МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ
СЕВЕРОДОНЕЦКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РАСЧЕТУ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК СТАЛЬНЫХ СВАРНЫХ СОСУДОВ И АППАРАТОВ

для студентов специальности 7.090220

УТВЕРЖДЕНО
на заседании кафедры
оборудования химических
предприятий, протокол
№ 5 от 13.11.2002 г.

Северодонецк 2002

УДК 66.023:539.4:006.354

Методические указания к расчету цилиндрических обечаек стальных сварных сосудов и аппаратов для студентов специальности 7.090220 / Сост. А.И. Барвин, И.М. Генкина, В.В. Иванченко, В.Г. Табунщиков, Ю.Н. Штонда. – Северодонецк, СТИ, 2002. – 83 с.

Составители: А.И. Барвин, доцент
И.М. Генкина, ст. преподаватель
В.В. Иванченко, доцент
В.Г. Табунщиков, ст. преподаватель
Г.В. Тараненко, доцент
Ю.Н. Штонда, ст. преподаватель

Ответственный за выпуск: А.И. Барвин, доцент, канд. техн. наук

Рецензент И.И. Багринцев

С О Д Е Р Ж А Н И Е

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ 4
2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 4
2.1 Расчетная температура 4
2.2 Рабочее, расчетное и пробное давление 4
2.3 Допускаемые напряжения 9
2.4 Коэффициенты прочности сварных швов 13
2.5 Прибавки к расчетным величинам конструктивных элементов. 16
3 РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК 18
3.1 Условия применения расчетных формул 19
3.2 Гладкие цилиндрические обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением 20
3.2.1 Однослойные цилиндрические обечайки 21
3.2.2. Обечайки из двухслойной стали 25
3.3 Гладкие цилиндрические обечайки, нагруженные наружным давлением 27
3.3.1 Однослойные цилиндрические обечайки 28
3.3.2 Обечайки, изготовленные из двухслойной стали 33
3.4 Гладкие цилиндрические обечайки, работающие под совместным действием нагрузок нескольких видов. 35
3.5 Цилиндрические обечайки, подкрепленные кольцами жесткости 56
3.5.1 Цилиндрические обечайки, подкрепленные кольцами жесткости, работающие под внутренним давлением. 56
3.5.2 Цилиндрические обечайки, подкрепленные кольцами жесткости, работающие под наружным давлением (вакуумом). 59
3.6 Цилиндрические обечайки, подкрепленные кольцами жесткости, работающие под совместным действием нагрузок нескольких видов 68
ПРИЛОЖЕНИЕ А. 72
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 82

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящих методических указаниях изложены нормы и методы расчета на прочность и устойчивость цилиндрических обечаек сосудов и аппаратов из углеродистых, легированных и двухслойных сталей, применяемых в химической, нефтеперерабатывающей и смежных с ними отраслях промышленности. Приведенные методы расчета применимы для сосудов и аппаратов, работающих в условиях однократных и многократных статических нагрузок под внутренним избыточным давлением до 16 МПа, под вакуумом или наружным давлением, а также под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия. Если сосуды и аппараты работают при многократных статических нагрузках, но количество циклов нагружения не превышает 10^3, то такая нагрузка в расчетах на прочность условно считается однократной.

Цилиндрические обечайки стальных сварных сосудов и аппаратов рассчитывают на прочность для рабочих условий и условий испытания.

2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1 Расчетная температура

Расчетную температуру определяют на основании теплотехнических расчетов или результатов испытаний.

За расчетную температуру стенки сосуда или аппарата принимают наибольшее значение температуры стенки. При температуре стенки ниже 20 °С за расчетную температуру при определении допускаемых напряжений принимают температуру 20 °С.

Если невозможно провести тепловые расчеты или измерения и в тех случаях, когда во время эксплуатации температура стенки сосуда или аппарата повышается до температуры среды, соприкасающейся со стенкой, за расчетную температуру следует принимать наибольшую температуру среды, но не ниже 20 °С.

2.2 Рабочее, расчетное и пробное давление

Под рабочим давлением для сосуда или аппарата следует понимать максимальное внутреннее избыточное или наружное давление, возникающее при нормальном протекании рабочего процесса, без учета гидростатического давления среды и без учета допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана.

Под расчетным давлением в рабочих условиях для элементов сосудов и аппаратов следует понимать давление, на которое производится их расчет на прочность. Если на элемент сосуда или аппарата действует гидростатическое давление, составляющее 5 % или более от рабочего давления, то расчетное давление повышают на величину гидростатического давления.

Гидростатическое давление, действующее на элемент сосуда, МПа, определяется по формуле

$$P_г = \rho_c \cdot g \cdot H_c \cdot 10^{-6}, \quad (1)$$

где ρ_c – плотность рабочей среды в аппарате, кг/м^3;

g – ускорение свободного падения, м/с;

H_c – высота среды в аппарате, м.

Для защиты от возможного повышения давления выше допустимого, сосуды и аппараты снабжают предохранительными устройствами (предохранительными клапанами и др.).

При действии предохранительных клапанов давление в сосуде или аппарате не должно превышать избыточное рабочее давление более чем на 0,05 МПа для сосудов с давлением до 0,3 МПа, на 15 % – для сосудов с давлением от 0,3 до 6,0 МПа и на 10 % – для сосудов с давлением свыше 6,0 МПа.

При повышении давления в сосуде или аппарате во время действия предохранительных устройств более чем на 10 % по сравнению с рабочим, элементы аппарата должны рассчитываться на давление, равное 90 % давления при срабатывании предохранительного устройства.

Давление в сосуде во время действия предохранительного клапана, МПа, может быть определено по формуле

$$P_к = \begin{cases} P_{раб} + 0{,}05 & при\ P_{раб} \le 0{,}3\ \text{МПа} \\ 1{,}15 \cdot P_{раб} & при\ 0{,}3 < P_{раб} \le 6{,}0\ \text{МПа} \end{cases}, \quad (2)$$

где $P_{раб}$ – рабочее давление в сосуде, МПа.

Расчетное давление, МПа, без учета гидростатического давления следует определять по формуле

$$P_р = \begin{cases} 0{,}9 \cdot P_к & при\ P_{раб} \le 6{,}0\ \text{МПа} \\ P_{раб} & при\ P_{раб} > 6{,}0\ \text{МПа} \end{cases}, \quad (3)$$

а с учетом гидростатического давления

$$P = \begin{cases} P_p + P_г & при\ \ P_г \geq 0{,}05 \cdot \mathrm{P}_{раб} \\ P_p & при\ \ P_г < 0{,}05 \cdot P_{раб} \end{cases}. \qquad (4)$$

Для элементов, разделяющих пространства с разными давлениями, за расчетное давление следует принимать либо каждое давление в отдельности, либо их алгебраическую сумму, если она требует большей толщины стенки рассчитываемого элемента.

Под пробным давлением в сосуде или аппарате следует понимать давление, при котором проводится испытание сосуда или аппарата на прочность и герметичность.

Пробное давление определяют по формуле

$$P_{пр} = 1{,}25 \cdot P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}, \qquad (5)$$

где P – расчетное давление сосуда, МПа;

$[\sigma]_{20}$ – допускаемое напряжение для материала сосуда при температуре 20 °С, МПа;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение для материала сосуда при расчетной температуре, МПа.

Отношение $[\sigma]_{20}/[\sigma]$ принимается по тому из использованных материалов элементов сосуда (обечайки, днища, фланцев, крепежных деталей, патрубков и др.), для которого оно является наименьшим.

Под расчетным давлением в условиях испытаний следует понимать давление, которому подвергаются сосуды во время пробного испытания, включая гидростатическое давление, если оно составляет 5 % и более от пробного давления.

Расчет на прочность элементов аппаратов для условий испытаний проводить не требуется, если расчетное давление в условиях испытания будет меньше, чем расчетное давление в рабочих условиях, умноженное на $1{,}35 \cdot [\sigma]_{20}/[\sigma]$.

Пример 1

Определить расчетное и пробное давления для вертикального сосуда (рисунок 1), изготовленного из стали марки 09Г2С, если рабочее давление в сосуде составляет $P_{раб} = 0{,}2$ *МПа, температура рабочей среды t=150 °С, плотность среды* $\rho_c = 1200$ *кг/м*^{3}*, высо-*

та сосуда со штуцерами $H_1 = 4{,}0$ *м, высота уровня рабочей среды* $H_c = 3{,}5$ *м. Проверить условие необходимости расчета в условиях испытания.*

Давление в сосуде во время действия предохранительного клапана определяем по формуле (2)

$$P_к = P_{раб} + 0{,}05 = 0{,}2 + 0{,}05 = 0{,}25 \ \ МПа.$$

Давление в сосуде, учитывающее кратковременное повышение его при срабатывании предохранительного клапана, без учета гидростатического давления определяем по формуле (3)

$$P_р = 0{,}9 \cdot P_к = 0{,}9 \cdot 0{,}25 = 0{,}225 \ \ МПа.$$

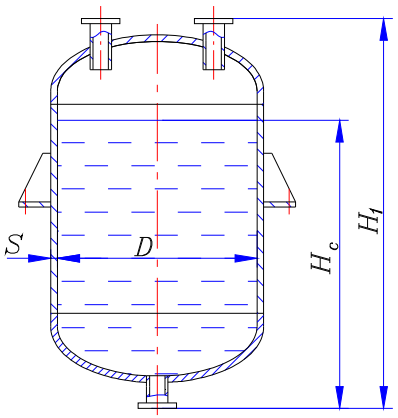


Рисунок 1. – Расчетная схема аппарата

Гидростатическое давление среды определяем по формуле (1)

$$P_г = \rho_c \cdot g \cdot H_c \cdot 10^{-6} = 1200 \cdot 9{,}81 \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-6} = 0{,}041 \ \ МПа.$$

Так как гидростатическое давление среды

$$P_г = 0{,}041 > 0{,}05 \ P_{раб} = 0{,}05 \cdot 0{,}2 = 0{,}01 \ \ МПа$$

составляет более 5 % от рабочего, то расчетное давление определяем по формуле (4) *с учетом гидростатического давления среды*

$$P = P_p + P_г = 0{,}225 + 0{,}041 = 0{,}266 \ \ МПа.$$

Расчетное давление округляем в большую сторону до величины $P = 0{,}27 \ \ МПа$.

Пробное давление определяем по формуле (5). *Для этого по таблице А.1 приложения А определяем значения допускаемых напряжений для стали марки 09Г2С при расчетной температуре, равной температуре среды в аппарате, t=150 °С* $[\sigma] = 171 \ \ МПа$ *и при температуре испытания* $t_и = 20 \ \ °C$ – $[\sigma]_{20} = 196 \ \ МПа$.

$$P_{пр} = 1{,}25 \ P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}25 \cdot 0{,}27 \cdot \frac{196}{171} = 0{,}39 \ \ МПа.$$

Гидростатическое давление воды в условиях испытания определяем по формуле (1), *принимая плотность воды равной* $\rho_в = 1000 \ \ кг/м^3$

$$P_{г\ воды} = \rho_в \cdot g \cdot H_в \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-6} = 0{,}039 \ \ МПа.$$

Так как гидростатическое давление воды

$$P_{г\ воды} = 0{,}039 > 0{,}05 \cdot P_{пр} = 0{,}05 \cdot 0{,}39 = 0{,}0195 \ \ МПа,$$

составляет более 5 % от пробного давления, то расчетное давление в условиях испытания $P_и$ *определяем с учетом гидростатического давления воды*

$$P_и = P_{пр} + P_{г\ воды} = 0{,}39 + 0{,}039 = 0{,}429 \ \ МПа.$$

Проверяем необходимость расчета на прочность в условиях испытания

$$P_и = 0{,}429 > 1{,}35 \ P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}35 \cdot 0{,}27 \cdot \frac{196}{171} = 0{,}418.$$

Так как расчетное давление в условиях испытания больше расчетного давления в рабочих условиях, умноженного на $1{,}35 [\sigma]_{20} / [\sigma]$, *то расчет на прочность необходимо проводить не только для рабочих условий, но и для условий испытания.*

Пример 2.

Определить расчетное давление для вертикального сосуда, изготовленного из стали Ст3сп5, если рабочее давление в сосуде составляет $P_{раб} = 0{,}96 \ МПа$, *температура рабочей среды*

$t = 165\ °C$, *плотность рабочей среды* $\rho_c = 1600\ кг/м^3$, *высота сосуда со штуцерами* $H_1 = 2{,}025$ *м, высота уровня рабочей среды* $H_c = 1{,}625$ *м. Проверить условие необходимости расчета в условиях испытания.*

Давление в сосуде во время действия предохранительного клапана определяем по формуле (*2*)

$$P_к = 1{,}15\ P_{раб} = 1{,}15 \cdot 0{,}96 = 1{,}104\ МПа.$$

Расчетное давление без учета гидростатического по формуле (*3*)

$$P_р = 0{,}9\ P_к = 0{,}9 \cdot 1{,}104 = 0{,}994\ МПа.$$

Гидростатическое давление среды определяем по формуле (*1*)

$$P_г = \rho_c \cdot g \cdot H_c \cdot 10^{-6} = 1600 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}625 \cdot 10^{-6} = 0{,}026\ МПа.$$

Так как гидростатическое давление среды составляет менее 5 % от рабочего давления $P_г = 0{,}026 < 0{,}05 \cdot 0{,}96 = 0{,}048\ МПа$, *то по формуле* (*4*) *расчетное давление определяем без учета гидростатического*

$$P = P_р = 0{,}994\ МПа.$$

Расчетное давление округляем в большую сторону $P = 1{,}0\ МПа$.

Пробное давление определяем по формуле (*5*). *Для этого предварительно по таблице А.1 приложения А определяем значения допускаемых напряжений для стали Ст3сп5 при расчетной температуре* $[\sigma] = 144\ МПа$ *и при температуре испытания* $t_и = 20\ °C$ – $[\sigma]_{20} = 154\ МПа$. *Допускаемое напряжение при расчетной температуре определяем линейной интерполяцией* (*см. пример 3*). *Если элементы сосуда изготовлены из сталей различных марок, то отношение* $[\sigma]_{20}/[\sigma]$ *принимается по тому из материалов элементов сосуда, работающих под давлением (обечайки, днищ, фланцев, крепежных деталей и др.), для которого оно является наименьшим.*

$$P_{пр} = 1{,}25\ P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}25 \cdot 1{,}0 \cdot \frac{154}{144} = 1{,}337\ МПа.$$

Гидростатическое давление воды в условиях испытания определяем по формуле (*1*), *учитывая, что плотность воды*

$\rho_в = 1000\ кг/м^3$

$$P_{г\ воды} = \rho_в \cdot g \cdot H_в \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 2{,}025 \cdot 10^{-6} = 0{,}0199\ МПа.$$

Так как гидростатическое давление воды составляет менее 5 % от пробного давления

$$P_{г\ воды} = 0{,}0199 < 0{,}05 \cdot P_{пр} = 0{,}05 \cdot 1{,}337 = 0{,}067\ МПа,$$

то расчетное давление в условиях испытаний $P_и$ *равно пробному давлению:*

$$P_и = 1{,}337\ МПа.$$

Если выполняется условие

$$P_и \le 1{,}35 \cdot P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]},$$

то расчет на прочность в условиях испытаний проводить не требуется.

$$1{,}337 \le 1{,}35 \cdot 1{,}0 \cdot \frac{154}{144} = 1{,}444\ (МПа).$$

Условие выполняется, следовательно, расчет на прочность в условиях испытаний проводить не требуется.

2.3 Допускаемые напряжения

Допускаемое напряжение для сталей, МПа, при расчете по предельным нагрузкам стальных сварных сосудов и аппаратов, работающих при статических однократных нагрузках, определяют:

для углеродистых и низколегированных сталей по формуле

$$[\sigma] = min\left(\frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{n_т}; \frac{R_m}{n_в}; \frac{R_{m/10^5}}{n_д}; \frac{R_{p1,0/10^5}}{n_п} \right); \qquad (6)$$

для аустенитных сталей по формуле

$$[\sigma] = min\left(\frac{R_{p1,0}}{n_т}; \frac{R_m}{n_в}; \frac{R_{m/10^5}}{n_д}; \frac{R_{p1,0/10^5}}{n_п} \right), \qquad (7)$$

где R_e – минимальное значение предела текучести при расчетной температуре, МПа;

$R_{p0,2}$ – минимальное значение 0,2 %-ого условного предела текучести при расчетной температуре (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 0,2 %), МПа;

R_m – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при расчетной температуре, МПа;

$R_{m/10^5}$ – среднее значение предела длительной прочности за 10^5 ч при расчетной температуре, МПа;

$R_{p1,0/10^5}$ – средний 1 %-ный предел ползучести за 10^5 ч при расчетной температуре, МПа;

$R_{p1,0}$ – минимальное значение 1 %-ого условного предела текучести при расчетной температуре (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 1 %), МПа;

$n_{\text{т}}$ – коэффициент запаса прочности по пределу текучести;

$n_{\text{в}}$ – коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению (пределу прочности);

$n_{\text{д}}$ – коэффициент запаса прочности по пределу длительной прочности;

$n_{\text{п}}$ – коэффициент запаса прочности по пределу ползучести.

Предел ползучести используют для определения допускаемого напряжения в тех случаях, когда отсутствуют данные по пределу длительной прочности или по условиям эксплуатации необходимо ограничить величину деформации (перемещения).

При отсутствии данных по условному пределу текучести при 1 %–ном остаточном удлинении допускаемое напряжение для аустенитной стали определяют по формуле (6).

Допускаемое напряжение для двухслойных сталей определяется по формуле

$$[\sigma]=\frac{[\sigma]_o\cdot(S_o-C_o)+[\sigma]_n\cdot(S_n-C_n)}{(S_o-C_o)+(S_n-C_n)}, \qquad (8)$$

где $[\sigma]_o, [\sigma]_n$ – допускаемые напряжения при расчетной температуре для материалов соответственно основного и плакирующего (коррозионностойкого) слоев, МПа;

S_o, S_n – толщины соответственно основного и плакирующего слоев, мм;

C_o, C_n – прибавка для компенсации коррозии и эрозии материала соответственно основного и плакирующего слоев, мм.

При определении допускаемого напряжения по формуле (8) толщина плакирующего слоя принимается минимальной при $[\sigma]_o < [\sigma]_n$, если $[\sigma]_o > [\sigma]_n$, то толщина плакирующего слоя принимается максимальной.

Для сталей, широко используемых в химическом машиностроении, допускаемые напряжения при расчетной температуре приведены в приложении А (таблицы А1 – А4).

Расчетные значения предела текучести и временного сопротивления приведены в приложении (таблицы А5 – А13).

В условиях испытания допускаемое напряжение определяют:

для углеродистых и низколегированных сталей

$$[\sigma] = \frac{R_e^{20} \text{ или } R_{p0,2}^{20}}{n_т}, \qquad (9)$$

для аустенитных сталей

$$[\sigma] = \frac{R_{p0,2}^{20} \text{ или } R_{p1,0}^{20}}{n_т}, \qquad (10)$$

где R_e^{20} – минимальное значение предела текучести при температуре 20 °С, МПа;

$R_{p0,2}^{20}$ – минимальное значение условного 0,2 %–ого предела текучести при температуре 20 °С (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 0,2 %), МПа;

$R_{p1,0}^{20}$ – минимальное значение условного 1 %–ого предела текучести при температуре 20 °С (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 1 %), МПа.

Коэффициенты запаса прочности должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 1.

В случае, если допускаемое напряжение для аустенитных сталей определяют по формуле (6), коэффициент запаса прочности $n_т$ по пределу текучести $R_{p0,2}$ для рабочих условий следует принимать равным 1,3.

Таблица 1 – Значения коэффициентов запаса прочности

Условия нагружения	Коэффициент запаса прочности			
	$n_т$	$n_в$	$n_д$	$n_п$
Рабочие условия	1,5	2,4	1,5	1,0
Условия испытания:				
гидравлические	1,1	–	–	–
пневматические	1,2	–	–	–
Условия монтажа	1,1	–	–	–

Пример 3

Определить допускаемое напряжение для стали Ст3сп5 при расчетной температуре $t = 165\ °C$.

Допускаемые напряжения при расчетной температуре $t = 165\ °C$ *определяем методом линейной интерполяции. Для этого определим допускаемые напряжения для стали Ст3сп5 по таблице А.1 приложения А:*

при температуре $t_1 = 150\ °C \quad [\sigma]_{150} = 145\ МПа,$

при температуре $t_2 = 200\ °C \quad [\sigma]_{200} = 142\ МПа.$

Допускаемое напряжение при температуре 165 °С

$$[\sigma] = [\sigma]_{150} + \frac{[\sigma]_{200} - [\sigma]_{150}}{t_2 - t_1} \cdot (t - t_1);$$

$$[\sigma] = 145 + \frac{142 - 145}{200 - 150} \cdot (165 - 150) = 144{,}1\ МПа.$$

Округляем результат вычисления до 0,5 МПа в сторону меньшего значения.

$$[\sigma] = 144{,}0\ МПа.$$

Пример 4

Определить допускаемое напряжение для листового проката из двухслойной стали Ст3сп+12Х18Н10Т толщиной 10 мм при расчетной температуре 100 °С.

По таблицам А.1 и А.3 приложения А определяем допускаемые напряжения для материала основного и плакирующего слоя:

для основного слоя (сталь Ст3сп) $[\sigma]_o = 149\ МПа,$

для плакирующего слоя (*сталь 12Х18Н10Т*) $[\sigma]_n = 174$ *МПа.*

По таблице 5 определяем, что для двухслойного листа толщиной 10 мм толщина плакирующего (*коррозионностойкого*) *слоя составляет от 2 до 3 мм. Так как* $[\sigma]_o < [\sigma]_n$, *то толщину плакирующего слоя принимаем минимальной, т.е.* $S_n = 2$ *мм, толщину основного слоя* $S_o = 8$ *мм. Прибавку для компенсации коррозии для плакирующего слоя принимаем* $C_n = 1$ *мм, для основного слоя* $C_o = 0$, *так как основной слой не подвержен коррозии со стороны агрессивной среды.*

Допускаемое напряжение определяем по формуле (*8*).

$$[\sigma] = \frac{[\sigma]_o \cdot (S_o - C_o) + [\sigma]_n \cdot (S_n - C_n)}{(S_o - C_o) + (S_n - C_n)} = \frac{149 \cdot (8-0) + 174 \cdot (2-1)}{(8-0) + (2-1)} =$$

$= 151{,}77$ *МПа.*

Пример 5

Определить допускаемое напряжение в условиях испытания для стали 09Г2С.

Допускаемое напряжение определяем по формуле (9). По таблице А.6 приложения А определяем значение предела текучести при температуре испытания $t_u = 20\,^\circ C$ $R_e^{20} = 300$ *МПа. Коэффициент запаса прочности при гидравлических испытаниях определяем по таблице 1:* $n_т = 1{,}1$.

$$[\sigma] = \frac{R_e^{20}}{n_т} = \frac{300}{1{,}1} = 272{,}7 \text{ МПа.}$$

2.4 Коэффициенты прочности сварных швов

При расчете на прочность сварных элементов сосудов и аппаратов в расчетные формулы следует вводить коэффициент прочности сварных соединений φ. Для бесшовных элементов сосудов и аппаратов $\varphi = 1$.

Для определения коэффициента прочности сварных соединений необходимо установить группу сосуда в зависимости от расчетного давления, температуры стенки и характера рабочей среды по таблице 2.

Объем контроля сварных соединений сосудов и их элементов

радиографическим методом или ультразвуковой дефектоскопией должен соответствовать указанному в таблице 3.

Таблица 2 – Группа сосудов

Группа сосуда	Расчетное давление, МПа (кгс/см^2)	Расчетная температура, °С	Характер рабочей среды
1	Выше 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывоопасная или пожароопасная или 1, 2 классов опасности по ГОСТ 12.1.007–76
2	Выше 0,07 (0,7) до 2,5 (25)	Выше 400	Любая, за исключением указанной для 1 группы сосудов
	Выше 2,5(25) до 5,0 (50)	Выше 200	
	Выше 4,0 (40) до 5,0 (50)	Ниже минус 40	
	Выше 5,0 (50)	Независимо	
3	Выше 0,07(0,7) до 1,6 (16)	Ниже минус 20, выше 200 до 400	
	Выше 1,6 (16) до 2,5 (25)	До 400	
	Выше 2,5 (25) до 4,0 (40)	До 200	
	Выше 4,0 (40) до 5,0 (50)	От минус 40 до 200	
4	Выше 0,07 (0,7) до 1,6 (16)	От минус 20 до 200	
5а	До 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывоопасная или пожароопасная или 1, 2, 3 классов опасности по ГОСТ 12.1.007–76
5б			Взрывобезопасная и пожаробезопасная, 4 класса опасности по ГОСТ 12.1.007–76

Таблица 3 – Объем контроля сварных соединений сосудов

Группа сосуда	Длина контролируемого участка швов в % от длины каждого шва
1, 2	100
3	не менее 50
4, 5а	не менее 25
5б	не менее 10

Коэффициент прочности сварного шва принимается по таблице 4.

Таблица 4 – Значения коэффициентов прочности сварных швов

Вид сварного шва	Коэффициент прочности сварных швов при длине контролируемых швов от общей длины, %	
	100	от 10 до 50
Стыковой или тавровый с двусторонним сплошным проваром, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой	1,0	0,9
Стыковой с подваркой корня шва или тавровый с двусторонним сплошным проваром, выполняемый вручную	1,0	0,9
Стыковой, доступный сварке только с одной стороны и имеющий в процессе сварки металлическую подкладку со стороны корня шва, прилегающую по всей длине шва к основному металлу	0,9	0,8
Втавр, с конструктивным зазором свариваемых деталей	0,8	0,65
Стыковой, выполняемый автоматической и полуавтоматической сваркой с одной стороны с флюсовой или керамической подкладкой	0,9	0,8
Стыковой, выполняемый вручную с одной стороны	0,9	0,65

Пример 6

Определить коэффициент прочности сварных соединений для аппарата, работающего при внутреннем избыточном давлении. Расчетное давление $P = 1{,}0$ МПа, расчетная температура $t = 165\ ^\circ C$, среда в аппарате взрывобезопасная, пожаробезопасная, невредная.

Для определения коэффициента прочности сварных соединений необходимо установить группу сосуда в зависимости от расчетного давления, температуры стенки и характера рабочей среды по таблице 2. Для заданных условий группа сосуда - 4. По таблице 3 определяем длину контролируемого участка швов - не менее 25 %. По таблице 4 для стыковых швов с двусторонним сплошным проваром, выполняемых автоматической, полуавтоматической сваркой или вручную значение коэффициента прочности сварных швов принимаем равным 0,9.

2.5 Прибавки к расчетным величинам конструктивных элементов

При расчете сосудов и аппаратов необходимо учитывать прибавку C к расчетным толщинам элементов сосудов и аппаратов.

Прибавку к расчетным толщинам следует определять по формуле

$$C = C_1 + C_2 + C_3, \qquad (11)$$

где C_1 – прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;

C_2 – прибавка для компенсации минусового допуска, мм;

C_3 – прибавка технологическая, мм.

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии принимается с учетом условий эксплуатации, расчетного срока службы, скорости коррозии.

Прибавка C_1 определяется по формуле

$$C_1 = П \cdot \tau + C_э, \qquad (12)$$

где $П$ – скорость проникновения коррозии, мм/год;

τ – срок службы аппарата, лет;

$C_э$ – прибавка для компенсации эрозии, мм.

Эрозионное воздействие среды (разрушение поверхностного слоя металла под действием ударяющихся в него твердых частиц, капель или потока жидкости или газа) учитывают при значительных скоростях движения среды: жидкостей – более 20 м/с, газов – более 100 м/с или при наличии в среде абразивных частиц.

В курсовом и дипломном проектировании принимают $C_э = 0$.

При двухстороннем контакте внутренних элементов сосуда с коррозионными средами прибавка для компенсации коррозии и эрозии должна учитывать сумму скоростей проникновения коррозии с каждой стороны.

Прибавка C_2 принимается по стандартам на прокат в зависимости от толщины листа по таблице 5 для двухслойных и по таблице 6 для однослойных сталей.

Прибавку C_2 учитывают в том случае, когда ее значение превышает 5 % от номинальной толщины листа.

Таблица 5 – Предельные отклонения и толщина коррозионностойкого слоя двухслойных сталей

Продолжение таблицы 5

В миллиметрах

Толщина листа	Предельное отклонение	Толщина коррозионностойкого слоя
4	+0,30 –0,50	0,7 – 1,1
5		0,8 – 1,2
6	+0,25 –0,60	1,0 – 1,6
8	±0,80	2,0 – 3,0
10	±0,90	
12	±1,08	
14	±0,98	
16	±1,12	2,5 – 3,5
18	±1,26	
20	±1,40	
22	±1,54	3,0 – 4,0
25	±1,50	
26	±1,56	

В миллиметрах

Толщина листа	Предельное отклонение	Толщина коррозионностойкого слоя
28	±1,68	3,5 – 5,0
30	±1,80	
32	±1,60	4,0 – 6,0
34	±1,70	
36	±1,80	
38	±1,90	
40	±2,00	
42	±2,10	
45	±2,25	
48	±2,40	
50	±2,50	
55	±2,20	
60	±2,40	

Технологическая прибавка C_3 предусматривает компенсацию

утонения стенки элемента сосуда при технологических операциях – вытяжке, штамповке, гибке и т. п. В зависимости от принятой технологии эту прибавку следует учитывать при разработке рабочих чертежей.

В курсовом и дипломном проектировании принимают $C_3 = 0$.

Пример 7

Определить прибавку для компенсации коррозии, если скорость коррозии материала в данной среде $П = 0{,}05$ мм/год, срок службы аппарата $\tau = 20$ лет.

Прибавку для компенсации коррозии определяем по формуле (*12*)

$$C_1 = П \cdot \tau + C_э = 0{,}05 \cdot 20 + 0 = 1 \text{ мм}.$$

Таблица 6 – Предельные отклонения листового проката из однослойных сталей

В миллиметрах

Толщина листа	3	4; 5	6	8 – 12	14 – 25	26 – 30	32 – 34
Предельное отклонение	±0,22	+0,30 –0,50	+0,25 –0,60	+0,30 –0,80	+1,40 –0,80	+1,50 –0,90	+1,60 –1,00

Продолжение таблицы 6

В миллиметрах

Толщина листа	36 – 40	42 – 50	55; 60	65; 70	75; 80	85; 90	95; 100
Предельное отклонение	+1,70 –1,10	+1,80 –1,20	+1,80 –1,30	+1,80 –1,60	+1,80 –2,20	+1,9 0 –2,50	+2,00 –2,70

Пример 8

Определить прибавку для компенсации коррозии для элементов корпуса аппарата с рубашкой, если скорость коррозии со стороны рабочей среды $П_1 = 0{,}1$ мм/год, а скорость коррозии со стороны теплоносителя $П_2 = 0{,}05$ мм/год. Корпус аппарата и рубашка выполнены из одного материала. Срок службы аппарата $\tau = 20$ лет.

Для элементов корпуса, подверженных коррозии со стороны рабочей среды и теплоносителя (*элементы корпуса под рубашкой*), *прибавка на коррозию составит*

$$C_1 = (П_1 + П_2) \cdot \tau = (0{,}1 + 0{,}05) \cdot 20 = 3 \text{ мм}.$$

Для элементов корпуса, подверженных коррозии только со сто-

роны рабочей среды (*элементы корпуса аппарата, не охваченные рубашкой*), *прибавка на коррозию составит*

$$C_1 = П_1 \cdot \tau = 0{,}1 \cdot 20 = 2\ мм.$$

Для элементов корпуса, подверженных коррозии только со стороны теплоносителя (*элементы рубашки*), *прибавка на коррозию составит*

$$C_1 = П_2 \cdot \tau = 0{,}05 \cdot 20 = 1\ мм$$

3 РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК

Цилиндрические обечайки являются одним из основных элементов химических аппаратов. Из них образуется цилиндрический корпус аппарата, они входят составной частью в различные внутренние и наружные устройства аппаратов.

Обечайки большей частью изготовляют вальцовкой из листового проката, реже из труб.

Кромки обечаек, образующие корпус аппарата, соединяют между собой преимущественно встык.

Вальцованные обечайки должны иметь как можно меньше сварных швов, особенно продольных, поэтому листы для их изготовления следует выбирать возможно больших размеров.

3.1 Условия применения расчетных формул

Расчетные формулы применимы при отношении толщины стенки к диаметру

$$\frac{S-C}{D} \le 0{,}1 \quad \text{для обечаек и труб при} \quad D \ge 200 \ \text{мм};$$

$$\frac{S-C}{D} \le 0{,}3 \quad \text{для труб при} \quad D < 200 \ \text{мм}.$$

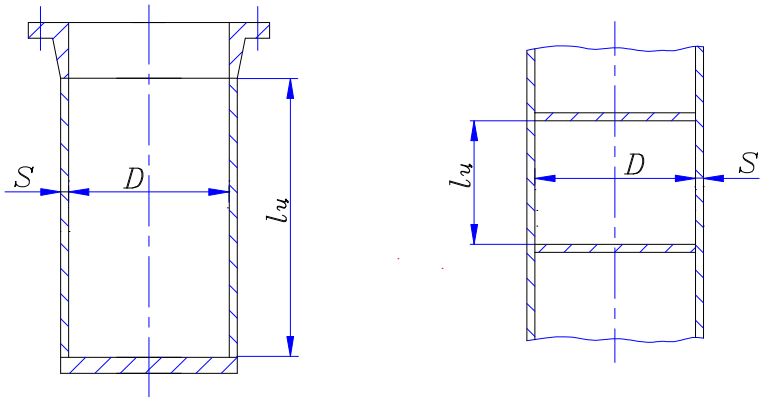
Расчетные формулы следует применять при условии, что расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывается ползучесть материалов, то есть при таких температурах, когда допускаемое напряжение определяют только по пределу текучести или временному сопротивлению (пределу прочности). Если нет точных данных, то формулы допускается применять при условии, что расчетная температура стенки обечайки из углеродистой стали не превышает 380 °С, из низколегированной 420 °С, а из аустенитной 525 °С.

Для обечаек, подкрепленных кольцами жесткости, дополнительно должны выполняться следующие ограничения:

– отношение высоты сечения кольца жесткости, измеряемой от срединной поверхности обечайки, к диаметру (рисунок 5) $h_2/D \le 0{,}2$;
– расчетные формулы следует применять при условии равномерного расположения колец жесткости;
– в тех случаях, когда кольца жесткости установлены неравномерно, значения b и l_1 необходимо подставлять для того участка, на котором расстояние между двумя соседними кольцами жесткости максимальное, в соответствии с рисунком 5;
– если $l_2 > l_1$, то в качестве расчетной длины принимается l_2.

3.2 Гладкие цилиндрические обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением

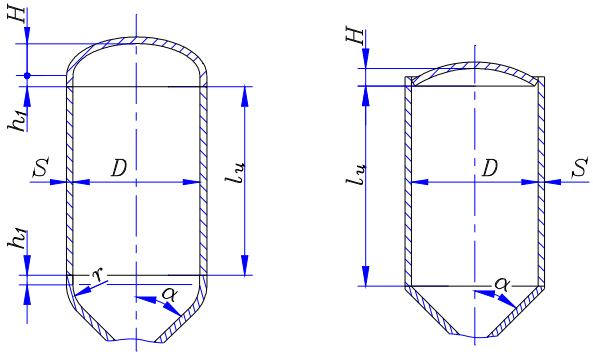
Расчетные схемы гладких цилиндрических обечаек приведены на рисунках 2 – 4.



а *б*

а – обечайка с фланцем и (или) плоским днищем; *б* – обечайка с жесткими перегородками

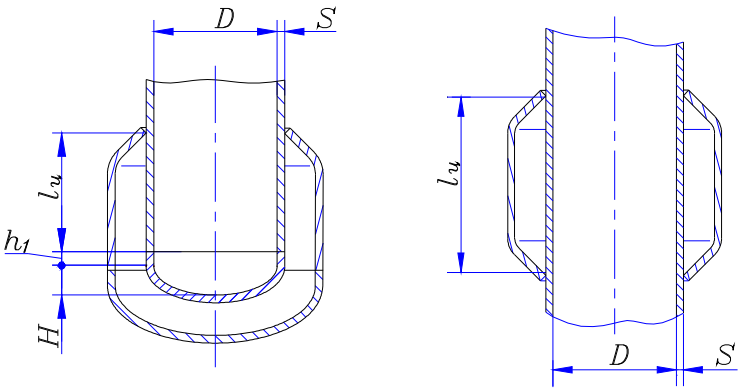
Рисунок 2 – Гладкие цилиндрические обечайки



а **б**

а – обечайка с отбортованными днищами; *б* – обечайка с неотбортованными днищами

Рисунок 3 – Гладкие обечайки с выпуклыми или коническими днищами



а **б**

а – обечайка с U – образной рубашкой; *б* – обечайка с цилиндрической рубашкой

Рисунок 4 – Гладкие обечайки с рубашками

3.2.1 Однослойные цилиндрические обечайки

Расчетная толщина стенки, мм

$$S_p = \frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - P}, \qquad (13)$$

где P – расчетное внутреннее избыточное давление, МПа;

D – внутренний диаметр обечайки, мм;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение для материала обечайки при расчетной температуре, МПа;

φ_p – коэффициент прочности продольных сварных швов.

Исполнительную толщину стенки, мм, обечайки определяют по формуле

$$S \geq S_p + C \qquad (14)$$

и округляют до ближайшего большего значения стандартной толщины листа листового проката: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 45, 48, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100.

Исполнительные толщины стенок обечаек и днищ должны быть не менее: (D /1000 + 2,5) мм – для углеродистых и низколегированных сталей, 2,5 мм – для сталей аустенитного и аустенитно–ферритного классов.

Минимальные толщины обечаек и днищ кожухотрубчатых теплообменных аппаратов следует принимать по таблице 7.

Таблица 7 – Минимальная толщина обечаек и днищ кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, мм

Тип аппарата	Материал кожуха (сталь)	Толщина кожуха при внутреннем диаметре кожуха, мм					
		500	600	800	1000	1200	≥1400
Н и К	Углеродистая и низколегированная	5	6	6	6	6	6
	Коррозионностойкая	3	4	4	6	6	6
П и У	Углеродистая и низколегированная	5	6	8	10	12	14
	Коррозионностойкая	3	4	6	8	10	12

Для принятого значения S рассчитывают допускаемое внутреннее избыточное давление, МПа, по формуле

$$[P]=\frac{2\cdot[\sigma]\cdot\varphi_p\cdot(S-C)}{D+(S-C)}. \qquad (15)$$

При этом должно выполняться условие $P\le[P]$.

Пример 9

Рассчитать толщину стенки цилиндрической обечайки корпуса аппарата (рисунок 1) из стали марки Ст3сп5. Внутренний диаметр аппарата D=1000 мм, расчетное давление в аппарате P=1,0 МПа, расчетная температура стенки обечайки t=165 °С, коэффициент прочности сварных соединений принять равным $\varphi_p=0{,}9$.

Допускаемое напряжение для материала обечайки при расчетной температуре определяем по таблице Б.1 приложения Б методом линейной интерполяции

$$[\sigma]=144\ МПа.$$

Расчетную толщину стенки обечайки определяем по формуле (13)

$$S_p=\frac{P\cdot D}{2[\sigma]\cdot\varphi_p-P}=\frac{1{,}0\cdot1000}{2\cdot144\cdot0{,}9-1{,}0}=3{,}87\ мм.$$

Прибавку C_1 *определяем по формуле (12), исходя из максимально допустимой скорости коррозии* $П=0{,}1$ *мм/год, расчетного срока службы аппарата* $\tau=20$ *лет и принимая прибавку для компенсации эрозии* $C_э=0$.

$$C_1=П\cdot\tau+C_э=0{,}1\cdot20+0=2\ мм.$$

Исполнительная толщина стенки обечайки без учета прибавки для компенсации минусового допуска равняется

$$S\ge S_p+C_1=3{,}87+2=5{,}87\ мм.$$

Определяем исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки с учетом прибавки на минусовой допуск $C_2=0{,}8$ *мм для листа толщиной* 8 *мм*

$$S\ge S_p+C_1+C_2=3{,}87+2+0{,}8=6{,}67\ мм.$$

Принимаем исполнительную толщину стенки обечайки равной $S=8$ *мм.*

Проверяем необходимость учета прибавки для компенсации минусового допуска стального листа толщиной $S = 8$ *мм*

$$C_2 = 0{,}8 > 0{,}05 \cdot S = 0{,}05 \cdot 8 = 0{,}4 \text{ мм.}$$

Прибавку учитываем, так как она составляет больше 5 % от толщины листа.

Сумма прибавок

$$C = C_1 + C_2 = 2 + 0{,}8 = 2{,}8 \text{ мм}$$

равняется предварительно принятой.

Допускаемое давление рассчитываем по формуле (15)

$$[P] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S - C)}{D + (S - C)} = \frac{2 \cdot 144 \cdot 0{,}9 \cdot (8 - 2{,}8)}{1000 + (8 - 2{,}8)} = 1{,}34 \text{ МПа.}$$

Условие прочности

$$P = 1{,}0 < [P] = 1{,}34 \text{ МПа}$$

выполняется.

Проверяем условие применения расчетных формул

$$\frac{S - C}{D} = \frac{8 - 2{,}8}{1000} = 0{,}0052 < 0{,}1 .$$

Условие выполняется.

Пример 10

Рассчитать толщину стенки цилиндрической обечайки корпуса аппарата (*рисунок 1*) *из стали марки 09Г2С. Внутренний диаметр аппарата D=1000 мм, расчетное давление в аппарате в рабочих условиях P=0,27 МПа, в условиях испытания* P_u*=0,43 МПа, расчетная температура стенки обечайки t=150 °С. Коэффициент прочности сварных соединений принять равным* $\varphi_p = 1$*, прибавку для компенсации коррозии –* C_1*=2 мм.*

Допускаемое напряжение для материала обечайки в рабочих условиях определяем по таблице Б.1 приложенияБ, $[\sigma] = 171$ *МПа.*

Допускаемое напряжение в условиях испытания определяем по формуле (9). *По таблице Б.6 приложения Б предел текучести при температуре испытания* $t_u = 20$ *°С составляет* $R_e^{20} = 300$ *МПа. Коэффициент запаса прочности при гидравлических испытаниях определяем по таблице 3.1,* $n_т = 1{,}1$.

$$[\sigma]_u = \frac{R_e^{20}}{n_т} = \frac{300}{1{,}1} = 272{,}7 \ \ МПа.$$

Расчетную толщину стенки обечайки определяем по формуле (13)*:*

– для рабочих условий

$$S'_p = \frac{P \cdot D}{2[\sigma] \cdot \varphi_p - P} = \frac{0{,}27 \cdot 1000}{2 \cdot 171 \cdot 1 - 0{,}27} = 0{,}79 \ \ мм;$$

– для условий испытания

$$S''_p = \frac{P_u \cdot D}{2[\sigma]_u \cdot \varphi_p - P_u} = \frac{0{,}43 \cdot 1000}{2 \cdot 272{,}7 \cdot 1 - 0{,}43} = 0{,}79 \ \ мм.$$

Исполнительную толщину стенки обечайки определяем по большему из полученных значений (*в данном примере они равны друг другу*) *без учета прибавки для компенсации минусового допуска*

$$S \geq S'_p + C_1 = 0{,}79 + 2 = 2{,}79 \ \ мм.$$

Определяем исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки с учетом прибавки на минусовой допуск $C_2 = 0{,}4$ *мм для листа толщиной* 4 *мм*

$$S \geq S'_p + C_1 + C_2 = 2{,}79 + 2 + 0{,}4 = 3{,}19 \, мм.$$

Принимаем исполнительную толщину стенки обечайки равной $S = 4$ *мм.*

Проверяем необходимость учета прибавки для компенсации минусового допуска стального листа толщиной $S = 4$ *мм*

$$C_2 = 0{,}4 > 0{,}05 \cdot S = 0{,}05 \cdot 4 = 0{,}2 \ \ мм.$$

Прибавку учитываем, так как она составляет больше 5 % от толщины листа.

Сумма прибавок к расчетной толщине стенки обечайки

$$C = C_1 + C_2 = 2 + 0{,}4 = 2{,}4 \ \ мм$$

равняется предварительно принятой.

Допускаемые давления рассчитываем по формуле (15)*:*

– для рабочих условий

$$[P]=\frac{2[\sigma]\cdot\varphi_p\cdot(S-C)}{D+(S-C)}=\frac{2\cdot 171\cdot 1\cdot(4-2{,}4)}{1000+(4-2{,}4)}=0{,}54\ \ МПа;$$

– для условий испытания

$$[P]_и=\frac{2[\sigma]_и\cdot\varphi_p\cdot(S-C)}{D+(S-C)}=\frac{2\cdot 272{,}7\cdot 1\cdot(4-2{,}4)}{1000+(4-2{,}4)}=0{,}87\ \ МПа.$$

Условия прочности:

– для рабочих условий

$$P=0{,}27<[P]=0{,}54\ \ МПа;$$

– и для условий испытания

$$P_и=0{,}43<[P]_и=0{,}87\ \ МПа$$

выполняются.

Условие применения расчетных формул

$$\frac{S-C}{D}=\frac{4-2{,}4}{1000}=0{,}0016<0{,}1$$

выполняется.

3.2.2 Обечайки из двухслойной стали

Для изготовления химической аппаратуры применяют стали, стойкие в агрессивных средах. Однако следует иметь в виду, что коррозионностойкие стали весьма дефицитны и имеют высокую стоимость. Для снижения стоимости аппаратов в ряде случаев целесообразно применять биметалл – двухслойный лист, состоящий из основного и плакирующего (коррозионностойкого) слоев. При этом основной слой, изготовляемый из углеродистых или низколегированных сталей, воспринимает нагрузку. Плакирующий слой предохраняет основной слой от коррозионного действия среды.

При расчете аппаратов из двухслойных сталей в качестве первого приближения толщину стенки обечайки следует определять по допускаемому напряжению для материала основного слоя по формулам (13) и (14). После назначения исполнительной толщины, а также толщины плакирующего слоя по таблице 5 рассчитывается допускаемое напряжение по формуле (8). По полученному допускаемому напряжению уточняется толщина стенки по формулам (13) и (14). Расчет производится до совпадения исполнительной толщины стенки обечайки, определенной расчетом, и принятой.

В случае, когда в расчете учитывается толщина только основного слоя, при определении исполнительной толщины стенки в качестве прибавки на коррозию принимается максимальная толщина плакирующего слоя.

Допускаемое внутреннее избыточное давление определяется по формуле (15).

Двухслойные листы изготовляют из сочетаний марок сталей основного и коррозионностойкого слоев, указанных в таблице 8.

Таблица 8 – Сочетания марок сталей основного и коррозионностойкого слоев двухслойного проката

Марка стали коррозионно–стойкого слоя	Марка стали основного слоя						
	Ст3сп	20К	09Г2	09Г2С	16ГС	12МХ	12ХМ
08Х18Н10Т	+	+	–	+	+	+	+
12Х18Н10Т	+	+	+	+	+	+	+
10Х17Н13М2Т	+	+	–	+	+	–	–
10Х17Н13М3Т	+	+	–	+	+	–	–
08Х17Н15М2Т	+	+	–	–	+	–	–
08Х22Н6Т	+	+	–	–	–	–	–
06Х28МДТ	+	+	–	–	+	–	–

Пример 11

Рассчитать толщину стенки цилиндрической обечайки корпуса аппарата (рисунок 1) из двухслойной стали Ст3сп+12Х18Н10Т. Внутренний диаметр аппарата D=2000 мм, расчетное давление в аппарате P=1,0 МПа, расчетная температура стенки обечайки t=100 °С. Коэффициент прочности сварных соединений принять равным $\varphi_p = 1$, прибавку для компенсации коррозии и эрозии со стороны плакирующего слоя – C_1=1 мм.

По таблицам А.1 и А.3 приложения А находим допускаемые напряжения для материала основного и плакирующего слоев:

– для основного слоя из стали марки Ст3сп $[\sigma]_o = 149$ *МПа;*

– для плакирующего слоя из стали марки 12Х18Н10Т $[\sigma]_n = 174$ *МПа.*

В качестве первого приближения толщину стенки обечайки определяем по допускаемому напряжению для материала основного слоя по формулам (13) *и* (14)

$$S_p = \frac{P \cdot D}{2[\sigma] \cdot \varphi_p - P} = \frac{1{,}0 \cdot 2000}{2 \cdot 149 \cdot 1 - 1{,}0} = 6{,}73 \text{ мм.}$$

С учетом прибавки для компенсации коррозии и эрозии толщина стенки составит

$$S \geq S_p + C_1 = 6{,}73 + 1 = 7{,}73 \text{ мм.}$$

Принимаем прибавку для компенсации минусового допуска для листа толщиной 8 мм по таблице 5 равной 0,8 мм, при этом исполнительная толщина с учетом суммы прибавок превышает 8 мм. Принимаем прибавку для компенсации минусового допуска для стального листа толщиной 10 мм равной $C_2 = 0{,}9$ *мм.*

Сумма прибавок к расчетной толщине стенки обечайки составит

$$C = C_1 + C_2 = 1 + 0{,}9 = 1{,}9 \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина стенки обечайки с учетом суммы прибавок к расчетной толщине составит

$$S \geq S_p + C = 6{,}73 + 1{,}9 = 8{,}63 \text{ мм}$$

Принимаем исполнительную толщину обечайки равной $S = 10$ *мм.*

Толщина плакирующего (*коррозионностойкого*) *слоя двухслойного листа толщиной* $S = 10$ *мм по таблице 5 составляет* $S_n = 2 - 3$ *мм. Так как* $[\sigma]_o < [\sigma]_n$, *толщину плакирующего слоя принимаем минимальной, т.е.* $S_n = 2$ *мм, толщину основного слоя –* $S_o = S - S_n = 10 - 2 = 8$ *мм. Прибавку для компенсации коррозии и эрозии со стороны основного слоя принимаем равной* $C_o = 0$ *мм, так как основной слой не подвержен коррозии со стороны агрессивной среды.*

Допускаемое напряжение определяем по формуле (8)

$$[\sigma]=\frac{[\sigma]_o\cdot(S_o-C_o)+[\sigma]_n\cdot(S_n-C_n)}{(S_o-C_o)+(S_n-C_n)}=\frac{149\cdot(8-0)+174\cdot(2-1)}{(8-0)+(2-1)}=$$
$$=151{,}7\ МПа.$$

По полученному допускаемому напряжению уточняем толщину стенки по формулам (13) *и* (14).

$$S_p=\frac{P\cdot D}{2[\sigma]\cdot\varphi_p-P}=\frac{1{,}0\cdot 2000}{2\cdot 151{,}7\cdot 1-1{,}0}=6{,}6\ мм;$$

$$S\geq S_p+C=6{,}6+1{,}9=8{,}5\ мм.$$

Принимаем исполнительную толщину стенки обечайки равной $S=10$ *мм, что совпадает с предварительным расчетом.*

Для принятого значения исполнительной толщины стенки обечайки рассчитываем допускаемое давление по формуле (15)

$$[P]=\frac{2[\sigma]\cdot\varphi_p\cdot(S-C)}{D+(S-C)}=\frac{2\cdot 151{,}7\cdot 1\cdot(10-1{,}9)}{2000+(10-1{,}9)}=1{,}22\ МПа.$$

Условие прочности

$$P=1{,}0<[P]=1{,}22\ МПа$$

выполняется.

Условие применения расчетных формул

$$\frac{S-C}{D}=\frac{10-1{,}9}{2000}=0{,}004<0{,}1\,.$$

выполняется.

3.3 Гладкие цилиндрические обечайки, нагруженные наружным давлением

Цилиндрические обечайки, нагруженные наружным давлением или работающие под вакуумом, находящиеся в менее благоприятных условиях по сравнению с обечайками, нагруженными внутренним избыточным давлением, требуют большей толщины стенки. Наружное давление вызывает нарушение цилиндрической формы обечайки, увеличивая имеющиеся первоначальные отклонения, являющиеся следствием изготовления. При этом в обечайке кроме напряжений сжатия возникают напряжения изгиба.

Тонкостенные обечайки под действием наружного давления при

определенных условиях могут потерять устойчивость. Явление потери устойчивости формы происходит при напряжениях меньших предела текучести материала обечайки, когда под действием некоторого давления, называемого критическим, поперечное сечение первоначальной круглой формы начинает искажаться, приобретая волнообразную форму.

Величина критического давления зависит от геометрических размеров и механических свойств материала обечайки. Эти факторы следует учитывать при расчете обечаек, нагруженных наружным давлением.

3.3.1 Однослойные цилиндрические обечайки

Расчетную толщину стенки, мм, определяют по формуле

$$S_p = max\left\{K_2 \cdot D \cdot 10^{-2}; \frac{1{,}1 \cdot P \cdot D}{2 \cdot [\sigma]}\right\}, \qquad (16)$$

где P – расчетное наружное давление, МПа;

K_2 – коэффициент, определяемый по номограмме, приведенной на рисунке 5, в зависимости от коэффициентов K_1 и K_3.

Коэффициент K_1 определяют по формуле

$$K_1 = 0{,}36 \cdot \frac{n_y \cdot P}{E \cdot 10^{-6}}, \qquad (17)$$

где n_y – коэффициент запаса устойчивости;

E – модуль продольной упругости материала обечайки при расчетной температуре, МПа, в соответствии с таблицей 9.

Коэффициент запаса устойчивости при расчете сосудов и аппаратов на устойчивость по нижним критическим напряжениям в пределах упругости следует принимать:

– для рабочих условий $n_y = 2{,}4$;

– для условий испытаний и монтажа $n_y = 1{,}8$.

Коэффициент K_3 определяют по формуле

$$K_3 = l/D, \qquad (18)$$

где l – расчетная длина гладкой обечайки, мм.

Расчетную длину определяют в зависимости от расчетной схемы в соответствии с рисунками 2 – 4.

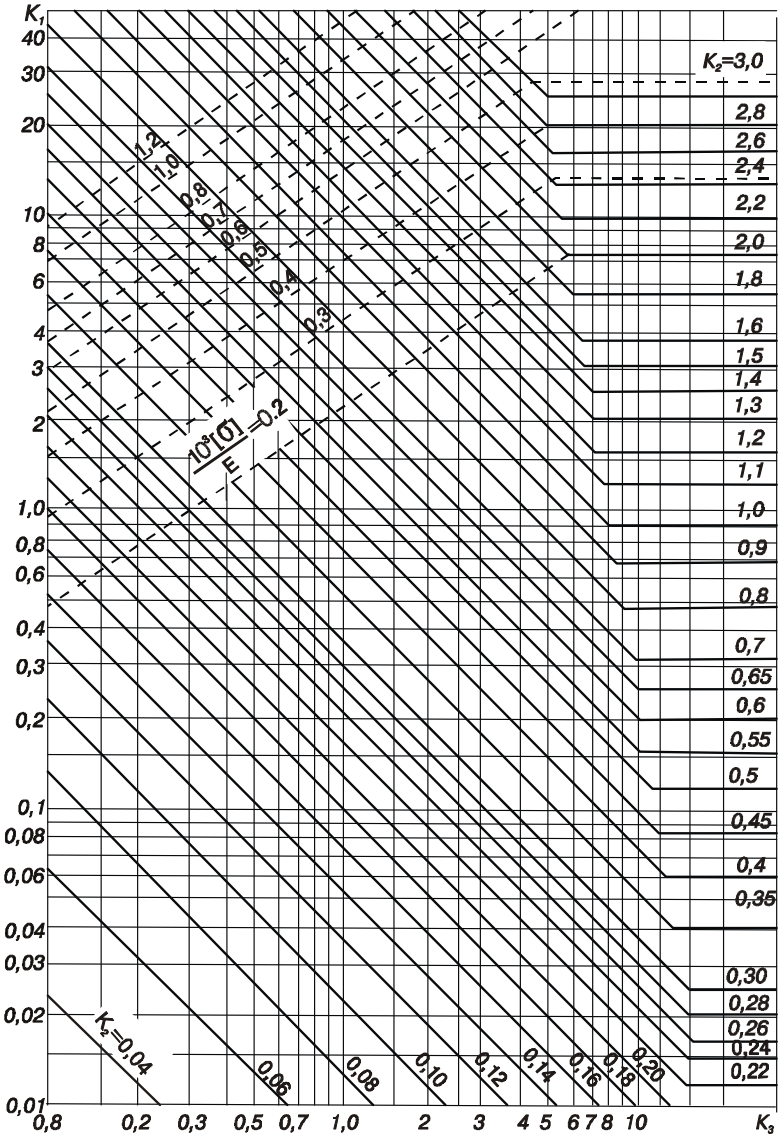


Рисунок 5 – Номограмма для определения коэффициентов K_1, K_2, K_3 при расчете цилиндрических обечаек, работающих под наружным давлением

Длину примыкающего элемента l_3, мм, определяют по формуле

$$l_3 = \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{H}{3} - \textit{для выпуклых днищ;} \\ max\left(r \cdot \sin\alpha; \dfrac{D}{6 \cdot tg\alpha} \right) - \begin{array}{l} \textit{для конических обечаек} \\ \textit{с отбортовкой, но не более} \\ \textit{длины конического элемента;} \end{array} \\ \dfrac{D}{6 \cdot tg\alpha} - \begin{array}{l} \textit{для конических обечаек без отбортовки,} \\ \textit{но не более длины конического элемента;} \end{array} \end{array} \right\}, \quad (19)$$

где α – половина угла раствора при вершине конической обечайки, град.

Таблица 9 – Значения модуля продольной упругости

Стали	Модуль продольной упругости $E \cdot 10^{-5}$, *МПа*, при температуре, °*С*													
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Углеродистые и низколегированные стали	1,99	1,91	1,86	1,81	1,76	1,71	1,64	1,55	1,40	–	–	–	–	–
Теплоустойчивые и коррозионностойкие хромистые стали	2,15	2,15	2,05	1,98	1,95	1,90	1,84	1,78	1,71	1,63	1,54	1,40	–	–
Жаропрочные и жаростойкие аустенитные стали	2,00	2,00	1,99	1,97	1,94	1,90	1,85	1,80	1,74	1,67	1,60	1,52	1,43	1,32
Примечание – Для промежуточных расчетных температур стенки модуль продольной упругости определяют линейной интерполяцией двух ближайших значений, указанных в таблице.														

Исполнительную толщину стенки S определяют по формуле (14), а допускаемое наружное давление – по формуле

$$[P]=\frac{[P]_{П}}{\sqrt{1+\left(\frac{[P]_{П}}{[P]_{E}}\right)^{2}}}, \qquad (20)$$

где $[P]_{П}$ – допускаемое давление из условия прочности, МПа;

$[P]_{E}$ – допускаемое давление из условия устойчивости, МПа.

Допускаемое давление из условия прочности определяется по формуле

$$[P]_{П}=\frac{2\cdot[\sigma]\cdot(S-C)}{D+(S-C)}. \qquad (21)$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости определяется по формуле

$$[P]_{E}=\frac{20{,}8\cdot10^{-6}\cdot D\cdot E}{n_{y}\cdot B_{1}\cdot l}\cdot\left[\frac{100\cdot(S-C)}{D}\right]^{2{,}5}, \qquad (22)$$

где

$$B_{1}=min\left\{1{,}0\,;\,9{,}45\cdot\frac{l}{D}\sqrt{\frac{D}{100\cdot(S-C)}}\right\}. \qquad (23)$$

При этом должно выполняться условие $P\le[P]$.

Пример 12

Рассчитать толщину стенки цилиндрической обечайки корпуса вертикального аппарата с приварными эллиптическими днищами и рубашкой (*рисунок 6*) *внутренним диаметром* D_1*=1000 мм. Давление в аппарате – атмосферное, расчетное давление в рубашке –* P_1*=0,63 МПа, материал корпуса – сталь марки Ст3сп5, расчетная температура стенки обечайки t=165 °С, длина цилиндрической обечайки под рубашкой* $l_1=700$ *мм, высота отбортовки эллиптического днища* $h_1=40$ *мм. Прибавку для компенсации коррозии и эрозии принять равной: со стороны рабочей среды –* $C_1'=2$ *мм, со стороны теплоносителя –* $C_1''=1$ *мм.*

Коэффициент запаса устойчивости при расчете сосудов и аппаратов на устойчивость по нижним критическим напряжениям в приделах упругости для рабочих условий принимаем равным $n_y=2{,}4$.

По таблице 9 модуль продольной упругости материала обечайки при расчетной температуре t=165 °С, определяем методом линейной интерполяции, $E = 1{,}85 \cdot 10^5$ *МПа.*

Коэффициент K_1 *определяем по формуле* (17)

$$K_1 = 0{,}36 \frac{n_y \cdot P}{E \cdot 10^{-6}} = 0{,}36 \cdot \frac{2{,}4 \cdot 0{,}63}{1{,}85 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 2{,}94 .$$

Высоту выпуклой части эллиптического днища определяем по формуле

$$H = 0{,}25D = 0{,}25 \cdot 1000 = 250 \text{ мм.}$$

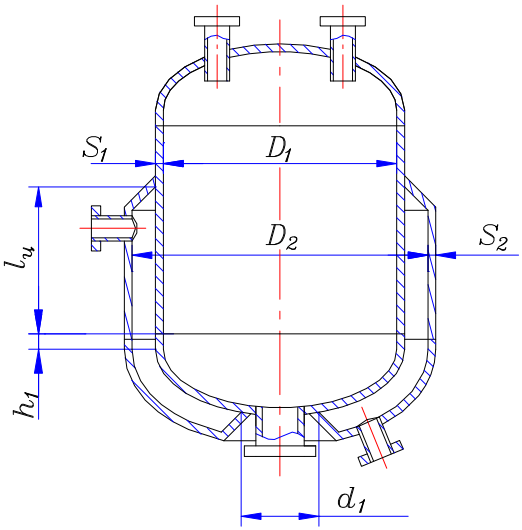


Рисунок 6 – Вертикальный аппарат с U – образной рубашкой

Расчетную длину примыкающего элемента эллиптического днища l_3 *определяем по формуле* (19)

$$l_3 = \frac{H}{3} = \frac{250}{3} = 83{,}3 \text{ мм} .$$

Расчетную длину цилиндрической обечайки определяем по формуле

$$l = l_1 + h_1 + l_3 = 700 + 40 + 83{,}3 = 823{,}3 \text{ мм.}$$

Коэффициент K_3 *определяем по формуле* (18)

$$K_3 = \frac{l}{D} = \frac{823{,}3}{1000} = 0{,}823\,.$$

По номограмме на рисунке 5 определяем коэффициент $K_2 = 0{,}65$.

Расчетную толщину стенки обечайки определяем по формуле (16)

$$S_p = max\left\{ K_2 \cdot D \cdot 10^{-2};\quad \frac{1{,}1\,P \cdot D}{2\,[\sigma]} \right\} =$$

$$= max\left\{ 0{,}65 \cdot 1000 \cdot 10^{-2};\quad \frac{1{,}1 \cdot 0{,}63 \cdot 1000}{2 \cdot 144} \right\} = max\{6{,}5;\ 2{,}4\} = 6{,}5\ мм.$$

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии (*с учетом двусторонней коррозии со стороны рабочей среды и теплоносителя*) *составит*

$$C_1 = C_1' + C_1'' = 2 + 1 = 3\ мм.$$

Прибавка для компенсации минусового допуска по таблице 6 для толщин 8–12 мм составит

$$C_2 = 0{,}8\ \ мм.$$

Сумма прибавок к расчетной толщине стенки обечайки равняется

$$C = C_1 + C_2 = 3 + 0{,}8 = 3{,}8\ \ мм.$$

Исполнительную толщину стенки обечайки S *определяем по формуле* (14)

$$S \geq S_p + C = 6{,}5 + 3{,}8 = 10{,}3\ \ мм.$$

Принимаем исполнительную толщину стенки обечайки равной

$$S = 12\ мм.$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности при $\varphi = 1$ *определяем по формуле* (21)

$$[P]_{II} = \frac{2\,[\sigma] \cdot (S - C)}{D + (S - C)} = \frac{2 \cdot 144 \cdot (12 - 3{,}8)}{1000 + (12 - 3{,}8)} = 2{,}34\ \ МПа.$$

Безразмерный коэффициент B_1 *определяем по формуле* (23)

$$B_1 = min\left\{ 1{,}0;\ 9{,}45\,\frac{D}{l}\sqrt{\frac{D}{100\,(S - C)}} \right\} =$$

$$= min\left\{ 1{,}0;\ 9{,}45 \cdot \frac{1000}{823}\sqrt{\frac{1000}{100 \cdot (12 - 3{,}8)}} \right\} = min\{1;\ 12{,}68\} = 1.$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (*22*)

$$[P]_E = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6}\ D \cdot E}{n_y \cdot B_1 \cdot l} \cdot \left[\frac{100\,(S-C)}{D}\right]^{2{,}5} =$$

$$= \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 1{,}85 \cdot 10^5}{2{,}4 \cdot 1 \cdot 823} \cdot \left[\frac{100 \cdot (12-3{,}8)}{1000}\right]^{2{,}5} = 1{,}18\ МПа.$$

Допускаемое наружное давление рассчитываем по формуле (*20*)

$$[P] = \frac{[P]_П}{\sqrt{1+\left(\frac{[P]_П}{[P]_E}\right)^2}} = \frac{2{,}34}{\sqrt{1+\left(\frac{2{,}34}{1{,}18}\right)^2}} = 1{,}05\ МПа.$$

Условие прочности

$$P = 0{,}63 < [P] = 1{,}05\ \ МПа$$

выполняется.

Условие применения расчетных формул

$$\frac{S-C}{D} = \frac{12-3{,}8}{1000} = 0{,}008 < 0{,}1$$

выполняется.

3.3.2 Обечайки, изготовленные из двухслойной стали

При расчете обечаек из двухслойной стали, нагруженных наружным давлением, по формулам (16, 14, 20) учитывается только основной слой.

Пример 13

Рассчитать толщину стенки цилиндрической обечайки корпуса колонного аппарата с приварными эллиптическими днищами (*рисунок 7*) *внутренним диаметром D=1200 мм, работающего под вакуумом. Остаточное давление в аппарате* $P_{ост} = 0{,}01$ *МПа, расчетная температура стенки аппарата t=100 °С. Материал корпуса аппарата двухслойная сталь Ст3сп+12Х18Н10Т. Длина цилиндрической обечайки* $l_ц = 10000$ *мм, высота отбортовки эллиптического днища* $h_1 = 40$ *мм.*

При расчете на прочность обечайки из двухслойной стали, на-

груженной наружным давлением, учитываем только основной слой.

Расчетное наружное давление в аппарате определяем как разность между атмосферным давлением P_a *и остаточным давлением в аппарате* $P_{ост}$

$$P = P_a - P_{ост} = 0{,}1 - 0{,}01 = 0{,}09 \ \ МПа.$$

Коэффициент запаса устойчивости при расчете сосудов и аппаратов на устойчивость по нижним критическим напряжениям в пределах упругости для рабочих условий принимаем равным $n_y = 2{,}4$.

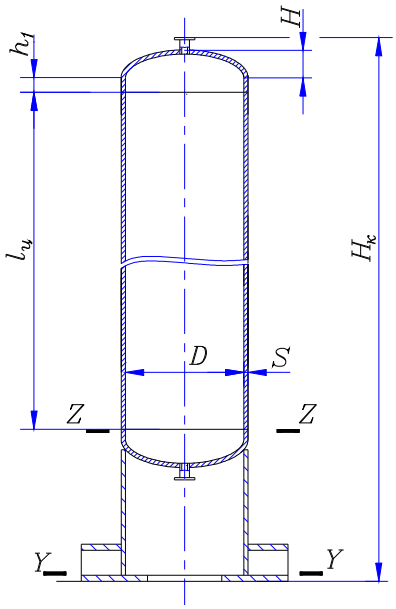


Рисунок 7 – Расчетная схема колонного аппарата

По таблице 9 модуль продольной упругости материала обечайки при расчетной температуре t=100 °C составляет $E = 1{,}91 \cdot 10^5$ *МПа.*

Коэффициент K_1 *определяем по формуле* (17)

$$K_1 = 0{,}36 \frac{n_y \cdot P}{E \cdot 10^{-6}} = 0{,}36 \cdot \frac{2{,}4 \cdot 0{,}09}{1{,}91 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 0{,}407.$$

Высоту выпуклой части эллиптического днища определяем по формуле

$$H = 0{,}25D = 0{,}25 \cdot 1200 = 300 \text{ мм}.$$

Для выпуклых днищ длину примыкающего элемента l_3 *определяем по формуле* (19)

$$l_3 = \frac{H}{3} = \frac{300}{3} = 100 \text{ мм}.$$

Расчетную длину цилиндрической обечайки определяем по формуле

$$l = l_ц + 2\,h_1 + 2\,l_3 = 10000 + 2 \cdot 40 + 2 \cdot 100 = 10280 \text{ мм}.$$

Коэффициент K_3 *определяем по формуле* (18)

$$K_3 = \frac{l}{D} = \frac{10280}{1200} = 8{,}57\,.$$

По номограмме на рисунке 5 определяем коэффициент $K_2 = 0{,}8$.

Расчетную толщину стенки обечайки определяем по формуле (16)

$$S_p = max\left\{K_2 \cdot D \cdot 10^{-2};\quad \frac{1{,}1\,P \cdot D}{2\,[\sigma]}\right\} =$$

$$= max\left\{0{,}8 \cdot 1200 \cdot 10^{-2};\ \frac{1{,}1 \cdot 0{,}09 \cdot 1200}{2 \cdot 149}\right\} = max\{9{,}6;\ 0{,}4\} = 9{,}6 \text{ мм}.$$

В качестве прибавки для компенсации коррозии и эрозии принимаем максимальную толщину плакирующего слоя по таблице 5

$$C_1 = 3 \text{ мм}\,.$$

Исполнительная толщина стенки обечайки учетом прибавки для компенсации коррозии и эрозии составит

$$S \geq S_p + C_1 = 9{,}6 + 3 = 12{,}6 \text{ мм}\,.$$

Прибавка для компенсации минусового допуска для листов толщиной 14 мм по таблице 5 составляет $C_2 = 0{,}98$ *мм.*

Прибавку к расчетной толщине стенки обечайки определяем по формуле

$$C = C_1 + C_2 = 3{,}0 + 0{,}98 = 3{,}98 \text{ мм}.$$

Исполнительную толщину стенки обечайки определяем по формуле (14)

$$S \geq S_p + C = 9{,}6 + 3{,}98 = 13{,}58 \text{ мм}\,.$$

Принимаем исполнительную толщину стенки обечайки по таблице 5

$$S = 14 \ \text{мм}.$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности при $\varphi = 1$ *определяем по формуле* (21)

$$[P]_{П} = \frac{2[\sigma]\cdot(S-C)}{D+(S-C)} = \frac{2\cdot 149\cdot(14-3{,}98)}{1200+(14-3{,}98)} = 2{,}468 \ \text{МПа}.$$

Безразмерный коэффициент B_1 *определяем по формуле* (23)

$$B_1 = \min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\frac{D}{l}\sqrt{\frac{D}{100(S-C)}}\right\} =$$

$$= \min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\cdot\frac{1200}{10280}\sqrt{\frac{1200}{100\cdot(14-3{,}98)}}\right\} = \min\{1;1{,}21\} = 1.$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (22)

$$[P]_E = \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\ D\cdot E}{n_y\cdot B_1\cdot l}\cdot\left[\frac{100(S-C)}{D}\right]^{2{,}5} =$$

$$= \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\cdot 1200\cdot 1{,}91\cdot 10^5}{2{,}4\cdot 1\cdot 10280}\cdot\left[\frac{100\cdot(14-3{,}98)}{1200}\right]^{2{,}5} = 0{,}123 \ \text{МПа}.$$

Допускаемое наружное давление рассчитываем по формуле (20)

$$[P] = \frac{[P]_{П}}{\sqrt{1+\left(\frac{[P]_{П}}{[P]_E}\right)^2}} = \frac{2{,}47}{\sqrt{1+\left(\frac{2{,}47}{0{,}123}\right)^2}} = 0{,}123 \ \text{МПа}.$$

Условие прочности

$$P = 0{,}09 < [P] = 0{,}123 \ \text{МПа}$$

выполняется.

Условие применения расчетных формул

$$\frac{S-C}{D} = \frac{14-4{,}08}{1200} = 0{,}008 < 0{,}1$$

выполняется.

3.4 Гладкие цилиндрические обечайки, работающие под совместным действием нагрузок нескольких видов

В некоторых случаях обечайки аппаратов работают под совместным действием внутреннего избыточного или наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия (например, колонные аппараты). В этом случае толщина стенки обечайки определяется из условия прочности или устойчивости от действия соответствующего давления. Проверку устойчивости обечаек, работающих под совместным действием нескольких видов нагрузок производят по формуле

$$\frac{P}{[P]}+\frac{F}{[F]}+\frac{M}{[M]}+\left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \le 1{,}0 \ , \qquad (24)$$

где P – наружное давление, МПа;

F – осевое сжимающее усилие, Н;

M – изгибающий момент, Н·мм;

Q – поперечное усилие, Н;

$[P]$ – допускаемое наружное давление, МПа, определяемое по формуле (20);

$[F]$ – допускаемое осевое сжимающее усилие, Н;

$[M]$ – допускаемый изгибающий момент, Н·мм;

$[Q]$ – допускаемое поперечное усилие, Н.

Если одна или более из указанных нагрузок отсутствуют, то в формуле (24) соответствующее слагаемое не учитывается.

Допускаемое осевое сжимающее усилие, Н, следует рассчитывать по формуле

$$[F]=\frac{[F]_{II}}{\sqrt{1+\left(\frac{[F]_{II}}{[F]_E}\right)^2}} \ , \qquad (25)$$

где допускаемое осевое сжимающее усилие $[F]_{II}$, Н, из условия прочности

$$[F]_{II}=\pi\cdot(D+S-C)\cdot(S-C)\cdot[\sigma], \qquad (26)$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости $[F]_E$, Н, из условия устойчивости

$$[F]_E = \begin{cases} min([F]_{E1}; [F]_{E2}), & \text{если } l/D \geq 10 \\ [F]_{E1}, & \text{если } l/D < 10 \end{cases}, \quad (27)$$

где $[F]_{E1}$ – допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости, Н;

$[F]_{E2}$ – допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости в пределах упругости, Н.

Допускаемое осевое сжимающее усилие $[F]_{E1}$ определяют по формуле

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot D^2 \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right]^{2,5}, \quad (28)$$

а допускаемое осевое сжимающее усилие $[F]_{E2}$ – по формуле

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot E \cdot (\pi/\lambda)^2}{n_y}, \quad (29)$$

где λ – гибкость элемента.

Гибкость определяют по формуле:

$$\lambda = \frac{2,83 \cdot l_{np}}{D + (S - C)}, \quad (30)$$

где l_{np} – приведенная расчетная длина, мм.

Приведенную расчетную длину l_{np} принимают по таблице 10.

При этом должно выполняться условие $F \leq [F]$.

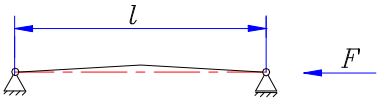
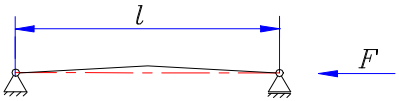
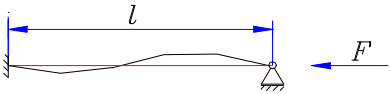
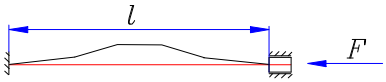
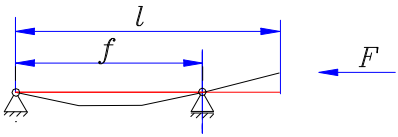
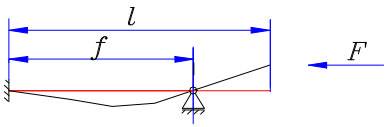
Допускаемый изгибающий момент, Н·мм, рассчитывают по формуле

$$[M] = \frac{[M]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{II}}{[M]_E} \right)^2}}. \quad (31)$$

Допускаемый изгибающий момент $[M]_{II}$, Н·мм, из условия прочности рассчитывают по формуле

$$[M]_{II} = 0,25 D \cdot [F]_{II}. \quad (32)$$

Таблица 10 – Приведенная расчетная длина, мм

Расчетная схема	$\frac{f}{l}$	$l_{пр}$
	–	l
		$2{,}00\ l$
	–	$0{,}70\ l$
	–	$0{,}50\ l$
	0	$2{,}00\ l$
	$0{,}2$	$1{,}73\ l$
	$0{,}4$	$1{,}47\ l$
	$0{,}6$	$1{,}23\ l$
	$0{,}8$	$1{,}06\ l$
	$1{,}0$	$1{,}00\ l$
	0	$2{,}00\ l$
	$0{,}2$	$1{,}70\ l$
	$0{,}4$	$1{,}40\ l$
	$0{,}6$	$1{,}11\ l$
	$0{,}8$	$0{,}85\ l$
	$1{,}0$	$0{,}70\ l$

Допускаемый изгибающий момент $[M]_E$, Н·мм, из условия устойчивости в пределах упругости – по формуле

$$[M]_E = 0{,}285 \cdot D \cdot [F]_{E1}. \qquad (33)$$

При этом должно выполняться условие $M \le [M]$.

Допускаемое поперечное усилие, Н, рассчитывают по формуле

$$[Q] = \frac{[Q]_П}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_П}{[Q]_E}\right)^2}}, \qquad (34)$$

где допускаемое поперечное усилие $[Q]_П$, Н, из условия прочности

$$[Q]_П = 0{,}25 \cdot \pi \cdot D \cdot (S - C) \cdot [\sigma], \qquad (35)$$

а допускаемое поперечное усилие $[Q]_E$, Н, из условия устойчивости в пределах упругости

$$[Q]_E = \frac{2{,}4 \cdot E \cdot (S - C)^2}{n_y} \cdot \left[0{,}18 + 0{,}33\frac{D \cdot (S - C)}{l^2}\right]. \qquad (36)$$

При этом должно выполняться условие $Q \le [Q]$.

Пример 14

Колонный аппарат, установленный на открытой площадке (*рисунок 7*), *работает под совместным действием внутреннего избыточного давления, осевого сжимающего усилия и изгибающего момента от ветровой нагрузки.*

Рабочее давление в аппарате составляет $P_{раб} = 0{,}96$ *МПа*, *внутренний диаметр аппарата* $D = 1200$ *мм, расчетная температура стенки корпуса колонны* $t = 100$ °*C, общая высота аппарата* $H_к = 30000$ *мм, длина цилиндрической обечайки* $l_ц = 27390$ *мм, высота отбортовки эллиптического днища* $h_1 = 25$ *мм. Вылет штуцеров принять равным* $h_ш = 200$ *мм. Уровень жидкости в кубе колонны* $H_c = 1100$ *мм, плотность жидкости в кубе* $\rho_c = 1150$ *кг/м*^{3}. *Материал корпуса колонны – сталь марки Ст3сп5. Коэффициент прочности сварных соединений принять равным* $\varphi_p = 0{,}9$, *прибавку для компенсации коррозии и эрозии –* $C_1 = 1$ *мм.*

Давление в аппарате во время действия предохранительного клапана определяем по формуле (2)

$$P_к = 1{,}15\ P_{раб} = 1{,}15 \cdot 0{,}96 = 1{,}104\ \ МПа.$$

Давление, учитывающее кратковременное повышение его в аппарате при срабатывании предохранительного клапана, без учета гидростатического давления определяем по формуле (3)

$$P_р = 0{,}9\ P_к = 0{,}9 \cdot 1{,}104 = 0{,}994\ \ МПа.$$

Гидростатическое давление среды определяем по формуле (1)

$$P_г = \rho_c \cdot g \cdot H_c \cdot 10^{-6} = 1150 \cdot 9{,}81 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-6} = 0{,}012\ \ МПа.$$

Так как гидростатическое давление среды

$$P_г = 0{,}012 < 0{,}05 \cdot P_{раб} = 0{,}05 \cdot 0{,}96 = 0{,}048\ \ МПа$$

составляет менее 5 % от рабочего давления, то расчетное давление определяем по формуле (4) *без учета гидростатического давления среды*

$$P = P_р = 0{,}994\ \ МПа.$$

Расчетное давление округляем в сторону увеличения $P = 1{,}0$ *МПа.*

По таблице А.1 приложения А определяем значения допускаемых напряжений для стали марки Ст3сп5 при расчетной температуре t=100 °C $[\sigma]$=149 *МПа и при температуре* $t_u = 20$ °C $[\sigma]_{20} = 154$ *МПа.*

Пробное давление определяем по формуле (5).

$$P_{пр} = 1{,}25\ P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}25 \cdot 1{,}0 \cdot \frac{154}{149} = 1{,}29\ \ МПа.$$

Гидростатическое давление воды в условиях испытания определяем по формуле (1), *принимая плотность воды равной* $\rho_в = 1000$ *кг/м*^{3}, *а общую высоту столба жидкости в аппарате, равную высоте цилиндрической обечайки с учетом высоты двух эллиптических днищ со штуцерами*

$$H_в = l_ц + 2\left(h_1 + H + h_ш\right) = 27390 + 2\left(25 + 300 + 200\right) =$$
$$= 28440\ мм = 28{,}44\ м;$$

$$P_{г\ воды} = \rho_в \cdot g \cdot H_в \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 28{,}44 \cdot 10^{-6} = 0{,}279\ \ МПа.$$

Так как гидростатическое давление воды

$$P_{г\ воды} = 0{,}279 > 0{,}05\ P_{пр} = 0{,}05 \cdot 1{,}29 = 0{,}065\ МПа$$

составляет более 5 % от пробного, то расчетное давление в условиях испытания $P_и$ *принимаем равным пробному давлению с учетом гидростатического давления воды*

$$P_и = P_{пр} + P_{г\ воды} = 1{,}29 + 0{,}279 = 1{,}569\ \ МПа.$$

Проверяем необходимость расчета на прочность в условиях испытания

$$P_и = 1{,}569 > 1{,}35\ P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}35 \cdot 1{,}0 \cdot \frac{154}{149} = 1{,}4\ МПа\ .$$

Так как расчетное давление в условиях испытания больше расчетного давления в рабочих условиях, умноженного на $1{,}35\,[\sigma]_{20}/[\sigma]$, *то расчет на прочность необходимо проводить не только для рабочих условий, но и для условий испытания.*

Допускаемое напряжение в условиях испытания определяем по формуле (9). *По таблице А.6 приложения А определяем предел текучести для стали марки Ст3сп5 при температуре испытания* $t_и = 20\ °C\ \ R_e^{20} = 250\ \ МПа$. *Коэффициент запаса прочности при гидравлических испытаниях определяем по таблице 1,* $n_т = 1{,}1$.

$$[\sigma]_и = \frac{R_e^{20}}{n_т} = \frac{250}{1{,}1} = 227\ \ МПа.$$

Расчетную толщину стенки обечайки определяем по формуле (13):

– *для рабочих условий*

$$S'_p = \frac{P \cdot D}{2[\sigma] \cdot \varphi_p - P} = \frac{1{,}0 \cdot 1200}{2 \cdot 149 \cdot 0{,}9 - 1{,}0} = 4{,}49\ \ мм;$$

– *для условий испытания*

$$S''_p = \frac{P_и \cdot D}{2[\sigma]_и \cdot \varphi_p - P_и} = \frac{1{,}569 \cdot 1200}{2 \cdot 227 \cdot 0{,}9 - 1{,}569} = 4{,}63\ \ мм.$$

С учетом прибавки для компенсации коррозии и эрозии толщина стенки обечайки по большему из полученных значений S''_p *составит*

$$S \geq S''_p + C_1 = 4{,}63 + 1{,}0 = 5{,}63\ \ мм.$$

Принимаем прибавку для компенсации минусового допуска $C_2 = 0{,}8$ *мм для толщины стального листа 8 мм по таблице 6.*

Сумма прибавок к расчетной толщине стенки обечайки равна

$$C = C_1 + C_2 = 1 + 0{,}8 = 1{,}8 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки определяем по формуле (14) по большему из значений S_p''

$$S \geq S_p'' + C = 4{,}63 + 1{,}8 = 6{,}43 \text{ мм.}$$

Принимаем исполнительную толщину стенки обечайки равной

$$S = 8 \text{ мм.}$$

Допускаемое давление для принятого значения исполнительной толщины стенки обечайки рассчитываем по формуле (15):

– для рабочих условий

$$[P] = \frac{2[\sigma]\cdot\varphi_p\cdot(S-C)}{D+(S-C)} = \frac{2\cdot 149\cdot 0{,}9\cdot(8-1{,}8)}{1200+(8-1{,}8)} = 1{,}37 \text{ МПа;}$$

– для условий испытания

$$[P]_u = \frac{2[\sigma]_u\cdot\varphi_p\cdot(S-C)}{D+(S-C)} = \frac{2\cdot 227\cdot 0{,}9\cdot(8-1{,}8)}{1200+(8-1{,}8)} = 2{,}1 \text{ МПа.}$$

Условия прочности:

– для рабочих условий

$$P = 1{,}0 < [P] = 1{,}37 \text{ МПа;}$$

– для условий испытания

$$P_u = 1{,}569 < [P]_u = 2{,}1 \text{ МПа}$$

выполняются.

Условие применения расчетных формул

$$\frac{S-C}{D} = \frac{8-1{,}8}{1200} = 0{,}005 < 0{,}1$$

выполняется.

Для колонны, установленной на открытой площадке, с соотношением $H_к/D = 30000/1200 = 25 > 10$ *, необходимо учитывать ветровую нагрузку.*

Масса колонны при исполнительной толщине стенки обечайки,

равной $S = 8$ *мм :*

– в рабочих условиях 14675 кг;

– в условиях испытаний 43420 кг.

В результате расчета колонны на ветровую нагрузку (*в данном примере не приводится*) *определены изгибающие моменты в сечении Z–Z, которые составляют:*

– в рабочих условиях $7{,}38 \cdot 10^8$ *Н·мм;*

– в условиях испытаний $7{,}50 \cdot 10^8$ *Н·мм.*

Обечайка вертикального колонного аппарата кроме внутреннего избыточного давления нагружена осевым сжимающим усилием от собственного веса и изгибающим моментом от действия ветровой нагрузки.

Проверку устойчивости обечайки, работающей под действием нескольких видов нагрузок, производим по формуле (*24*), *в которой принимаем* $P=0$, *так как действует только внутреннее избыточное давление, и поперечное усилие* $Q=0$. *Значение осевого сжимающего усилия* F *в сечении Z–Z принимаем равным весу колонны в рабочих условиях, т.е.*

$$F = m \cdot g = 14675 \cdot 9{,}81 = 144000 \ \ H,$$

где m *– масса аппарата в рабочих условиях, кг;*

g *– ускорение свободного падения,* $м/с^2$.

Производим проверку устойчивости корпуса колонного аппарата для рабочих условий и условий испытания.

Определяем допускаемое осевое сжимающее усилие и допускаемый изгибающий момент для рабочих условий и условий испытания.

Модуль продольной упругости для стали марки Ст3сп5 в рабочих условиях (*при температуре* $t=100$ °*C*) *по таблице 9 составляет* $E = 1{,}91 \cdot 10^5$ *МПа.*

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (*28*)

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \ D^2 \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100\,(S-C)}{D}\right]^{2{,}5} =$$

$$= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 1200^2 \cdot 1{,}91 \cdot 10^5}{2{,}4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (8-1{,}8)}{1200}\right]^{2{,}5} = 6{,}82 \cdot 10^6 \ H.$$

Приведенную расчетную длину корпуса колонного аппарата принимаем по таблице 10

$$l_{пр} = 2{,}0 \cdot l = 2{,}0\ H_к = 2 \cdot 30000 = 6 \cdot 10^4\ \text{мм}.$$

Гибкость обечайки определяем по формуле (30)

$$\lambda = \frac{2{,}83\, l_{пр}}{D + (S - C)} = \frac{2{,}83 \cdot 6 \cdot 10^4}{1200 + (8 - 1{,}8)} = 140{,}8.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (29)

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot E \cdot (\pi/\lambda)^2}{n_y} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot (1200 + 8 - 1{,}8) \cdot (8 - 1{,}8) \cdot 191 \cdot 10^3 \cdot (3{,}14/140{,}8)^2}{2{,}4} = 9{,}31 \cdot 10^5\ H.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости в пределах упругости при $l/D \geq 10$ *определяем по формуле* (27)

$$[F]_E = min\ \{[F]_{E1};\ [F]_{E2}\} = min\left\{6{,}82 \cdot 10^6;\ 9{,}31 \cdot 10^5\right\} =$$

$$= 9{,}31 \cdot 10^5\ H.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности определяем по формуле (26)

$$[F]_П = \pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\sigma] =$$

$$= 3{,}14 \cdot (1200 + 8 - 1{,}8) \cdot (8 - 1{,}8) \cdot 149 = 3{,}5 \cdot 10^6\ H.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие для рабочих условий определяем по формуле (25)

$$[F] = \frac{[F]_П}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[F]_П}{[F]_E}\right)^2}} = \frac{3{,}5 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{3{,}5 \cdot 10^6}{9{,}31 \cdot 10^5}\right)^2}} = 9{,}0 \cdot 10^5\ H.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности для рабочих условий рассчитываем по формуле (32)

$$[M]_П = 0{,}25\ D \cdot [F]_П = 0{,}25 \cdot 1200 \cdot 3{,}5 \cdot 10^6 = 1{,}05 \cdot 10^9\ H \cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости для рабочих условий рассчитываем по формуле (33)

$$[M]_E = 0{,}285\, D \cdot [F]_{E1} = 0{,}285 \cdot 1200 \cdot 6{,}82 \cdot 10^6 = 2{,}33 \cdot 10^9\ Н \cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент для рабочих условий определяем по формуле (31)

$$[M] = \frac{[M]_{П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{П}}{[M]_E}\right)^2}} = \frac{1{,}05 \cdot 10^9}{\sqrt{1 + \left(\frac{1{,}05 \cdot 10^9}{2{,}33 \cdot 10^9}\right)^2}} = 9{,}57 \cdot 10^8\ Н \cdot мм.$$

Проверяем устойчивость обечайки, работающей под совместным действием осевого сжимающего усилия и изгибающего момента от ветровой нагрузки для рабочих условий по формуле (24)

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = \frac{144000}{9 \cdot 10^5} + \frac{7{,}38 \cdot 10^8}{9{,}57 \cdot 10^8} = 0{,}93 < 1{,}0\ .$$

Условие устойчивости выполняется.

Для условий испытания при температуре $t_u = 20\ ^\circ C$ *модуль продольной упругости для стали марки Ст3сп5 по таблице 9 составляет* $E = 1{,}99 \cdot 10^5\ МПа$.

Определяем допускаемое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости $[F]_{E1}$ *в условиях испытаний по формуле* (28)

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6}\ D^2 \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100\,(S-C)}{D}\right]^{2{,}5} =$$

$$= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 1200^2 \cdot 1{,}99 \cdot 10^5}{1{,}8} \cdot \left[\frac{100 \cdot (8 - 1{,}8)}{1200}\right]^{2{,}5} = 9{,}47 \cdot 10^6\ Н.$$

Определяем допускаемое сжимающее усилие из условия общей устойчивости в пределах упругости $[F]_{E2}$ *в условиях испытаний по формуле* (29)

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot E \cdot (\pi/\lambda)^2}{n_y} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot (1200 + 8 - 1{,}8) \cdot (8 - 1{,}8) \cdot 1{,}99 \cdot 10^5 \cdot (3{,}14/140{,}8)^2}{1{,}8} =$$

$$= 1{,}29 \cdot 10^6 \, H.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в пределах упругости из условия устойчивости при $l/D > 10$ в условиях испытаний определяем по формуле (*27*)

$$[F]_E = min \left\{ [F]_{E1}; [F]_{E2} \right\} = min \left\{ 9{,}47 \cdot 10^6 ; 1{,}29 \cdot 10^6 \right\} =$$

$$= 1{,}29 \cdot 10^6 \, H.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности в условиях испытаний определяем по формуле (*26*)

$$[F]_{П} = \pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\sigma]_u =$$

$$= 3{,}14 \cdot (1200 + 8 - 1{,}8) \cdot (8 - 1{,}8) \cdot 227 = 5{,}33 \cdot 10^6 \, H.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в условиях испытаний определяем по формуле (*25)*

$$[F] = \frac{[F]_{П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{П}}{[F]_E} \right)^2}} = \frac{5{,}33 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + \left(\frac{5{,}33 \cdot 10^6}{1{,}29 \cdot 10^6} \right)^2}} = 1{,}26 \cdot 10^6 \, H.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности в условиях испытаний рассчитываем по формуле (*32*)

$$[M]_{П} = 0{,}25 \, D \cdot [F]_{П} = 0{,}25 \cdot 1200 \cdot 5{,}33 \cdot 10^6 = 1{,}6 \cdot 10^9 \, Н \cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в условиях испытаний рассчитываем по формуле (*33*)

$$[M]_E = 0{,}285 \, D \cdot [F]_{E1} = 0{,}285 \cdot 1200 \cdot 9{,}47 \cdot 10^6 = 3{,}23 \cdot 10^9 \, Н \cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент в условиях испытаний определяем по формуле (*31*)

$$[M] = \frac{[M]_{П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{П}}{[M]_E} \right)^2}} = \frac{1{,}6 \cdot 10^9}{\sqrt{1 + \left(\frac{1{,}6 \cdot 10^9}{3{,}23 \cdot 10^9} \right)^2}} = 1{,}43 \cdot 10^9 \, Н \cdot мм.$$

Проверяем устойчивость обечайки, работающей под совместным действием осевого сжимающего усилия и изгибающего момента для условий испытаний по формуле (24)

$$\frac{F}{[F]}+\frac{M}{[M]}=\frac{144000}{1{,}26\cdot 10^{6}}+\frac{7{,}5\cdot 10^{8}}{1{,}43\cdot 10^{9}}=0{,}64<1{,}0\,.$$

Условие устойчивости выполняется.

Пример 15

Рассчитать толщину стенки цилиндрической обечайки корпуса колонного аппарата (*рисунок 7*), *установленного на открытой площадке и работающего под вакуумом. Остаточное давление в аппарате* $P_{ост}=0{,}01$ *МПа, расчетная температура стенки обечайки t=100 °С. Внутренний диаметр аппарата D=1200 мм, общая высота колонны* $H_к=30000$ *мм, длина цилиндрической обечайки* $l_ц=27350$ *мм, высота цилиндрической отбортовки эллиптического днища* $h_1=40$ *мм. Вылеты штуцеров принять равными* $h_ш=200$ *мм. Материал корпуса колонного аппарата – сталь марки Ст3сп5. Прибавку для компенсации коррозии и эрозии принять равной* $C_1=1$ *мм, коэффициент прочности сварных швов –* $\varphi_p=0{,}9$.

Расчетное наружное давление в аппарате определяем как разность между атмосферным давлением P_a *и остаточным давлением в аппарате* $P_{ост}$

$$P=P_a-P_{ост}=0{,}1-0{,}01=0{,}09\ \ МПа.$$

При определении пробного давления для сосудов, работающих под вакуумом, расчетное давление в формуле (5) *принимаем равным P= 0,1 МПа. По таблице А.1 приложения А определяем допускаемые напряжения для стали марки Ст3сп5:*

– *при расчетной температуре t=100 °С* $[\sigma]=149$ *МПа;*

– *при температуре испытания* $t_и=20$ *°С* $[\sigma]=154$ *МПа.*

Пробное давление определяем по формуле (5)

$$P_{пр}=1{,}25\,P\,\frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}=1{,}25\cdot 0{,}1\cdot\frac{154}{149}=0{,}13\ МПа.$$

Высоту выпуклой части эллиптического днища вычисляем по формуле

$$H = 0{,}25\ D = 0{,}25 \cdot 1200 = 300\ мм\ .$$

Гидростатическое давление воды в аппарате определяем по формуле (1). *Плотность воды составляет* $\rho_в = 1000\ кг/м^3$, *общая высота столба воды в аппарате равна высоте цилиндрической обечайки с учетом высоты двух эллиптических днищ со штуцерами*

$$H_в = l_ц + 2\left(h_1 + H + h_ш\right) = 27350 + 2 \cdot \left(40 + 300 + 200\right) =$$

$$= 28430\ мм = 28{,}43\ м;$$

$$P_{г\ воды} = \rho_в \cdot g \cdot H_в \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 28{,}43 \cdot 10^{-6} = 0{,}279\ \ МПа.$$

Гидростатическое давление воды в аппарате

$$P_{г\ воды} = 0{,}279 > 0{,}05\,P_{пр} = 0{,}05 \cdot 0{,}13 = 0{,}0065\ \ МПа$$

составляет более 5 % от пробного, то расчетное давление в условиях испытаний $P_и$ *принимаем равным пробному давлению с учетом гидростатического давления воды*

$$P_и = P_{пр} + P_{г\ воды} = 0{,}13 + 0{,}279 = 0{,}409\ \ МПа.$$

Проверяем условие необходимости расчета на прочность в условиях испытания

$$P_и \le 1{,}35 \cdot P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]};$$

$$P_и = 0{,}409 > 1{,}35 \cdot 0{,}1 \cdot \frac{154}{149} = 0{,}139\ МПа.$$

Условие не выполняется, следовательно, требуется проводить расчет на прочность для рабочих условий и условий испытаний.

По формуле (17) *определяем коэффициент* K_1, *принимая коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий* $n_y = 2{,}4$, *а модуль продольной упругости материала обечайки при расчетной температуре определяем по таблице 9.*

$$K_1 = 0{,}36\ \frac{n_y \cdot P}{E \cdot 10^{-6}} = 0{,}36 \cdot \frac{2{,}4 \cdot 0{,}09}{1{,}91 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}} = 0{,}41\ .$$

Длину примыкающего элемента l_3 *для выпуклых днищ определяем по формуле* (19)

$$l_3 = \frac{H}{3} = \frac{300}{3} = 100\ мм.$$

Расчетную длину цилиндрической обечайки определяем по формуле

$$l = l_ц + 2\,h_1 + 2\,l_3 = 27350 + 2 \cdot 40 + 2 \cdot 100 = 27630 \ \ мм.$$

Коэффициент K_3 *определяем по формуле* (18)

$$K_3 = \frac{l}{D} = \frac{27630}{1200} = 23{,}03.$$

По номограмме на рисунке 5 определяем коэффициент $K_2 = 0{,}8$.

Расчетную толщину стенки обечайки определяем по формуле (16)

$$S_p = max\left\{ K_2 \cdot D \cdot 10^{-2};\quad \frac{1{,}1\,P \cdot D}{2\,[\sigma]} \right\} =$$

$$= max\left\{ 0{,}8 \cdot 1200 \cdot 10^{-2};\ \frac{1{,}1 \cdot 0{,}09 \cdot 1200}{2 \cdot 149} \right\} = max\{9{,}6;\ 0{,}4\} = 9{,}6 \ мм.$$

По таблице А.6 приложения А определяем предел текучести материала обечайки при температуре $t = 20\,°C$, $R_e^{20} = 250$ *МПа. Коэффициент запаса прочности при гидравлических испытаниях по таблице* (1) *равняется* $n_т = 1{,}1$. *Допускаемое напряжение в условиях испытаний определяем по формуле* (9)

$$[\sigma]_u = \frac{R_e^{20}}{n_т} = \frac{250}{1{,}1} = 227 \ \ МПа.$$

Для условий испытания расчетную толщину стенки определяем по формуле (13)

$$S_p = \frac{P_u \cdot D}{2\,[\sigma]_u \cdot \varphi - P_u} = \frac{0{,}409 \cdot 1200}{2 \cdot 227 \cdot 0{,}9 - 0{,}409} = 1{,}2 \ \ мм.$$

Исполнительную толщину стенки обечайки без учета прибавки для компенсации минусового допуска определяем по формуле (14) *по большему из значений* S_p *с учетом прибавок на коррозию и эрозию* C_1

$$S \geq S_p + C_1 = 9{,}6 + 1 = 10{,}6 \ \ мм.$$

Определяем исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки с учетом прибавки на минусовой допуск $C_2 = 0{,}8$ *мм для листа толщиной 12 мм*

$$S \geq S_p + C_1 + C_2 = 9{,}6 + 1 + 0{,}8 = 11{,}4 \ \ мм.$$

Принимаем исполнительную толщину стенки обечайки равной

$S = 12$ *мм.*

Проверяем необходимость учета прибавки для компенсации минусового допуска стального листа толщиной 12 мм

$$C_2 = 0{,}8 > 0{,}05 \cdot S = 0{,}05 \cdot 12 = 0{,}6 \text{ мм.}$$

Прибавку учитываем, так как она составляет больше 5 % от толщины листа.

Сумма прибавок составляет

$$C = C_1 + C_2 = 1 + 0{,}8 = 1{,}8 \text{ мм.}$$

Определяем допускаемое давление из условия прочности $[P]_{II}$ *по формуле* (21)

$$[P]_{II} = \frac{2[\sigma]\cdot(S-C)}{D+(S-C)} = \frac{2\cdot 149\cdot(12-1{,}8)}{1200+(12-1{,}8)} = 2{,}51 \text{ МПа.}$$

Безразмерный коэффициент B_1 *определяем по формуле* (23)

$$B_1 = min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\frac{D}{l}\sqrt{\frac{D}{100(S-C)}}\right\} =$$

$$= min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\frac{1200}{27630}\sqrt{\frac{1200}{100(12-1{,}8)}}\right\} = min\{1;\ 0{,}445\} = 0{,}445.$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости $[P]_E$ *определяем по формуле* (22)

$$[P]_E = \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\ D\cdot E}{n_y\cdot B_1\cdot l}\cdot\left[\frac{100(S-C)}{D}\right]^{2{,}5} =$$

$$= \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\cdot 1200\cdot 1{,}91\cdot 10^5}{2{,}4\cdot 0{,}445\cdot 27630}\cdot\left[\frac{100(12-1{,}8)}{1200}\right]^{2{,}5} = 0{,}108 \text{ МПа.}$$

Допускаемое наружное давление в рабочих условиях определяем по формуле (20)

$$[P] = \frac{[P]_{II}}{\sqrt{1+\left(\frac{[P]_{II}}{[P]_E}\right)^2}} = \frac{2{,}51}{\sqrt{1+\left(\frac{2{,}51}{0{,}108}\right)^2}} = 0{,}107 \text{ МПа.}$$

Условие прочности в рабочих условиях

$$P = 0{,}09 < [P] = 0{,}107 \text{ МПа}$$

выполняется.

Для принятого значения исполнительной толщины стенки обечайки рассчитываем допускаемое внутреннее избыточное давление в условиях испытаний по формуле (*15*)

$$[P]=\frac{2[\sigma]_u\cdot\varphi_p\cdot(S-C)}{D+(S-C)}=\frac{2\cdot 227\cdot 0{,}9\cdot(12-1{,}8)}{1200+(12-1{,}8)}=3{,}44\ \ МПа.$$

Условие прочности в условиях испытаний

$$P=0{,}409<[P]=3{,}44\ \ МПа$$

выполняется.

Условие применения расчетных формул

$$\frac{S-C}{D}=\frac{12-1{,}8}{1200}=0{,}0085<0{,}1$$

выполняется.

Для колонного аппарата, установленного на открытой площадке, с соотношением $H_к/D>10$ *необходимо учитывать ветровую нагрузку.*

Масса колонны при толщине стенки обечайки равной $S=12$ *мм :*

– в рабочих условиях 18070 кг;

– в условиях испытаний 46820 кг.

В результате расчета колонны на ветровую нагрузку (*в данном примере не приводится*) *определены изгибающие моменты в сечении Z–Z, которые составляют:*

– в рабочих условиях $7{,}45\cdot 10^8$ *Н·мм;*

– в условиях испытаний $7{,}52\cdot 10^8$ *Н·мм.*

Проверку устойчивости обечайки, работающей под действием наружного давления, осевого сжимающего усилия и изгибающего момента, производим по формуле (*24*), *в которой принимаем поперечное усилие Q=0. Осевое сжимающее усилие* F *в сечении Z–Z принимаем равным весу колонны в рабочих условиях, т.е.*

$$F=m\cdot g=18070\cdot 9{,}81=177000\ Н,$$

где m *– масса аппарата в рабочих условиях, кг;*

g *– ускорение свободного падения,* $м/с^2$.

Производим проверку устойчивости корпуса колонного аппарата для рабочих условий и условий испытаний.

Определяем допускаемое осевое сжимающее усилие и допускаемый изгибающий момент для рабочих условий.

Модуль продольной упругости для стали марки Ст3сп5 для рабочих условий (при температуре t=100 °С) определяем по таблице 9, $E = 1{,}91 \cdot 10^5$ *МПа.*

Допускаемое осевое сжимающее усилие определяем из условия местной устойчивости в пределах упругости по формуле (28)

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6}\ D^2 \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100\,(S-C)}{D}\right]^{2{,}5} =$$

$$= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 1200^2 \cdot 1{,}91 \cdot 10^5}{2{,}4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (12-1{,}8)}{1200}\right]^{2{,}5} = 2{,}37 \cdot 10^7\ Н.$$

Приведенную расчетную длину определяем по таблице 10

$$l_{пр} = 2{,}0\ l = 2\ H_к = 2 \cdot 30000 = 6 \cdot 10^4\ мм.$$

Гибкость обечайки определяем по формуле (30)

$$\lambda = \frac{2{,}83\ l_{пр}}{D + (S-C)} = \frac{2{,}83 \cdot 6 \cdot 10^4}{1200 + (12-1{,}8)} = 140{,}3.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (29)

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + S - C) \cdot (S-C) \cdot E \cdot (\pi/\lambda)^2}{n_y} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot (1200 + 12 - 1{,}8) \cdot (12-1{,}8) \cdot 1{,}91 \cdot 10^5 \cdot (3{,}14/140{,}3)^2}{2{,}4} =$$

$$= 1{,}55 \cdot 10^6\ Н.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (27)

$$[F]_E = min\ \{[F]_{E1}; [F]_{E2}\} = min\left\{2{,}37 \cdot 10^7;\ 1{,}55 \cdot 10^6\right\} = 1{,}55 \cdot 10^6\ Н.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности определяем по формуле (26)

$$[F]_П = \pi \cdot (D + S - C) \cdot (S-C) \cdot [\sigma] =$$

$$= 3{,}14 \cdot (1200 + 12 - 1{,}8) \cdot (12-1{,}8) \cdot 149 = 5{,}78 \cdot 10^6\ Н.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие в рабочих условиях опре-

деляем по формуле (*25*)

$$[F]=\frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1+\left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_E}\right)^2}}=\frac{5{,}78\cdot 10^6}{\sqrt{1+\left(\frac{5{,}78\cdot 10^6}{1{,}55\cdot 10^6}\right)^2}}=1{,}5\cdot 10^6\ H.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности рассчитываем по формуле (*32*)

$$[M]_{\Pi}=0{,}25\ D\cdot[F]_{\Pi}=0{,}25\cdot 1200\cdot 5{,}78\cdot 10^6=1{,}73\cdot 10^9\ H\cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости рассчитываем по формуле (*33*)

$$[M]_E=0{,}285\ D\cdot[F]_{E1}=0{,}285\cdot 1200\cdot 2{,}37\cdot 10^7=8{,}09\cdot 10^9\ H\cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент в рабочих условиях определяем по формуле (*31*)

$$[M]=\frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1+\left(\frac{[M]_{\Pi}}{[M]_E}\right)^2}}=\frac{1{,}73\cdot 10^9}{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}73\cdot 10^9}{8{,}09\cdot 10^9}\right)^2}}=1{,}7\cdot 10^9\ H\cdot мм.$$

Проверяем устойчивость обечайки, которая находится под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия от собственного веса и изгибающего момента от ветровой нагрузки, для рабочих условий по формуле (*24*).

$$\frac{P}{[P]}+\frac{F}{[F]}+\frac{M}{[M]}=\frac{0{,}09}{0{,}107}+\frac{177000}{1{,}5\cdot 10^6}+\frac{7{,}45\cdot 10^8}{1{,}7\cdot 10^9}=1{,}4>1{,}0\ .$$

Условие устойчивости не выполняется, поэтому необходимо увеличить толщину стенки обечайки до следующей стандартной толщины листа и расчеты повторить до выполнения условия устойчивости, после чего проверить условие устойчивости в условиях испытания.

3.5 Цилиндрические обечайки, подкрепленные кольцами жесткости

С целью увеличения жесткости обечайки во многих случаях экономически целесообразно устанавливать специальные кольца жесткости. Это позволяет снизить толщину стенки обечайки, а следователь-

но, металлоемкость аппарата, что особенно эффективно при изготовлении аппаратов из дорогих и дефицитных коррозионностойких сталей. Кольца жесткости могут быть установлены как снаружи, так и внутри аппарата. Их поперечное сечение может быть различной формы. Наиболее широкое применение получили кольца прямоугольного сечения, привариваемые к наружной поверхности обечайки.

В настоящих методических указаниях рассматривается расчет на устойчивость цилиндрических обечаек, подкрепленных кольцами жесткости, применяемых в аппаратах, работающих под внутренним избыточным давлением или под наружным давлением (вакуумом).

Расчетная схема цилиндрической обечайки, подкрепленной кольцами жесткости, приведена на рисунке 8.

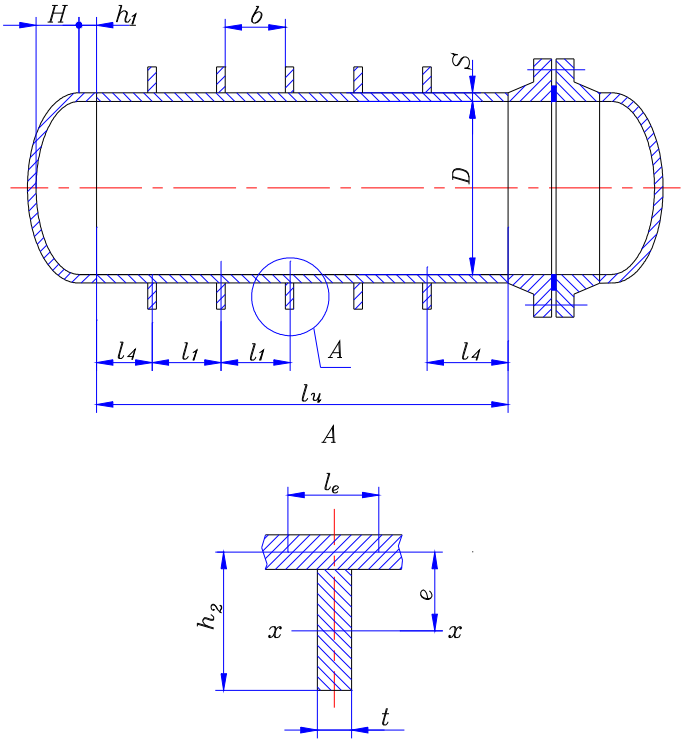


Рисунок 8 – Цилиндрическая обечайка, подкрепленная кольцами жесткости

3.5.1 Цилиндрические обечайки, подкрепленные кольцами жесткости, работающие под внутренним давлением

Необходимость установки колец жесткости при внутреннем избыточном давлении определяют по коэффициенту K_4. Для заданных расчетного давления P и толщины S коэффициент K_4 рассчитывают по формуле

$$K_4 = \frac{P \cdot (D + S - C)}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] \cdot (S - C)} - 1. \qquad (37)$$

Если $K_4 \le 0$, то укрепления кольцами жесткости не требуется.

Если значение коэффициента K_4 находится в диапазоне $0 \le K_4 \le 2 \cdot \varphi_т / \varphi_p - 1$, то для определения расстояния b между двумя соседними кольцами жесткости используют формулу

$$b \le \sqrt{D \cdot (S - C) \cdot \left[\frac{2}{K_4} - \frac{\varphi_p}{\varphi_т} \cdot \left(1 + \frac{1}{K_4} \right) \right]}, \qquad (38)$$

где $\varphi_т$ – коэффициент прочности кольцевого сварного шва.

Площадь поперечного сечения кольца жесткости $A_к$ определяют по формуле

$$A_к \ge l_1 \cdot (S - C) \frac{[\sigma] \cdot \varphi_p}{[\sigma]_к \cdot \varphi_к} \cdot K_4, \qquad (39)$$

где l_1 – расстояние между двумя кольцами жесткости по осям, проходящим через центр тяжести поперечного сечения колец жесткости, мм;

$[\sigma]_к$ – допускаемое напряжение для кольца жесткости при расчетной температуре, МПа;

$\varphi_к$ – коэффициент прочности сварных швов кольца жесткости.

Если значение коэффициента $K_4 \ge 2 \cdot \frac{\varphi_т}{\varphi_p} - 1$, то толщину стенки обечайки необходимо увеличить до такого размера, чтобы выполнялось следующее условие

$$0 < K_4 < 2 \cdot \frac{\varphi_т}{\varphi_p} - 1. \qquad (40)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление следует определять из условия

$$[P] = min\{[P]_1; [P]_2\}. \quad (41)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление $[P]_1$, определяемое из условий прочности всей обечайки, следует рассчитывать по формуле

$$[P]_1 = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p (S - C) + 2 \cdot \frac{A_к}{l_1} \cdot [\sigma]_к \cdot \varphi_к}{D + (S - C)}. \quad (42)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление $[P]_2$, определяемое из условий прочности обечайки между двумя соседними кольцами жесткости, следует рассчитывать по формуле

$$[P]_2 = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_т \cdot (S - C)}{D + (S - C)} \cdot \frac{2 + \lambda_n^2}{1 + \frac{\varphi_т \cdot \lambda_n^2}{\varphi_p}}, \quad (43)$$

где

$$\lambda_n^2 = \frac{b^2}{D \cdot (S - C)}. \quad (44)$$

3.5.2 Цилиндрические обечайки, подкрепленные кольцами жесткости, работающие под наружным давлением (вакуумом)

Рекомендуемый профиль колец жесткости и максимальное расстояние между ними для аппаратов, работающих под вакуумом, приведены в таблице 11.

Для определения толщины стенки S или расстояния между кольцами жесткости b при заданном давлении P используют номограмму на рисунке 5, при этом полагают $l = b$.

Площадь поперечного сечения кольца жесткости определяют по конструктивным соображениям (таблица 11), при этом должно выполняться условие

$$I \geq I_p, \quad (45)$$

где I – эффективный момент инерции расчетного поперечного сечения кольца жесткости, мм^4;

I_p – расчетный эффективный момент инерции кольца жесткости, мм^4.

Таблица 11 – Рекомендуемый профиль колец жесткости ($t \times h$) и максимальное расстояние между ними (l_{max}) для аппаратов, работающих под вакуумом

В миллиметрах

Высота аппарата	Расстояние/ профиль колец	Внутренний диаметр аппарата													
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200	3400	3600
10000	l_{max}	2800		1600		2500									
	$t \times h$	8×40		10×60											
15000	l_{max}	1900		1500		2500		3500		4800		6000			
	$t \times h$	8×50		10×60		12×70		14×80		16×90		18×100			
20000	l_{max}			1200		2000		3000		4400		5000		6000	
	$t \times h$			12×70		14×80		18×100			18×110		20×110	20×120	
30000	l_{max}						1400	2400	3500			4600		5400	
	$t \times h$						18×110	20×110		20×120		20×130		20×140	
40000	l_{max}									2600		3800		4900	
	$t \times h$									20×140		25×150		28×160	

Эффективный момент инерции I расчетного поперечного сечения кольца жесткости определяют по формуле

$$I = I_к + \frac{l_1 \cdot (S - C)^3}{10{,}9} + e^2 \cdot \frac{A_к \cdot l_e \cdot (S - C)}{A_к + l_e \cdot (S - C)}\ , \qquad (46)$$

где $I_к$ – момент инерции выбранного профиля кольца жесткости, мм^4;

l_1 – расстояние между двумя кольцами жесткости по осям, проходящим через центр тяжести поперечного сечения колец жесткости, мм;

e – расстояние между центром тяжести поперечного сечения кольца жесткости и срединной поверхностью обечайки, мм;

$A_к$ – площадь поперечного сечения кольца жесткости, мм^2;

l_e – эффективная длина стенки обечайки, мм.

Момент инерции поперечного сечения кольца жесткости прямоугольной формы определяется по формуле

$$I_к = \frac{t \cdot h^3}{12}\,, \qquad (47)$$

где t – ширина поперечного сечения кольца жесткости, мм;

h – высота поперечного сечения кольца жесткости, мм.

Эффективную длину стенки обечайки определяют по формуле

$$l_e = min\left\{l_1; t + 1{,}1\sqrt{D \cdot (S - C)}\right\}. \qquad (48)$$

Расчетный эффективный момент инерции определяют по формуле

$$I_p = \frac{0{,}1 \cdot P \cdot D^3 \cdot l_1}{E} \cdot \frac{n_y}{2{,}4} \cdot K_5\,, \qquad (49)$$

где K_5 – безразмерный коэффициент, определяемый по рисунку 9.

Для определения коэффициента K_5 необходимо рассчитать отношения K_1/K_2 и l/D.

Коэффициент K_1 определяют по формуле (17), а коэффициент K_2 – по формуле

$$K_2 = 100(S - C)/D. \qquad (50)$$

Допускаемое наружное давление определяют из условия

$$[P] = min\{[P]_1; [P]_2\}, \qquad (51)$$

где $[P]_1$ – допускаемое наружное давление, определяемое из условия устойчивости всей обечайки, МПа;

$[P]_2$ – допускаемое наружное давление, определяемое из условий устойчивости обечайки между двумя соседними кольцами жесткости, МПа.

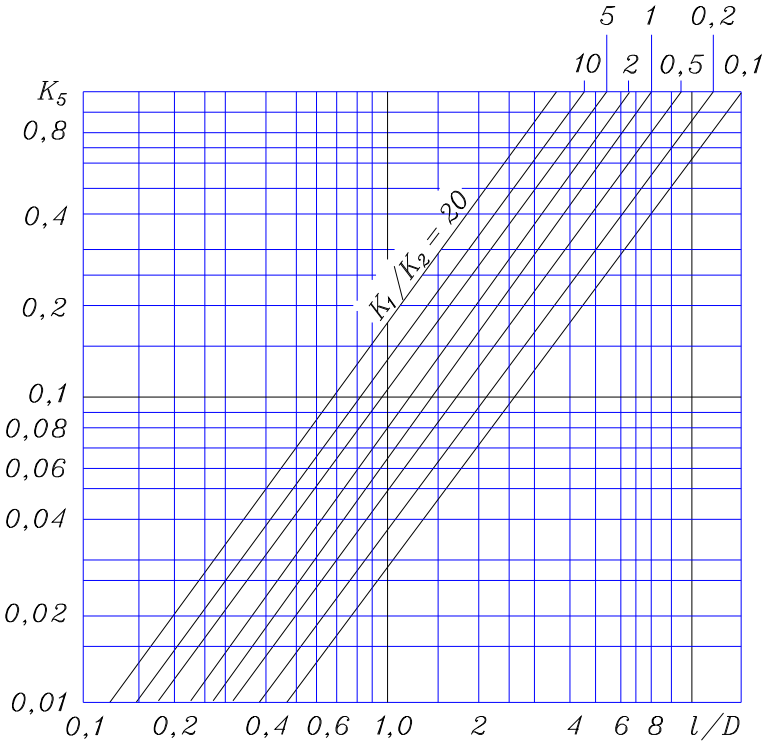


Рисунок 9 – График для определения коэффициента K_5

Величину $[P]_1$ определяют по формуле

$$[P]_1 = \frac{[P]_{1П}}{\sqrt{1+\left(\frac{[P]_{1П}}{[P]_{1E}}\right)^2}}, \qquad (52)$$

где $[P]_{1П}$ – допускаемое наружное давление из условий прочности

всей обечайки при $\varphi_т = \varphi_p = 1$, МПа;

$[P]_{1E}$ – допускаемое наружное давление из условий устойчивости всей обечайки в пределах упругости, МПа.

Допускаемое наружное давление, определяемое из условия прочности всей обечайки, следует рассчитывать по формуле

$$[P]_{1П} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_P \cdot (S - C) + 2 \cdot \frac{A_к}{l_1} \cdot [\sigma]_к \cdot \varphi_к}{D + (S - C)}, \qquad (53)$$

где $[\sigma]_к$ – допускаемое напряжение для кольца жесткости при расчетной температуре, МПа;

$\varphi_к$ – коэффициент прочности сварных швов кольца жесткости.

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости всей обечайки в пределах упругости

$$[P]_{1E} = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D}{k \cdot n_y \cdot B_2 \cdot L} \cdot \left[\frac{100 \cdot k \cdot (S - C)}{D}\right]^{2{,}5}, \qquad (54)$$

где k – коэффициент жесткости обечайки, подкрепленной кольцами жесткости;

B_2 – безразмерный коэффициент.

Коэффициент k определяется по формуле

$$k = \sqrt{\frac{10{,}9 \cdot I}{l_1 \cdot (S - C)^3}}. \qquad (55)$$

Коэффициент B_2 определяют по формуле

$$B_2 = min\left\{1{,}0;\ 9{,}45 \cdot \frac{D}{L} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot k \cdot (S - C)}}\right\}. \qquad (56)$$

Расчетная длина цилиндрической обечайки, подкрепленной кольцами жесткости, определяется как сумма длин цилиндрической обечайки $l_ц$ и прилегающих элементов l_3.

Допускаемое наружное давление $[P]_2$ определяют по формуле (20) при расчетной длине обечайки, которая рассчитывается по формуле значении длины

$$l = max\{b;\ l_2 - 0{,}5 \cdot t\}, \qquad (57)$$

где b – расстояние между двумя смежными кольцами жесткости, мм;

l_2 – расчетное расстояние между эффективным элементом жесткости и осью, проходящей через центр тяжести смежного с ним кольца жесткости, мм;

t – ширина поперечного сечения кольца жесткости в месте его приварки к обечайки, мм.

Эффективными элементами жесткости являются приваренные к обечайке днища, перегородки, а также фланцы.

Расчетное расстояние l_2 определяют таким образом:

– для фланцев, плоских днищ и жестких перегородок

$$l_2 = l_4;$$

– для отбортованных днищ

$$l_2 = l_4 + h_1 + l_3;$$

– для неотбортованных днищ

$$l_2 = l_4 + l_3,$$

где l_4 – расстояние между элементом жесткости и осью, проходящей через центр тяжести смежного с ним кольца жесткости, мм;

h_1 – длина цилиндрической части отбортованного днища, мм.

Пример 16

Определить размеры колец жесткости, подкрепляющих цилиндрическую обечайку корпуса вертикального аппарата с эллиптическими днищами, и расстояние между ними (*рисунок.10*). *Остаточное давление в аппарате* $P_{ост} = 0{,}01$ *МПа*. *Внутренний диаметр аппарата* $D=1200$ *мм, расчетная температура в аппарате* $t=100$ °*C. Высота аппарата* $H_к = 15000$ *мм, длина цилиндрической обечайки* $l_ц = 12390$ *мм, толщина стенки обечайки* $S = 8$ *мм, высота отбортовки эллиптического днища* $h_1 = 25$ *мм, вылеты штуцеров* $h_ш = 200$ *мм*. *Материал корпуса – сталь марки Ст3сп5. Прибавку для компенсации коррозии принять равной* $C_1 = 2$ *мм, коэффициент прочности сварных соединений–* $\varphi_p = 0{,}9$.

Расчетное наружное давление в аппарате определяем как разность между атмосферным и остаточным давлением

$$P = P_{ат} - P_{ост} = 0{,}1 - 0{,}01 = 0{,}09 \ \ МПа.$$

По таблице 11 определяем рекомендуемый профиль колец жесткости и максимальное расстояние между ними

$$t \times h = 8 \times 50 \ мм; \quad l_{max} = b = 1900 \ \ мм.$$

Расстояние между двумя смежными кольцами жесткости по осям, проходящим через центр тяжести их поперечных сечений, определяем по формуле

$$l_1 = b + t = 1900 + 8 = 1908 \ мм.$$

Момент инерции поперечного сечения кольца жесткости прямоугольной формы определяем по формуле (47)

$$I_к = \frac{t \cdot h^3}{12} = \frac{8 \cdot 50^3}{12} = 83330 \ \ мм^4.$$

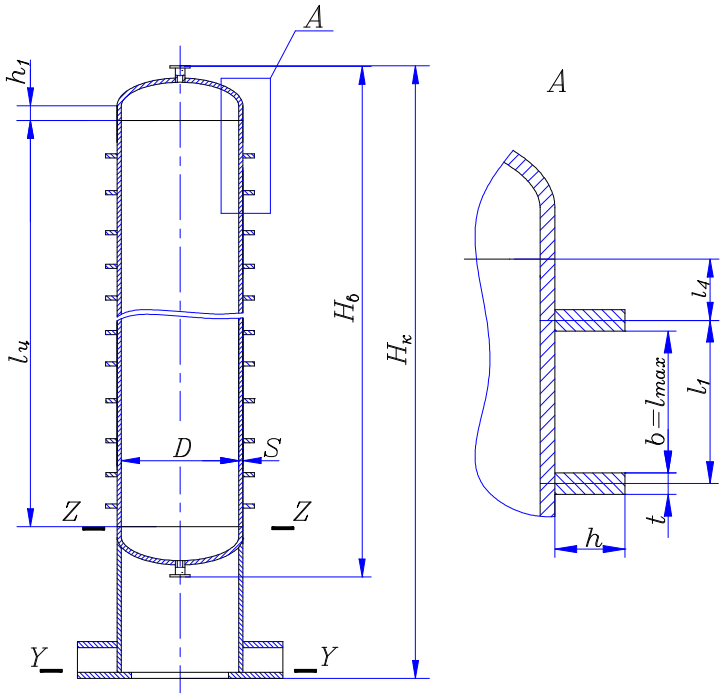


Рисунок 10 – Расчетная схема обечайки с кольцами жесткости

Эффективную длину стенки обечайки определяем по формуле (48)

$$l_e = min\left\{l_1;\quad t + 1{,}1\sqrt{D\cdot(S-C)}\right\}=$$
$$= min\left\{1908;\ 8 + 1{,}1\cdot\sqrt{1200\cdot(8-2{,}8)}\right\}= min\left\{1908;\ 94{,}9\right\}=$$
$$= 94{,}9\ мм.$$

Эффективный момент инерции расчетного поперечного сечения кольца жесткости определяем по формуле (46).

$$I = I_к + \frac{l_1\cdot(S-C)^3}{10{,}9} + e^2\cdot\frac{A_к\cdot l_e\cdot(S-C)}{A_к + l_e\cdot(S-C)} =$$
$$= 83330 + \frac{1908\cdot(8-2{,}8)^3}{10{,}9} + 29^2\cdot\frac{400\cdot 94{,}9\cdot(8-2{,}8)}{400+94{,}9\cdot(8-2{,}8)} = 2{,}937\cdot 10^5\ мм^4$$

Для определения расчетного эффективного момента инерции I_p *найдем значение коэффициента* K_5 *по графику на рисунке 9. Для этого вычисляем отношение*

$$l/D = 1900/1200 = 1{,}583,$$

где l *– расчетная длина гладкой цилиндрической обечайки, мм*

$$l = b = 1900\ мм.$$

Коэффициент K_1 *определяем значение по формуле* (17)

$$K_1 = 0{,}36\frac{n_y\cdot P}{E\cdot 10^{-6}} = 0{,}36\cdot\frac{2{,}4\cdot 0{,}09}{1{,}91\cdot 10^5\cdot 10^{-6}} = 0{,}407.$$

Прибавку для компенсации минусового допуска стального листа толщиной $S = 8$ *мм определяем по таблице 6,* $C_2 = 0{,}8$ *мм. Общая прибавка к расчетной толщине составит*

$$C = C_1 + C_2 = 2 + 0{,}8 = 2{,}8\ мм.$$

Коэффициент K_2 *определяем по формуле* (50)

$$K_2 = \frac{100\,(S-C)}{D} = \frac{100\,(8-2{,}8)}{1200} = 0{,}433.$$

По графику на рисунке 9 при $K_1/K_2 = 0{,}407/0{,}433 = 0{,}94$ *и* $l/D = 1{,}583$ *находим значение коэффициента* $K_5 = 0{,}12$.

Расчетный эффективный момент инерции цилиндрической обечайки определяем по формуле (49)

$$I_p = \frac{0{,}1\,P \cdot D^3 \cdot l_1}{E} \cdot \frac{n_y}{2{,}4} \cdot K_5 = \frac{0{,}1 \cdot 0{,}09 \cdot 1200^3 \cdot 1908}{1{,}91 \cdot 10^5} \cdot \frac{2{,}4}{2{,}4} \cdot 0{,}12 =$$

$$= 1{,}864 \cdot 10^4 \ мм^4.$$

Условие

$$I = 2{,}937 \cdot 10^5 > I_p = 1{,}864 \cdot 10^4 \ мм^4$$

выполняется.

Проверяем условие устойчивости обечайки в рабочих условиях по наружному давлению и условие прочности обечайки в условиях испытания по внутреннему давлению.

Допускаемое наружное давление из условия прочности всей обечайки определяем по формуле (3.53) *при* $\varphi_p = \varphi_к = 1$

$$[P]_{1П} = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_P \cdot (S - C) + 2\frac{A_к}{l_1} \cdot [\sigma]_к \cdot \varphi_к}{D + (S - C)} =$$

$$= \frac{2 \cdot 149 \cdot 1 \cdot (8 - 2{,}8) + 2 \cdot \frac{400}{1908} \cdot 149 \cdot 1}{1200 + (8 - 2{,}8)} = 1{,}338 \ МПа.$$

Высоту выпуклой части эллиптического днища определяем по формуле

$$H = 0{,}25\,D = 0{,}25 \cdot 1200 = 300 \ мм.$$

Расчетную длину примыкающего элемента для выпуклых днищ определяем по формуле (19)

$$l_3 = \frac{H}{3} = \frac{300}{3} = 100 \ мм\ .$$

Расчетную длину цилиндрической обечайки определяем по формуле

$$L = l_ц + 2(l_3 + h_1) = 12390 + 2(100 + 25) = 12640 \ мм.$$

Коэффициент жесткости обечайки, подкрепленной кольцами жесткости, определяем по формуле (55)

$$k = \sqrt{\frac{10{,}9 \cdot I}{l_1 \cdot (S - C)^3}} = \sqrt{\frac{10{,}9 \cdot 2{,}937 \cdot 10^5}{1908 \cdot (8 - 2{,}8)^3}} = 3{,}455\ ;$$

Коэффициент B_2 *определяем по формуле* (56)

$$B_2 = min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\frac{D}{L}\cdot\sqrt{\frac{D}{100\,k\cdot(S-C)}}\right\} =$$

$$= min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\cdot\frac{1200}{12640}\cdot\sqrt{\frac{1200}{100\cdot 3{,}455\cdot(8-2{,}8)}}\right\} =$$

$$= min\{1{,}0;\ 0{,}733\} = 0{,}733.$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости всей обечайки с кольцами жесткости в пределах упругости определяем по формуле (54)

$$[P]_{1E} = \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\cdot E\cdot D}{k\cdot n_y\cdot B_2\cdot L}\cdot\left[\frac{100\,k\cdot(S-C)}{D}\right]^{2{,}5} =$$

$$= \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\cdot 1{,}91\cdot 10^{5}\cdot 1200}{3{,}455\cdot 2{,}4\cdot 0{,}733\cdot 12640}\cdot\left[\frac{100\cdot 3{,}455\cdot(8-2{,}8)}{1200}\right]^{2{,}5} = 0{,}17\ МПа.$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости всей обечайки с кольцами жесткости вычисляем по формуле (52)

$$[P]_1 = \frac{[P]_{1П}}{\sqrt{1+\left(\dfrac{[P]_{1П}}{[P]_{1E}}\right)^2}} = \frac{1{,}338}{\sqrt{1+\left(\dfrac{1{,}338}{0{,}17}\right)^2}} = 0{,}169\ МПа.$$

Расстояние между элементом жесткости и осью, проходящей через центр тяжести смежного с ним кольца при наличии семи колец жесткости, определяем по формуле

$$l_4 = 0{,}5\left(l_ц - 6\,l_1\right) = 0{,}5(12390 - 6\cdot 1908) = 471\ мм.$$

Расчетное расстояние l_2 *определяем по формуле*

$$l_2 = l_4 + h_1 + l_3 = 471 + 25 + 100 = 596\ мм.$$

Расчетную длину обечайки определяем по формуле (57)

$$l = max\{b;\ \ l_2 - 0{,}5\,t\} = max\{1900;\ \ 596 - 0{,}5\cdot 8\} = 1900\ мм.$$

Коэффициент B_1 *определяем по формуле* (23)

$$B_1 = min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\,\frac{D}{l}\sqrt{\frac{D}{100\,(S-C)}}\right\} =$$

$$= min\left\{1{,}0;\quad 9{,}45\cdot\frac{1200}{1900}\cdot\sqrt{\frac{1200}{100\cdot(8-2{,}8)}}\right\} = min\{1{,}0;\quad 9{,}07\} = 1{,}0.$$

Для определения допускаемого наружного давления $[P]_2$ *по формуле* (20) *вычисляем допускаемое наружное давление из условия прочности* $[P]_{II}$ *по формуле* (21)

$$[P]_{II} = \frac{2\,[\sigma]\cdot(S-C)}{D+(S-C)} = \frac{2\cdot 149\cdot(8-2{,}8)}{1200+(8-2{,}8)} = 1{,}286\ \ МПа$$

и допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости $[P]_E$ *– по формуле* (22)

$$[P]_E = \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\ D\cdot E}{n_y\cdot B_1\cdot l}\cdot\left[\frac{100\,(S-C)}{D}\right]^{2,5} =$$

$$= \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\cdot 191\cdot 10^3\cdot 1200}{2{,}4\cdot 1{,}0\cdot 1900}\cdot\left[\frac{100\cdot(8-2{,}8)}{1200}\right]^{2,5} = 0{,}129\ МПа.$$

Допускаемое наружное давление, определяемое из условия устойчивости обечайки между двумя соседними кольцами жесткости, определяем по формуле (20)

$$[P]_2 = \frac{[P]_{II}}{\sqrt{1+\left(\dfrac{[P]_{II}}{[P]_E}\right)^2}} = \frac{1{,}286}{\sqrt{1+\left(\dfrac{1{,}286}{0{,}129}\right)^2}} = 0{,}129\ \ МПа.$$

Допускаемое наружное давление определяем по формуле (51)

$$[P] = min\{[P]_1;\ [P]_2\} = min\{0{,}169;\ 0{,}129\} = 0{,}129\ \ МПа.$$

Условие устойчивости

$$P = 0{,}09 < [P] = 0{,}129\ \ МПа$$

выполняется.

По таблице А.1 приложения А определяем допускаемые напряжения для стали марки Ст3сп5 при расчетной температуре стенки

$t = 100\ °C$ $[\sigma] = 149$ *МПа и при температуре испытания* $t_и = 20\ °C$ $[\sigma]_{20} = 154$ *МПа.*

Пробное давление для аппарата, работающего под вакуумом, определяем по формуле (5), *принимая расчетное давление равным* $P = 0{,}1$ *МПа*

$$P_{пр} = 1{,}25\ P\ \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}25 \cdot 0{,}1 \cdot \frac{154}{149} = 0{,}13\ \text{МПа}.$$

Общая высота столба жидкости в аппарате равняется высоте цилиндрической обечайки с учетом высоты двух эллиптических днищ

$$H_в = l_ц + 2\left(H + h_1 + h_{шт}\right) = 12390 + 2 \cdot \left(300 + 25 + 100\right) = 13440\ мм = 13{,}44\ м.$$

Гидростатическое давление воды определяем по формуле (1), *принимая плотность воды* $\rho_в = 1000$ *кг/м*^{3}

$$P_{г\ воды} = \rho_в \cdot g \cdot H_в \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 13{,}44 \cdot 10^{-6} = 0{,}132\ \text{МПа}.$$

$$P_{г\ воды} = 0{,}132 > 0{,}05\ P_{пр} = 0{,}05 \cdot 0{,}13 = 0{,}0065\ \text{МПа}.$$

Так как гидростатическое давление составляет более 5 % от пробного давления, то расчетное давление в условиях испытаний $P_и$ *определяем с учетом гидростатического давления воды по формуле* (4)

$$P_и = P_{пр} + P_{г\ воды} = 0{,}13 + 0{,}132 = 0{,}262\ \text{МПа}.$$

Проверяем необходимость расчета на прочность в условиях испытания

$$P_и = 0{,}262 > 1{,}35\ P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1{,}35 \cdot 0{,}1 \cdot \frac{154}{149} = 0{,}139.$$

Так как расчетное давление в условиях испытания больше расчетного давления в рабочих условиях, умноженного на $1{,}35\,[\sigma]_{20}/[\sigma]$, *то расчет на прочность необходимо проводить как для рабочих условий, так и для условий испытания.*

Выполняем проверочный расчет на прочность для условий испытания.

По таблице А.6 приложения А определяем предел текучести материала обечайки и колец жесткости при температуре 20 °С $R_e^{20} = 250$ *МПа. Коэффициент запаса прочности при гидравлических испытаниях принимаем по таблице 1 равным* $n_т = 1{,}1$. *Допускаемое*

напряжение в условиях испытаний определяем по формуле (.9)

$$[\sigma]_u = [\sigma]_к = \frac{R_e^{20}}{n_т} = \frac{250}{1{,}1} = 227 \ \ МПа.$$

Допускаемое давление $[P]_1$ *из условия прочности всей обечайки рассчитываем по формуле* (42)

$$[P]_1 = \frac{2[\sigma]_u \cdot \varphi_p \cdot (S-C) + 2\frac{A_к}{l_1} \cdot [\sigma]_к \cdot \varphi_к}{D + (S-C)} =$$

$$= \frac{2 \cdot 227 \cdot 1 \cdot (8-2{,}8) + 2 \cdot \frac{400}{1908} \cdot 227 \cdot 1}{1200 + (8-2{,}8)} = 1{,}83 \ МПа.$$

Параметр λ_n *определяем по формуле* (44)

$$\lambda_n^2 = \frac{b^2}{D \cdot (S-C)} = \frac{1900^2}{1200 \cdot (8-2{,}8)} = 578{,}5.$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление из условия прочности обечайки между двумя соседними кольцами жесткости определяем по формуле (43)

$$[P]_2 = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_т \cdot (S-C)}{D + (S-C)} \cdot \frac{2 + \lambda_n^2}{1 + \frac{\varphi_т \cdot \lambda_n^2}{\varphi_p}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 227 \cdot 0{,}9 \cdot (8-2{,}8)}{1200 + (8-2{,}8)} \cdot \frac{2 + 578{,}5}{1 + \frac{0{,}9 \cdot 578{,}5}{0{,}9}} = 1{,}76 \ МПа.$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление определяем по формуле (41)

$$[P] = min\{1{,}83; 1{,}76\} = 1{,}76 \ \ МПа.$$

Условие прочности

$$P = 0{,}262 < [P] = 1{,}76 \ \ МПа$$

выполняется.

3.6 Цилиндрические обечайки, подкрепленные кольцами жесткости, работающие под совместным действием нагрузок нескольких видов

Толщину стенки цилиндрической обечайки, размеры поперечного сечения колец жесткости и расстояние между ними предварительно следуеи определять по подразделу 3.5. После этого производят поверочный расчет по формуле (24), при этом допускаемое наружное давление следует определять по формуле (51).

Допускаемые нагрузки следует рассчитывать по формулам (20, 25, 31, 34) при расчетной длине гладкой цилиндрической обечайки l, равной расстоянию между двумя смежными кольцами жесткости b. При определении приведенной расчетной длины $l_{пр}$ по таблице 10 вместо длины l следует принимать расчетную длину цилиндрической обечайки, подкрепленной кольцами жесткости, L.

Пример 17

Рассчитать на прочность и устойчивость цилиндрическую обечайку корпуса колонного аппарата с кольцами жесткости, установленного на открытой площадке и работающего под вакуумом (*рисунок 10*). *Остаточное давление в аппарате* $P_{ост} = 0{,}01$ *МПа*. *Внутренний диаметр аппарата* $D=1200$ *мм, расчетная температура стенки обечайки* $t=100$ *°С. Высота аппарата* $H_к = 15000$ *мм. Длина цилиндрической обечайки* $l_ц = 12390$ *мм, толщина стенки обечайки* $S = 8$ *мм, высота отбортовки эллиптического днища* $h_1 = 25$ *мм. Материал корпуса – сталь марки Ст3сп5. Прибавку для компенсации коррозии принять равной* $C_1 = 2$ *мм.*

Размеры поперечного сечения колец жесткости и расстояние между ними определены в примере 16.

Для колонного аппарата, установленного на открытой площадке, с соотношением $H_к / D > 10$ *необходимо учитывать ветровую нагрузку.*

Масса колонного аппарата:

– в рабочих условиях 7670 кг;

– в условиях испытания 20600 кг.

В результате расчета колонного аппарата на ветровую нагрузку определены изгибающие моменты в месте присоединения опорной обечайки к корпусу (*сечение Z–Z на рисунке 10*), *которые составляют:*

– в рабочих условиях 1,636·10^8 Н·мм;

– в условиях испытания 1,646·10^8 Н·мм.

В данном случае обечайка, кроме наружного давления, нагружена осевым сжимающим усилием от собственного веса и изгибающим моментом от действия ветровой нагрузки.

Осевое сжимающее усилия принимаем равным весу колонны в рабочих условиях

$$F = m \cdot g = 7670 \cdot 9{,}81 = 75240 \text{ Н},$$

где m *– масса аппарата в рабочих условиях, кг;*

g *– ускорение свободного падения, м/с^2.*

Модуль продольной упругости для стали марки Ст3сп5 в рабочих условиях (при температуре $t = 100$ °С*) находим по таблице 9,*

$$E = 1{,}91 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Прибавку для компенсации минусового допуска C_2 *для листа толщиной* $S = 8$ *мм определяем по таблице 6,* $C_2 = 0{,}8$ *мм. Сумма прибавок к расчетной толщине обечайки составит*

$$C = C_1 + C_2 = 2 + 0{,}8 = 2{,}8 \text{ мм}.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (28)

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot D^2 \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100\,(S - C)}{D}\right]^{2{,}5} =$$

$$= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 1200^2 \cdot 1{,}91 \cdot 10^5}{2{,}4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (8 - 2{,}8)}{1200}\right]^{2{,}5} = 4{,}39 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Расчетные длины примыкающих элементов эллиптических днищ, которые учитываются при определении расчетной длины цилиндрической обечайки, укрепленной кольцами жесткости, определяем по формуле

$$l_3 = \frac{H}{3} = \frac{0{,}25\,D}{3} = \frac{0{,}25 \cdot 1200}{3} = 100 \text{ мм}.$$

Расчетную длину цилиндрической обечайки, укрепленной кольцами жесткости, определяем по формуле

$$L = l_ц + 2\,(h_1 + l_3) = 12390 + 2\,(25 + 100) = 12640 \text{ мм}.$$

В качестве расчетной схемы колонного аппарата принимаем вертикальный консольный упруго защемленный стержень. Приведенная расчетная длина по таблице 10 составляет

$$l_{пр} = 2\,L = 2 \cdot 12640 = 25280 \text{ мм}.$$

Гибкость обечайки определяем по формуле (30)

$$\lambda = \frac{2{,}83\, l_{пр}}{D + (S - C)} = \frac{2{,}83 \cdot 25280}{1200 + (8 - 2{,}8)} = 59{,}36.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (29)

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot E \cdot (\pi/\lambda)^2}{n_y} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot (1200 + 8 - 2{,}8) \cdot (8 - 2{,}8) \cdot 1{,}91 \cdot 10^5 \cdot (3{,}14/59{,}36)^2}{2{,}4} =$$

$$= 4{,}39 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости в пределах упругости при $L/D = 12640/1200 = 10{,}53 > 10$ *определяем по формуле* (27)

$$[F]_E = \min\{[F]_{E1};\ \ [F]_{E2}\} = \min\left\{4{,}39 \cdot 10^6;\ \ 4{,}39 \cdot 10^6\right\} = 4{,}39 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности определяем по формуле (26)

$$[F]_{П} = \pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\sigma] =$$

$$= 3{,}14 \cdot (1200 + 8 - 2{,}8) \cdot (8 - 2{,}8) \cdot 149 = 2{,}93 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие определяем по формуле (25)

$$[F] = \frac{[F]_{П}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[F]_{П}}{[F]_E}\right)^2}} = \frac{2{,}93 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{2{,}93 \cdot 10^6}{4{,}39 \cdot 10^6}\right)^2}} = 2{,}43 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности рассчи-

тываем по формуле (32)

$$[M]_{П} = 0{,}25\, D \cdot [F]_{П} = 0{,}25 \cdot 1200 \cdot 2{,}93 \cdot 10^{6} = 8{,}8 \cdot 10^{8}\, Н \cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости рассчитываем по формуле (33)

$$[M]_{E} = 0{,}285\, D \cdot [F]_{E1} = 0{,}285 \cdot 1200 \cdot 4{,}39 \cdot 10^{6} = 1{,}5 \cdot 10^{9}\, Н \cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент определяем по формуле (31)

$$[M] = \frac{[M]_{П}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[M]_{П}}{[M]_{E}}\right)^{2}}} = \frac{8{,}8 \cdot 10^{8}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{8{,}8 \cdot 10^{8}}{1{,}5 \cdot 10^{9}}\right)^{2}}} = 7{,}59 \cdot 10^{8}\, Н.$$

Проверяем устойчивость обечайки, работающей под совместным действием наружного давления (вакуума), осевого сжимающего усилия и изгибающего момента в рабочих условиях, по формуле (24), *в которой принимаем поперечное усилие Q=0, а допускаемое наружное давление определяем по формуле* (51), $[P] = 0{,}129$ *МПа* (*см. пример 16*)

$$\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} = \frac{0{,}09}{0{,}129} + \frac{75240}{2{,}43 \cdot 10^{6}} + \frac{1{,}64 \cdot 10^{8}}{7{,}59 \cdot 10^{8}} = 0{,}946 < 1{,}0\ .$$

Условие устойчивости обечайки в рабочих условиях выполняется.

Модуль продольной упругости для стали марки Ст3сп5 в условиях испытания (*при температуре* $t_{и} = 20\ \ °C$) *находим по таблице 3.8,* $E = 1{,}99 \cdot 10^{5}$ *МПа.*

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (28)

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6}\ D^{2} \cdot E}{n_{y}} \cdot \left[\frac{100\,(S - C)}{D}\right]^{2{,}5} =$$

$$= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 1200^{2} \cdot 1{,}99 \cdot 10^{5}}{1{,}8} \cdot \left[\frac{100 \cdot (8 - 2{,}8)}{1200}\right]^{2{,}5} = 6{,}1 \cdot 10^{6}\, Н.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости в пределах упругости определяем по формуле (29)

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot E \cdot (\pi/\lambda)^2}{n_y} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot (1200 + 8 - 2{,}8) \cdot (8 - 2{,}8) \cdot 1{,}99 \cdot 10^5 \cdot (3{,}14/59{,}36)^2}{1{,}8} =$$

$$= 6{,}1 \cdot 10^6 \, H.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости в пределах упругости при $l/D > 10$ *определяем по формуле* (27)

$$[F]_E = min \, \{ [F]_{E1}; \, [F]_{E2} \} = min \left\{ 6{,}1 \cdot 10^6 ; 6{,}1 \cdot 10^6 \right\} = 6{,}1 \cdot 10^6 \, H.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности определяем по формуле (26)

$$[F]_{\Pi} = \pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\sigma] =$$

$$= 3{,}14 \cdot (1200 + 8 - 2{,}8) \cdot (8 - 2{,}8) \cdot 227 = 4{,}47 \cdot 10^6 \, H.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие определяем по формуле (3.25)

$$[F] = \frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\Pi}}{[F]_E} \right)^2}} = \frac{4{,}47 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + \left(\frac{4{,}47 \cdot 10^6}{6{,}1 \cdot 10^6} \right)^2}} = 3{,}6 \cdot 10^6 \, H.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности рассчитываем по формуле (32)

$$[M]_{\Pi} = 0{,}25 \, D \cdot [F]_{\Pi} = 0{,}25 \cdot 1200 \cdot 4{,}47 \cdot 10^6 = 1{,}34 \cdot 10^9 \, H \cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости рассчитываем по формуле (33)

$$[M]_E = 0{,}285 \, D \cdot [F]_{E1} = 0{,}285 \cdot 1200 \cdot 6{,}1 \cdot 10^6 = 2{,}09 \cdot 10^9 \, H \cdot мм.$$

Допускаемый изгибающий момент определяем по формуле (31)

$$[M]=\frac{[M]_{П}}{\sqrt{1+\left(\frac{[M]_{П}}{[M]_{E}}\right)^{2}}}=\frac{1{,}34\cdot 10^{9}}{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}34\cdot 10^{9}}{2{,}09\cdot 10^{9}}\right)^{2}}}=1{,}13\cdot 10^{9}\,Н.$$

Проверяем устойчивость обечайки, работающей под совместным действием осевого сжимающего усилия и изгибающего момента в условиях испытаний, по формуле (*24*)

$$\frac{F}{[F]}+\frac{M}{[M]}=\frac{75240}{3{,}6\cdot 10^{6}}+\frac{1{,}65\cdot 10^{8}}{1{,}13\cdot 10^{9}}=0{,}16<1{,}0\ .$$

Условие устойчивости обечайки в условиях испытания выполняется.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Допускаемые напряжения для углеродистых и низколегированных сталей

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа, для сталей марок					
	Ст3	09Г2С 16ГС	20 20К	10	10Г2 09Г2	17ГС 17Г1С 10Г2С1
20	154	196	147	130	180	183
100	149	177	142	125	160	160
150	145	171	139	122	154	154
200	142	165	136	118	148	148
250	131	162	132	112	145	145
300	115	151	119	100	134	134
350	105	140	106	88	123	123
375	93	133	98	82	108	116
400	85	122	92	77	92	105
410	81	104	86	75	86	104
420	75	92	80	72	80	92
430	71*	86	75	68	75	86
440	–	78	67	60	67	78
450	–	71	61	53	61	71
460	–	64	55	47	55	64
470	–	56	49	42	49	56
480	–	53	46**	37	46**	53

* Для расчетной температуры 425° С.

** Для расчетной температуры 475° С.

Примечание – Для промежуточных расчетных температур стенки допускаемое напряжение определяют линейной интерполяцией с округлением результата до 0,5 МПа в сторону меньшего значения.

Таблица А.2 – Допускаемые напряжения для теплоустойчивых хромистых сталей

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа, для сталей марок				
	12ХМ	12МХ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	147	147	155	146	240
100	146,5	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	127	134	99	140
440	126	126	132	96	135
450	124	124	131	94	130
460	122	122	127	91	126
470	117	117	122	89	122
480	114	114	117	86	118
490	105	105	107	83	114
500	96	96	99	79	108
510	82	82	84	72	97
520	69	69	74	66	85
530	60	57	67	60	72
540	50	47	57	54	58
550	41	–	49	47	52
560	33	–	41	40	45
570	–	–	–	35	40
580	–	–	–	30	34
590	–	–	–	28	30
600	–	–	–	25	25

Примечания

1 Для промежуточных расчетных температур стенки допускаемое напряжение определяют линейной интерполяцией с округлением результата до 0,5 МПа в сторону меньшего значения.

2 При расчетных температурах ниже 200° С стали марок 12МХ, 12ХМ и 15ХМ применять не рекомендуется.

Таблица А.3 – Допускаемые напряжения для жаропрочных, жаростойких коррозионностойких сталей

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, ° С	Допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа, для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т 08Х18Н12Т 08Х17Н13М2Т 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т 12Х18Н12Т 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
20	180	153	160	168	184
100	173	140	133	156	174
150	171	130	125	148	168
200	171	120	120	140	160
250	167	113	115	132	154
300	149	103	112	123	148
350	143	101	108	113	144
375	141	90	107	108	140
400	140	87	107	103	137
410	–	83	107	102	136
420	–	82	107	101	135
430	–	81	107	100,5	134
440	–	81	107	100	133
450	–	80	107	99	132
460	–	–	–	98	131
470	–	–	–	97,5	130
480	–	–	–	97	129
490	–	–	–	96	128
500	–	–	–	95	127
510	–	–	–	94	126
520	–	–	–	79	125
530	–	–	–	79	124
540	–	–	–	78	111
550	–	–	–	76	111
560	–	–	–	73	101
570	–	–	–	69	97
580	–	–	–	65	90
590	–	–	–	61	81
600	–	–	–	57	74

Продолжение таблицы А.3

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа, для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т 08Х18Н12Т 08Х17Н13М2Т 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т 12Х18Н12Т 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
610	–	–	–	–	68
620	–	–	–	–	62
630	–	–	–	–	57
640	–	–	–	–	52
650	–	–	–	–	48
660	–	–	–	–	45
670	–	–	–	–	42

Таблица А.4 – Допускаемые напряжения для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного и аустенитно-ферритного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемые напряжения $[\sigma]$, МПа, для сталей марок					
	08Х18Г8Н2Т	07Х13АГ20	02Х8Н22С6	15Х18Н12С4ТЮ	06ХН28МДТ 03ХН28МДТ	08Х22Н6Т 08Х21Н6М2Т
20	230	233	133	233	147	233
100	206	173	106,5	220	138	200
150	190	153	100	206,5	130	193
200	175	133	90	200	124	188,5
250	160	127	83	186,5	117	166,5
300	144	120	76,5	180	110	160
350	–	113	–	–	107	–
375	–	110	–	–	105	–
400	–	107	–	–	103	–

Примечание – Для промежуточных расчетных температур стенки допускаемое напряжение определяют линейной интерполяцией двух ближайших значений, указанных в таблице, с округлением результата до 0,5 МПа в сторону меньшего значения.

Таблица А.5 – Расчетное значение временного сопротивления для углеродистых и низколегированных сталей

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение временного сопротивления R_m, МПа, для сталей марок					
	Ст3	09Г2С 16ГС	20 20К	10	10Г2 09Г2	17ГС 17Г1С 10Г2С1
20	460	470	410	340	440	440
100	435	425	380	310	385	385
150	460	430	425	340	430	430
200	505	439	460	382	439	439
250	510	444	460	400	444	444
300	520	445	460	374	445	445
350	480	441	430	360	441	441
375	450	425	410	330	425	425

Таблица А.6 – Расчетное значение предела текучести для углеродистых и низколегированных сталей

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение предела текучести R_e, МПа, для сталей марок					
	Ст3	09Г2С, 16ГС	20, 20К	10	10Г2, 09Г2	17ГС. 17Г1С, 10Г2С1
20	250	300	220	195	270	280
100	230	265,5	213	188	240	240
150	224	256,5	209	183	231	231
200	223	247,5	204	177	222	222
250	197	243	198	168	218	218
300	173	226,5	179	150	201	201
350	167	210	159	132	185	185
375	164	199,5	147	123	162	174
400	–	183	–	–	–	158
410	–	–	–	–	–	156
420	–	–	–	–	–	138

Таблица А.7 – Расчетное значение временного сопротивления для теплоустойчивых хромистых сталей

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение временного сопротивления R_m, МПа, для сталей марок				
	12ХМ	12МХ	15ХМ	15Х5М	15Х5М–У
20	450	450	450	400	600
100	440	440	440	380	572
150	434	434	434	355	555
200	430	430	430	330	535
250	440	437	437	320	520
300	454	445	445	318	503
350	437	442	442	314	492
375	427	436	436	312	484
400	415	426	426	310	472
410	413	424	424	306	468
420	410	421	421	300	462

Таблица А.8 – Расчетное значение условного предела текучести для теплоустойчивых хромистых сталей

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, ° С	Расчетное значение условного предела текучести $R_{p0,2}$, МПа, для сталей марок				
	12ХМ	12МХ	15ХМ	15Х5М	15Х5М–У
20	220	220	233	220	400
100	219	219	230	210	352,5
150	218	218	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 А.9 – Расчетное значение временного сопротивления для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного и аустенитно-ферритного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, ° С	Расчетное значение временного сопротивления R_m, МПа, для сталей марок					
	08Х18Г8Н2Т	07Х13АГ20	02Х8Н22С6	15Х18Н12С4ТЮ	06ХН28МДТ 03ХН28МДТ	08Х22Н6Т 08Х21Н6М2Т
20	600	670	550	700	550	600
100	535	550	500	640	527,5	583
150	495	520	480	610	512,5	550
200	455	490	468	580	500	515
250	415	485	450	570	490	503
300	375	480	440	570	482,5	500
350	–	465	–	–	478	–
375	–	458	–	–	474	–
400	–	450	–	–	470	–

Таблица А.10 – Расчетное значение условного предела текучести для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного и аустенитно-ферритного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, ° С	Расчетное значение условного предела текучести $R_{p0,2}$, МПа, для сталей марок					
	08Х18Г8Н2Т	07Х13АГ20	02Х8Н22С6	15Х18Н12С4ТЮ	06ХН28МДТ 03ХН28МДТ	08Х22Н6Т 08Х21Н6М2Т
20	350	350	200	350	350	220
100	328	260	160	330	300	207
150	314	230	150	310	290	195
200	300	200	135	300	283	186
250	287	1190	125	280	250	175
300	274	180	115	270	240	165
350	–	170	–	–	–	160
375	–	165	–	–	–	157,5
400	–	160	–	–	–	155

Таблица А.11 – Расчетное значение временного сопротивления для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, ° С	Расчетное значение условного предела текучести R_m, МПа, для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т 08Х18Н12Т 08Х17Н13М2Т 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т 12Х18Н12Т 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
20	550	500	520	520	540
100	540	474	450	480	500
150	535	453	433	455	475
200	534	432	415	430	450
250	520	412	405	424	443
300	518	392	397	417	440
350	517	376	394	408	438
375	516	368	392	405	437
400	–	360	390	402	436
410	–	358	388	400	434
420	–	356	386	398	432
430	–	354	384	396	431
440	–	352	382	394	430
450	–	350	380	392	428
460	–	–	–	390	426
470	–	–	–	388	424
480	–	–	–	386	422
490	–	–	–	385	421
500	–	–	–	383	420
510	–	–	–	381	418
520	–	–	–	380	416
550	–	–	–	374	412

Таблица А.12 – Расчетное значение условного предела текучести для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, ° С	Расчетное значение условного предела текучести $R_{p0,2}$, МПа, для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т 08Х18Н12Т 08Х17Н13М2Т 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т 12Х18Н12Т 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
20	250	200	200	210*	240
100	240	180	160	195	228
150	235	165	150	180	219
200	235	150	140	173	210
250	232	140	135	165	204
300	205	126	130	150	195
350	199	115	127	137	190
375	195	108	125	133	186
400	191	100	122,5	129	181
410	–	98	121,5	128	180
420	–	97,5	121	128	180
430	–	97	120,5	127	179
440	–	96	120	126	177
450	–	95	120	125	176
460	–	–	–	125	174
470	–	–	–	124	173
480	–	–	–	123	173
490	–	–	–	122	171
500	–	–	–	122	170
510	–	–	–	120	168
520	–	–	–	119	168
530	–	–	–	119	167

* Для сталей 08Х17Н13М2Т и 08Х17Н15М3Т условный предел текучести при 20 °С равен 200 МПа.

Таблица А.13 – Расчетное значение условного предела текучести для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, ° С	Расчетное значение условного предела текучести $R_{p1,0}$, МПа, для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т 08Х18Н12Т 08Х17Н13М2Т 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т 12Х18Н12Т 10Х17Н13М2Т 10Х17Н13М3Т
20	270	230	240	252	276
100	260	210	200	234	261
150	257	195	187,5	222	252
200	257	180	180	210	240
250	250	170	173	198	231
300	223	155	168	184,5	222
350	215	152	162	169,5	216
375	212	135	160	162	210
400	210	130	160	154,5	205,5
410	–	125	160	153	204
420	–	123	160	151,5	202,5
430	–	122	160	150,75	201
440	–	121	160	150	199,5
450	–	120	160	148,5	198
460	–	–	–	147	196,5
470	–	–	–	146	195
480	–	–	–	145,5	193,5
490	–	–	–	144	192
500	–	–	–	142,5	190,5
510	–	–	–	141	189
520	–	–	–	139,5	187,5
530	–	–	–	138	186

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском. ДНАОП 0.00–1.07–94. – Київ: Видавництво «Основа», 1998.– 373 с.
2. Колонные аппараты. Каталог. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1987.
3. ГОСТ 10885–85. Сталь листовая горячекатанная двухслойная коррозионностойкая. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1985.
4. ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – М.: Издательство стандартов, 1989.
5. ГОСТ 19903–74. Прокат листовой горячекатанный. Сортамент. – М.: Издательство стандартов, 1974.
6. ГСТУ 3–17–191–2000. Посудини та апарати стальні зварні. Загальні технічні умови. Державний комітет промислової політики України, 2000.– 301 с.
7. РД 26–11–05–85. Сосуды и аппараты из двухслойной стали. Нормы и методы расчета на прочность.
8. Методические указания к расчету на прочность и устойчивость колонных аппаратов для студентов специальности 7.090220. – Северодонецк: СТИ, 1996. – 28 с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ
СЕВЕРОДОНЕЦКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Александр Иванович Барвин, Ирина Михайловна Генкина, Виктор Васильевич Иванченко, Владимир Георгиевич Табунщиков, Геннадий Владимирович Тараненко, Юрий Николаевич Штонда.

Методические указания к расчету цилиндрических обечаек стальных сварных сосудов и аппаратов для студентов специальности 7.090220

Редактор Белых З.Д.

Тираж 40 экземпляров

СТИ Северодонецк