

# **РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННИКА**

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

# РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННИКА

Методические указания  
для студентов 3–4 курсов специальностей 150400, 220600 всех форм обучения



Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2009

УДК 66.01.001.24  
ББК Л112-51я-73-5  
К658

Рекомендовано Редакционно-издательским советом ТГТУ

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент  
***Е.В. Хабарова***

Составитель

***В.Б. Коптева***

К658      Расчёт на прочность теплообменника : метод. указания / сост.  
В.Б. Коптева. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. –  
16 с. – 80 экз.

Рассмотрен порядок расчёта элементов теплообменника на прочность. Даны таблицы для определения допускаемых напряжений.

Предназначены для студентов 3 – 4 курсов, обучающихся по специальностям 150400, 220600 всех форм обучения.

УДК 66.01.001.24  
ББК Л112-51я-73-5

# РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННИКА

Методические указания

Составитель  
КОПТЕВА Вера Борисовна

Редактор З.Г. Чернова  
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкova

Подписано в печать 17.03.2009.  
Формат 60 × 84/16. 0,93 усл. печ. л.  
Тираж 80 экз. Заказ № 100

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ВВЕДЕНИЕ

Конструирование химического оборудования необходимо производить с максимальным использованием стандартизованных и нормализованных узлов и деталей, проверенных в изготовлении и хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации. При этом необходимо стремиться к экономии конструкционного материала, уменьшению массы элементов всего аппарата, но без ущерба для их надёжности и безопасности эксплуатации. Многие из рассматриваемых элементов независимо от вида и типа аппарата, являются общими для оборудования химических производств.

К таким общим элементам относятся обечайки, днища, фланцевые соединения, укрепление отверстий в оболочках, узлы сопряжения оболочек.

Сосуды и аппараты, применяемые в химической промышленности принято считать тонкостенными, если толщина их стенки не превышает 10 % внутреннего диаметра.

Основным узлом сосуда и аппарата является корпус, который определяет его форму, размеры, объём, производительность и стоимость. Корпуса аппаратов состоят из пластинок и оболочек различной конфигурации, соединённых друг с другом как неразъёмными (сварными, паяными), так и разъёмными (фланцевыми) соединениями. Корпуса работают чаще всего в условиях статических нагрузок под внутренним избыточным давлением, вакуумом или наружным избыточным давлением, а также при действии осевых или поперечных усилий и изгибающих моментов.

## 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Рабочее давление  $P$  – максимальное внутреннее избыточное или наружное давление во время эксплуатации без учёта гидростатического давления среды, МПа.

Расчётное давление  $P_p$  – максимальное внутреннее избыточное или наружное давление с учётом гидростатического давления среды или давления насадки, МПа,

$$P_p = P + P_r,$$

где  $P_r$  – гидростатическое давление среды, МПа.

Если  $P_r$  составляет менее 5 % от  $P_p$ , то его не учитывают и  $P_p = P$ .

Пробное давление  $P_{и}$  – максимальное избыточное давление, создаваемое при гидравлических или пневматических испытаниях на прочность и плотность, МПа:

$$\text{при } P < 0,5 \text{ МПа} \quad P_{и} = \max\{1,5P[\sigma]_{20} / [\sigma]; 0,2\};$$

$$\text{при } P \geq 0,5 \text{ МПа} \quad P_{и} = \max\{1,25P[\sigma]_{20} / [\sigma]; P + 0,3\},$$

где  $[\sigma]_{20}$ ,  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение при 20 °С и рабочей температуре, МПа.

Аппараты, работающие при вакууме, обычно испытывают внутренним избыточным давлением на 0,2 МПа.

Важнейшим вопросом конструирования является правильный выбор допускаемого напряжения, при котором обеспечивается безопасная работа аппарата и не происходит перерасход конструкционного материала.

Допускаемое напряжение определяют:

– для рабочих условий

$$[\sigma] = \sigma_{\text{доп}}^* \eta,$$

где  $\sigma_{\text{доп}}^*$  – нормативное допускаемое напряжение для заданного конструкционного материала при 20 °С и рабочей температуре (эти напряжения берутся по ГОСТ 14249–94);  $\eta$  – коэффициент, учитывающий вид заготовки;

– для условий испытания:

$$1) \text{ гидроиспытания} \quad [\sigma]_{и} = \frac{\sigma_T^{20}}{1,1};$$

$$2) \text{ пневмоиспытания} \quad [\sigma]_{и} = \frac{\sigma_T^{20}}{1,2},$$

где  $\sigma_T^{20}$  – предел текучести при 20 °С, МПа.

Корпуса аппаратов, как правило, сварные, поэтому необходимо учитывать ослабление конструкции сваркой. Коэффициент прочности сварного шва  $\phi$  характеризует прочность соединения по сравнению с прочностью основного металла и зависит от вида сварки, типа сварного шва и процента контроля сварных швов.

При определении толщины элементов корпуса аппарата делают конструктивную прибавку

$$C = C_1 + C_2 + C_3,$$

где  $C_1$  – прибавка на коррозию и эрозию, мм;

$$C_1 = \Pi\tau + C_3,$$

где  $C_2$  – прибавка на минусовой допуск, мм;  $C_3$  – прибавка на уменьшение толщины при технологических операциях: вытяжке, вальцовке, штамповке, гибке, мм;  $\Pi$  – скорость коррозии, мм/год;  $\tau$  – срок работы аппарата, год;  $C_3$  – прибавка на эрозию, которая учитывается при:

- 1) наличии в движущейся среде абразивных частиц;
  - 2) ударном действии среды на деталь.
- Для округления конструктивной прибавки обычно принимают

$$C_2 + C_3 = 0,1 \dots 0,5 \text{ мм.}$$

## 2. РАСЧЁТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК

Основным узлом аппарата является корпус, обычно цилиндрический. Толщина цилиндрической обечайки определяется

$$S = \max \left\{ \frac{PD}{2[\sigma]\varphi - P}; \frac{P_n D}{2[\sigma]_n \varphi - P_n} \right\} + C.$$

Полученную максимальную величину округляют в большую сторону до ближайшего стандартного значения листового проката. Принятую к исполнению толщину обязательно проверяют на допустимое давление:

- в рабочих условиях  $[P] = \frac{2[\sigma]\varphi(S - C)}{D + (S - C)} > P;$
- в условиях испытания  $[P] = \frac{2[\sigma]_n \varphi(S - C)}{D + (S - C)} > P_n.$

При конструировании цилиндрических корпусов предпочтение следует отдавать вертикальному исполнению, так как в них не возникает дополнительных напряжений изгиба от действия на аппарат сил тяжести. Изготавливают цилиндрическую обечайку вальцовкой с предварительной подгибкой кромок и стыковым сварным швом. При этом необходимо учесть следующее:

- 1) листы необходимо брать больших размеров, чтобы свести к минимуму общую длину сварных швов;
- 2) нельзя делать отверстия в швах;
- 3) в горизонтальных аппаратах не следует располагать продольный шов в нижней части обечайки;
- 4) продольные швы составных частей (царг) корпуса нельзя располагать по меридиану, а должны быть смещены относительно друг друга.

## 3. РАСЧЁТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ДНИЩ И КРЫШЕК

Днище и крышка – это нижняя и верхняя части аппарата. Они бывают:

- 1) выпуклые – полушаровые, эллиптические, сегментные, тарельчатые;
- 2) конические;
- 3) плоские.

### 3.1. Эллиптические днища и крышки

Эллиптические днища и крышки являются самым распространённым типом днища. Хорошо работают при давлении до 10 МПа. Изготавливают их штамповкой с отбортовкой на цилиндр.

Отбортовку делают для того, чтобы вывести сварной шов из опасной зоны перехода эллипса в цилиндр. Высота отбортовки зависит от толщины днища.

Толщина эллиптического днища определяется

$$S = \max \left\{ \frac{PD}{2[\sigma]\varphi - 0,5P}; \frac{P_n D}{2[\sigma]_n \varphi - 0,5P_n} \right\} + C.$$

Допускаемое давление:

- в рабочих условиях  $[P] = \frac{2[\sigma]\varphi(s - c)}{D + 0,5(s - c)} > P;$
- в условиях испытания  $[P] = \frac{2[\sigma]_n \varphi(s - c)}{D + 0,5(s - c)} > P_n.$

### 3.2. Конические днища

Конические днища применяют в следующих случаях:

- 1) если необходимо удалить из аппарата продукт с содержанием кристаллов или твёрдых веществ;
- 2) для лучшего распределения среды по сечению аппарата;
- 3) в качестве конфузоров и диффузоров для равномерного повышения или понижения скорости и давления потока.

Конические днища изготавливают вальцовкой с отбортовкой или без неё.

Толщина конического днища

$$S = \max \left\{ \frac{PD_p}{(2[\sigma]_p - P) \cos \alpha}; \frac{P_n D_p}{(2[\sigma]_n - P) \cos \alpha} \right\} + C,$$

где  $D_p$  – расчётный диаметр, зависящий от конструкции днища.

Допускаемое давление:

- в рабочих условиях  $[P] = \frac{2[\sigma] \varphi (s - c)}{\frac{D_p}{\cos \alpha} + (s - c)} > P;$
- в условиях испытания  $[P] = \frac{2[\sigma]_n \varphi (s - c)}{\frac{D_p}{\cos \alpha} + (s - c)} > P_n.$

Конические днища в литой и ковальной аппаратуре делают с плавным переходом в цилиндр. Конические днища хуже работают при давлении, чем эллиптические, получаются более толстыми; они увеличивают габариты аппарата, поэтому без особой необходимости их не применяют.

### 3.3. Плоские днища и крышки

Плоские днища и крышки плохо работают при повышенном давлении, получаются громоздкими и массивными. Удобны в ёмкостях и резервуарах при установке на фундамент непосредственно днищем. Если необходимо разместить привод или много технологических штуцеров, то плоская крышка гораздо удобнее, чем эллиптическая.

Толщина плоской крышки и днища определяется

$$S = \max \left\{ KK_0 D_p \sqrt{\frac{P}{[\sigma]}}; KK_0 D_p \sqrt{\frac{P_n}{[\sigma]_n}} \right\} + C,$$

где  $K$  – коэффициент конструкции днища или крышки;  $K_0$  – коэффициент, учитывающий ослабление днища или крышки отверстиями;  $D_p$  – расчётный диаметр, зависящий от конструкции днища или крышки.

Допускаемое давление:

- для рабочих условий  $[P] = \left( \frac{S - C}{KK_0 D_p} \right)^2 [\sigma] > P;$
- в условиях испытания  $[P] = \left( \frac{S - C}{KK_0 D_p} \right)^2 [\sigma]_n > P_n.$

#### 4. РАСЧЁТ ТЕПЛООБМЕННИКА

Рассчитать на прочность двухходовой теплообменник по данным теплового и технологического расчётов.

Диаметр теплообменника  $D = 2,0$  м.

Давление в трубном пространстве  $P_1 = 0,4$  МПа.

Давление в межтрубном пространстве  $P_2 = 0,6$  МПа.

Температура трубного пространства  $T_1 = 180$  °С.

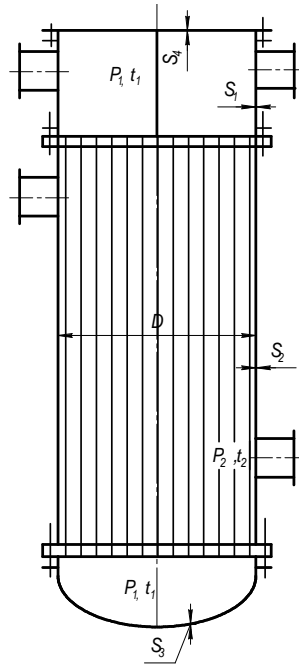
Температура межтрубного пространства  $T_2 = 120$  °С.

Среда в трубном пространстве агрессивная, коррозионная.

Скорость коррозии  $\Pi = 0,1$  мм/год.

Срок работы аппарата  $\tau = 15$  лет.

В межтрубном пространстве водяной пар.



##### Решение

Расчёт проводится по [1] и табл. П1 – П6 приложения.

##### 1. Выбор конструкционного материала.

Так как среда в аппарате коррозионная выбираем высоколегированную сталь 12Х18Н10Т для трубного пространства. В межтрубном пространстве водяной пар, среда неагрессивная. Выбираем углеродистую сталь обыкновенного качества ВСт.3.

##### 2. Определение допускаемого напряжения.

##### 2.1. Для трубного пространства:

– В рабочих условиях

$$[\sigma]_1 = \sigma_{\text{доп}}^* \eta.$$

Для стали 12Х18Н10Т нормативное допускаемое напряжение будет (табл. П3):

при 20 °С  $\sigma_{\text{доп}}^{20} = 184$  МПа;

при 80 °С  $\sigma_{\text{доп}}^{80} = 176$  МПа.

Так как в качестве заготовки берём листовую прокат, то  $\eta = 1$ . Тогда

$$[\sigma]_1^{20} = 184 \cdot 1 = 184 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_1 = 176 \cdot 1 = 176 \text{ МПа}.$$

– В условиях гидроиспытания

$$[\sigma]_{\text{нп}} = \frac{\sigma_{\text{т}}^{20}}{1,1}.$$

Предел текучести для стали 12Х18Н10Т при 20 °С  $\sigma_{\text{т}}^{20} = 240$  МПа (табл. П6)

$$[\sigma]_{\text{нп}} = \frac{240}{1,1} = 218,2 \text{ МПа}.$$

##### 2.2. Для межтрубного пространства:



– В рабочих условиях

$$[\sigma]_2 = \sigma_{\text{доп}}^* \eta.$$

Нормативное допускаемое напряжение для стали ВСт3 (табл. П1):

при 20 °С  $\sigma_{\text{доп}}^{20} = 154$  МПа;

при 120 °С  $\sigma_{\text{доп}}^{120} = 148$  МПа.

– В условиях гидроиспытания

$$[\sigma]_{\text{и2}} = \frac{\sigma_{\text{т}}^{20}}{1,1}.$$

Предел текучести для стали ВСт3 при 20 °С  $\sigma_{\text{т}}^{20} = 250$  МПа (табл. П4)

$$[\sigma]_{\text{и2}} = \frac{250}{1,1} = 227,3 \text{ МПа.}$$

### **3. Определение давления испытания.**

3.1. Для трубного пространства:

$$P_{\text{и1}} = \max \left\{ 1,5 \frac{[\sigma]_1^{20}}{[\sigma]_1} P_1; 0,2 \right\};$$

$$P_{\text{и1}} = 1,5 \frac{184}{176} 0,4 = 0,63 \text{ МПа};$$

$$P_{\text{и1}} = 0,2 \text{ МПа};$$

$$P_{\text{и1}} = \max \{0,63; 0,2\};$$

$$P_{\text{и1}} = 0,63 \text{ МПа.}$$

3.2. Для межтрубного пространства:

$$P_{\text{и2}} = \max \left\{ 1,25 \frac{[\sigma]_2^{20}}{[\sigma]_2} P_2; P_2 + 0,3 \right\};$$

$$P_{\text{и2}} = 1,25 \frac{154}{148} 0,6 = 0,78 \text{ МПа};$$

$$P_{\text{и2}} = 0,6 + 0,3 = 0,9 \text{ МПа};$$

$$P_{\text{и2}} = \max \{0,78; 0,9\};$$

$$P_{\text{и2}} = 0,9 \text{ МПа.}$$

### **4. Определение конструктивной прибавки.**

4.1. Для трубного пространства

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

Прибавка на коррозию и эрозию

$$C_1 = \Pi\tau + C_3.$$

Прибавка на эрозию  $C_3 = 0$ , так как в нашей среде отсутствуют твёрдые частицы

$$C_1 = 0,1 \cdot 15 = 1,5 \text{ мм.}$$

Прибавка на минусовой допуск и на технологические операции

$$C_2 + C_3 = 0,5 \text{ мм.}$$

Тогда получаем

$$C = 1,5 + 0,5 = 2 \text{ мм.}$$

4.2. Для межтрубного пространства.

Так как в межтрубном пространстве водяной пар, то прибавка на коррозию будет меньше, чем для трубного пространства. Принимаем также  $C = 2$  мм, что получается с небольшим запасом.

### 5. Определение коэффициента прочности сварного шва.

Сварка автоматическая, сварные швы стыковые, процент контроля сварных швов 80 %. Согласно [1], коэффициент прочности сварного шва будет  $\varphi = 0,95$ .

### 6. Определение толщины составляющих элементов теплообменника.

#### 6.1. Определение толщины камеры $S_1$ .

Камера цилиндрическая:

$$S_1 = \max \left\{ \frac{P_1 D}{2[\sigma]_1 \varphi - P_1}; \frac{P_{н1} D}{2[\sigma]_{н1} \varphi - P_{н1}} \right\} + C;$$

$$S_1 = \frac{0,4 \cdot 2}{2 \cdot 176 \cdot 0,95 - 0,4} + 2 \cdot 10^{-3} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$S_1 = \frac{0,63 \cdot 2}{2 \cdot 218 \cdot 0,95 - 0,63} + 2 \cdot 10^{-3} = 5,05 \cdot 10^{-3} \text{ м;}$$

$$S_1 = \max \{4,4 \cdot 10^{-3}; 5,05 \cdot 10^{-3}\};$$

$$S_1 = 5,05 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Полученную величину округляем в большую сторону до ближайшего стандартного значения листового проката.

Толщина горячекатаных листов по ГОСТ 19903–84 (мм): 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 25; 26; 28; 30; 32; 34; 36; 38; 40; 42; 45; 50; 55; 60; 65; 75; 75; 80; 85; 90; 95; 100.

Принимаем  $S_1 = 6 \cdot 10^{-3}$  м.

Принятую к исполнению толщину проверяем на допускаемое давление.

– В рабочих условиях:

$$[P] = \frac{2[\sigma]_1 \varphi (S_1 - c)}{D + (S_1 - c)} > P_1;$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 176 \cdot 0,95 (6 - 2) \cdot 10^{-3}}{2 + (6 - 2) \cdot 10^{-3}} > 0,4;$$

$$0,66 > 0,44.$$

– В условиях гидроиспытания:

$$[P] = \frac{2[\sigma]_{н1} \varphi (S_1 - c)}{D + (S_1 - c)} > P_{н1};$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 218 \cdot 0,95(6-2) \cdot 10^{-3}}{2 + (6-2) \cdot 10^{-3}} > 0,63;$$

$$0,82 > 0,63.$$

Условие выполняется.

6.2. *Определение толщины корпуса  $S_2$ :*

$$S_2 = \max \left\{ \frac{P_2 D}{2[\sigma]_2 \varphi - P_2}; \frac{P_{н2} D}{2[\sigma]_{н2} \varphi - P_{н2}} \right\} + C;$$

$$S_2 = \frac{0,6 \cdot 2}{2 \cdot 148 \cdot 0,95 - 0,6} + 2 \cdot 10^{-3} = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{0,9 \cdot 2}{2 \cdot 227,3 \cdot 0,95 - 0,9} + 2 \cdot 10^{-3} = 6,05 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S_2 = \max \{ 6,3 \cdot 10^{-3}; 6,17 \cdot 10^{-3} \};$$

$$S_2 = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Принимаем  $S_2 = 7 \cdot 10^{-3}$  м.

Проверяем принятую толщину на допускаемое давление.

– В рабочих условиях:

$$[P] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi (S_2 - c)}{D + (S_2 - c)} > P_2;$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 148 \cdot 0,95(7-2) \cdot 10^{-3}}{2 + (7-2) \cdot 10^{-3}} > 0,6;$$

$$0,7 > 0,6.$$

– В условиях гидроиспытания:

$$[P] = \frac{2[\sigma]_{н2} \varphi (S_2 - c)}{D + (S_2 - c)} > P_{н2};$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 227,3 \cdot 0,95(7-2) \cdot 10^{-3}}{2 + (7-2) \cdot 10^{-3}} > 0,9;$$

$$1,08 > 0,9.$$

Условие выполняется.

6.3. *Определение толщины днища  $S_3$ .*

Днище эллиптическое, стандартное:

$$S_3 = \max \left\{ \frac{P_1 D}{2[\sigma]_1 \varphi - 0,5 P_1}; \frac{P_{н1} D}{2[\sigma]_{н1} \varphi - 0,5 P_{н1}} \right\} + C;$$

$$S_3 = \frac{0,4 \cdot 2}{2 \cdot 176 \cdot 0,95 - 0,5 \cdot 0,4} + 2 \cdot 10^{-3} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S_3 = \frac{0,63 \cdot 2}{2 \cdot 218 \cdot 0,95 - 0,5 \cdot 0,63} + 2 \cdot 10^{-3} = 5,07 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S_3 = \max \{4,4 \cdot 10^{-3}; 5,07 \cdot 10^{-3}\};$$

$$S_3 = 5,07 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Принимаем  $S_3 = 6 \cdot 10^{-3}$  м.

Проверяем принятую толщину на допускаемое давление.

– В рабочих условиях:

$$[P] = \frac{2[\sigma]_1 \varphi (S_3 - c)}{D + 0,5(S_3 - c)} > P_1;$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 176 \cdot 0,95(6 - 2) \cdot 10^{-3}}{2 + 0,5(6 - 2) \cdot 10^{-3}} > 0,4;$$

$$0,66 > 0,4.$$

– В условиях гидроиспытания:

$$[P] = \frac{2[\sigma]_{н1} \varphi (S_3 - c)}{D + 0,5(S_3 - c)} > P_{н1};$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 218 \cdot 0,95(6 - 2) \cdot 10^{-3}}{2 + 0,5(6 - 2) \cdot 10^{-3}} > 0,63;$$

$$0,82 > 0,63.$$

Условие выполняется.

#### 6.4. Определение толщины крышки $S_4$

Крышка плоская, соединяется с фланцем корпуса болтами.

$$S_4 = \max \left\{ K K_0 D_p \sqrt{\frac{P_1}{[\sigma]_1}}; K K_0 D_p \sqrt{\frac{P_{н1}}{[\sigma]_{н1}}} \right\} + C.$$

Коэффициент днища для нашего случая равен  $K = 0,4$ .

Ослабление, вызванное отверстиями под болты,  $K_0 = 1,012$ .

Расчётный диаметр  $D_p$  будет равен диаметру болтовой окружности.

$$D_p = D_6 = D + 0,1; \quad D_p = 2,1 \text{ м};$$

$$S_4 = 0,4 \cdot 1,012 \cdot 2,1 \sqrt{\frac{0,4}{176}} + 2 \cdot 10^{-3} = 43 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S_4 = 0,4 \cdot 1,012 \cdot 2,1 \sqrt{\frac{0,63}{218}} + 2 \cdot 10^{-3} = 48 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$S_4 = \max \{44 \cdot 10^{-3}; 48 \cdot 10^{-3}\};$$

$$S_4 = 48 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Округляем в большую сторону до величины листового проката. Принимаем  $S_4 = 50 \cdot 10^{-3}$  м.

Допускаемое давление:

– в рабочих условиях:

$$[P] = \left( \frac{S_4 - c}{KK_0 D_p} \right)^2 [\sigma]_1 > P_1;$$

$$[P] = \left( \frac{(50 - 2) \cdot 10^{-3}}{0,4 \cdot 1,012 \cdot 2,1} \right)^2 \cdot 176 > 0,4;$$

$$0,55 > 0,4;$$

– в условиях гидроиспытания:

$$[P] = \left( \frac{S_4 - c}{KK_0 D_p} \right)^2 [\sigma]_{гид} > P_{гид};$$

$$[P] = \left( \frac{(50 - 2) \cdot 10^{-3}}{0,4 \cdot 1,012 \cdot 2,1} \right)^2 \cdot 218 > 0,63;$$

$$0,67 > 0,63.$$

Условие выполняется.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 14249–94. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. – М. : Издательство стандартов, 1994. – 78 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### П1. Допускаемые напряжения для углеродистых и низколегированных сталей

Расчётная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение [σ], МПа, для сталей марок								
	ВСтЗ		09Г2С, 16ГС		20, 20К		10	10Г2, 09Г2	17ГС, 17Г1С1, 10Г2С1
	толщина, мм								
	до 20	свыше 20	до 32	свыше 32	до 160				
20	154	140	196	183	147	130	180	183	
100	149	134	177	160	142	125	160	160	
150	145	131	171	154	139	122	154	154	
200	142	126	165	148	136	118	148	148	
250	131	120	162	145	132	112	145	145	
300	115	108	151	134	119	100	134	134	
350	105	98	140	123	106	88	123	123	
375	93	93	133	116	98	82	108	116	
400	85	85	122	105	92	77	92	105	
410	81	81	104	104	86	75	86	104	
420	75	75	92	92	80	72	80	92	

### П2. Допускаемые напряжения для теплоустойчивых хромистых сталей

Расчётная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение [σ], МПа, для сталей марок				
	12ХМ	12МХ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	147	147	155	146	240
100	146,9	146,5	153	141	235
150	146	146	152,5	138	230
200	145	145	152	134	225
250	145	145	152	127	220
300	141	141	147	120	210
350	137	137	142	114	200
375	135	135	140	110	180
400	132	132	137	105	170
410	130	130	136	103	160
420	129	129	135	101	150
430	127	137	134	99	140
440	126	120	132	96	135
450	124	124	131	94	130

### П3. Допускаемые напряжения для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного класса

Расчётная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение [σ], МПа, для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3	08Х18Н10Т 08Х18Н12Т 08Х17Н13М2Т 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т 12Х18Н12Т 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
20	180	160	153	168	184
100	173	133	140	156	174
150	171	125	130	148	168
200	171	120	120	140	160
250	167	115	113	132	154
300	149	112	103	123	148
350	143	108	101	113	144
375	141	107	90	108	140
400	140	107	87	103	137
410	–	107	83	102	136
420	–	107	82	101	135
430	–	107	81	100,5	134
440	–	107	81	100	133
450	–	107	80	99	132

Таблица П4

Расчётная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчётное значение предела текучести $\sigma_T$ , МПа, для сталей марок								
	ВСтЗ		09Г2С, 16ГС		20, 20К		10	10Г2, 09Г2	17ГС, 17Г1С1, 10Г2С1
	толщина, мм								
	до 20	свыше 20	до 32	свыше 32	до 160				
20	250	210	300	280	220	195	270	280	
100	230	201	265,5	240	213	188	240	240	
150	224	197	156,6	231	209	183	231	231	
200	223	189	247,5	222	204	177	222	222	
250	197	180	243	218	198	168	218	218	
300	173	162	226,5	201	179	150	201	201	
350	167	147	210	185	159	132	185	185	
375	164	140	199,5	174	147	123	162	174	
400	–	–	183	158	–	–	–	158	
410	–	–	–	156	–	–	–	156	
420	–	–	–	138	–	–	–	138	

Таблица П5

Расчётная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчётное значение предела текучести $\sigma_T$ , МПа, для сталей марок				
	12МХ	12ХМ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	220	220	233	220	400
100	219	129	230	210	352,5
150	218	128	229	207	345
200	217,5	217,5	228	201	337,5
250	217,5	217,5	228	190	330
300	212	212	220	180	315
350	206	206	213	171	300
375	202	202	210	164	270
400	198	198	205	158	255
410	195	195	204	155	240
420	194	194	202	152	225

Таблица П6

Расчётная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчётное значение предела текучести $\sigma_T$ , МПа, для сталей марок					
	12Х18Н10Т	08Х18Н10Т	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3	
	12Х18Н12Т	08Х18Н12Т				
	10Х17Н13М2Т	08Х17Н13М2Т				
10Х17Н13М3Т	08Х17Н15М3Т					
20	276	252	270	240	230	
100	261	234	260	200	210	
150	252	222	257	187,5	195	
200	240	210	257	180	180	
250	231	198	250	173	170	
300	222	184,5	223	168	155	
350	216	169,5	215	162	152	
375	210	192	212	160	135	
400	205,5	154,5	210	160	130	
410	204	153	–	160	125	
420	202,5	151,5	–	160	123	
430	201	105,75	–	160	122	
440	199,5	150	–	160	121	
450	198	148,5	–	160	120	