которая преобразуется в мартенситную. Происходит уменьшение пластичности материала с одновременным увеличением его прочности.

При нагреве заготовок используются печи двух видов – индукционные, доменные. Для закалки выдерживается температурный режим от 790 до 820оС. Время нахождения изделий в печи может быть разным, определяется технологией. Охлаждение выполняется на воздухе, в масле или воде. Для отжига выполняют нагрев заготовок до 160 – 200оС.

Зависимо от степени раскисления можно выделить три типа стали:

1. Кипящая. Для раскисления применяется марганец. В составе повышается количество железа. При взаимодействии с углеродом выделяется большое количество углекислого газа. Особенность данного вида стали — высокая пористость. Основные компоненты металла распределяются по структуре неравномерно. Из-за этого снижается показатель прочности.

2. Спокойная. Образуется в процессе удаления кислорода из состава металла. Для этого в сплав вводится марганец, кремний. Внутри содержится минимальное количество оксида железа. Структура однородная, упорядоченная. Сталь получается высокопрочной. Газовые карманы, которые образуются возле поверхностей, удаляются механическим путем.

Третий вид — полустойкий сплав. Представляет собой комбинацию двух вариантов.

### **Сферы применения**

Определенные технические характеристики стали 20 объясняют ее применение в разных направлениях промышленности:

- Производстве трубной арматуры (накидных гаек, штуцеров, фланцев, крестовин, ниппелей).
- Изготовлении строительных материалов.
- Сборке разных металлоконструкций, машин, судов, промышленного оборудования.

Из этого металла производят:

- Бесшовные трубы. Изготавливаются путем холодного, горячего волочения. Их особенность — высокая прочность.
- Цельносварные холоднокатаные трубы.
- Различные профили (проволоку, двутавры, швеллера, металлические уголки, листы разной толщины, прутки).

### **Аналоги материала**

Для некоторых изделий допускается замена материала сталью, имеющей аналогичные качества. Продукция российских производителей — сталь 40Х, 30, 25, 15. Металл-заменитель может поставляться из-за рубежа – 20 (Китай), S20C (Япония), 1020, 1023 (США), C22R (Германия).



## 2 Расчет

### 2.1 Расчетные параметры

1. Расчетная температура стенок:

$$T = \max(t_c; 20^\circ\text{C}) = \max(110; 20) = 110^\circ\text{C}$$

2. Расчетное давление

а) внутри аппарата (для днища, обечайки корпуса и крышки):

$P_p = P = 0,4$  МПа, так как максимальное значение гидростатического давления рабочей среды:

$$P_z = g \rho_c (2H + l_1 + l)$$

$$H = 0,25D = 0,25 \cdot 1,0 = 0,25 \text{ м}$$

$$P_z = 9,81 \cdot 1000 (2 \cdot 0,5 + 0,245 + 1,61) = 23103 \text{ Па или } 0,023 \text{ МПа}$$

$0,05 P_p = 0,02$  МПа <  $0,023$  МПа, следовательно, гидростатическое давление учитываем.

Окончательно принимаем  $P_p = 0,4 + 0,023 = 0,423$  МПа.

б) в рубашке  $P_p = P_{p_{\text{руб}}} = 0,6$  МПа, так как максимальное значение гидростатического давления в рубашке при наличии конденсата водяного пара

$$P_{r.p} = g \cdot \rho_v \cdot (H + l_2 + L) = 9,81 \cdot 1000 \cdot (0,25 + 0,05 + 1,61) = 21190 \text{ Па} \approx 0,0212 \text{ МПа, где}$$

$$H = 0,25D = 0,25 \cdot 1,0 = 0,25 \text{ м, } \rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3 \text{ – плотность воды}$$

$$\frac{P_{z.p}}{P_{p.p}} \cdot 100\% = \frac{0,0212}{0,6} \cdot 100\% = 3,5\% \leq 5\%$$

- гидростатическое давление не учитываем.

3. Допускаемое напряжение

В рабочем состоянии:

$$[\sigma] = \eta \cdot \sigma^* = 1 \cdot 146 = 146 \text{ МПа, где } \sigma^* = 146 \text{ МПа – для стали 20К при } t = 110^\circ\text{C, } \eta = 1 \text{ – для листового проката.}$$

При гидравлических испытаниях:

$$[\sigma] = \sigma / \eta = 147 / 1,1 = 133,64 \text{ МПа, где } \sigma^* = 147 \text{ МПа – для стали 20К при } t = 20^\circ\text{C, } \eta = 1 \text{ – для листового проката.}$$

4. Модуль продольной упругости

$$E = 2,08 \cdot 10^5 \text{ МПа – для обечайки корпуса при } t = 110^\circ\text{C;}$$

$$E_p = 2,12 \cdot 10^5 \text{ МПа – для рубашки при } t = 20^\circ\text{C.}$$

5. Прибавки к расчетным толщинам примем:  $C = 2$  мм – обечайки и днища корпуса;

$$C_{\text{кр}} = 2 \text{ мм – крышки; } C_p = 0,2 \text{ – рубашки.}$$

Расчетная длина цилиндрической обечайки корпуса:

$$l_p = L + H / 3 = 1,61 + 0,25 / 3 = 1,69 \text{ м,}$$

## 2.2 Толщина стенок

Расчетная толщина цилиндрической обечайки корпуса:

а) при действии внутреннего давления

$$S = \frac{P_p \cdot D}{2 [\sigma] \cdot \phi - P_p} = \frac{0,423 \cdot 1,0}{2 \cdot 146 \cdot 1 - 0,423} = 0,00145 \text{ м} = 1,45 \text{ мм}$$

б) при действии наружного давления

$$S_n = \max \left\{ \begin{array}{l} K_2 D \cdot 10^{-2} = 0,87 \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} = 0,0087 \text{ м} \\ \frac{1,1 \cdot P_{н.р} \cdot D}{2 [\sigma]} = \frac{1,1 \cdot 0,6 \cdot 1,0}{2 \cdot 133,64} = 0,00036 \text{ м} \end{array} \right\} = 8,7 \text{ мм}$$

Где

$$K_1 = \frac{n_y \cdot P_{н.р}}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E} = \frac{2,4 \cdot 0,6}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,12 \cdot 10^5} = 2,8$$

$K_3 = l_p/D = 1,69/1,0 = 1,69$ , откуда по номограмме (рисунок 1.14[3])  $K_2 = 0,87$ .

Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки корпуса в первом приближении

$$S > \max(S_p; S_{р.н.}) + C = \max(0,36; 8,7) + 2 = 10,7 \text{ мм.}$$

Принимаем большее стандартное значение  $S = 12 \text{ мм}$ . Так как обечайка корпуса при наличии давления в рубашке и внутри аппарата работает под совместным действием наружного давления  $P_{н.р}$  и осевого сжимающего усилия  $F$ , то должно выполняться условие устойчивости:

$$\frac{P_{н.р}}{[P_n]} + \frac{F}{[F]} \leq 1$$

Осевое сжимающее усилие – это усилие прижатия днища к обечайке давлением в рубашке, которое может быть рассчитано (пренебрегая силой тяжести днища и его связью с рубашкой) следующим образом:

$$F \approx 0,25 \pi (D + 2S)^2 P_{н.р} = 0,25 \cdot 3,14 \cdot (1,0 + 2 \cdot 0,012)^2 \cdot 0,6 = 0,49 \text{ МН}$$

Допускаемое наружное давление:

- из условия прочности

$$[P_n]_p = \frac{2 [\sigma] \cdot (S - C)}{(D + S - C)} = \frac{2 \cdot 146 \cdot (0,012 - 0,002)}{(1,0 + 0,012 - 0,002)} = 2,89 \text{ МПа}$$

- Из условия устойчивости в пределах упругости при  $l_p < l_0$  ( $l_p = 1,69$ );

$$l_0 = 8,15 D \sqrt{D / [100(S - C)]} = 8,15 \cdot 1,0 \sqrt{1,0 / [100 \cdot (0,012 - 0,002)]} = 8,15 \text{ м}$$

$$[P_n]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D}{n_y \cdot l_p} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right]^{2,5} =$$

$$= \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot 2,08 \cdot 10^5 \cdot 1,0}{2,4 \cdot 1,69} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,012 - 0,002)}{1,0} \right]^{2,5} = 0,92 \text{ МПа}$$

- с учетом обоих условий

$$[P_H] = \frac{[P_n]_P}{\sqrt{1 + \left( \frac{[P_n]_P}{[P_n]_E} \right)^2}} = \frac{2,89}{\sqrt{1 + \left( \frac{2,89}{0,92} \right)^2}} = 0,88 \text{ МПа}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

- из условия прочности

$$[F]_\sigma = \pi(D + S - C)(S - C)[\sigma] = 3,14 \cdot (1,0 + 0,012 - 0,002) \cdot (0,012 - 0,002) \cdot 146 = 4,63 \text{ МН}$$

Из условия прочности в пределах упругости при  $l_p/D = 1,69/1,0 = 1,69 < 10$

$$[F]_E = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D^2}{n_y} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right]^{2,5} =$$

$$= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 2,08 \cdot 10^5 \cdot 1,0^2}{2,4} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,012 - 0,002)}{1,0} \right]^{2,5} = 26,87 \text{ МПа}$$

- с учетом обоих условий:

$$[F] = \frac{[F]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_\sigma}{[F]_E} \right)^2}} = \frac{4,63}{\sqrt{1 + \left( \frac{4,63}{26,87} \right)^2}} = 4,562 \text{ МПа}$$

Условие устойчивости обечайки корпуса выполняется:

$$\frac{0,6}{0,88} + \frac{0,49}{4,562} = 0,789 < 1$$

Допускаемое внутренне давление на обечайку корпуса:

$$[P] = \frac{2[\sigma] \cdot \phi \cdot (S - C)}{(D + S - C)} = \frac{2 \cdot 146 \cdot 1 \cdot (0,012 - 0,002)}{(1,0 + 0,012 - 0,002)} = 2,89 \text{ МПа}$$

Условие  $P_p < [P]$  выполняется ( $0,423 < 2,18$ ).

Исполнительную толщину  $S_3$  эллиптического днища корпуса аппарата примем из условия равной толщины свариваемых друг с другом оболочек:  $S_3 = S = 12 \text{ мм}$ . При этом должно выполняться условие  $P_{p,r} \leq [P_n]_3$  и  $P_p \leq [P]_3$ .

Допускаемое наружное давление для днища:

- из условия прочности

$$[P_n]_{\sigma\sigma} = \frac{2[\sigma] \cdot (S_s - C)}{[D + 0,5 \cdot (S_s - C)]} = \frac{2 \cdot 146 \cdot (0,012 - 0,002)}{(1,0 + 0,5 \cdot 0,01)} = 2,91 \text{ МПа}$$

- из условия устойчивости в пределах упругости

$$[P_n]_{E\sigma} = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S_s - C)}{K_s \cdot D} \right]^{2,5} =$$

$$= \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 2,08 \cdot 10^5}{2,4} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,012 - 0,002)}{0,919 \cdot 1,0} \right]^{2,5} = 2,78 \text{ МПа}$$

$$\text{где } K_s = \frac{[1 + (2,4 + 8x)x]}{[1 + (3 + 10x)x]} = \frac{[1 + (2,4 + 8 \cdot 0,15) \cdot 0,15]}{[1 + (3 + 10 \cdot 0,15) \cdot 0,15]} = 0,919$$

$$x = \frac{15 \cdot (s_s - c)}{D} = \frac{15 \cdot 0,01}{1,0} = 0,15$$

- с учетом обоих условий

$$[P_n]_{\Sigma} = \frac{[P_n]_{\sigma\sigma}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[P_n]_{\sigma\sigma}}{[P_n]_{E\sigma}} \right)^2}} = \frac{2,91}{\sqrt{1 + \left( \frac{2,91}{2,78} \right)^2}} = 1,39 \text{ МПа}$$

Условие устойчивости днища выполняется:

$$\frac{P_{p.p}}{[P_n]_{\Sigma}} = \frac{0,6}{1,39} = 0,432 < 1$$

Допускаемое внутреннее давление для эллиптического днища:

$$[P]_{\Sigma} = \frac{2[\sigma] \cdot \phi \cdot (S_s - C)}{D + 0,5 \cdot (S_s - C)} = \frac{2 \cdot 146 \cdot 1 \cdot (0,012 - 0,002)}{1,0 + 0,5 \cdot 0,01} = 2,91 \text{ МПа}$$

Условие  $P_p < [P]_{\Sigma}$  выполняется ( $0,423 < 2,91$ ).

Исполнительная толщина эллиптической крышки:

$$S_{кр} > \frac{P_p \cdot D}{2[\sigma] \phi - 0,5 \cdot P_p} + C_{кр} = \frac{0,2 \cdot 1,0}{2 \cdot 146 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,423} + 0,002 = 0,00268 \text{ м}$$

Принимаем  $S_{кр} = 4 \text{ мм}$ .

Допускаемое внутреннее давление для крышки:

$$[P]_{кр} = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{кр} - C_{кр})}{D + 0,5 \cdot (S_{кр} - C_{кр})} = \frac{2 \cdot 146 \cdot (0,004 - 0,002)}{1,0 + 0,5 \cdot 0,002} = 0,583 \text{ МПа}$$

Условие  $P_p < [P]_{кр}$  выполняется ( $0,423 < 0,583$ ).

Исполнительная толщина:

- цилиндрической обечайки рубашки

$$S_{p,ч} > \frac{P_{p,p} \cdot D_{руб}}{2\phi[\sigma] - P_{p,p}} + C_p = \frac{0,45 \cdot 1,0}{2 \cdot 1 \cdot 146 - 0,6} + 0,0002 = 0,0035 м = 3,5 мм$$

- эллиптического днища рубашки

$$S_{p,э} > \frac{P_{p,p} \cdot D_{руб}}{2\phi[\sigma] - 0,5 \cdot P_{p,p}} + C_p = \frac{0,6 \cdot 1,0}{2 \cdot 1 \cdot 146 - 0,5 \cdot 0,6} + 0,0002 = 0,0041 м = 4,1 мм$$

Принимаем толщину стенки рубашки  $S_p = 5$  мм.

Допускаемое внутреннее давление:

- на обечайку рубашки

$$[P]_{p,ч} = \frac{2\phi[\sigma] \cdot (S_p - C_p)}{D_{руб} + S_p - C_p} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 146 \cdot (0,005 - 0,0002)}{1,1 + 0,005 - 0,0002} = 0,79 МПа$$

- на эллиптическое днище рубашки

$$[P]_{p,э} = \frac{2\phi[\sigma] \cdot (S_p - C_p)}{D_{руб} + 0,5 \cdot (S_p - C_p)} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 146 \cdot (0,005 - 0,0002)}{1,1 + 0,5 \cdot (0,005 - 0,0002)} = 0,8 МПа$$

Допускаемое давление внутри аппарата в рабочих условиях:

$$[P]_a = \min\{[P]; [P]_э; [P]_{кр}\} = \min\{2,89; 2,91; 0,583\} = 0,583 МПа$$

Допускаемое давление в рубашке при работе аппарата:

$$[P]_p = \min\{[P]_ф; [P]_н; [P]_{р,ч}; [P]_{р,э}\} = \min\{0,6; 1,024; 0,79; 0,8\} = 0,6 МПа, \text{ где } [P]_ф = P_{p,p} = 0,6 МПа.$$

### 2.3 Укрепление отверстия

Расчетный диаметр укрепляемого элемента  $D_p = 2D = 2 \cdot 1,0 = 2,0 м$ , так как  $X = 0$ .

Расчетный диаметр отверстий в стенке обечайки  $d_p = d + 2C_1 = 600 + 2 \cdot 2 = 604 мм = 0,604 м$ .

$$d_{оп} = 0,4 \sqrt{D_p \cdot (S - C)} = 0,4 \cdot \sqrt{1,1 \cdot (0,003 - 0,002)} = 0,021 м$$

$$d_o = 2 \cdot \left[ \frac{S - C}{S_R} - 0,8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (S - C)} = 2 \cdot \left[ \frac{0,003 - 0,002}{0,00086} - 0,8 \right] \cdot \sqrt{1,1 \cdot (0,003 - 0,002)} = 0,038 м$$

Так как  $d_p > d_o$ , то необходимо провести укрепление.

Ширина зоны укрепления для отверстия

$$L_0 = \sqrt{D_p \cdot (S - C)}$$

$$L_0 = \sqrt{2,8 \cdot (0,003 - 0,002)} = 0,053 м$$

Толщина стенки штуцера:

$$S_{1,p} = \frac{P \cdot (d + 2C_1)}{2[\sigma]_1 \cdot \phi - P} = \frac{0,2 \cdot (0,6 + 0,004)}{2 \cdot 146 \cdot 1 - 0,2} = 0,0004 м$$

где

$$S_1 \geq 0,4 + 2 = 2,4 \text{ мм}$$

Примем  $S_1 = 3 \text{ мм}$ .

Расчетные длины штуцера

$$l_{1p} = 1,25 \sqrt{(d + 2C_1) \cdot (S_1 - C)} = 1,25 \cdot \sqrt{(0,6 + 2 \cdot 0,002) \cdot (0,003 - 0,002)} = 0,031 \text{ м}$$

$$l_{1p} = 0,031 \text{ м}$$

$$l_{3p} = \min \{0; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2C_1)}\} = \min \{0; 0,5 \cdot \sqrt{(0,6 + 2 \cdot 0,002)} = 0,39\} = 0$$

$$L_k \approx L_0$$

Необходимая площадь укрепления кольца

$$A_2 \geq A_0 - (A + A_1 + A_3)$$

$$A_0 = (d + 2C_1 - d_{op}) \cdot S_R = (0,6 + 0,004 - 0,021) \cdot 0,00086 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$A = 2 \cdot (S - C - S_R) \cdot (L_0 + S_1 - C_1)$$

$$A = 2 \cdot (0,003 - 0,002 - 0,00086) \cdot (0,053 + 0,003 - 0,002) = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

$$A_1 = (S_1 - C_1 - S_{1R}) \cdot l_{1p} = (3 - 2 - 0,4) \cdot 10^{-3} \cdot 0,031 = 1,86 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

$$A_3 = 2 \cdot l_{3p} = 2 \cdot 0 = 0$$

$$A_2 \geq 5 \cdot 10^{-4} - (1,5 \cdot 10^{-5} + 1,86 \cdot 10^{-5} + 0) = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения укрепляемого кольца примем  $A_2 = 0,0005 \text{ м}^2$ .

Толщина накладного кольца

$$S_2 = \frac{A_2}{2 \cdot (L_k + S_1 - C_1)} = \frac{0,0005}{2 \cdot (0,053 + 0,003 - 0,002)} = 0,0046 \text{ м}$$

Окончательно примем  $S_2 = 5 \text{ мм}$ .

## 2.4 Фланцевое соединение корпуса с крышкой

Конструкцию соединения крышки и корпуса аппарата при  $D=1000 \text{ мм}$  и  $P_p=0,423 \text{ МПа}$  выбираем согласно таблице 1.36[3] с плоскими приварными фланцами и уплотнительной поверхностью «шип-паз».

1. Конструктивные размеры фланца. Толщину втулки фланца принимаем  $S_0=S=12 \text{ мм}$ .

Высота втулки фланца

$$h_a > 0,5 \cdot \sqrt{D \cdot (S_0 - C)} = 0,5 \cdot \sqrt{1,0 \cdot (0,012 - 0,01)} = 0,06 \text{ м}$$

Принимаем  $h_b = 100 \text{ мм}$ .

Диаметр болтовой окружности

$$D_b \geq D + 2 \cdot (2S_0 + d_b + u) = 1,0 + 2 \cdot (2 \cdot 0,012 + 0,02 + 0,004) = 1,496 \approx 1,5 \text{ м}$$

где  $d_b = 20 \text{ мм}$  – наружный диаметр болта при  $D = 1,0 \text{ м}$  и  $P_p = 0,423 \text{ МПа}$  (таблица 1.40[3]);  $u$  – нормативный зазор ( $u = 4 \text{ мм}$ ).

Наружный диаметр фланца

$$D_H = D_b + a = 1500 + 40 = 1540 \text{ мм},$$

где  $a = 40 \text{ мм}$  – для шестигранных гаек при  $d_b = 20 \text{ мм}$  (таблица 1.41[3]).

Наружный диаметр прокладки

$$D_{н.л} = D_b - e = 1500 - 30 = 1470 \text{ мм},$$

где  $e = 30 \text{ мм}$  – для плоских прокладок (таблица 1.41[3]).

Средний диаметр прокладки

$$D_{с.л} = D_{н.л} - b = 1470 - 15 = 1455 \text{ мм},$$

где  $b = 15 \text{ мм}$  – ширина прокладки (таблица 1.42[3]).

Количество болтов необходимых для герметичности соединения

$$n_b > \frac{\pi \cdot D_b}{t_{ш}} = \frac{3,14 \cdot 1500}{90} = 52,2 \text{ шт.},$$

где  $t_{ш} = 4,5 \cdot d_b = 4,5 \cdot 20 = 90 \text{ мм}$  – шаг размещения болтов М20 на болтовой окружности при  $P_p = 0,2 \text{ МПа}$  (таблица 1.43[3]).

Принимаем  $n_b = 56$ , кратное четырем.

Высота (толщина) фланца

$$h_\phi > \lambda_\phi \sqrt{D \cdot S_{зк}} = 0,3 \cdot \sqrt{1,4 \cdot 0,012} = 0,038 \text{ м},$$

где  $\lambda_\phi = 0,3$  – для плоских фланцев при  $P_p = 0,423 \text{ МПа}$  (рисунок 1.40[3]);

$S_{зк} = S_0 = 12 \text{ мм}$ , так как для плоских фланцев  $\beta_1 = S_1/S_0 = 1$ . Принимаем  $h_\phi = 40 \text{ мм}$ .

Расчетная длина болта

$$l_b = l_{б.о} + 0,28 \cdot d_b = 84 + 0,28 \cdot 20 = 89,6 \text{ мм} = 0,0896 \text{ м}$$

где  $l_{б.о} = 2 \cdot (h_\phi + h_n) = 2 \cdot (40 + 2) = 84 \text{ мм}$  – расстояние между опорными поверхностями головки болта и гайки при толщине прокладки  $h_n = 2 \text{ мм}$ .

2. Нагрузки, действующие на фланец

Равнодействующая внутреннего давления

$$F_D = P_p \cdot \pi \cdot D_{с.л}^2 / 4 = 0,2 \cdot 3,14 \cdot 1,455^2 / 4 = 0,332 \text{ МН}$$

Реакция прокладки

$$R_n = \pi \cdot D_{с.л} \cdot b_0 \cdot K_{нр} \cdot P_p = 3,14 \cdot 1,455 \cdot 0,015 \cdot 1 \cdot 0,2 = 0,014 \text{ МН}$$

где  $K_{np}=1$  – для резины с плотностью свыше 1,2 МПа (таблица 1.44[3]);  
 $b_0=b=15\text{мм}=0,015\text{м}$ , так как  $b \leq 15\text{мм}$ .

Коэффициент жесткости фланцевого соединения

$$K_{\text{жс}} = \frac{y_{\bar{b}} + 0,5 \cdot y_{\phi} \cdot (D_{\bar{b}} - D - S_{\text{жс}}) \cdot (D_{\bar{b}} - D_{\text{с.л}})}{y_n + y_{\bar{b}} + 0,5 \cdot y_{\phi} \cdot (D_{\bar{b}} - D_{\text{с.л}})^2},$$

где  $y_{\bar{b}}$ ,  $y_n$ ,  $y_{\phi}$  – податливость, соответственно болтов, прокладки, фланцев.

Податливость болтов

$$y_{\bar{b}} = l_{\bar{b}} / (E_{\bar{b}} \cdot f_{\bar{b}} \cdot n_{\bar{b}}) = 0,0896 / (1,9 \cdot 10^5 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 56) = 36 \cdot 10^{-6} \text{ м / МН}$$

где  $E_{\bar{b}}=1,9 \cdot 10^5$  МПа – для материала болтов из стали 35;  $f_{\bar{b}}=2,35 \cdot 10^{-4}\text{м}^2$  – для болтов диаметром  $d_{\bar{b}}=20\text{мм}$ .

Податливость прокладки

$$y_n = K_n \cdot h_n / (E_n \cdot \pi \cdot D_{\text{с.л}} \cdot b) = 0,09 \cdot 0,002 / (19 \cdot 3,14 \cdot 2,35 \cdot 1,455 \cdot 0,015) = 138 \cdot 10^{-6} \text{ м / МН}$$

где  $E_n=4[1+b/(2h_n)]=4 \cdot [1+0,015/(2 \cdot 0,002)]=19\text{МПа}$  – для прокладки из резины с твердостью свыше 1,2МПа (таблица 1.44[3]);  $K_n=0,09$ .

Податливость фланца

$$y_{\phi} = \left[ 1 - \nu \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda_{\phi}') \right] \cdot \frac{\psi_2}{h_{\phi}^3 \cdot E} = \left[ 1 - 0,69 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,31) \right] \cdot \frac{21}{0,04^3 \cdot 2 \cdot 10^5} = 0,19 (\text{МН} \cdot \text{м})^{-1},$$

где  $E=2 \cdot 10^5\text{МПа}$  – для стали 16ГС;

$$\lambda_{\phi}' = h_{\phi} / \sqrt{D \cdot S_{\text{жс}}} = \frac{0,04}{\sqrt{1,4 \cdot 0,012}} = 0,31;$$

$$\psi_2 = \frac{(D_n + D)}{(D_n - D)} = \frac{(1,54 + 1,0)}{(1,54 - 1,0)} = 21;$$

$$\psi_1 = 1,28 \cdot \lg \left( \frac{D_n}{D} \right) = 1,28 \cdot \lg \left( \frac{1,54}{1,0} \right) = 0,053$$

$$\nu = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \lambda_{\phi}' \cdot (1 + \psi_1 \cdot h_{\phi}^2 / S_{\text{жс}}^2)} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,31 \cdot (1 + 0,053 \cdot 0,04^2 / 0,012^2)} = 0,69$$

Тогда

$$K_{\text{жс}} = \frac{36 \cdot 10^{-6} + 0,5 \cdot 0,19 \cdot (1,5 - 1,0 - 0,012) \cdot (1,5 - 1,455)}{138 \cdot 10^{-6} + 36 \cdot 10^{-6} + 0,5 \cdot 0,19 \cdot (1,5 - 1,455)^2} = 1,125$$

Болтовая нагрузка в условиях монтажа

$$F_{\bar{b}1} = \max \left\{ \begin{array}{l} K_{\text{жс}} \cdot F_{\bar{d}} + R_n = 1,125 \cdot 0,332 + 0,014 = 0,39 \text{ МН} \\ 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{с.л}} \cdot b_0 \cdot P_{np} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 1,455 \cdot 0,015 \cdot 4 = 0,137 \text{ МН} \end{array} \right\} = 0,39 \text{ МН}$$

где  $P_{np}=4\text{МПа}$  – для резиновой прокладки с твердостью свыше 1,2МПа (таблица 1.44[3]).



Болтовая нагрузка в рабочих условиях

$$F_{62} = F_{61} + (1 - K_{\text{жк}}) \cdot F_{\text{д}} + F_t = 0,39 + (1 - 1,125) \cdot 0,334 + 0 = 0,35 \text{ МН}$$

Приведенный изгибающий момент

$$M_0 = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot (D_{\bar{6}} - D_{\text{с.л}}) \cdot F_{61} \\ 0,5 \cdot [(D_{\bar{6}} - D_{\text{с.л}}) \cdot F_{61} + (D_{\text{с.л}} - D - S_{\text{жк}}) \cdot F_{\text{д}}] \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} \end{array} \right\}$$

где  $[\sigma]_{20} = 170 \text{ МПа}$  и  $[\sigma] = 162,5 \text{ МПа}$ ,

$$M_0 = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \cdot (1,5 - 1,455) \cdot 0,39 = 0,0087 \\ 0,5 \cdot [(1,5 - 1,455) \cdot 0,35 + (1,455 - 1,0 - 0,012) \cdot 0,334] \cdot \frac{170}{162,5} = 0,024 \end{array} \right\} = 0,024 \text{ МН} \cdot \text{м}$$

Проверка прочности и герметичности соединения. Условие прочности болтов при монтаже фланцевого соединения и в его рабочем состоянии выполняется:

$$F_{61} / n_{\bar{6}} \cdot f_{\bar{6}} = \frac{0,39}{56 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 29,6 \text{ МПа} < [\sigma]_{\bar{6},20} = 130 \text{ МПа} \quad (\text{для болтов из стали 35 при } t=20^{\circ}\text{C});$$

$$F_{62} / n_{\bar{6}} \cdot f_{\bar{6}} = \frac{0,35}{56 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 26,6 \text{ МПа} < [\sigma]_{\bar{6}} = 127 \text{ МПа} \quad (\text{для болтов из стали 35 при } t=110^{\circ}\text{C}).$$

Условие прочности прокладок выполняется:

$$F_{\bar{6},\text{max}} / (\pi \cdot D_{\text{с.л}} \cdot b) = \frac{0,39}{3,14 \cdot 1,455 \cdot 0,015} = 5,69 \text{ МПа} < [P_{\text{пр}}] = 20 \text{ МПа},$$

где  $P_{\text{пр}} = 20 \text{ МПа}$  – для резиновой прокладки с твердостью свыше 1,2 МПа;  $F_{\bar{6},\text{max}} = \max\{F_{61}; F_{62}\} = \max\{0,39; 0,35\} = 0,39 \text{ МН}$ .

Максимальное напряжение в сечении, ограниченном размером  $S_0$ :

$$\sigma_0 = f_{\phi} \cdot T_{\phi} \cdot M_0 \cdot \nu / [D^* \cdot (S_1 - C)^2] = 1 \cdot 1,88 \cdot 0,024 \cdot 0,69 / [1,0 \cdot (0,012 - 0,002)^2] = 222,4 \text{ МПа}$$

где  $D^* = D = 1,0 \text{ м}$ , так как  $D > 20 \cdot S_0$  ( $1,0 > 20 \cdot 0,012 = 0,24 \text{ м}$ );

$$T_{\phi} = \frac{D_n^2 \cdot [1 + 8,55 \lg(D_n / D)] - D^2}{(1,05 \cdot D^2 + 1,945 \cdot D_n^2) \cdot (D_n / D - 1)} = \frac{1,54 \cdot [1 + 8,55 \lg(1,54 / 1,0)] - 1,0^2}{(1,05 \cdot 1,0^2 + 1,945 \cdot 1,54^2) \cdot (1,54 / 1,0 - 1)} = 1,88$$

Напряжение во втулке от внутреннего давления:

тангенциальное

$$\sigma_t = \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot (S_0 - C)} = \frac{0,2 \cdot 1,0}{2 \cdot (0,012 - 0,002)} = 14 \text{ МПа}$$

меридиональное

$$\sigma_m = \frac{P_p \cdot D}{4 \cdot (S_0 - C)} = \frac{0,2 \cdot 1,0}{4 \cdot (0,012 - 0,002)} = 7 \text{ МПа}$$

Условие прочности для сечения, ограниченном размером  $S_0=12\text{мм}$ , выполняется:

$$\sqrt{(\sigma_0 + \sigma_m)^2 + \sigma_t^2} - (\sigma_0 + \sigma_m) \cdot \sigma_t < \phi \cdot [\sigma_0]$$

$$\sqrt{(222,4 + 7)^2 + 14^2} - (222,4 + 7) \cdot 14 = 222,7 \text{ МПа} < \phi \cdot [\sigma_0] = 1 \cdot 579 = 579 \text{ МПа}$$

где  $[\sigma]_0 = 0,003 \cdot E = 0,003 \cdot 1,93 \cdot 10^5 = 579 \text{ МПа}$  – для фланца из стали 16ГС в сечении  $S_0$  при  $P_p = 0,423 \text{ МПа}$ .

Окружное напряжение в кольце фланца

$$\sigma_\kappa = M_0 \cdot \left[ 1 - \nu \cdot (1 + 0,9 \cdot \lambda_\phi) \right] \cdot \frac{\psi'_2}{D \cdot h_\phi^2} =$$

$$= 0,024 \cdot \left[ 1 - 0,69 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,31) \right] \cdot \frac{21}{1,0 \cdot 0,04^2} = 26,43 \text{ МПа}$$

Условие герметичности фланцевого соединения выполняется:

$$\theta = \left( \frac{\sigma_\kappa}{E} \right) \cdot \left( \frac{D}{h_\phi} \right) < [\theta]$$

$$\theta = \left( \frac{26,43}{1,93 \cdot 10^5} \right) \cdot \left( \frac{1,0}{0,04} \right) = 0,0048 < 0,013$$

## 2.5 Теплообменная рубашка

Для соединения сосуда с рубашкой используем коническое без отбортовки сопряжение. При сопряжении при помощи конуса угол  $\alpha$  примем равным  $30^\circ$ . Увеличим толщину стенки рубашки до  $S_{н,руб} = 5\text{мм}$ , так как при  $S_{н,руб} = 3\text{мм}$  допускаемое избыточное давление меньше расчетного.

Коэффициент осевого усилия

$$A = \frac{D_1 D_2 - d_2^2}{D_2^2} = \frac{1,0 \cdot 1,5 - 0,6^2}{1,5^2} = 0,8$$

где  $d_1 \leq 0,4 D_2 = 0,4 \cdot 1,5 = 0,6\text{м}$  – диаметр окружности сопряжения рубашки с днищем сосуда.

Коэффициент, учитывающий расстояние между корпусом сосуда и рубашкой

$$\varepsilon = e_0 / \sqrt{D_2 \cdot (S_2 - C)} = \frac{0,0405}{\sqrt{1,5 \cdot (0,005 - 0,0002)}} = 0,48$$

$$e_0 = \frac{(D_2 + S_2) - (D_1 + 2 \cdot S_1)}{2} = \frac{(1,5 + 0,005) - (1,0 + 2 \cdot 0,012)}{2} = 0,0405$$

где  $e_0$  – расстояние от середины стенки до наружной стороны стенки сосуда.

Коэффициент длины сопряжения

$\lambda = 2\varepsilon + 0,25\rho = 2 \cdot 0,48 + 0,25 \cdot 0 = 0,96$ , при  $\alpha=30^\circ$ ;  $\rho=0$  – для конического соединения без отбортовки.

Коэффициент отношения прочности корпуса сосуда и рубашки

$$\chi = 1,25 \cdot \frac{[\sigma]_1 \cdot (S_1 - C) \cdot \sqrt{D_1 \cdot (S_1 - C)}}{[\sigma]_2 \cdot (S_2 - C) \cdot \sqrt{D_2 \cdot (S_2 - C)}} \cdot \left[ \sqrt{1 - \frac{P_1 D_1}{2 [\sigma]_1 \cdot (S_1 - C)}} + \sqrt{1 - \frac{(P_1 - P_2) \cdot D_1}{2 [\sigma]_1 \cdot (S_1 - C)}} \right],$$

где  $[\sigma]_1=162,5\text{МПа}$  и  $[\sigma]_2=152,8\text{МПа}$  – допускаемые напряжения для стенки сосуда и рубашки при температуре  $110^\circ\text{C}$  и  $20^\circ\text{C}$ , соответственно.

$$\chi = 1,25 \cdot \frac{162,5 \cdot (0,012 - 0,002) \cdot \sqrt{1,0 \cdot (0,012 - 0,002)}}{152,8 \cdot (0,005 - 0,0002) \cdot \sqrt{1,5 \cdot (0,005 - 0,0002)}} \cdot \left[ \sqrt{1 - \frac{0,2 \cdot 1,0}{2 \cdot 152,8 \cdot (0,012 - 0,002)}} + \sqrt{1 - \frac{(0,2 - 0,45) \cdot 1,0}{2 \cdot 152,8 \cdot (0,012 - 0,002)}} \right] = 7,75$$

Радиус отбортовки определяется по уравнению

$$r_0 = \frac{(e_0 - 0,5 \cdot S_2)}{(1 - \cos \alpha)} = \frac{(0,0405 - 0,5 \cdot 0,005)}{(1 - \cos 30^\circ)} = 0,28\text{м}$$

Относительная эффективная несущая длина конуса

$$\mu = \min \left\{ \frac{\varepsilon}{\sin \alpha} = \frac{0,48}{\sin 30^\circ} = 0,96; \sqrt{\frac{\phi_{R1} + \phi_{R2}}{4 \cos \alpha}} = \sqrt{\frac{1+1}{4 \cdot \cos 30^\circ}} = 0,76 \right\} = 0,76$$

Допускаемое избыточное давление в рубашке

$$[P]_2 = \frac{2[\sigma]_2 \cdot (S_2 - C) \cdot \phi_{\rho 2}}{D_2 + (S_2 - C)} \cdot \frac{B}{A}$$

где  $\phi_2=1$  – коэффициент прочности сварного продольного шва рубашки;

$B$  – коэффициент сопряжения при помощи конуса

$$B = 2 \cdot \sqrt{\frac{(S_2 - C)}{D_2}} \min \{ X_1; X_2; X_3 \}$$

$$X_1 = \frac{\cos \alpha}{\varepsilon} \cdot \left( \frac{\phi_{R1} + \phi_{R2}}{4 \cos \alpha} + \lambda f_1 \right) = \frac{\cos 30^\circ}{0,48} \cdot \left( \frac{1+1}{4 \cos 30^\circ} + 0,96 \cdot 1,9 \right) = 4,33$$

где  $f_1=1,9$  – коэффициент прочности, определяется по графику (рисунок 10[4]).

$$X_2 = f_2 \cdot \sqrt{1 + \phi_{R2}} = 3,2 \cdot \sqrt{1+1} = 4,5$$

где  $f_2=3,2$  – коэффициент прочности, определяется по графику (рисунок 11[4]).

$$X_3 = \chi \cdot f_3 + \left( \frac{\phi_{R1} + \phi_{R2}}{4 \mu \cos \alpha} + \mu \right) \cdot f_4 = 7,75 \cdot 1,732 + \left( \frac{1+1}{4 \cdot 0,76 \cdot \cos 30^\circ} + 0,76 \right) \cdot 1,732 = 16,1$$

где  $f_3=f_4=1,732$  – коэффициент прочности, определяется по графику (рисунок 12 и 13[4]).

$$B = 2 \cdot \sqrt{\frac{(0,005 - 0,0002)}{1,5}} \min(4,33; 4,5; 16,1) = 0,49$$

Тогда

$$[P]_2 = \frac{2 \cdot 152,8 \cdot (0,005 - 0,0002) \cdot 0,49}{1,5 + (0,005 - 0,0002)} \cdot \frac{0,49}{0,8} = 0,597 \text{ МПа}$$

Условие  $[P]_2 > P_2$  выполняется ( $0,597 > 0,423$ ).

Определение размеров сопряжения

$$l_R \geq 0,7 \cdot \sqrt{D_2 \cdot (S_2 - C)} = 0,7 \cdot \sqrt{1,5 \cdot (0,005 - 0,0002)} = 0,06 \text{ м}$$

Нагрузка от собственного веса

$F = G_1 = 0,027 \text{ МН}$ , так как опоры на цилиндрической обечайке корпуса.

Проверка несущей способности от совместного действия осевого усилия и избыточного давления в рубашке

$$\left| \frac{P_2}{[P]_2} + \frac{4 \cdot F}{\pi [P]_2 \cdot D_2^2 \cdot A} \right| = \left| \frac{0,45}{0,597} + \frac{4 \cdot 0,027}{3,14 \cdot 0,597 \cdot 1,5^2 \cdot 0,8} \right| = 0,784 < 1$$

Условие выполняется.

## 2.6 Определение оптимальных размеров корпуса аппарата

Масса аппарата, снабженного теплообменной рубашкой

$$m_{ан} = m_k + m_{ж} + m_p + m_{ж.p}$$

Масса корпуса аппарата

$$m_k = \rho \cdot \left[ \frac{4VS_1}{D} - 1,05D^2S_1 + 1,24D^2S_2 + 1,24D^2S_3 \right] =$$

$$= 7850 \cdot \left[ \frac{4 \cdot 2,5 \cdot 0,012}{1,0} - 1,05 \cdot 1,0^2 \cdot 0,012 + 1,24 \cdot 1,0^2 \cdot 0,003 + 1,24 \cdot 1,0^2 \cdot 0,012 \right] = 765,2 \text{ кг}$$

Масса жидкости

$$m_{ж} = \rho_{ж} \cdot V \cdot \psi = 1000 \cdot 2,5 \cdot 0,6 = 1500 \text{ кг}$$

Масса U-образной теплообменной цилиндрической рубашки

$$m_p = \rho \cdot (\pi \cdot D_p \cdot l_p \cdot S_p + 1,24 \cdot D_p \cdot S_{1p}) =$$

$$= 7850 \cdot (3,14 \cdot 1,5 \cdot 1,32 \cdot 0,003 + 1,24 \cdot 1,5^2 \cdot 0,003) = 212,12 \text{ кг}$$

Массу жидкости в рубашке примем  $m_{ж.р} = 0$ , так как среда пар. Тогда

$$m_{ан} = 765,2 + 1500 + 212,12 + 0 = 2477,4 \text{ кг}$$

Сила тяжести аппарата

$$G = m_a \cdot g = 2477,4 \cdot 9,81 = 24246,29 \text{ Н} = 24,24 \text{ кН}$$

## 2.7 Опоры

Опоры ставим на цилиндрическую обечайку корпуса.

$$Q = \frac{G}{2} = \frac{24,24}{2} = 12,12 \text{ кН}$$

По Q выбираем по таблице 1[2], опоры типа 1 с допускаемой нагрузкой Q=25кН:

Опора 1 – 2500 ОСТ 26 – 665 – 79

Параметры:

a=125мм; a<sub>1</sub>=155мм; b=155мм; c=45мм; c<sub>1</sub>=90мм; h=230мм; h<sub>1</sub>=16мм; S<sub>1</sub>=8мм; κ=25мм; κ<sub>1</sub>=40мм; d=24мм; d<sub>6</sub>=M20; f<sub>max</sub>=40мм.

Усилие, действующее на одну опорную лапу

$$F_1 = \frac{G}{2} + \frac{M}{D+2(e+S_0+S_H)} = \frac{0,0272}{2} + \frac{0,01}{1,0+2(0,1292+0,01+0)} = 0,019 \text{ МН}$$

где G – вес аппарата в условиях эксплуатации или испытания, Н;

M – изгибающий момент: M=0,01МНм;

S<sub>0</sub>=(S-C) – толщина стенки аппарата в конце срока службы, м:

S<sub>0</sub>=0,012-0,002=0,01м;

S<sub>H</sub> – толщина подкладного листа: при отсутствии подкладного листа S<sub>H</sub>=0;

e – Расстояние между точкой приложения усилия и обечайкой

$$e = \frac{5}{6} \cdot b = \frac{5}{6} \cdot 155 = 129,2 \text{ мм}$$

b – Длина опорной лапы, м.

Несущую способность обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа проверяем по формуле

$$F_1 \leq [F_1]$$

где допустимое усилие на опорный элемент в условиях эксплуатации или испытания [F<sub>1</sub>] определяем по формуле

$$[F_1] = \frac{[\sigma_i] \cdot h \cdot (s - c)^2}{K_7 \cdot e}$$

Коэффициент K<sub>7</sub> определяем в соответствии с графиком (рисунок 5[2]): K=0,87.

[σ<sub>i</sub>] – Предельное напряжение изгиба

$$[\sigma_i] = K_1 \cdot [\sigma] \cdot \frac{n_T}{K_2}$$

где [σ] – допускаемое напряжение для материала обечайки, МПа;

n<sub>T</sub> – запас прочности по пределу текучести;

$K_2$  – коэффициент, принимаемый равным  $K_2=1,2$  для рабочих условий;

$K_1$  – коэффициент, который определяем по рисунку 8[2] в зависимости от  $\nu_1$  и  $\nu_2$ ;

$\nu_1$  – коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба. Для опорных лап без подкладного листа принимают  $\nu_1=0,3$ ;

$\nu_2$  – коэффициент, учитывающий степень нагрузки общими мембранными напряжениями, определяют по формуле

$$\nu_2 = \frac{K_2}{n_T} \cdot \frac{\bar{\sigma}_m}{[\sigma] \cdot \phi},$$

Где  $\bar{\sigma}_m$  – общее мембранное напряжение в цилиндрической обечайке

$$\bar{\sigma}_m = \frac{P \cdot D_R}{2 \cdot (S - C)} = \frac{0,2 \cdot 1,0}{2 \cdot (0,012 - 0,002)} = 10 \text{ МПа}$$

$D_R=D=1,4\text{м}$  – расчетный диаметр для цилиндрической обечайки.

$$\nu_2 = \frac{1,2}{1,5} \cdot \frac{10}{162,5 \cdot 1} = 0,068$$

Тогда  $K_1=1,2$ .

$$[\sigma_i] = 1,2 \cdot 162,5 \cdot \frac{1,5}{1,2} = 243,75 \text{ МПа}$$

Окончательно

$$[F_1] = \frac{243,75 \cdot 0,23 \cdot (0,012 - 0,002)^2}{0,87 \cdot 0,1292} = 0,049 \text{ МН}$$

$F_1 < [F_1]$ , т.е.  $0,019 \text{ МПа} < 0,049 \text{ МПа}$  – условие выполняется.

## **Заключение**

В ходе проектирования была разработан аппарат, с требуемыми техническим заданием характеристиками.

В пояснительной записке приведены механические расчёты, подтверждающие работоспособность проектируемого сосуда.

В графической части курсового проекта изображены: сборочный чертеж корпуса аппарата с выносками узлов фланцевого соединения, опорного узла и соединения рубашки с корпусом.

## Список литературы

1. Конструирование и расчет элементов оборудования. Опоры аппаратов: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию для студентов специальностей 170501, 170601, 030528 всех форм обучения. – Красноярск: СибГТУ, 2002. -36с.
2. Михалев М.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи: Учебное пособие для студентов вузов/М.Ф. Михалев, Н.П. Третьяков, А.И. Мильченко, В.В. Зобнин. Л.:Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 301 с., ил.
3. Антипин Г.В. Торцовые уплотнения аппаратов химических производств/Г.В.Антипин.- М.:Машиностроение,1984.-112 стр.