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

РАСЧЕТ ВЫПУКЛЫХ И ПЛОСКИХ ДНИЩ И КРЫШЕК, КОНИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК, ДНИЩ И ПЕРЕХОДОВ СТАЛЬНЫХ СВАРНЫХ СОСУДОВ И АППАРАТОВ.

МЕТОДИКА И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

УТВЕРЖДЕНО
на заседании кафедры оборудования
химических предприятий,
протокол № 7 от 14 февраля 2003 г.

Северодонецк 2003

УДК 66.023:593.4:006.354

Расчет выпуклых и плоских днищ и крышек, конических обечаек, днищ и переходов стальных сварных сосудов и аппаратов. Методика и примеры расчета / Сост. А.И. Барвин, И.М. Генкина, В.В. Иванченко, Д.А. Куликов, В.Г. Табунщиков, Г.В. Тараненко, Ю.Н. Штонда. – Северодонецк, СТИ, 2003. – 122 с.

Составители: А.И. Барвин, доцент
И.М. Генкина, ст. преподаватель
В.В. Иванченко, доцент
Д.А. Куликов, ассистент
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 5
2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 5
3 РАСЧЕТ ВЫПУКЛЫХ ДНИЩ 11
3.1 Эллиптические и полусферические днища 11
3.1.1 Эллиптические и полусферические днища, нагруженные внутренним избыточным давлением 12
3.1.2 Эллиптические и полусферические днища, нагруженные наружным давлением 18
3.2 Сферические неотбортованные днища и крышки 25
3.2.1 Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные внутренним избыточным давлением 26
3.2.2 Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные наружным давлением 34
4 РАСЧЕТ КОНИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК И ДНИЩ 38
4.1 Расчетные схемы и расчетные параметры 39
4.2 Условия применения расчетных формул 42
4.3 Гладкие конические обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением 43
4.4 Гладкие конические обечайки, нагруженные наружным давлением 44
4.5 Соединение цилиндрической и конической обечаек без тороидального перехода 46
4.6 Соединение цилиндрической и конической обечаек с укрепляющим кольцом 48
4.7 Соединение цилиндрической и конической обечаек с тороидальным переходом 50
4.8 Соединение штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой 51
4.9 Гладкие конические обечайки, работающие под совместным действием нагрузок нескольких видов 62
4.10 Соединение цилиндрических и конических обечаек, работающих под совместным действием нагрузок нескольких видов 65
4.10.1 Соединение обечаек без тороидального перехода 65
4.10.2 Соединение цилиндрической и конической обечаек с укрепляющим кольцом 66
4.10.3 Соединение обечаек с тороидальным переходом 66
4.10.4 Соединение штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой 66
4.11 Расчет конических обечаек и днищ из двухслойной стали . . . 67
5 РАСЧЕТ ПЛОСКИХ КРУГЛЫХ ДНИЩ И КРЫШЕК 67
5.1 Расчетные схемы 67

5.2 Условия применения расчетных формул 68
5.3 Расчет плоских круглых днищ 69
5.4 Расчет плоских круглых крышек 77
ПРИЛОЖЕНИЕ А 82
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 102
ПРИЛОЖЕНИЕ В 114
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 120

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящих методических указаниях изложены нормы и методы расчета на прочность и устойчивость выпуклых и плоских днищ и крышек, конических обечаек и днищ, соединений цилиндрических и конических обечаек сосудов и аппаратов, изготовленных 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 и изгибающего момента.

Если сосуды и аппараты работают при многократных статических нагрузках, но количество циклов за весь срок службы не превышает 10^3, то такая нагрузка в расчетах на прочность условно считается однократной.

Выпуклые, плоские днища и крышки, а также конические обечайки, днища, соединения цилиндрических и конических обечаек стальных сварных сосудов и аппаратов рассчитывают на прочность для рабочих условий и условий испытания.

Днища и крышки являются одним из основных элементов корпусов сосудов и аппаратов. Цилиндрические корпуса как горизонтальных, так и вертикальных аппаратов с обеих сторон ограничиваются днищами.

Днище – неотъемная часть корпуса сосуда, ограничивающая внутреннюю полость с торца.

Крышка – отъемная часть корпуса сосуда, закрывающая внутреннюю полость.

2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В сосудах и аппаратах применяются днища: эллиптические, полусферические, торосферические, сферические неотбортованные, конические отбортованные, конические неотбортованные, плоские отбортованные, плоские неотбортованные, а также плоские крышки, присоединяемые на болтах.

Выпуклые днища изготавливаются штамповкой и фланжированием (обкаткой роликами) из круглых плоских заготовок.

Заготовки выпуклых днищ допускается изготовлять сварными из частей с расположением сварных швов согласно указанным на рисунке 1.

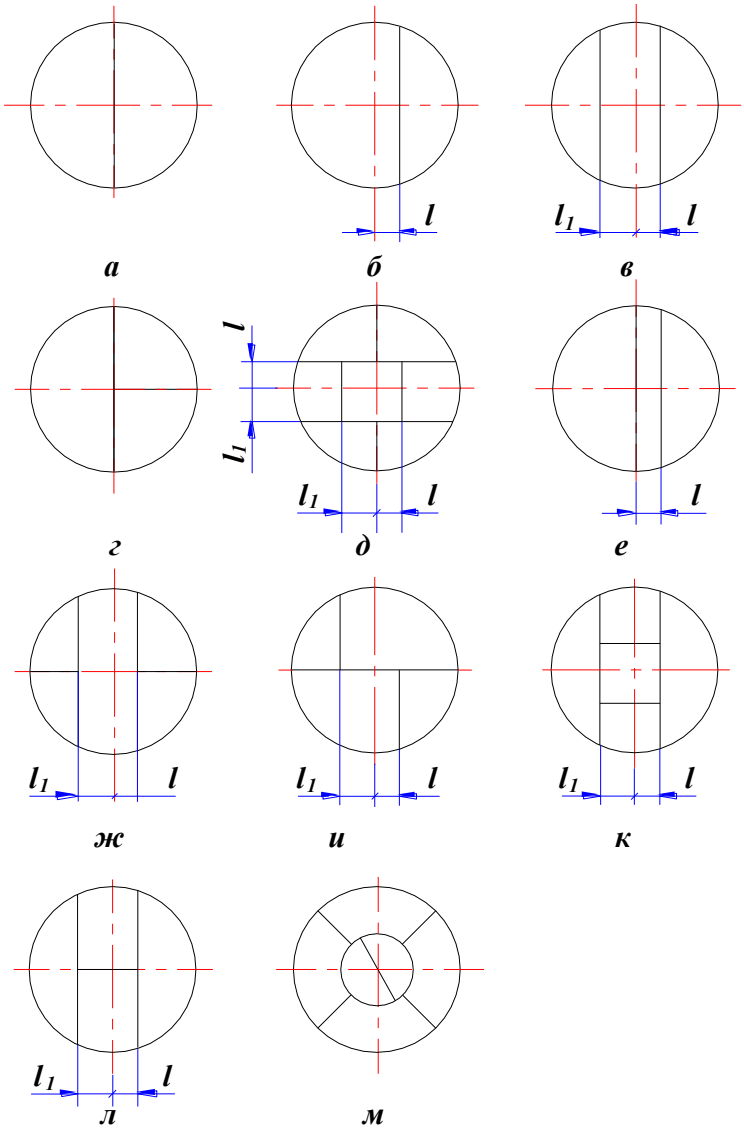


Рисунок 1 – Расположение сварных швов заготовок выпуклых днищ

Расстояния l и l_1 от оси заготовки выпуклых днищ, за исключением полусферических, до центра сварного шва должны быть не более 0,2 внутреннего диаметра днища.

При изготовлении заготовок согласно рисунку 1*м* количество частей не регламентируется.

Выпуклые днища допускается изготовлять из штампованных лепестков и шарового сегмента. Количество лепестков не регламентируется.

Если по центру установлен штуцер, то шаровой сегмент допускается не изготовлять.

Круговые швы выпуклых днищ, за исключением полусферических, изготовленных из штампованных лепестков и шарового сегмента или заготовок с расположением сварных швов согласно рисунку 1*м*, должны располагаться от центра днища на расстоянии по проекции не более 1/3 внутреннего диаметра днища.

Наименьшее расстояние между меридиональными швами в месте их примыкания к шаровому сегменту или штуцеру, установленному по центру днища вместо шарового сегмента, а также между меридиональными швами и швом на шаровом сегменте должно быть более трехкратной толщины днища, но не менее 100 мм по осям швов.

Наиболее распространенной формой днищ в сварных стальных сосудах и аппаратах, работающих под давлением, является эллиптическая отбортованная с высотой выпуклой части, равной $0{,}25\,D$.

Эллиптические днища должны соответствовать ГОСТ 6533–78 [2].

Основные параметры эллиптических днищ с внутренними базовыми размерами приведены в приложении А (рисунок А.1, таблица А.1).

Полусферические днища, как правило, изготовляют из штампованных лепестков и шарового сегмента.

В сосудах с толщиной обечайки не менее 40 мм составные полусферические днища в соответствии с рисунком 2 допускается применять при выполнении следующих условий:

– нейтральные оси полусферической части днища и переходной части обечайки корпуса должны совпадать;

– смещение t нейтральных осей полусферической части днища и переходной части обечайки корпуса не должно превышать $0{,}5\cdot(S-S')$ (S – толщина обечайки, S' – толщина днища);

– высота h переходной части обечайки корпуса должна быть не менее $3\,y$ (y – расстояние от края днища до края обечайки).

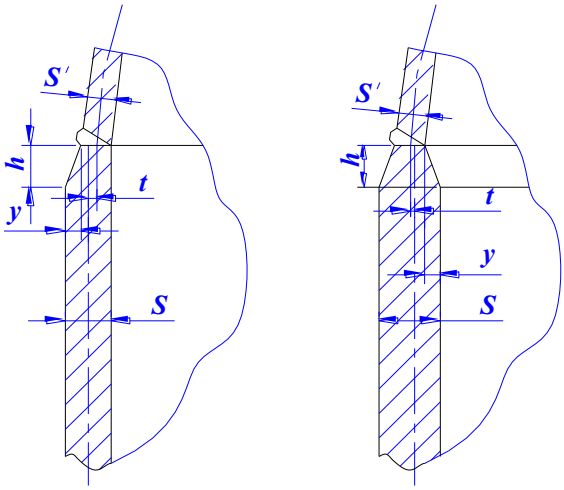
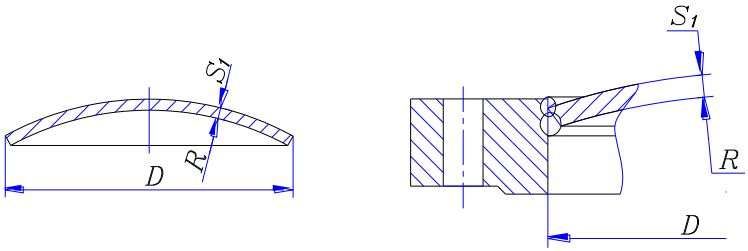


Рисунок 2 – Узел соединения полусферического днища с обечайкой

Сферические неотбортованные днища в соответствии с рисунком 3 должны:

– иметь радиус сферы R не менее $0{,}85 \cdot D$ и не более D (D – диаметр днища);

– привариваться сварным швом со сплошным проваром.



а ***б***

а – эллиптическое неотбортованное днище; *б* – фланцевая крышка

Рисунок 3 – Сферическое неотбортованное днище

Сферические неотбортованные днища допускается применять в сосудах 5–й группы, за исключением работающих под вакуумом.

Сферические неотбортованные днища в сосудах 1, 2, 3, 4–й групп и работающих под вакуумом допускается применять только в качестве элемента фланцевых крышек.

Основные параметры сферических неотбортованных днищ с внутренними базовыми размерам и приведены в приложении А (рисунок А.2, таблица А.2).

Конические отбортованные днища с углом при вершине $2\alpha = 60°$ и $2\alpha = 90°$, предназначенные для сосудов и аппаратов, работающих под давлением, должны соответствовать ГОСТ 12619–78 [5] .

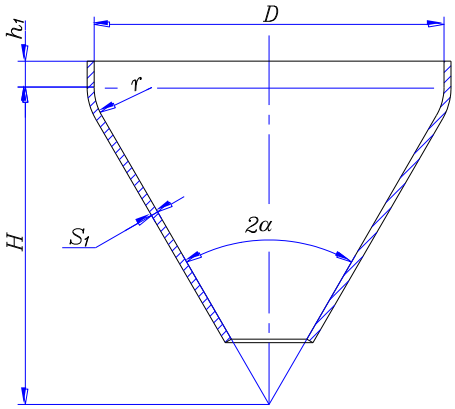


Рисунок 4 – Днище коническое отбортованное

Основные параметры конических отбортованных днищ с внутренними базовыми размерами приведены в приложении Б (рисунок Б.1, таблицы Б.1 и Б.2).

Конические неотбортованные днища с углами при вершине $2\alpha = 60°$, $2\alpha = 90°$ и $2\alpha = 120°$, предназначенные для сосудов и аппаратов, работающих без давления (под налив) или сосудов 5–й группы (работающих под давлением не выше 0,07 МПа), за исключением работающих под наружным давлением или вакуумом, должны соответствовать ГОСТ 12620–78 [6].

Основные параметры конических неотбортованных днищ с внутренними базовыми размерами приведены в стандарте [6].

Конические неотбортованные днища, с углом при вершине $2\alpha = 140°$, предназначенные для горизонтальных сосудов и аппаратов, работающих без давления (под налив) или сосудов 5–й группы (работающих под давлением не выше 0,07 МПа), должны соответствовать ГОСТ 12621–78 [7].

Конические неотбортованные днища или переходы допускается применять:

– для сосудов 1, 2, 3, 4–й групп, если центральный угол при вершине конуса не более $2\alpha = 45°$;

– для сосудов, работающих под наружным давлением или вакуумом, если центральный угол при вершине конуса не более $2\alpha = 60°$.

Возможность применения конических неотбортованных днищ с центральными углами более 45 ° и 60 ° должна решаться в каждом конкретном случае специализированной научно-исследовательской организацией.

Части выпуклых днищ в сочетании с коническими днищами или переходами применяются без ограничения угла при вершине конуса.

Плоские крышки, которые присоединяются на болтах или шпильках, допускается применять для всех типов сосудов.

Плоские днища в соответствии с рисунком 5, применяемые в сосудах групп 1, 2, 3, 4, должны изготавливаться из поковок. При этом должны выполняться следующие условия:

– расстояние от начала закругления до оси сварного шва не менее $0{,}25 \cdot \sqrt{D \cdot S}$, где D – внутренний диаметр обечайки, S – толщина обечайки;

– для днищ в соответствии с рисунком 4*а* радиус закругления $r \geq 2{,}5 \cdot S$,

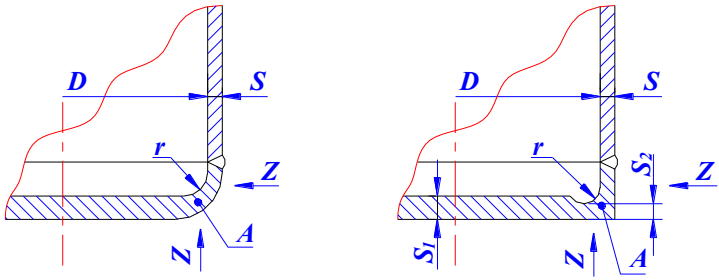
– для днищ в соответствии с рисунком 4*б* радиус кольцевой выточки $r \geq 0{,}25 \cdot S$, но не менее 8 мм, а наименьшая толщина днища в месте кольцевой выточки $S_2 \geq 0{,}8 \cdot S_1$, но не менее толщины обечайки S (S_1 – толщина днища);

– зона «А» контролируется в направлении «Z» ультразвуковым методом по всей площади.

Допускается изготавливать плоские отбортованные днища в соответствии с рисунком 4*а* для сосудов, работающих под давлением, путем штамповки из листа.

Допускается изготавливать плоские неотбортованные днища внутренним диаметром не более 500 мм для сосудов 1, 2, 3 групп и без ограничения диаметра для сосудов 4 и 5 групп, при этом приварка к

обечайке плоского неотбортованного днища должна быть выполнена с проваром на всю толщину днища.



а *б*

Рисунок 5 – Плоские днища

Плоские отбортованные днища, изготовленные из листовой стали методом штамповки, предназначенные для работы под налив, должны соответствовать ГОСТ 12622–78 [8] или ГОСТ 12623–78 [9].

Плоские неотбортованные днища, предназначенные для сосудов и аппаратов, работающих под наливом, а также для сосудов и аппаратов диаметром до 500 мм под давлением не выше 1,6 МПа должны соответствовать ГОСТ 12623-78 [9].

Длина цилиндрического борта L – (расстояние от начала закругления отбортованного элемента до окончательно обработанной кромки) в зависимости от толщины стенки S в соответствии с рисунком 5 для отбортованных и переходных элементов сосудов, за исключением штуцеров, компенсаторов и выпуклых днищ, должна быть не менее указанной в таблице 1, радиус отбортовки $R \geq 2{,}5 \cdot S$.

Таблица 1 – Длина цилиндрического борта

Толщина стенки отбортованного элемента, S, мм	Длина цилиндрического борта, L, мм
До 5 вкл.	15
Св. 5 до 10 вкл.	2S + 5
Св. 10 до 20 вкл.	S + 15
Св. 20	S/2 + 25

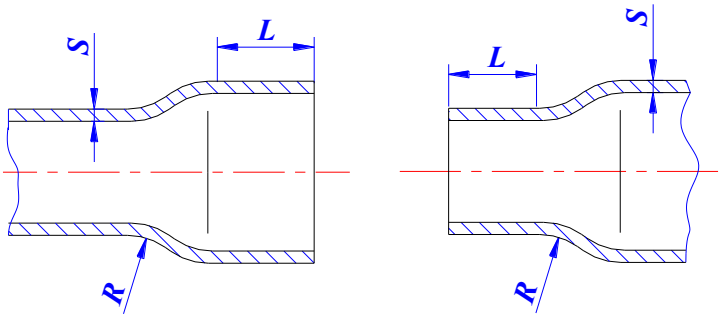


Рисунок 6 – Отбортованный и переходный элементы

Расчетную температуру, рабочее, расчетное и пробное давления, допускаемые напряжения, коэффициенты прочности сварных швов и прибавки к расчетным величинам конструктивных элементов следует определять по стандарту [10] или методическим указаниям [21].

Расчетные формулы, приведенные в разделах 3, 4, 5, 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 днища из углеродистой стали не превышает *380* °С, из низколегированной *420* °С, а из аустенитной *525* °С.

3 РАСЧЕТ ВЫПУКЛЫХ ДНИЩ

3.1 Эллиптические и полусферические днища

На рисунке 7 приведены расчетные схемы эллиптических и полусферических днищ.

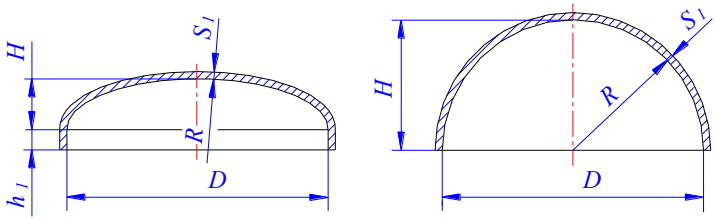
Расчетные формулы для эллиптических днищ применимы при выполнении условий:

$$0{,}002 \le \frac{S_1 - C}{D} \le 0{,}100 ,$$

$$0{,}2 \le \frac{H}{D} \le 0{,}5 ,$$

где S_1 – исполнительная толщина стенки днища, мм;

H – высота выпуклой части днища, мм.



а *б*

а – эллиптическое днище; *б* – полусферическое днище

Рисунок 7 – Выпуклые днища

3.1.1 Эллиптические и полусферические днища, нагруженные внутренним избыточным давлением

Расчетную толщину стенки днища, мм, определяют по формуле

$$S_{1p} = \frac{P \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0{,}5 \cdot P}, \qquad (1)$$

где P – расчетное внутреннее избыточное давление, МПа;

R – радиус кривизны в вершине днища по внутренней поверхности, мм;

φ – коэффициент прочности сварных швов;

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

Радиус кривизны в вершине днища, мм, определяют по формуле

$$R = \frac{D^2}{4H}, \qquad (2)$$

где $R = D$ – для стандартных эллиптических днищ с $H = 0{,}25D$;

$R = 0{,}5D$ – для полусферических днищ с $H = 0{,}5D$.

Для днищ, изготовленных из одной заготовки, коэффициент $\varphi = 1$. Для днищ, изготовленных из нескольких заготовок, коэффициент φ следует определять по стандарту [10] или методическим указаниям [21].

Исполнительную толщину стенки днища, мм, рассчитывают по формуле

$$S_1 \geq S_{1p} + C. \qquad (3)$$

Размеры эллиптического днища принимают по стандарту [3] или по таблице А.1 приложения А, а исполнительную толщину полусферического днища округляют до ближайшего большего значения стандартной толщины листового проката.

Если длина цилиндрической отбортованной части эллиптического днища $h_1 > 0{,}8 \cdot \sqrt{D \cdot (S_1 - C)}$, то толщина стенки днища S_1 должна быть не менее толщины стенки обечайки S, рассчитанной при $\varphi = 1$.

Допускаемое внутреннее избыточное давление рассчитывают по формуле

$$[P] = \frac{2 \cdot (S_1 - C) \cdot \varphi \cdot [\sigma]}{R + 0{,}5 \cdot (S_1 - C)}. \qquad (4)$$

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

Пример 1

Рассчитать толщину стенки эллиптического днища, работающего под внутренним избыточным давлением. Материал днища – сталь Ст3сп5. Внутренний диаметр аппарата 1000 мм, расчетное давление 1,0 МПа, расчетная температура 165 °С, коэффициент прочности сварных соединений $\varphi = 0{,}9$. Прибавку на коррозию принять равной 2 мм.

Расчетную толщину стенки днища определяем по формуле (1), учитывая, что радиус кривизны в вершине днища по внутренней поверхности для стандартных эллиптических днищ $R = D$.

$$S_{1p} = \frac{1{,}0 \cdot 1000}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 144 - 0{,}5 \cdot 1{,}0} = 3{,}87 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавок для компенсации коррозии C_1 *и минусового допуска* C_2

$$S_1 \geq 3{,}87 + 2{,}8 = 6{,}67 \text{ мм},$$

где $C_1 = 2$ *мм;*

$C_2 = 0{,}8$ *мм (по таблице 6 [21] для толщин 8 – 12 мм).*

Исполнительную толщину эллиптического днища принимаем по таблице А.1 приложения А

$$S_1 = 8 \text{ мм.}$$

Для принятой толщины допускаемое внутреннее избыточное давление рассчитываем по формуле (4)

$$[P] = \frac{2 \cdot (8 - 2{,}8) \cdot 0{,}9 \cdot 144}{1000 + 0{,}5 \cdot (8 - 2{,}8)} = 1{,}34 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется

$$1{,}0 < 1{,}34 \text{ (МПа).}$$

Проверяем условие применения расчетных формул

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

$$0{,}002 < 0{,}0052 < 0{,}1.$$

Условие применения расчетных формул выполняется.

Пример 2

Рассчитать толщину стенки полусферического днища, работающего под внутренним избыточным давлением. Материал днища – сталь 09Г2С. Внутренний диаметр аппарата 4000 мм, расчетное давление 0,6 МПа, расчетная температура 100 °С, коэффициент прочности сварных соединений $\varphi = 1$*. Прибавку для компенсации коррозии и эрозии принять равной 2 мм.*

Расчетную толщину стенки днища определяем по формуле (1), учитывая, что радиус кривизны в вершине днища по внутренней поверхности полусферического днища $R = \frac{D}{2}$.

$$S_{1p} = \frac{0{,}6 \cdot 2000}{2 \cdot 1 \cdot 177 - 0{,}5 \cdot 0{,}6} = 3{,}39 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавок для компенсации коррозии C_1 *и минусового допуска* C_2

$$S_1 \geq 3{,}39 + 2{,}8 = 6{,}19 \text{ мм},$$

где $C_1 = 2$ *мм;*

$C_2 = 0{,}8$ *мм (по таблице 6 [21] для толщин 8 – 12 мм).*

Исполнительную толщину полусферического днища округляем до ближайшего большего значения стандартной толщины листового проката

$$S_1 = 8 \text{ мм.}$$

Для принятой толщины допускаемое внутреннее избыточное давление рассчитываем по формуле (4)

$$[P] = \frac{2 \cdot (8 - 2{,}8) \cdot 1 \cdot 177}{2000 + 0{,}5 \cdot (8 - 2{,}8)} = 0{,}919 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется

$$0{,}6 < 0{,}919 \text{ (МПа).}$$

Днища из двухслойной стали

При расчете эллиптических и полусферических днищ, изготовленных из двухслойной стали и нагруженных внутренним избыточным давлением, в качестве первого приближения толщину стенки днища следует определять по допускаемому напряжению для материала основного слоя по формулам (1, 2, 3). После выбора исполнительной толщины, а также толщины плакирующего слоя по таблице 5 [21] рассчитывается допускаемое напряжение по формуле (8) [21]. По полученному допускаемому напряжению уточняется толщина стенки по

формулам (1, 2, 3). Расчет производится до совпадения исполнительной толщины стенки днища, определенной расчетом, и принятой.

В случае, когда в расчете учитывается толщина только основного слоя, при определении исполнительной толщины стенки днища в качестве прибавки для компенсации коррозии и эрозии принимается максимальная толщина плакирующего слоя.

Допускаемое внутреннее избыточное давление следует определять по формуле (4).

Пример 3

Рассчитать толщину эллиптического днища из двухслойной стали Ст3сп+12Х18Н10Т. Внутренний диаметр аппарата 2000 мм, расчетное давление 1,0 МПа, расчетная температура 100 °С, коэффициент прочности сварных соединений $\varphi = 1$. Прибавку для компенсации коррозии и эрозии со стороны плакирующего слоя принять равной 1 мм.

По таблицам А.1 и А.3 приложения А [21] 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.*

В качестве первого приближения толщину стенки днища определяем по допускаемому напряжению для материала основного слоя по формуле (1)

$$S_{1p} = \frac{1{,}0 \cdot 2000}{2 \cdot 1 \cdot 149 - 0{,}5 \cdot 1{,}0} = 6{,}81 \text{ мм}.$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавок для компенсации коррозии C_1 *и минусового допуска* C_2

$$S_1 \geq 6{,}81 + 1{,}9 = 8{,}71 \text{ мм},$$

где $C = C_1 + C_2 = 1 + 0{,}9 = 1{,}9$ *мм.*

Прибавку для компенсации минусового допуска C_2 *принимаем по таблице 5 [21] для* $S_1 = 10$ *мм.*

По таблице 5 [21] определяем, что для двухслойного листа толщиной 10 мм толщина плакирующего (коррозионностойкого) слоя со-

ставляет 2…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) [21].

$$[\sigma] = \frac{149 \cdot (8-0) + 174 \cdot (2-1)}{(8-0)+(2-1)} = 151{,}77 \text{ МПа}.$$

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

$$[\sigma] = 151{,}5 \text{ МПа}.$$

По полученному допускаемому напряжению уточняем толщину стенки по формулам (1) и (3).

$$S_{1p} = \frac{1{,}0 \cdot 2000}{2 \cdot 151{,}5 \cdot 1 - 0{,}5 \cdot 1{,}0} = 6{,}61 \text{ мм}.$$

$$S_1 \geq 6{,}61 + 1{,}9 = 8{,}51 \text{ мм}.$$

Принимаем значение толщины стенки $S_1 = 10$ *мм, что совпадает с предварительным расчетом.*

Для принятого значения S_1 *рассчитываем допускаемое давление по формуле (4)*

$$[P] = \frac{2 \cdot 151{,}5 \cdot 1 \cdot (10 - 1{,}9)}{2000 + 0{,}5 \cdot (10 - 1{,}9)} = 1{,}22 \text{ МПа}.$$

Условие прочности выполняется $1{,}0 < 1{,}22$ *(МПа).*

Проверяем условие применения расчетных формул

$$\frac{S - C}{D} = \frac{10 - 1{,}9}{2000} = 0{,}0041;$$

$$0{,}002 < 0{,}0041 < 0{,}1.$$

Условие применения расчетных формул выполняется.

Пример 4

Определить толщину стенки эллиптического днища по данным примера 3, учитывая только толщину основного слоя.

Для основного слоя (сталь Ст3сп) $[\sigma]_o = 149$ *МПа.*

Расчетную толщину стенки днища определяем по допускаемому напряжению для материала основного слоя по формуле (1)

$$S_{1p} = \frac{1{,}0 \cdot 2000}{2 \cdot 1 \cdot 149 - 0{,}5 \cdot 1{,}0} = 6{,}81 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавки для компенсации коррозии и эрозии C_1 *и прибавки на компенсацию минусового допуска* C_2*, при этом в качестве прибавки для компенсации коррозии принимаем максимальную толщину плакирующего слоя по таблице 5[21]*

$$S_1 \geq 6{,}81 + 4{,}08 = 10{,}89 \text{ мм,}$$

где $C = C_1 + C_2 = 3 + 1{,}08 = 4{,}08$ *мм.*

Исполнительную толщину эллиптического днища принимаем по таблице А.1 приложения А

$$S_1 = 12 \text{ мм.}$$

Для принятой толщины допускаемое внутреннее избыточное давление рассчитываем по формуле (4)

$$[P] = \frac{2 \cdot (12 - 4{,}08) \cdot 1 \cdot 149}{2000 + 0{,}5 \cdot (12 - 4{,}08)} = 1{,}17 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется

$$1{,}0 < 1{,}17 \text{ (МПа).}$$

Проверяем условие применения расчетных формул

$$\frac{S - C}{D} = \frac{12 - 4{,}08}{2000} = 0{,}004;$$

$$0{,}002 < 0{,}004 < 0{,}1.$$

Условие применения расчетных формул выполняется.

3.1.2 Эллиптические и полусферические днища, нагруженные наружным давлением

Расчетную толщину стенки, мм, приближенно определяют по формуле

$$S_{1p} = max\left\{ \frac{K_э \cdot R}{510} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot P}{10^{-6} \cdot E}} \; ; \quad \frac{P \cdot R}{2 \cdot [\sigma]} \right\}, \tag{5}$$

где P – расчетное наружное давление, МПа;

$K_э$ – коэффициент приведения радиуса кривизны эллиптического днища;

n_y – коэффициент запаса устойчивости;

E – модуль продольной упругости при расчетной температуре, МПа (таблица 9 [21]).

Для предварительного расчета $K_э$ принимают равным 0,9 для эллиптических днищ и 1,0 – для полусферических днищ.

Коэффициент n_y следует принимать:

$n_y = 2{,}4$ – для рабочих условий;

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

Исполнительную толщину стенки днища определяют по формуле (3).

Расчетное значение коэффициента $K_э$ определяют по формуле

$$K_э = \frac{1 + (2{,}4 + 8 \cdot x) \cdot x}{1 + (3{,}0 + 10 \cdot x) \cdot x}, \tag{6}$$

где

$$x = 10 \cdot \frac{S_1 - C}{D} \cdot \left(\frac{D}{2H} - \frac{2H}{D} \right). \tag{7}$$

После этого по формулам (5) и (3) уточняют значение толщины стенки днища. Расчет производят до совпадения исполнительной толщины стенки днища, определенной двумя последними расчетами.

Допускаемое наружное давление, МПа, рассчитывается по формуле

$$[P] = \frac{[P]_П}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P]_П}{[P]_E} \right)^2}}. \tag{8}$$

Допускаемое давление из условия прочности, МПа

$$[P]_{П} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (S_1 - C)}{R + 0{,}5 \cdot (S_1 - C)}, \qquad (9)$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа

$$[P]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (S_1 - C)}{K_э \cdot R} \right]^2. \qquad (10)$$

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

Пример 5

Рассчитать толщину нижнего эллиптического днища корпуса аппарата типа ВЭЭ с рубашкой. Давление в аппарате – атмосферное, расчетное давление в рубашке – 0,63 МПа. Материал корпуса – сталь Ст3сп5. Внутренний диаметр аппарата 1000 мм, расчетная температура 165 °С. Прибавку для компенсации коррозии и эрозии принять равной: со стороны рабочей среды – 2 мм, со стороны теплоносителя – 1 мм.

Расчетную толщину стенки приближенно определяем по формуле (5), при этом принимаем для предварительного расчета эллиптического днища $K_э = 0{,}9$, *коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий* $n_y = 2{,}4$, *а модуль продольной упругости материала обечайки при расчетной температуре определяем методом линейной интерполяции по таблице 9 [21].*

$$S_{1p} = max\left\{ \frac{0{,}9 \cdot 1000}{510} \cdot \sqrt{\frac{2{,}4 \cdot 0{,}63}{10^{-6} \cdot 185 \cdot 10^3}};\quad \frac{0{,}63 \cdot 1000}{2 \cdot 144} \right\} =$$

$$= max\{5{,}05;\ 2{,}19\} = 5{,}05 \text{ мм}.$$

Исполнительную толщину стенки днища определяем по формуле (3).

$$S_1 \ge 5{,}05 + 3{,}8 = 8{,}85 \text{ мм},$$

где $C = C_1 + C_2 = (2 + 1) + 0{,}8 = 3{,}8$ *мм.*

Исполнительную толщину эллиптического днища принимаем по таблице А.1 приложения А

$$S_1 = 10\,мм.$$

Для принятого значения S_1 по формуле (6) уточняем расчетное значение коэффициента $K_э$, для этого по формуле (7) вычисляем значение коэффициента x

$$x = 10 \cdot \frac{10-3{,}8}{1000} \cdot \left(\frac{1000}{2 \cdot 250} - \frac{2 \cdot 250}{1000} \right) = 0{,}093,$$

где $H = 0{,}25 \cdot D = 0{,}25 \cdot 1000 = 250\,мм$ – высота выпуклой части днища.

$$K_э = \frac{1 + (2{,}4 + 8 \cdot 0{,}093) \cdot 0{,}093}{1 + (3 + 10 \cdot 0{,}093) \cdot 0{,}093} = 0{,}946.$$

После этого по формулам (5) и (3) уточняем значение толщины стенки днища.

$$S_{1p} = max\left\{ \frac{0{,}946 \cdot 1000}{510} \cdot \sqrt{\frac{2{,}4 \cdot 0{,}63}{10^{-6} \cdot 185 \cdot 10^3}}; \frac{0{,}63 \cdot 1000}{2 \cdot 144} \right\} =$$

$$= max\{5{,}31; 2{,}19\} = 5{,}31\,мм.$$

$$S_1 \geq 5{,}31 + 3{,}8 = 9{,}11\,мм.$$

$$S_1 = 10\,мм.$$

Полученная толщина совпадает со значением, принятым при определении расчетного значения коэффициента $K_э$.

Допускаемое наружное давление рассчитываем по формуле (8).

Допускаемое давление из условия прочности в формуле (8) определяем по формуле (9)

$$[P]_П = \frac{2 \cdot 144 \cdot (10-3{,}8)}{1000 + 0{,}5 \cdot (10-3{,}8)} = 1{,}78\,МПа,$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости – по формуле (10)

$$[P]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 185 \cdot 10^3}{2{,}4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (10-3{,}8)}{0{,}946 \cdot 1000} \right]^2 = 0{,}86\,МПа,$$

$$[P]=\frac{1{,}78}{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}78}{0{,}86}\right)^2}}=0{,}774\ \text{МПа}.$$

Условие прочности выполняется $0{,}63\le 0{,}774$ *(МПа).*

Проверяем условие применения расчетных формул

$$\frac{S-C}{D}=\frac{10-3{,}8}{1000}=0{,}006;$$

$$0{,}002<0{,}006<0{,}1\ .$$

Условие применения расчетных формул выполняется.

Пример 6

Рассчитать толщину полусферического днища, нагруженного наружным давлением. Расчетное наружное давление – 0,4 МПа. Материал корпуса – сталь 09Г2С. Внутренний диаметр аппарата 4000 мм, расчетная температура 100 °С. Прибавку на коррозию принять равной 2 мм.

Расчетную толщину стенки днища определяем по формуле (5), учитывая, что радиус кривизны в вершине днища по внутренней поверхности полусферического днища $R=\frac{D}{2}$, *при этом принимаем для полусферического днища* $K_э=1{,}0$, *коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий* $n_y=2{,}4$, *а модуль продольной упругости материала днища при расчетной температуре определяем по таблице 9 [21].*

$$S_{1p}=\max\left\{\frac{1{,}0\cdot 2000}{510}\cdot\sqrt{\frac{2{,}4\cdot 0{,}4}{10^{-6}\cdot 191\cdot 10^3}};\quad \frac{0{,}4\cdot 2000}{2\cdot 177}\right\}=$$

$$=\max\{8{,}80;\quad 2{,}26\}=8{,}8\ \text{мм}.$$

Исполнительную толщину стенки днища определяем по формуле (3).

$$S_1\ge 8{,}8+2{,}8=11{,}6\ \text{мм}.$$

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

Исполнительную толщину полусферического днища округляем до ближайшего большего значения стандартной толщины листового проката

$$S_1 = 12 \text{ мм.}$$

Допускаемое наружное давление рассчитываем по формуле (8).

Допускаемое давление из условия прочности в формуле (8) определяем по формуле (9)

$$[P]_П = \frac{2 \cdot 177 \cdot (12 - 2{,}8)}{2000 + 0{,}5 \cdot (12 - 2{,}8)} = 1{,}625 \text{ МПа,}$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости – по формуле (10)

$$[P]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 191 \cdot 10^3}{2{,}4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (12 - 2{,}8)}{1{,}0 \cdot 2000}\right]^2 = 0{,}497 \text{ МПа,}$$

$$[P] = \frac{1{,}625}{\sqrt{1 + \left(\frac{1{,}625}{0{,}497}\right)^2}} = 0{,}475 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется $0{,}4 \le 0{,}475$ *(МПа).*

Проверяем условие применения расчетных формул:

$$\frac{S - C}{D} = \frac{12 - 2{,}8}{4000} = 0{,}006;$$

$$0{,}002 < 0{,}0023 < 0{,}1 .$$

Условие применения расчетных формул выполняется.

Днища, изготовленные из двухслойной стали

Расчет днищ, изготовленных из двухслойной стали и нагруженных наружным давлением, производится по подразделу 3.1.2. При этом учитывается только основной слой.

Пример 7

Определить толщину стенки эллиптического днища из двухслойной стали Ст3сп+12Х18Н10Т по данным примера 5, учитывая только толщину основного слоя.

Для основного слоя (сталь Ст3сп) $[\sigma]_o = 144$ *МПа.*

Расчетную толщину стенки днища определяем по допускаемому напряжению для материала основного слоя по формуле (5)

$$S_{1p} = max\left\{\frac{0{,}9\cdot 1000}{510}\cdot\sqrt{\frac{2{,}4\cdot 0{,}63}{10^{-6}\cdot 185\cdot 10^{3}}};\quad \frac{0{,}63\cdot 1000}{2\cdot 144}\right\} =$$

$$= max\{5{,}05;\,2{,}19\} = 5{,}05 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки днища определяем по формуле (3), при этом прибавку для компенсации коррозии и эрозии C_1 *определяем как сумму максимальной толщины плакирующего слоя (3 мм по таблице 5 [21]) и прибавки для компенсации коррозии со стороны теплоносителя (1 мм)*

$$S_1 \geq 5{,}05 + 4{,}8 = 9{,}85 \text{ мм.}$$

где $C = C_1 + C_2 = (3+1) + 0{,}8 = 4{,}8$ *мм.*

Исполнительную толщину эллиптического днища принимаем по таблице А.1 приложения А

$$S_1 = 10 \text{ мм.}$$

Для принятого значения S_1 *по формуле (6) уточняем расчетное значение коэффициента* $K_э$*, для этого по формуле (7) вычисляем значение коэффициента* x

$$x = 10\cdot\frac{10-4{,}8}{1000}\cdot\left(\frac{1000}{2\cdot 250}-\frac{2\cdot 250}{1000}\right) = 0{,}078,$$

где $H = 0{,}25\cdot D = 0{,}25\cdot 1000 = 250$ *мм – высота выпуклой части днища.*

$$K_э = \frac{1+(2{,}4+8\cdot 0{,}078)\cdot 0{,}078}{1+(3+10\cdot 0{,}078)\cdot 0{,}078} = 0{,}954.$$

После этого по формулам (5) и (3) уточняем значение толщины стенки днища.

$$S_{1p} = max\left\{\frac{0{,}954 \cdot 1000}{510} \cdot \sqrt{\frac{2{,}4 \cdot 0{,}63}{10^{-6} \cdot 185 \cdot 10^3}};\quad \frac{0{,}63 \cdot 1000}{2 \cdot 144}\right\} =$$

$$= max\{5{,}35; 2{,}19\} = 5{,}35 \text{ мм}.$$

$$S_1 \geq 5{,}35 + 4{,}8 = 10{,}15 \text{ мм}.$$

$$S_1 = 12 \text{ мм}.$$

Полученная толщина не совпадает со значением, принятым при определении расчетного значения коэффициента $K_э$. Уточняем значение $K_э$

$$x = 10 \cdot \frac{12 - 4{,}8}{1000} \cdot \left(\frac{1000}{2 \cdot 250} - \frac{2 \cdot 250}{1000}\right) = 0{,}108,$$

$$K_э = \frac{1 + (2{,}4 + 8 \cdot 0{,}108) \cdot 0{,}108}{1 + (3 + 10 \cdot 0{,}108) \cdot 0{,}108} = 0{,}939.$$

$$S_{1p} = max\left\{\frac{0{,}939 \cdot 1000}{510} \cdot \sqrt{\frac{2{,}4 \cdot 0{,}63}{10^{-6} \cdot 185 \cdot 10^3}}; \frac{0{,}63 \cdot 1000}{2 \cdot 144}\right\} =$$

$$= max\{5{,}26; 2{,}19\} = 5{,}26 \text{ мм}.$$

$$S_1 \geq 5{,}26 + 4{,}8 = 10{,}06 \text{ мм}.$$

$$S_1 = 12 \text{ мм}.$$

Полученная толщина совпадает со значением, принятым при определении расчетного значения коэффициента $K_э$.

Допускаемое наружное давление рассчитываем по формуле (8).

Допускаемое давление из условия прочности в формуле (8) определяем по формуле (9)

$$[P]_П = \frac{2 \cdot 144 \cdot (12 - 4{,}8)}{1000 + 0{,}5 \cdot (12 - 4{,}8)} = 2{,}066 \text{ МПа},$$

а допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости – по формуле (10)

$$[P]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 185 \cdot 10^3}{2{,}4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (12 - 4{,}8)}{0{,}939 \cdot 1000}\right]^2 = 1{,}179 \text{ МПа},$$

$$[P] = \frac{2{,}066}{\sqrt{1 + \left(\frac{2{,}066}{1{,}179}\right)^2}} = 1{,}024 \ \ МПа.$$

Условие прочности выполняется $0{,}63 \le 1{,}024$ *(МПа).*

Проверяем условие применения расчетных формул

$$\frac{S - C}{D} = \frac{12 - 4{,}8}{1000} = 0{,}007;$$

$$0{,}002 < 0{,}007 < 0{,}1.$$

Условие применения расчетных формул выполняется.

3.2 Сферические неотбортованные днища и крышки

Расчетные формулы следует применять при отношении толщины стенки к радиусу сферы

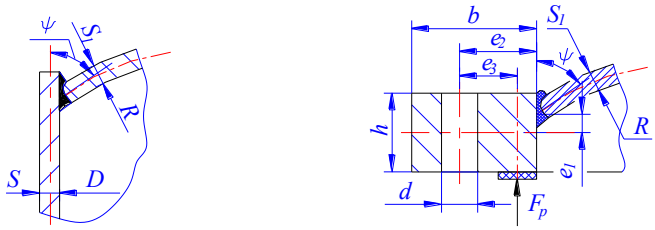
$$\frac{S_1 - C}{R} \le 0{,}1$$

и

$$0{,}85\,D \le R \le D.$$

Для днищ в соответствии с рисунком 8, нагруженных внутренним избыточным давлением, расчетные формулы следует применять при дополнительном условии

$$\frac{S_1 - C}{R} \ge 0{,}002.$$



а *б*

Рисунок 8 – Расчетная схема сферического неотбортованного днища

Расчетные формулы применяют при условии выполнения угловых швов с двусторонним сплошным проваром.

3.2.1 Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные внутренним избыточным давлением

Расчетную толщину стенки крышек и днищ определяют методом последовательных приближений. Предварительно толщину стенки следует определять по формуле

$$S'_{1p} = \frac{P \cdot R}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi - P}, \qquad (11)$$

а затем по формуле

$$S''_{1p} = \frac{P \cdot D \cdot \beta}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_к - P}, \qquad (12)$$

где φ – коэффициент прочности сварного шва для сферического сегмента, соединенного сваркой из двух или нескольких частей;

$\varphi_к$ – коэффициент прочности кольцевого сварного шва по краю днища.

Расчет проводят до тех пор, пока разница между полученным значением S''_1 и принятым S_1 при определении коэффициента β по формуле (13) не будет превышать 5%. В качестве расчетной толщины стенки днища или крышки принимают большее из двух значений, определяемых по формулам (11) и (12).

Исполнительную толщину стенки определяют по формуле (3).

Коэффициент β определяют по формуле

$$\beta = 0{,}5 + \frac{tg\,\psi}{\chi_к \frac{4A_к}{D(S_1 - C)}\sqrt{1 - \frac{M}{[M]}} + 3\sqrt{\frac{S_1 - C}{D}}\left[\frac{1}{\sqrt{\cos\psi}} + \left(\chi \frac{S - C}{S_1 - C}\right)^{1{,}5}\right]} \qquad (13)$$

где ψ – угол между касательной к сферическому сегменту в краевой зоне и вертикальной осью, град.;

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

M – расчетный момент, действующий на кольце, Н·мм;

$[M]$ – допускаемый момент для кольца, Н·мм.

При заданных геометрических размерах днища тригонометрические функции угла ψ определяют по формулам

$$\cos\psi = \frac{D}{2R}; \quad tg\,\psi = \sqrt{\left(\frac{2R}{D}\right)^2 - 1}.$$

Отношения допускаемых напряжений

$$\chi_к = \frac{[\sigma]_к}{[\sigma]_1}; \quad \chi = \frac{[\sigma]}{[\sigma]_1},$$

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

$[\sigma]_1$ – допускаемое напряжение для материала сферического сегмента при расчетной температуре, МПа;

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

Величины $A_к, M, [M]$ для конструкции по рисунку 7*б* определяют по формулам

$$A_к = (b - d)\cdot h, \tag{14}$$

$$M = \left| P\frac{\pi \cdot D^2}{4}(e_2 - e_1 \cdot tg\,\psi) + F_p \cdot e_3 \right|, \tag{15}$$

$$[M] = \frac{\pi \cdot [\sigma]_к \cdot (b - d)\cdot h^2}{2}, \tag{16}$$

где b – ширина кольца, мм;

d – диаметр отверстия под болт (шпильку), мм;

h – высота кольца, мм;

e_1 – расстояние от точки пересечения средней линии стенки сферического сегмента с кольцом до горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести кольца, мм;

e_2 – расстояние от окружности расположения болтов до внутреннего диаметра кольца, мм;

e_3 – расстояние от окружности расположения болтов до линии действия реакции прокладки, мм;

F_p – реакция прокладки, Н.

Допускаемое избыточное давление определяют по формуле

$$[P] = min\{[P_1]; [P_2]\}, \quad (17)$$

где $[P_1]$ – допускаемое избыточное давление из условия прочности краевой зоны;

$[P_2]$ – допускаемое избыточное давление из условия прочности центральной зоны.

Допускаемое избыточное давление из условия прочности краевой зоны определяется по формуле

$$[P_1] = \frac{2(S_1 - C)\cdot \varphi_к \cdot [\sigma]_1}{D\cdot \beta + (S_1 - C)}; \quad (18)$$

Допускаемое избыточное давление из условия прочности центральной зоны определяется по формуле

$$[P_2] = \frac{2(S_1 - C)\cdot \varphi \cdot [\sigma]_1}{R + (S_1 - C)}. \quad (19)$$

Пример 8

Рассчитать толщину стенки сферического неотбортованного днища горизонтального резервуара, работающего под налив. Давление в резервуаре – атмосферное, температура среды 100 °С. Внутренний диаметр резервуара 2000 мм, толщина цилиндрической обечайки 6 мм, плотность жидкости 1200 кг/м^3, материал днища – сталь 09Г2С, группа аппарата – 5б. Прибавку на коррозию принять равной 2 мм.

Расчетное давление в сосуде будет равно гидростатическому давлению среды. Высоту жидкости в резервуаре принимаем равной диаметру аппарата. Гидростатическое давление жидкости определяем по формуле (1) методических указаний [21]

$$P_г = 1200 \cdot 9{,}81 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0{,}024 \text{ МПа}.$$

Расчетную температуру принимаем равной температуре среды. Допускаемое напряжение при расчетной температуре 100 °С для стали 09Г2С определяем по таблице А.1 приложения А методических указаний [21]

$$[\sigma] = 177 \text{ МПа}.$$

Для аппарата, относящегося к 5б группе, длина контролируемых участков швов составляет не менее 10 %, коэффициент прочности сварных соединений для стыковых швов с двусторонним сплошным проваром принимаем равным $\varphi = 0{,}9$ *[21].*

Предварительно толщину стенки сферического неотбортованного днища определяем по формуле (11)

$$S'_{1p} = \frac{0{,}024 \cdot 2000}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 177 - 0{,}5 \cdot 0{,}024} = 0{,}148 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавок для компенсации коррозии C_1 *и минусового допуска* C_2

$$S'_1 \geq 0{,}148 + 2{,}6 = 2{,}748 \text{ мм},$$

где $C_1 = 2$ *мм;*

$C_2 = 0{,}6$ *мм (по таблице 6 [21] для толщины 6 мм).*

Исполнительную толщину сферического неотбортованного днища принимаем по таблице А.2 приложения А

$$S_1 = 6 \text{ мм.}$$

Уточняем значение расчетной толщины днища по формуле (12). Для этого определим тригонометрические функции угла ψ

$$\cos\psi = \frac{2000}{2 \cdot 2000} = 0{,}5; \quad tg\,\psi = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 2000}{2000}\right)^2 - 1} = 1{,}732.$$

Определяем значение коэффициента β *по формуле (13) применительно к конструкции на рисунке 7а (при* $A_к = 0$ *)*

$$\beta = 0{,}5 + \frac{0{,}5}{3\sqrt{\frac{6-2{,}6}{2000}}\left[\frac{1}{\sqrt{0{,}5}} + \left(1 \cdot \frac{6-2{,}6}{6-2{,}6}\right)^{1{,}5}\right]} = 6{,}3.$$

По формуле (12)

$$S''_{1p} = \frac{0{,}024 \cdot 2000 \cdot 6{,}3}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 177 - 0{,}5 \cdot 0{,}024} = 0{,}931 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавок для компенсации коррозии C_1 и минусового допуска C_2

$$S_1'' \geq 0{,}931 + 2{,}6 = 3{,}531 \text{ мм.},$$

Исполнительную толщину сферического неотбортованного днища принимаем с учетом большей расчетной толщины по формулам (11) и (12)

$$S_1 = 6 \text{ мм.}$$

Допускаемое давление определяем по формуле (17), предварительно определив допускаемые давления $[P_1]$ и $[P_2]$ по формулам (18) и (19):

$$[P_1] = \frac{2(6-2{,}6)\cdot 0{,}9 \cdot 177}{2000 \cdot 6{,}3 + (6-2{,}6)} = 0{,}086 \text{ МПа;}$$

$$[P_2] = \frac{2(6-2{,}6)\cdot 0{,}9 \cdot 177}{2000 + (6-2{,}6)} = 0{,}541 \text{ МПа;}$$

$$[P] = \min\{0{,}086\,;\,0{,}541\} = 0{,}086 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется: $0{,}024 < 0{,}086$ (МПа).

Условия применения расчетных формул

$$\frac{S_1 - C}{D} = \frac{6-2{,}6}{2000} = 0{,}0017 < 0{,}002\,.$$

Условие применения не выполняется, поэтому принимаем ближайшее большее значение толщины днища по таблице А.2 и повторяем расчеты.

Определяем значение коэффициента β

$$\beta = 0{,}5 + \frac{0{,}5}{\sqrt[3]{\frac{8-2{,}8}{2000}}\left[\frac{1}{\sqrt{0{,}5}} + \left(1 \cdot \frac{8-2{,}8}{8-2{,}8}\right)^{1{,}5}\right]} = 5{,}19.$$

По формуле (12)

$$S_{1p}'' = \frac{0{,}024 \cdot 2000 \cdot 5{,}19}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 177 - 0{,}5 \cdot 0{,}024} = 0{,}767 \text{ мм.}$$

$$S_1'' \geq 0{,}767 + 2{,}8 = 3{,}567 \text{ мм.},$$

Принимаем исполнительную толщину сферического неотбортованного днища

$$S_1 = 8 \text{ мм.}$$

Допускаемое давление определяем по формуле (17), предварительно определив допускаемые давления $[P_1]$ *и* $[P_2]$ *по формулам (18) и (19)*

$$[P_1] = \frac{2(8-2{,}8)\cdot 0{,}9 \cdot 177}{2000 \cdot 5{,}19 + (8-2{,}8)} = 0{,}16 \text{ МПа;}$$

$$[P_2] = \frac{2(8-2{,}8)\cdot 0{,}9 \cdot 177}{2000 + (8-2{,}8)} = 0{,}826 \text{ МПа;}$$

$$[P] = \min\{0{,}16\,;\,0{,}826\} = 0{,}16 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется: $0{,}024 < 0{,}16$ *(МПа).*

Условия применения расчетных формул

$$\frac{S_1 - C}{D} = \frac{8-2{,}8}{2000} = 0{,}0026 > 0{,}002\,.$$

Пример 9

Рассчитать толщину крышки люка колонного аппарата, работающего под внутренним избыточным давлением. Внутренний диаметр аппарата 1200 мм, расчетное давление 1,0 МПа, расчетная температура 100 °С. Материал корпуса – сталь 12Х18Н10Т. Группа аппарата – 4. Прибавку для компенсации коррозии принять равной 2 мм.

Принимаем люк по ОСТ 26–2003–83 [17] исполнения 1 внутренним диаметром 600 мм на условное давление 1,0 МПа с шифром материального исполнения 4 (сталь 12Х18Н10Т). Условное обозначение люка

Люк 1–600–1,0–4 ОСТ 26–2003–83.

Толщина стенки обечайки люка 10 мм.

Расчетная схема крышки люка приведена на рисунке 8.

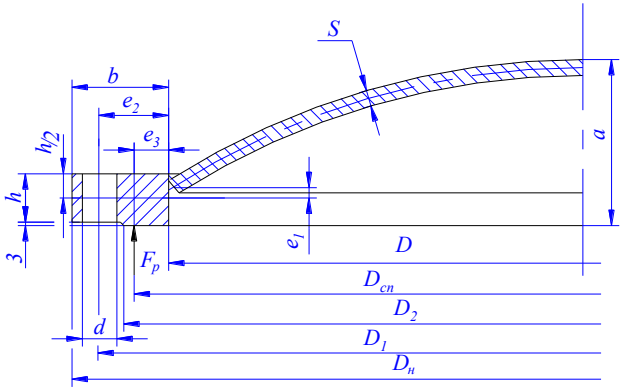


Рисунок 8 – Крышка люка

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при расчетной температуре

$$[\sigma] = 174 \text{ МПа}.$$

Предварительно толщину стенки сферического неотбортованного днища определяем по формуле (11)

$$S'_{1p} = \frac{1{,}0 \cdot 600}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 174 - 0{,}5 \cdot 1{,}0} = 0{,}148 \text{ мм}.$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавок для компенсации коррозии C_1 *и минусового допуска* C_2

$$S'_1 \geq 0{,}148 + 2{,}8 = 2{,}948 \text{ мм},$$

где $C_1 = 2$ *мм;*

$C_2 = 0{,}8$ *мм (по таблице 6 [21] для толщины 10 мм).*

Исполнительную толщину сферического неотбортованного днища принимаем по стандарту [17]

$$S_1 = 10 \text{ мм}.$$

Уточняем значение расчетной толщины днища по формуле (12). Для этого определим тригонометрические функции угла ψ

$$\cos\psi = \frac{600}{2\cdot 600} = 0{,}5; \quad tg\,\psi = \sqrt{\left(\frac{2\cdot 600}{600}\right)^2 - 1} = 1{,}732.$$

Величины $A_к, M, [M]$ для конструкции по рисунку 7б определяем по формулам (14 – 16). Размеры фланца определяем по стандарту [17]. Размеры прокладки определяем по стандарту [14], материал прокладки – паронит. Реакцию прокладки определяем по формуле (45) методических указаний [23]

$$F_p = 3{,}14\cdot 648\cdot 15\cdot 2{,}5\cdot 1{,}0 = 7{,}634\cdot 10^4\ Н,$$

$$A_к = (70-23)\cdot 32 = 1504\ мм^2,$$

$$M = \left|1{,}0\frac{3{,}14\cdot 600^2}{4}(50 - 2{,}8\cdot 1{,}732) + 7{,}634\cdot 10^4\cdot 26\right| = 1{,}475\cdot 10^7\ Н{\cdot}мм,$$

$$[M] = \frac{3{,}14\cdot 174\cdot (70-23)\cdot 32^2}{2} = 1{,}315\cdot 10^7\ Н{\cdot}мм.$$

Условие прочности по изгибающим моментам для выбранного фланца не выполняется

$$1{,}315\cdot 10^7 < 1{,}475\cdot 10^7\ (Н{\cdot}мм).$$

Переходим на фланец большего условного давления. Соответственно принимаем люк по ОСТ 26–2002–83 [17] исполнения 1 внутренним диаметром 600 мм на условное давление 1,6 МПа. Повторяем расчеты, учитывая размеры фланца, крышки, днища и прокладки по соответствующим стандартам.

$$A_к = (70-23)\cdot 37 = 1739\ мм^2,$$

$$M = \left|1{,}0\frac{3{,}14\cdot 600^2}{4}(50 - 5{,}3\cdot 1{,}732) + 7{,}634\cdot 10^4\cdot 26\right| = 1{,}353\cdot 10^7\ Н{\cdot}мм,$$

$$[M] = \frac{3{,}14\cdot 174\cdot (70-23)\cdot 37^2}{2} = 1{,}759\cdot 10^7\ Н{\cdot}мм.$$

Условие прочности по изгибающим моментам для выбранного фланца выполняется

$$1{,}353\cdot 10^7 < 1{,}759\cdot 10^7\ (Н{\cdot}мм).$$

Определяем значение коэффициента β по формуле (13) применительно к конструкции на рисунке 7б

$$\beta = 0{,}5 + \frac{0{,}5}{\frac{4 \cdot 1739}{600(10-2{,}8)}\sqrt{1-\frac{1{,}353 \cdot 10^7}{1{,}759 \cdot 10^7}} + 3\sqrt{\frac{10-2{,}8}{2000}}\left[\frac{1}{\sqrt{0{,}5}} + \left(\frac{10-2{,}8}{10-2{,}8}\right)^{1{,}5}\right]} =$$

$$= 1{,}605.$$

По формуле (12)

$$S''_{1p} = \frac{1{,}0 \cdot 600 \cdot 1{,}605}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 174 - 0{,}5 \cdot 1{,}0} = 3{,}08 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавок для компенсации коррозии C_1 и минусового допуска C_2

$$S''_1 \geq 3{,}08 + 2{,}8 = 5{,}88 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину сферического неотбортованного днища принимаем с учетом большей расчетной толщины по формулам (11) и (12) по стандарту [17]

$$S_1 = 10 \text{ мм.}$$

Допускаемое давление определяем по формуле (17), предварительно определив допускаемые давления $[P_1]$ и $[P_2]$ по формулам (18) и (19):

$$[P_1] = \frac{2(10-2{,}8) \cdot 0{,}9 \cdot 174}{600 + (10-2{,}8)} = 3{,}714 \text{ МПа;}$$

$$[P_2] = \frac{2(10-2{,}8) \cdot 0{,}9 \cdot 174}{600 \cdot 1{,}605 + (10-2{,}8)} = 2{,}324 \text{ МПа;}$$

$$[P] = \min\{3{,}714;\ 2{,}324\} = 2{,}324 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется $1{,}0 < 2{,}324$ (МПа).

Условия применения расчетных формул выполняется

$$\frac{S_1 - C}{R} = \frac{10-2{,}8}{600} = 0{,}012 < 0{,}1,$$

$$\frac{S_1 - C}{R} = \frac{10 - 2{,}8}{600} = 0{,}012 > 0{,}002 .$$

3.2.2 Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные наружным давлением

Толщину стенки сферического сегмента днища или крышки определяют по формулам (11) и (12) с последующей проверкой по формуле (20). При наружном давлении на крышку в формуле (15) при определении M давление P следует принимать со знаком минус.

Допускаемое наружное давление определяют по формуле

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

где $[P]_{II}$ – допускаемое избыточное давление из условия прочности центральной зоны;

$[P]_E$ – допускаемое избыточное давление из условия прочности краевой зоны.

Допускаемое наружное давление из условия прочности в центральной зоне определяется по формуле

$$[P]_{II} = \frac{2(S_1 - C)\cdot[\sigma]}{R + (S_1 - C)} . \qquad (21)$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости определяется по формуле

$$[P]_E = \frac{K}{n_y} E \cdot \left(\frac{S_1 - C}{R}\right)^2 . \qquad (22)$$

Коэффициент K определяют по таблице 2 в зависимости от параметра $\frac{R}{S_1 - C}$.

Таблица 2 – Значение коэффициента K

Расчетные модели	Значение коэффициента K при отношении $\frac{R}{S_1 - C}$								
	25	50	75	100	150	200	250	300	350 и выше
Днище (рисунок 7*а*)	0,33	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
Крышка (рисунок 7*б*)	0,46	0,30	0,25	0,22	0,19	0,17	0,16	0,13	0,12

Пример 10

Рассчитать толщину крышки люка колонного аппарата, работающего под вакуумом. Внутренний диаметр аппарата 1200 мм, внутренний диаметр люка 600 мм, остаточное давление 0,01 МПа, расчетная температура 100 °С. Материал корпуса – сталь 12Х18Н10Т. Группа аппарата – 5а. Прибавку для компенсации коррозии принять равной 2 мм.

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

$$P = 0{,}1 - 0{,}01 = 0{,}09 \text{ МПа}.$$

Принимаем люк по ОСТ 26–2003–83 [17] исполнения 2 внутренним диаметром 600 мм на условное давление 0,3 МПа с шифром материального исполнения 4 (сталь 12Х18Н10Т). Условное обозначение люка

Люк 2–600–0,3–4 ОСТ 26–2003–83.

Толщина стенки обечайки люка 8 мм.
Расчетная схема крышки люка приведена на рисунке 9.

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при расчетной температуре

$$[\sigma] = 174 \text{ МПа}.$$

Предварительно толщину стенки сферического неотбортованного днища определяем по формуле (11)

$$S'_{1p} = \frac{0{,}09 \cdot 600}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 174 - 0{,}5 \cdot 0{,}09} = 0{,}172 \text{ мм}.$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавок для компенсации коррозии C_1 и минусового допуска C_2 :

$$S'_1 \geq 0{,}172 + 2{,}8 = 2{,}972 \text{ мм},$$

где $C_1 = 2$ *мм;*

$C_2 = 0{,}8$ *мм (по таблице 6 [21] для толщины 8 мм).*

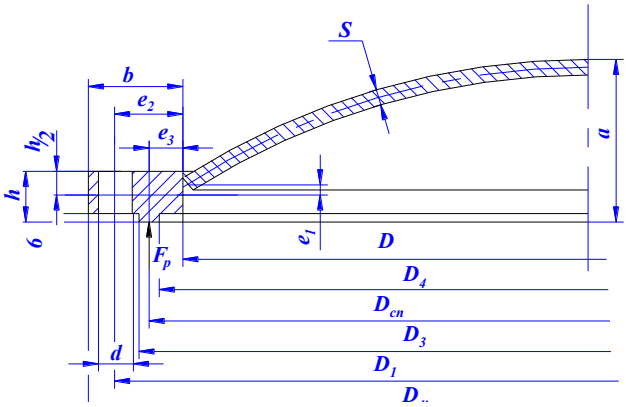


Рисунок 9 – Крышка люка

Исполнительную толщину сферического неотбортованного днища принимаем по стандарту [17]

$$S_1 = 8 \text{ мм.}$$

Уточняем значение расчетной толщины днища по формуле (12). Для этого определим тригонометрические функции угла ψ *:*

$$\cos\psi = \frac{600}{2 \cdot 600} = 0{,}5; \quad tg\,\psi = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 600}{600}\right)^2 - 1} = 1{,}732.$$

Величины $A_к, M, [M]$ *для конструкции по рисунку 7б определяем по формулам (14 – 16). Размеры фланца определяем по стандарту [17]. Размеры прокладки определяем по стандарту [14], материал прокладки – паронит. Реакцию прокладки определяем по формуле (45) методических указаний [23]*

$$F_p = 3{,}14 \cdot 630 \cdot 13 \cdot 2{,}5 \cdot 1{,}0 = 5789 \text{ Н},$$

$$A_к = (60 - 23) \cdot 19 = 703 \text{ мм}^2,$$

$$M = \left| -0{,}09\frac{3{,}14\cdot 600^2}{4}\left(40 - 4{,}8\cdot 1{,}732\right) + 5789\cdot 25 \right| = 6{,}616\cdot 10^5 \text{ Н·мм},$$

$$[M] = \frac{3{,}14\cdot 174\cdot(60-23)\cdot 19^2}{2} = 3{,}651\cdot 10^6 \text{ Н·мм}.$$

Условие прочности по изгибающим моментам для выбранного фланца выполняется

$$6{,}616\cdot 10^5 < 3{,}651\cdot 10^6 \text{ (Н·мм)}.$$

Определяем значение коэффициента β *по формуле (13) применительно к конструкции на рисунке 7б*

$$\beta = 0{,}5 + \frac{0{,}5}{\frac{4\cdot 703}{600(8-2{,}8)}\sqrt{1-\frac{6{,}616\cdot 10^5}{3{,}651\cdot 10^6}} + 3\sqrt{\frac{8-2{,}8}{600}\left[\frac{1}{\sqrt{0{,}5}} + \left(\frac{8-2{,}8}{8-2{,}8}\right)^{1{,}5}\right]}} =$$

$$= 1{,}663.$$

По формуле (12)

$$S''_{1p} = \frac{0{,}09\cdot 600\cdot 1{,}663}{2\cdot 0{,}9\cdot 174 - 0{,}5\cdot 0{,}09} = 0{,}287 \text{ мм}.$$

Исполнительную толщину стенки днища рассчитываем по формуле (3) с учетом прибавок для компенсации коррозии C_1 *и минусового допуска* C_2

$$S''_1 \geq 0{,}287 + 2{,}8 = 3{,}087 \text{ мм}.$$

Исполнительную толщину сферического неотбортованого днища принимаем с учетом большей расчетной толщины по формулам (11) и (12) и рекомендуемой толщины по стандарту [17]

$$S_1 = 8 \text{ мм}.$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности в центральной зоне

$$[P]_{II} = \frac{2(8-2{,}8)\cdot 174}{600 + (8-2{,}8)} = 2{,}99 \text{ МПа}.$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости

$$[P]_E = \frac{0{,}19}{2{,}4} 200 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{8 - 2{,}8}{600} \right)^2 = 1{,}189 \text{ МПа.}$$

Коэффициент K *определяют по таблице 2 в зависимости от параметра*

$$\frac{R}{S_1 - C} = \frac{600}{8 - 2{,}8} = 115 , \; K = 0{,}19 .$$

Допускаемое наружное давление определяем по формуле (20)

$$[P] = \frac{2{,}99}{\sqrt{1 + \left(\frac{2{,}99}{1{,}189} \right)^2}} = 1{,}105 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется $0{,}09 < 1{,}105$ *(МПа).*

Условия применения расчетных формул выполняется

$$\frac{S_1 - C}{R} = \frac{8 - 2{,}8}{600} = 0{,}009 < 0{,}1 ,$$

$$\frac{S_1 - C}{R} = \frac{8 - 2{,}8}{600} = 0{,}009 > 0{,}002 .$$

4 РАСЧЕТ КОНИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК И ДНИЩ

Конические обечайки и днища являются одним из основных элементов корпусов химических аппаратов. Основные размеры конических отбортованных днищ приведены в стандарте [5] и таблицах Б.1, Б.2 приложения Б, а неотбортованных – в стандарте [6].

Конические неотбортованные днища или переходы допускается применять:

– для сосудов 1 – 4-й групп, если центральный угол при вершине конуса не более 45 °;

– для сосудов, работающих под наружным давлением или вакуумом, если центральный угол при вершине конуса не превышает 60 °.

Части выпуклых днищ в сочетании с коническими днищами или переходами применяются без ограничения угла при вершине конуса.

Конические днища и переходы изготовляют вальцовкой из листового проката. Кромки днищ и переходов соединяют между собой встык.

4.1 Расчетные схемы и расчетные параметры

Расчетные схемы соединений цилиндрической и конической обечаек без тороидального перехода приведены на рисунке 10, а с тороидальным переходом – на рисунке 11.

Для соединения обечаек без тороидального перехода в соответствии с рисунками 10*а*, 10*б* расчетные длины переходных частей a_1 и a_2, мм, определяют по формулам:

$$a_1 = 0{,}7 \cdot \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha} \cdot (S_1 - C)}; \tag{23}$$

$$a_2 = 0{,}7 \cdot \sqrt{D \cdot (S_2 - C)}, \tag{24}$$

где D – внутренний диаметр цилиндрической обечайки, мм,

S_1, S_2 –исполнительные толщины переходных частей обечаек, мм;

C – сумма прибавок к расчетной толщине стенки соответствующего элемента, мм;

α – половина угла при вершине конической обечайки, град.

Для соединения конической обечайки с цилиндрической меньшего диаметра в соответствии с рисунком 10*в* расчетную длину переходной части a_2 определяют по формуле

$$a_2 = 1{,}25 \cdot \sqrt{D \cdot (S_2 - C)}, \tag{25}$$

Для соединения обечаек с тороидальным переходом в соответствии с рисунком 11 расчетные длины переходных частей a_1 и a_2 определяют по формулам

$$a_1 = 0{,}7 \cdot \sqrt{\frac{D}{\cos\alpha} \cdot (S_т - C)}, \tag{26}$$

$$a_2 = 0{,}5 \cdot \sqrt{D \cdot (S_т - C)}, \tag{27}$$

где $S_т$ – исполнительная толщина стенки тороидального перехода конической обечайки, мм.

Для предварительного расчета длин переходных частей a_1 и a_2 рекомендуется принять значения S_1, S_2 и $S_т$ равными исполнительной толщине стенки цилиндрической обечайки S.

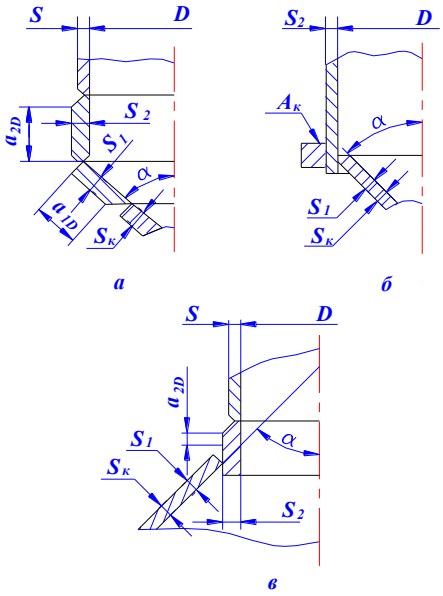


Рисунок 10 – Соединение обечаек без тороидального перехода

а – соединение цилиндрической и конической обечаек; *б* – соединение цилиндрической и конической обечаек с укрепляющим кольцом; *в* – соединение конической обечайки с цилиндрической меньшего диаметра.

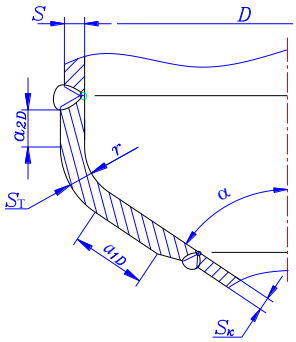


Рисунок 11 – Соединение обечаек с тороидальным переходом

Расчетный диаметр гладкой конической обечайки без тороидального перехода рассчитывают по формуле

$$D_к = D - 1{,}4 \cdot a_1 \cdot \sin\alpha \,. \tag{28}$$

Для конической обечайки с тороидальным переходом расчетный диаметр $D_к$ определяют по формуле

$$D_к = D - 2 \cdot \left[r \cdot (1 - \cos\alpha) + 0{,}7 \cdot a_1 \cdot \sin\alpha \right], \tag{29}$$

где r – внутренний радиус отбортовки конического днища, мм.

Расчетный коэффициент прочности сварных швов переходов обечаек определяют в зависимости от вида нагрузки.

Для соединений цилиндрической и конической обечаек без тороидального в соответствии с рисунком 10*а* и с тороидальным переходом в соответствии с рисунком 11 расчетный коэффициент прочности сварных швов φ_p определяют:

– при действии внутреннего давления

$$\varphi_p = \sqrt{\varphi_т} \,, \tag{30}$$

– при действии наружного давления, осевой сжимающей силы или изгибающего момента

$$\varphi_p = min \left\{ \varphi_п ; \sqrt{\varphi_т} \right\}, \tag{31}$$

где $\varphi_п$ – коэффициент прочности продольного сварного шва;

$\varphi_т$ – коэффициент прочности кольцевого сварного шва.

Для соединений с укрепляющим кольцом в соответствии с рисунком 10*б* расчетный коэффициент прочности поперечного сварного шва укрепляющего кольца φ_{ap} принимают равным:

– при действии внутреннего давления или изгибающего момента

$$\varphi_{ap} = \varphi_a \,;$$

– при действии наружного давления или осевой сжимающей силы

$$\varphi_{ap} = 1 \,,$$

где φ_a – коэффициент прочности поперечного сварного шва укрепляющего кольца.

Для соединения конической обечайки с цилиндрической меньшего диаметра в соответствии с рисунком 10*в* расчетный коэффициент прочности сварных швов определяют:

– при действии внутреннего давления или изгибающего момента – по формуле (30);

– при действии наружного давления или осевой сжимающей силы – по формуле (31).

4.2 Условия применения расчетных формул

Расчетные формулы, приведенные в настоящих методических указаниях, применимы:

– если половина угла раствора конического элемента составляет

$$\alpha \le 70^{\circ};$$

– при соотношении между толщиной стенки S_1, диаметром D и углом α в пределах

$$0{,}001 \le \frac{S_1 \cdot \cos\alpha}{D} \le 0{,}050;$$

– для соединения цилиндрической и конической обечаек без тороидального перехода при условии выполнения углового шва с двухсторонним сплошным проваром;

– для соединения цилиндрической и конической обечаек с укрепляющим кольцом и без тороидального перехода при условии

$$(S_1 - C) \ge (S_2 - C);$$

– для соединения цилиндрической и конической обечаек с тороидальным переходом при условии

$$0 \le r/D \le 0{,}3;$$

– при условии, что расчетные температуры конических элементов аппаратов, нагруженных наружным давлением, осевым сжимающим усилием или изгибающим моментом, не превышают значений, при которых должна учитываться ползучесть материалов. При отсутствии точных данных о температуре формулы применимы при условии, что расчетная температура стенки сосуда из углеродистой стали не превышает 380 ºС, из низколегированной 420 ºС, из аустенитной 525 ºС;

– при условии, что исполнительные длины переходных частей обечаек a_{1D} и a_{2D} не менее расчетных длин a_1 и a_2.

Расчетные формулы, приведенные в настоящих методических указаниях, не применимы для расчета на прочность конических переходов в местах крепления рубашки к корпусу. В этом случае расчет проводят по стандарту [12].

4.3 Гладкие конические обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением

Расчетную толщину стенки гладкой конической обечайки, нагруженной внутренним избыточным давлением, мм, определяют по формуле

$$S_{кр} = \frac{P \cdot D_к}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - P} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}, \qquad (32)$$

где P – расчетное внутреннее избыточное давление, МПа;

$D_к$ – расчетный диаметр гладкой конической обечайки, мм;

φ_p – расчетный коэффициент прочности сварных швов;

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

α – половина угла при вершине конической обечайки, град.

Исполнительную толщину стенки, мм, определяют по формуле

$$S_к \geq S_{кр} + C, \qquad (33)$$

и округляют до ближайшего большего значения стандартной толщины листового проката.

После определения исполнительной толщины стенки гладкой конической обечайки для соединения обечаек без тороидального перехода принимают $S_1 = S_к$, а для соединения обечаек с тороидальным переходом $S_т = S_к$, по формулам (23) и (26) уточняют расчетную длину переходной части a_1, а по формулам (28), (29) – расчетный диаметр гладкой конической обечайки. После этого по формулам (32) и (33) уточняют исполнительную толщину стенки обечайки. Расчет проводят до совпадения исполнительной толщины стенки.

Допускаемое внутреннее избыточное давление, МПа, определяют по формуле

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S_к - C)}{\frac{D_к}{\cos \alpha} + (S_к - C)}. \qquad (34)$$

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

4.4 Гладкие конические обечайки, нагруженные наружным давлением

Расчетную толщину стенки, мм, приближенно определяют по формуле

$$S_{кр} = max\left\{K_2 \cdot D_E \cdot 10^{-2};\quad \frac{1{,}1 \cdot P \cdot D_E}{2 \cdot [\sigma]}\right\}, \tag{35}$$

где K_2 – безразмерный коэффициент;

P – расчетное наружное давление, МПа;

D_E – эффективный диаметр конической обечайки, мм.

Коэффициент K_2 следует определять по номограмме, приведенной в методических указаниях [21], в зависимости от коэффициентов K_1 и K_3.

Коэффициент K_1 определяют по формуле

$$K_1 = 0{,}36 \cdot \frac{n_y \cdot P}{E \cdot 10^{-6}}, \tag{36}$$

где n_y – коэффициент запаса устойчивости [21];

E – модуль продольной упругости материала конической обечайки при расчетной температуре, МПа, [21].

Коэффициент K_3 определяют по формуле

$$K_3 = \frac{l_E}{D_E}, \tag{37}$$

где l_E – эффективная длина конической обечайки, мм.

Эффективная длина конической обечайки определяется по формуле

$$l_E = \frac{D - D_1}{2 \cdot \sin\alpha}, \tag{38}$$

где D_1 – диаметр меньшего основания конической обечайки, мм, (рисунок 12).

Эффективный диаметр конической обечайки

$$D_E = max\left\{\frac{D + D_1}{2 \cdot \cos\alpha}; \frac{D}{\cos\alpha} - 0{,}31 \cdot (D + D_1) \cdot \sqrt{\frac{D + D_1}{100 \cdot (S_к - C)}} \cdot tg\,\alpha\right\}. \tag{39}$$

Для предварительного расчета эффективного диаметра конической обечайки D_E рекомендуется принять значение $S_к$ равным исполнительной толщине стенки S цилиндрической обечайки диаметром D, соединяемой с конической обечайкой.

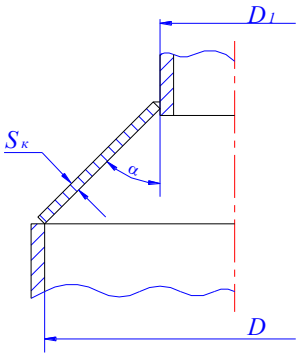


Рисунок 12 – Основные размеры конического перехода

Исполнительную толщину стенки $S_к$ определяют по формуле (33) и округляют до ближайшего большего значения стандартной толщины листового проката или принимают толщину стенки отбортованных днищ по стандарту [5] или по таблицам Б.1, Б.2 приложения Б, а неотбортованных днищ – по стандарту [6].

После этого уточняют эффективный диаметр конической обечайки по формуле (39), значение коэффициента K_3 по формуле (37), коэффициента K_2, расчетную толщину стенки по формуле (35) и исполнительную толщину по формуле (33). Расчеты продолжают до совпадения толщин стенки конической обечайки.

Допускаемое давление определяют по формуле

$$[P]=\frac{[P]_П}{\sqrt{1+\left(\frac{[P]_П}{[P]_E}\right)^2}}, \qquad (40)$$

где $[P]_П$ – допускаемое давление из условия прочности, МПа;

$[P]_E$ – допускаемое давление из условия устойчивости, МПа;

Допускаемое давление из условия прочности определяют по формуле

$$[P]_П=\frac{2\cdot[\sigma]\cdot(S_к-C)}{\frac{D_к}{\cos\alpha}+(S_к-C)}, \qquad (41)$$

а допускаемое давление из условия устойчивости – по формуле

$$[P]_E = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D_E}{l_E} \cdot \left[\frac{100 \cdot (S_к - C)}{D_E} \right]^{2{,}5}, \qquad (42)$$

где B_1 – безразмерный коэффициент.

$$B_1 = min \left\{ 1{,}0;\ 9{,}45 \cdot \frac{D_E}{l_E} \cdot \sqrt{\frac{D_E}{100 \cdot (S_к - C)}} \right\}. \qquad (43)$$

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

4.5 Соединение цилиндрической и конической обечаек без тороидального перехода

Конструкция соединения цилиндрической и конической обечаек без тороидального перехода и укрепляющего кольца приведена на рисунке 10*а*.

Расчет толщин стенок переходных частей конической S_1 и цилиндрической S_2 обечаек производят методом последовательных приближений, предварительно приняв $S_1 = S_к$ и $S_2 = S$.

Расчетную толщину стенки переходной части цилиндрической обечайки, мм, определяют по формуле

$$S_{2p} = \frac{P \cdot D \cdot \beta_1}{2 \cdot [\sigma]_2 \cdot \varphi_p - P}, \qquad (44)$$

где β_1 – коэффициент формы;

$[\sigma]_2$ – допускаемое напряжение для переходной части цилиндрической обечайки при расчетной температуре, МПа.

Коэффициент формы β_1 определяется по формуле

$$\beta_1 = max \{ 0{,}5;\ \beta \}. \qquad (45)$$

Коэффициент формы β определяют по формуле

$$\beta = 0{,}4 \cdot \sqrt{\frac{D}{S_2 - C}} \cdot \frac{tg\,\alpha}{1 + \sqrt{\dfrac{1 + \chi \cdot \left(\dfrac{S_1 - C}{S_2 - C} \right)^2}{2 \cdot cos\,\alpha} \cdot \chi \cdot \left(\dfrac{S_1 - C}{S_2 - C} \right)}} - 0{,}25 \qquad (46)$$

где χ – отношение допускаемых напряжений материалов конической и

цилиндрической переходных частей при расчетной температуре.

Коэффициент χ определяют по формуле

$$\chi = \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2}, \tag{47}$$

где $[\sigma]_1$ – допускаемое напряжение для материала конической переходной части при расчетной температуре, МПа;

$[\sigma]_2$ – допускаемое напряжение для материала цилиндрической переходной части при расчетной температуре, МПа.

Исполнительная толщина стенки переходной части цилиндрической обечайки определяется по формуле

$$S_2 \geq S_{2p} + C. \tag{48}$$

Расчет толщины стенки конического элемента перехода проводят по формуле

$$S_1 \geq \left(\frac{S_1 - C}{S_2 - C} \right) \cdot S_{2p} + C\,. \tag{49}$$

После назначения исполнительных толщин стенок переходных частей S_1 и S_2 уточняют значения коэффициентов формы β и β_1 по формулам (46) и (45), а затем – толщины переходных частей по формулам (44), (48) и (49). Расчет производят до совпадения значения толщин стенок рассчитываемых элементов.

Допускаемое внутреннее избыточное или наружное давление из условия прочности переходной части определяют по формуле

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma]_2 \cdot \varphi_p \cdot (S_2 - C)}{D \cdot \beta_1 + (S_2 - C)}. \tag{50}$$

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

4.6 Соединение цилиндрической и конической обечаек с укрепляющим кольцом

Соединение цилиндрической и конической обечаек с укрепляющим кольцом показано на рисунке 10*б*.

Необходимую площадь поперечного сечения укрепляющего кольца, мм^2, определяют по формуле

$$A_к = \frac{P \cdot D^2 \cdot tg\,\alpha}{8 \cdot [\sigma]_к \cdot \varphi_{ар}} \cdot \left(1 - \frac{\beta_A + 0{,}25}{\beta + 0{,}25}\right), \qquad (51)$$

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

β_A, β – коэффициенты формы.

Коэффициент β_A определяют по формуле

$$\beta_A = \left(\frac{2 \cdot [\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{P} - 1\right) \cdot \frac{S_2 - C}{D}. \qquad (52)$$

Коэффициент β определяют по формуле (46).

При $A_к \le 0$ укрепление кольцом жесткости не требуется.

Допускаемое внутреннее избыточное или наружное давление из условия прочности переходной части определяют по формуле

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma]_2 \cdot \varphi_p \cdot (S_2 - C)}{D \cdot \beta_2 + (S_2 - C)}, \qquad (53)$$

где β_2 – общий коэффициент формы для переходной части.

$$\beta_2 = max\left\{0{,}5;\ \beta_0\right\}, \qquad (54)$$

где β_0 – коэффициент формы.

$$\beta_0 = \frac{0{,}4 \cdot \sqrt{\frac{D}{S_2 - C}} \cdot tg\,\alpha - B_3 \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \cdot \left(\frac{S_1 - C}{S_2 - C}\right)^2}{2 \cdot \cos\alpha} \cdot \chi \cdot \left(\frac{S_1 - C}{S_2 - C}\right)}\right]}{B_2 + \left[1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \cdot \left(\frac{S_1 - C}{S_2 - C}\right)^2}{2 \cdot \cos\alpha} \cdot \chi \cdot \left(\frac{S_1 - C}{S_2 - C}\right)}\right]} \qquad (55)$$

где B_2 и B_3 – безразмерные коэффициенты.

$$B_2 = \frac{1{,}6 \cdot A_к}{(S_2 - C) \cdot \sqrt{D(S_2 - C)}} \cdot \frac{[\sigma]_к \cdot \varphi_{ap}}{[\sigma]_2 \cdot \varphi_p}; \qquad (56)$$

$$B_3 = 0{,}25.$$

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

Проверку прочности сварного шва укрепляющего кольца производят по формуле

$$\sum t_j \ge \frac{4 \cdot A_к}{D}, \qquad (57)$$

где $\sum t_j$ – сумма эффективных ширин сварных швов между укрепляющим кольцом и обечайкой (рисунок 13).

У прерывистого сварного шва действительная его ширина уменьшается в отношении длин сварного шва и всего периметра обечайки. Расстояние между концами прерывистых швов должно быть не более восьми толщин стенки обечайки и сумма длин сварных швов – не менее половины длины контура кольца.

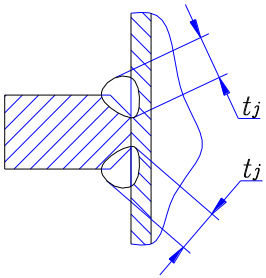


Рисунок 13 – Эффективная ширина сварных швов

4.7 Соединение цилиндрической и конической обечаек с тороидальным переходом

Соединение цилиндрической и конической обечаек с тороидальным переходом показано на рисунке 11.

Толщину стенки тороидального перехода, мм, определяют по формуле

$$S_т \ge S_{тр} + C, \qquad (58)$$

где $S_{тр}$ – расчетная толщина стенки переходного элемента с тороидальным переходом, мм.

$$S_{тр} = \frac{P \cdot D \cdot \beta_3}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma] - P}. \quad (59)$$

Коэффициент формы β_3 определяют по формуле

$$\beta_3 = max\{0{,}5;\ \beta \cdot \beta_т\}, \quad (60)$$

где

$$\beta = 0{,}4 \cdot \sqrt{\frac{D}{S_т - C}} \cdot \frac{tg\,\alpha}{1 + \sqrt{\frac{1}{\cos\alpha}}} - 0{,}25; \quad (61)$$

$$\beta_т = \frac{1}{1 + \frac{0{,}028 \cdot \frac{r}{D} \cdot \sqrt{\frac{D}{S_т - C}} \cdot \alpha}{\frac{1}{\sqrt{\cos\alpha}} + 1}}. \quad (62)$$

Допускаемое внутреннее избыточное или наружное давление из условия прочности переходной части определяется по формуле

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S_т - C)}{D \cdot \beta_3 + (S_т - C)}. \quad (63)$$

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

4.8 Соединение штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой

Соединение штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой показано на рисунке 10*в*.

Расчетную толщину стенки штуцера, мм, определяют по формуле

$$S_{2p} = \frac{P \cdot D \cdot \beta_4}{2 \cdot \varphi_p \cdot [\sigma]_2 - P}, \quad (64)$$

где β_4 – коэффициент формы.

Коэффициент формы β_4 определяют по формуле

$$\beta_4 = max\{1{,}0;\ \beta_н\}, \quad (65)$$

где $\beta_н$ – коэффициент формы.

Коэффициент $\beta_н$ определяют по формуле

$$\beta_н = \begin{cases} \beta + 0{,}75, \text{ если } \chi \cdot \left(\dfrac{S_1 - C}{S_2 - C}\right)^2 \geq 1 \\ 0{,}4\sqrt{\dfrac{D}{S_2 - C}} \cdot \dfrac{\operatorname{tg}\alpha}{\chi\left(\dfrac{S_1 - C}{S_2 - C}\right)\sqrt{\dfrac{S_1 - C}{(S_2 - C)\cdot\cos\alpha}} + \sqrt{\dfrac{1 + \chi \cdot \left(\dfrac{S_1 - C}{S_2 - C}\right)^2}{2}}} + \\ + 0{,}5, \text{ если } \chi \cdot \left(\dfrac{S_1 - C}{S_2 - C}\right)^2 < 1 \end{cases} \tag{66}$$

Допускаемое внутреннее избыточное или наружное давление из условия прочности переходной части определяют по формуле

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma]_2 \cdot \varphi_p \cdot (S_2 - C)}{D \cdot \beta_4 + (S_2 - C)}. \tag{67}$$

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

Пример 11

Рассчитать толщину стенки конического отбортованного днища корпуса аппарата из стали Ст3сп5. Внутренний диаметр аппарата 1000 мм, расчетное давление 1,0 МПа, расчетная температура 165 ºС, коэффициент прочности сварных соединений $\varphi = 0{,}9$.

В примере 9 методических указаний [21] рассчитана толщина стенки цилиндрической обечайки для данных условий. Толщина стенки цилиндрической обечайки принята равной $S = 8$ *мм, а сумма прибавок к расчетной толщине С составляет 2,8 мм.*

По таблице А.2 приложения А для конического отбортованного днища внутренним диаметром D = 1000 мм и углом при вершине конуса $2\alpha = 90°$ *определяем радиус отбортовки r = 160 мм.*

Расчетную длину переходной части соединения с тороидальным переходом определяем по формуле (26), принимая для предварительного расчета значение $S_т$, *равное толщине стенки цилиндрической обечайки* S.

$$a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{1000}{\cos 45^\circ}(8-2{,}8)} = 60 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр гладкой конической обечайки определяем по формуле (29)

$$D_к = 1000 - 2\cdot\left[160\cdot(1-\cos 45^\circ) + 0{,}7\cdot 60\cdot \sin 45^\circ\right] = 847 \text{ мм.}$$

Для соединения с тороидальным переходом расчетный коэффициент прочности сварных соединений при действии внутреннего давления определяем по формуле (30),принимая коэффициент прочности кольцевого сварного шва $\varphi_T = \varphi = 0{,}9.$

$$\varphi_p = \sqrt{0{,}9} = 0{,}949.$$

Расчетную толщину стенки определяем по формуле (32),

$$S_{кр} = \frac{1\cdot 847}{2\cdot 144\cdot 0{,}949 - 1}\cdot\frac{1}{\cos 45^\circ} = 4{,}4 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину конического днища определяем по формуле (33)

$$S_к \geq 4{,}4 + 2{,}8 = 7{,}2 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину конического днища принимаем по таблице Б.2 приложения Б

$$S_к = 8 \text{ мм.}$$

Полученная в результате расчета толщина конического днища и предварительно принятая для определения a_1 *и* D_K *толщина тороидального перехода совпадают.*

Допускаемое внутреннее избыточное давление определяем по формуле (34)

$$[P] = \frac{2\cdot 144\cdot 0{,}949\cdot(8-2{,}8)}{\frac{847}{\cos 45^\circ} + (8-2{,}8)} = 1{,}18 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется: $1{,}0 < 1{,}18$ *(МПа).*

Проверяем условия применения расчетных формул:

$$\alpha = 45^\circ < 70^\circ;$$

$$\frac{8\cdot\cos 45^\circ}{1000}=0{,}0057,\quad 0{,}001\le 0{,}0057\le 0{,}050\ .$$

Условия выполняются.

Для конического отбортованного днища необходимо рассчитать соединение конической обечайки с цилиндрической с помощью тороидального перехода.

Для определения толщины стенки тороидального перехода по формуле (59) вычисляем коэффициенты β , $\beta_{\text{т}}$ *и* β_3 *по формулам (61, 62, 60)*

$$\beta=0{,}4\cdot\sqrt{\frac{1000}{8-2{,}8}}\cdot\frac{tg\ 45^\circ}{1+\sqrt{\dfrac{1}{\cos 45^\circ}}}-0{,}25=2{,}284;$$

$$\beta_{\text{т}}=\frac{1}{1+\dfrac{0{,}028\cdot\dfrac{160}{1000}\cdot\sqrt{\dfrac{1000}{8-2{,}8}}\cdot 45}{\dfrac{1}{\sqrt{\cos 45^\circ}}+1}}=0{,}439;$$

$$\beta_3=\max\left\{0{,}5;\quad 2{,}284\cdot 0{,}439\right\}=\max\left\{0{,}5;\quad 1{,}003\right\}=1{,}003.$$

Расчетную толщину стенки тороидального перехода определяем по формуле (59), где $\varphi_p=\sqrt{\varphi}=\sqrt{0{,}9}=0{,}949$ *по формуле (30)*

$$S_{\text{тр}}=\frac{1{,}0\cdot 1000\cdot 1{,}003}{2\cdot 0{,}949\cdot 144-1{,}0}=3{,}68\ \text{мм.}$$

Исполнительную толщину стенки тороидального перехода определяем по формуле(58)

$$S_{\text{т}}\ge 3{,}68+2{,}8=6{,}48\ \text{мм.}$$

Принимаем $S_{\text{т}}=8\ \text{мм.}$

Определяем допускаемое внутреннее давление из условия прочности переходной части по формуле (63)

$$[P]=\frac{2\cdot 144\cdot 0{,}949\cdot(8-2{,}8)}{1000\cdot 1{,}003+(8-2{,}8)}=1{,}4\ \text{МПа.}$$

Условие прочности выполняется: $1{,}0<1{,}4$ *(МПа).*

Пример 12

Рассчитать толщину стенки конического неотбортованного перехода колонного аппарата, работающего под внутренним избыточным давлением. Диаметр нижней части колонного аппарата $D = 1200$ *мм, диаметр верхней части* $D_1 = 1000$ *мм. Расчетное давление 1,0 МПа, расчетная температура 100 ºС, материал – сталь Ст3сп5. Коэффициент прочности сварных соединений принять равным 0,9. Прибавку для компенсации коррозии принять равной 1 мм.*

Расчетные параметры и толщину стенки цилиндрической обечайки нижней части колонны принимаем по примеру 14 методических указаний [21].

Центральный угол 2α *при вершине конуса конических переходов в сосудах 1 – 4 групп не должен превышать 45º. Принимаем угол* $\alpha = 22{,}5^\circ$ *. Расчетную длину переходной части соединения без тороидального перехода определяем по формуле (23), принимая для предварительного расчета значение* S_1 *, равное толщине стенки цилиндрической обечайки* S *.*

$$a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{1200}{\cos 22{,}5^\circ}(8 - 1{,}8)} = 62{,}8 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр гладкой конической обечайки определяем по формуле (28)

$$D_к = 1200 - 1{,}4 \cdot 62{,}8 \cdot \sin 22{,}5^\circ = 1066 \text{ мм.}$$

Для соединения без тороидального перехода расчетный коэффициент прочности сварных соединений при действии внутреннего давления определяем по формуле (30), принимая коэффициент прочности кольцевого сварного шва $\varphi_T = \varphi = 0{,}9.$

$$\varphi_p = \sqrt{0{,}9} = 0{,}949.$$

Расчетную толщину стенки определяем по формуле (32),

$$S_{кр} = \frac{1 \cdot 1066}{2 \cdot 149 \cdot 0{,}949 - 1} \cdot \frac{1}{\cos 22{,}5^\circ} = 4{,}1 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину конического перехода определяем по формуле (33)

$$S_к \geq 4{,}1 + 1{,}8 = 5{,}9 \text{ мм.}$$

Так как толщина конического перехода не должна быть менее толщины цилиндрической обечайки, принимаем

$$S_к = 8 \text{ мм.}$$

Полученная в результате расчета толщина конического перехода совпадает с предварительно принятой толщиной при определении a_1 *и* $D_к$.

Допускаемое внутреннее избыточное давление определяем по формуле (34)

$$[P] = \frac{2 \cdot 149 \cdot 0{,}949 \cdot (8 - 1{,}8)}{\frac{1066}{\cos 22{,}5^\circ} + (8 - 1{,}8)} = 1{,}398 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется: $1{,}0 < 1{,}398$ *(МПа).*

Проверяем условия применения формул :

$\alpha = 22{,}5^\circ < 70^\circ$ *– условие выполняется;*

исполнительная длина переходной части $a_{1D} = (D - D1) / 2\sin\alpha \geq a_1$,

$a_{1D} = (1200 - 1000) / 2\sin 22{,}5^\circ = 261{,}3 мм \geq 62{,}8$ *мм – условие выполняется;*

Расчет толщин стенок переходных частей конической S_1 *и цилиндрической* S_2 *обечаек производим методом последовательных приближений, предварительно приняв* $S_1 = S_к = 8$ *мм и* $S_2 = S = 8$ *мм по данным примера.*

Для определения расчетной толщины стенки переходной части цилиндрической обечайки необходимо вычислить значение коэффициентов β *по формуле (46) и по* β_1 *формуле (45)*

$$\beta = 0{,}4 \cdot \sqrt{\frac{1200}{8 - 1{,}8}} \cdot \frac{tg\ 22{,}5^\circ}{1 + \sqrt{\frac{1 + 1 \cdot \left(\frac{8 - 1{,}8}{8 - 1{,}8}\right)^2}{2 \cdot \cos 22{,}5^\circ} \cdot 1 \cdot \left(\frac{8 - 1{,}8}{8 - 1{,}8}\right)}} - 0{,}25 = 0{,}88,$$

где коэффициент $\chi = 1$ *, так как цилиндрическая обечайка и конический переход выполнены из одного материала.*

$$\beta_1 = max\{0{,}5;\ \beta\} = max\{0{,}5;\ 0{,}88\} = 0{,}88.$$

Расчетную толщину определяем по формуле (44)

$$S_{2p} = \frac{1{,}0 \cdot 1200 \cdot 0{,}88}{2 \cdot 149 \cdot 0{,}9 - 1{,}0} = 3{,}95,$$

Исполнительная толщина стенки переходной части цилиндрической обечайки определяем по формуле (48)

$$S_2 \geq 3{,}95 + 1{,}8 = 5{,}75 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину стенки переходной части цилиндрической обечайки $S_2 = 8$ *мм, равную толщине стенки цилиндрической обечайки.*

Расчет толщины стенки конического элемента перехода производим по формуле (49)

$$S_1 \geq \left(\frac{8 - 1{,}8}{8 - 1{,}8}\right) \cdot 3{,}68 + 1{,}8 = 5{,}48 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину стенки конического элемента перехода $S_1 = 8$ *мм, так как должно выполняться условие* $(S_1 - C) \geq (S_2 - C)$.

Так как исполнительные толщины стенок переходных частей S_1 *и* S_2 *совпали с предварительно принятыми значениями при определении коэффициентов формы* β *и* β_1*, то пересчета значений этих коэффициентов не требуется.*

Допускаемое внутреннее избыточное или наружное давление из условия прочности переходной части определяем по формуле (50)

$$[P] = \frac{2 \cdot 149 \cdot 0{,}9 \cdot (8 - 1{,}8)}{1200 \cdot 0{,}88 + (8 - 1{,}8)} = 1{,}64 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется: $1{,}0 \leq 1{,}64$ *(МПа).*

Пример 13

Рассчитать толщину конического отбортованного днища корпуса аппарата типа ВКЭ с рубашкой. Давление в аппарате – атмосферное, расчетное наружное давление рубашки – 0,63 МПа. Материал корпуса – сталь Ст3сп5. Внутренний диаметр аппарата 1000 мм, расчетная температура 165°С. Прибавку для компенсации коррозии принять равной: со стороны рабочей среды – 2 мм, со стороны теплоносителя – 1 мм. Диаметр нижнего выходного отверстия конического днища D_1*=90 мм.*

Расчетные параметры и толщину стенки цилиндрической обечайки корпуса аппарата принимаем по примеру 12 методических указаний [21].

Расчетную толщину стенки вычисляем по формуле (35), предварительно определив коэффициент K_2 по номограмме на рисунке 4 методических указаний [21]. Для этого определяем коэффициенты K_1 и K_3. Коэффициент K_1 определяем по формуле (36), при этом принимаем коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий $n_y = 2{,}4$, а модуль продольной упругости материала обечайки при расчетной температуре определяем по таблице 9 методических указаний [21].

$$K_1 = 0{,}36 \cdot \frac{2{,}4 \cdot 0{,}63}{185 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} = 2{,}94 .$$

Для определения коэффициента K_3 необходимо определить эффективную длину конической обечайки по формуле (38)

$$l_E = \frac{1000 - 90}{2 \cdot \sin\ 45^\circ} = 643{,}5 \text{ мм.}$$

Эффективный диаметр конической обечайки определяем по формуле (39), приняв для предварительного расчета значение $S_к$, равное исполнительной толщине цилиндрической обечайки S, соединяемой с коническим днищем.

$$D_E = max\ \left\{ \frac{1000 + 90}{2 \cdot cos\ \ 45^\circ};\ \frac{1000}{cos\ \ 45^\circ} - 0{,}31 \cdot (1000 + 90) \cdot \sqrt{\frac{1000 + 90}{100 \cdot (12 - 3{,}8)}} \cdot tg\ \ 45^\circ \right\} =$$

$$= max\ \left\{ 770{,}8;\ 1025 \right\} = 1025\ \text{мм.}$$

Определяем коэффициент K_3 по формуле (37)

$$K_3 = \frac{643{,}5}{1025} = 0{,}628.$$

Находим значение коэффициента K_2 по номограмме: $K_2 = 0{,}6$. Подставляем значение коэффициента K_2 в формулу (35)

$$S_{кр} = max \left\{ 0{,}6 \cdot 1025 \cdot 10^{-2};\ \frac{1{,}1 \cdot 0{,}63 \cdot 1025}{2 \cdot 144} \right\} = max\ \left\{ 6{,}15; 2{,}47 \right\} = 6{,}15 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки конического днища определяем по формуле (33)

$$S_к \geq 6{,}15 + 3{,}8 = 9{,}95\ \text{мм.}$$

Исполнительную толщину конического днища принимаем по таблице Б.2 приложения Б

$$S_к = 10 \text{ мм.}$$

Толщина днища, полученная в результате расчета и предварительно принятая для определения D_E *не совпадают. Уточняем значение эффективного диаметра по полученной толщине конического днища.*

$$D_E = max\left\{\frac{1000+90}{2\cdot cos\ 45^\circ};\ \frac{1000}{cos\ 45^\circ} - 0{,}31\cdot(1000+90)\cdot\sqrt{\frac{1000+90}{100\cdot(10-3{,}8)}}\cdot tg\ 45^\circ\right\} =$$

$$= max\ \{770{,}8;\ 966{,}2\} = 966{,}2 \text{ мм.}$$

Уточняем значение коэффициента K_3

$$K_3 = \frac{643{,}5}{966{,}2} = 0{,}666.$$

Находим значение коэффициента K_2 *по номограмме* $K_2 = 0{,}6$. *Подставляем значение коэффициента* K_2 *в формулу (35)*

$$S_{кр} = max\left\{0{,}6\cdot 966{,}2\cdot 10^{-2};\ \frac{1{,}1\cdot 0{,}63\cdot 966{,}2}{2\cdot 144}\right\} = max\ \{5{,}80;2{,}33\} =$$

$$= 5{,}80 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину стенки конического днища определяем по формуле (33)

$$S_к \geq 5{,}80 + 3{,}8 = 9{,}60 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину конического днища принимаем по таблице приложения

$$S_к = 10 \text{ мм.}$$

Полученная в результате расчета толщина совпала со значением принятым при определении D_E. *Окончательно принимаем толщину конического днища* $S_к = 10$ *мм.*

Допускаемое давление определяют по формуле (40). Для этого уточняем длину переходной части по формуле (26)

$$a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{1000}{cos\,45^\circ}(10-3{,}8)} = 65{,}5 \text{ мм.}$$

Расчетный диаметр гладкой конической обечайки определяем по формуле (29)

$$D_к = 1000 - 2\cdot\left[160\cdot(1-\cos 45^\circ) + 0{,}7\cdot 65{,}5\cdot \sin 45^\circ\right] = 841{,}4 \text{ мм.}$$

Допускаемое давление из условия прочности определяем по формуле (41)

$$[P]_П = \frac{2\cdot 144\cdot(10-3{,}8)}{\frac{841{,}4}{\cos 45^\circ} + (10-3{,}8)} = 1{,}493 \text{ МПа,}$$

а допускаемое давление из условия устойчивости – по формуле (42)

$$[P]_E = \frac{20{,}8\cdot 10^{-6}\cdot 185\cdot 10^3}{2{,}4\cdot 1{,}0}\cdot\frac{966{,}2}{643{,}5}\cdot\left[\frac{100\cdot(10-3{,}8)}{966{,}2}\right]^{2{,}5} = 0{,}792 \text{ МПа,}$$

где B_1 *– безразмерный коэффициент.*

$$B_1 = \min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\cdot\frac{966{,}2}{643{,}5}\cdot\sqrt{\frac{966{,}2}{100\cdot(10-3{,}8)}}\right\} = \min\{1{,}0;\ 17{,}7\} = 1{,}0.$$

Допускаемое наружное давление

$$[P] = \frac{1{,}493}{\sqrt{1+\left(\frac{1{,}493}{0{,}792}\right)^2}} = 0{,}7 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется $0{,}63 \le 0{,}7$ *(МПа).*

Проверяем условия применения расчетных формул:

$$\alpha = 45^\circ < 70^\circ;$$

$$\frac{10\cdot\cos 45^\circ}{1000} = 0{,}007, \quad 0{,}001 \le 0{,}007 \le 0{,}050.$$

Условия выполняются.

Пример 14

Проверить необходимость установки укрепляющего кольца по данным примера 12.

Необходимую площадь поперечного сечения укрепляющего кольца определяем по формуле, предварительно вычислив коэффициенты формы β_A *и* β *по формулам (52) и (46). Принимаем коэффициент прочности поперечного сварного шва укрепляющего кольца* $\varphi_a = \varphi = 0{,}9$*. Тогда расчетный коэффи-*

циент прочности поперечного сварного шва укрепляющего кольца φ_{ap} *при действии внутреннего давления* $\varphi_{ap} = \varphi_a = 0{,}9$. *Полагаем, что укрепляющее кольцо выполнено из того же материала, что и соединяемые обечайки, т.е.* $[\sigma]_к = [\sigma] = 149$ *МПа*.

$$\beta_A = \left(\frac{2 \cdot 144 \cdot 0{,}9}{1{,}0} - 1 \right) \cdot \frac{8 - 1{,}8}{1200} = 1{,}38;$$

$$\beta = 0{,}4 \cdot \sqrt{\frac{1200}{8 - 1{,}8}} \cdot \frac{tg\ 22{,}5^\circ}{1 + \sqrt{\dfrac{1 + 1 \cdot \left(\dfrac{8 - 1{,}8}{8 - 1{,}8} \right)^2}{2 \cdot \cos 22{,}5^\circ} \cdot 1 \cdot \left(\dfrac{8 - 1{,}8}{8 - 1{,}8} \right)}} - 0{,}25 = 0{,}88;$$

$$A_к = \frac{1{,}0 \cdot 1200^2 \cdot tg\ 22{,}5^\circ}{8 \cdot 149 \cdot 0{,}9} \cdot \left(1 - \frac{1{,}38 + 0{,}25}{0{,}88 + 0{,}25} \right) = -246 \ мм^2.$$

Значение $A_к$ *получилось отрицательным, следовательно, укрепление кольцом жесткости не требуется.*

Пример 15

Рассчитать соединение штуцера с коническим отбортованным днищем по данным примера 11. Условный проход штуцера $d_y = 80$.

По стандарту [21] выбираем материал трубы для штуцера. Принимаем углеродистую сталь 20, как наиболее близкую по свойствам к материалу конического днища. Допускаемое напряжение при расчетной температуре для материала штуцера $[\sigma]_2 = 138$ *МПа. По условному проходу штуцера принимаем трубу* $\varnothing\ 89 \times 4$ *по стандарту [4]. Внутренний диаметр штуцера определяем по наружному диаметру и толщине стенки патрубка штуцера*

$$d = d_н - 2 \cdot S_2,$$

где $d_н = 89$ *мм - наружный диаметр трубы;*

$S_2 = 4$ *мм – толщина стенки трубы.*

$$d = 89 - 2 \cdot 4 = 81 \ мм.$$

Прибавку к расчетной толщине стенки штуцера определяем как сумму прибавки для компенсации коррозии (по данным примера 11 $C_1 = 2$ *мм) и*

прибавки для компенсации минусового допуска C_2. *Прибавка* C_2 *для труб принимается равной 15% от толщины стенки трубы, т.е.*

$$C_2 = 0{,}15 \cdot 4 = 0{,}6 \text{ мм.}$$

Для определения расчетной толщины стенки штуцера по формуле (64) необходимо вычислить коэффициенты β_4 *и* $\beta_н$ *по формулам (65),(66). Определяем величину* χ *по формуле (47) и отношение в формуле (66):*

$$\chi = \frac{144}{138} = 1{,}043;$$

$$1{,}043 \cdot \left(\frac{8-2{,}8}{4-2{,}6}\right)^2 = 14{,}4 > 1,$$

тогда коэффициент $\beta_н$ *определяем по формуле* $\beta_н = \beta + 0{,}75$.

Значение β *вычисляем по формуле (46)*

$$\beta = 0{,}4 \cdot \sqrt{\frac{81}{4-2{,}6}} \cdot \frac{tg45^\circ}{1+\sqrt{\dfrac{1+1{,}043 \cdot \left(\dfrac{8-2{,}8}{4-2{,}6}\right)^2}{2 \cdot \cos 45^\circ} \cdot 1{,}043 \cdot \left(\dfrac{8-2{,}8}{4-2{,}6}\right)}} - 0{,}25 = 0{,}156$$

$$\beta_H = 0{,}156 + 0{,}75 = 0{,}906,$$

$$\beta_4 = \max\{1{,}0; 0{,}906\} = 1{,}0.$$

Расчетная толщина стенки штуцера по формуле (64)

$$S_{2p} = \frac{1 \cdot 81 \cdot 1{,}0}{2 \cdot 138 \cdot 1 - 1} = 0{,}3 \text{ мм,}$$

где $\varphi_р$ *- коэффициент прочности сварного шва, для штуцера* $\varphi_р$ *= 1.*

Толщина стенки штуцера с учетом прибавки к расчетной толщине

$$S_2 \geq 0{,}3 + 2{,}6 = 2{,}9 \text{ мм.}$$

Выбранная предварительно труба ∅ 89×4 удовлетворяет условию прочности. Допускаемое внутреннее избыточное давление из условия прочности переходной части определяем по формуле (67)

$$[P] = \frac{2 \cdot 138 \cdot 1 \cdot (4-2{,}6)}{81 \cdot 1 + (4-2{,}6)} = 4{,}68 \text{ МПа.}$$

Проверка условия прочности

$$1 < 4{,}68 \text{ (МПа)}.$$

Условие прочности выполняется.

Проверяем условие применения расчетных формул:

$$\alpha = 45^\circ < 70^\circ .$$

Условие выполняется.

4.9 Гладкие конические обечайки, работающие под совместным действием нагрузок нескольких видов

Часто конические обечайки аппаратов работают под совместным действием внутреннего избыточного или наружного давления, осевого сжимающего усилия и изгибающего момента. В этом случае толщину стенки обечайки определяют из условия прочности или устойчивости от воздействия соответствующего давления.

Эквивалентные давления от осевого сжимающего усилия и изгибающего момента, МПа, определяют по формулам:

$$P_F = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D_p^2}; \tag{68}$$

$$P_M = \frac{16 \cdot M}{\pi \cdot D_p^2}, \tag{69}$$

где F – расчетное осевое сжимающее усилие, Н;

M – расчетный изгибающий момент, Н·мм;

D_p – расчетный диаметр конической обечайки, мм.

Если коническая обечайка нагружена наружным давлением, осевым сжимающим усилием и изгибающим моментом, причем сумма эквивалентных давлений от этих нагрузок составляет для соответствующего расчетного диаметра менее 10 % от рабочего давления, то есть

$$P_F + P_M < 0{,}1 \cdot P_{раб}, \tag{70}$$

то ее рассчитывают только на действие давления.

Если сумма эквивалентных давлений P_F и P_M составляет для соответствующего расчетного диаметра не менее 10 % от рабочего давления, необходимо произвести проверку устойчивости от совместного действия нагрузок по формуле

$$\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \le 1{,}0, \tag{71}$$

где P – расчетное наружное давление, МПа;

F – расчетное осевое сжимающее усилие, Н;

M – расчетный изгибающий момент, Н·мм;

$[P]$ – допускаемое наружное давление, МПа, определяемое по формуле (40);

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

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

При действии внутреннего давления в формуле (71) следует принять $P = 0$.

Допускаемое осевое сжимающее усилие, действующее на гладкую коническую обечайку, Н, определяют по формуле

$$[F] = min\left\{ \frac{[F]_{\text{П}}}{\sqrt{1+\left(\frac{[F]_{\text{П}}}{[F]_{\text{E}}}\right)^2}}; \frac{D_1}{D_{\text{F}}} \cdot [F]_{\text{П}} \right\}, \qquad (72)$$

где $[F]_{\text{П}}$ – допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности, Н;

$[F]_{\text{E}}$ – допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости в пределах упругости, Н;

D_1 – внутренний диаметр конической обечайки, мм;

D_F – эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе, мм.

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности определяют по формуле

$$[F]_{\text{П}} = \pi \cdot D_{\text{F}} \cdot (S_к - C) \cdot [\sigma] \cdot cos\ \alpha\ . \qquad (73)$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости в пределах упругости определяют по формуле

$$[F]_{\text{E}} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot (D_{\text{F}} \cdot cos\ \alpha)^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (S_к - C)}{D_{\text{F}}} \right]^{2,5}. \qquad (74)$$

Эффективный диаметр конической обечайки при осевом сжатии и изгибе следует рассчитывать по формуле

$$D_{\text{F}} = \frac{0{,}9 \cdot D + 0{,}1 \cdot D_1}{cos\ \alpha}. \qquad (75)$$

Допускаемый изгибающий момент, Н·мм, рассчитывают по формуле

$$[M] = \frac{[M]_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\text{п}}}{[M]_{\text{E}}}\right)^2}}, \qquad (76)$$

где $[M]_{\text{п}}$ – допускаемый изгибающий момент из условия прочности, Н·мм;

$[M]_{\text{E}}$ – допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости, Н·мм.

$$[M]_{\text{п}} = 0{,}25 \cdot D_{\text{F}} \cdot [F]_{\text{п}}. \qquad (77)$$

$$[M]_{\text{E}} = 0{,}286 \cdot D_{\text{F}} \cdot [F]_{\text{E}}. \qquad (78)$$

Допускаемые осевые сжимающие усилия $[F]_{\text{п}}$ и $[F]_{\text{E}}$ определяют по формулам (73) и (74), эффективный диаметр D_{F} – по формуле (75).

Необходимо также произвести проверку устойчивости от отдельных нагрузок:

$$P \le [P];\ F \le [F];\ M \le [M]. \qquad (79)$$

4.10 Соединения цилиндрических и конических обечаек, работающих под совместным действием нагрузок нескольких видов

Соединения цилиндрических и конических обечаек, работающих под совместным действием нагрузок нескольких видов проверяют по условиям прочности от отдельных нагрузок по условиям (79). При этом, если сумма эквивалентных давлений, определяемых по формулам (68) и (69), составляет не менее 10 % от рабочего давления, необходимо проверить условие устойчивости по формуле (71), в которой допускаемые нагрузки для переходной части обечайки $[P]$, $[F]$ и $[M]$ определяются по формулам, приведенным ниже.

4.10.1 Соединение обечаек без тороидального перехода

Допускаемое наружное давление $[P]$ определяют по формуле (50).

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности переходной части, Н, определяют по формуле

$$[F] = \pi \cdot D \cdot \frac{(S_2 - C) \cdot [\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_5}, \qquad (80)$$

где β_5 –коэффициент формы.

$$\beta_5 = max\left\{1{,}0;\ 2\cdot\beta + 1{,}2\right\}. \qquad (81)$$

Коэффициент формы β определяют по формуле (46).

Допускаемый изгибающий момент, Н·мм, рассчитывают по формуле

$$[M] = 0{,}25\cdot D\cdot[F]. \qquad (82)$$

4.10.2 Соединение цилиндрической и конической обечаек с укрепляющим кольцом

Допускаемое наружное давление $[P]$ определяют по формуле (53).

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности переходной части, Н, определяют по формуле

$$[F] = \pi\cdot D\cdot\frac{(S_2 - C)\cdot[\sigma]_2\cdot\varphi_p}{\beta_6}, \qquad (83)$$

где β_6 – коэффициент формы.

$$\beta_6 = max\left\{1{,}0;\ 2\cdot\beta_0\right\}. \qquad (84)$$

Коэффициент β_0 определяют по формуле (55) при $B_3 = -0{,}35$.

Допускаемый изгибающий момент $[M]$ рассчитывают по формуле (82), в которой допускаемое осевое сжимающее усилие $[F]$ определяют по формуле (83).

4.10.3 Соединение обечаек с тороидальным переходом

Допускаемое наружное давление $[P]$ определяют по формуле (63).

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности переходной части, Н, определяют по формуле

$$[F] = \pi\cdot D\cdot\frac{(S_\text{т} - C)\cdot[\sigma]\cdot\varphi_p}{\beta_7}, \qquad (85)$$

где β_7 –коэффициент формы.

$$\beta_7 = max\left\{1{,}0;\ \beta_\text{т}\cdot(2\cdot\beta + 1{,}2)\right\}, \qquad (86)$$

Коэффициенты β и $\beta_т$ определяют по формулам (61) и (62).

Допускаемый изгибающий момент $[M]$ рассчитывают по формуле (82), в которой допускаемое осевое сжимающее усилие $[F]$ определяют по формуле (85).

4.10.4 Соединение штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой

Допускаемое наружное давление $[P]$ определяют по формуле (67).

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности переходной части, Н, определяют по формуле

$$[F] = \pi \cdot D \cdot \frac{(S_2 - C) \cdot [\sigma]_2 \cdot \varphi_p}{\beta_8}, \qquad (87)$$

где β_8 – коэффициент формы.

$$\beta_8 = max\{1,0;\ 2 \cdot \beta_н - 1\}. \qquad (88)$$

Коэффициент $\beta_н$ определяют по формулам (66).

Допускаемый изгибающий момент $[M]$ рассчитывают по формуле (82), в которой допускаемое осевое сжимающее усилие $[F]$ определяют по формуле (87).

4.11 Расчет конических обечаек и днищ из двухслойной стали

Расчет конических обечаек и днищ, изготовленных из двухслойной стали, выполняют аналогично расчету цилиндрических обечаек, приведенному в методических указаниях [21].

5 РАСЧЕТ ПЛОСКИХ КРУГЛЫХ ДНИЩ И КРЫШЕК

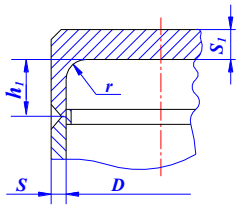
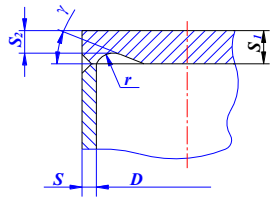
В сосудах и аппаратах, работающих под давлением, кроме выпуклых днищ и крышек, применяются плоские днища, изготавливаемые из поковок, и плоские крышки, присоединяемые на болтах.

5.1 Расчетные схемы

Расчетные схемы плоских днищ, условия их закрепления и значения коэффициента конструкции приведены в таблице 3.

Расчетная схема плоской круглой крышки, нагруженной дополнительным краевым моментом, приведена на рисунке 15.

Таблица 3 – Значение коэффициента K в зависимости от конструкции днищ

Тип*	Схема	Условия закрепления	Коэффициент конструкции
4		$\frac{S-C}{S_1-C}<0,5$ $\frac{S-C}{S_1-C}\geq 0,5$ $D_p=D$	$0,41$ $0,38$
9		$max\{S;0,25\cdot S_1\}\leq$ $\leq r\leq min\{S_1;\ 0,1\cdot D\}$ $h_1\geq r$ $D_p=D-2\cdot r$	$K=max\{0,41\times$ $\times(1-0,23\times$ $\times\frac{S-C}{S_1-C}\Big);0,35\}$
10		$\frac{S-C}{S_1-C}<0,5$ $\frac{S-C}{S_1-C}\geq 0,5$ $D_p=D$ $0,25\cdot S_1\leq r\leq S_1-S_2$ $30^\circ\leq\gamma\leq 90^\circ$	$0,41$ $0,38$
* Номера типов днищ приведены по ГОСТ 14249-89			

5.2 Условия применения расчетных формул

Формулы для расчета плоских круглых днищ и крышек применимы при условии

$$\frac{S_1-C}{D_p}\leq 0,11,$$

где S_1 – исполнительная толщина стенки днища (крышки);

D_p – расчетный диаметр днища (крышки), мм.

Допускается проводить расчет при $(S_1 - C)/D_p > 0{,}11$, но значение допускаемого давления $[P]$, рассчитанного по формуле (95) или (106), следует умножить на поправочный коэффициент K_p.

$$K_p = \frac{2{,}2}{1 + \sqrt{1 + \left(6 \cdot \frac{S_1 - C}{D_p}\right)^2}}. \qquad (89)$$

При $K_p \cdot [P] < P$ толщину днища S следует увеличить так, чтобы было выполнено условие

$$K_p \cdot [P] \geq P.$$

5.3 Расчет плоских круглых днищ

Толщину плоских круглых днищ сосудов и аппаратов, работающих под внутренним избыточным или наружным давлением, рассчитывают по формуле

$$S_1 \geq S_{1p} + C, \qquad (90)$$

где S_{1p} – расчетная толщина, мм.

$$S_{1p} = K \cdot K_o \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P}{\varphi \cdot [\sigma]}}, \qquad (91)$$

где K – коэффициент, определяемый в зависимости от конструкции днища по таблице 3;

K_o – коэффициент ослабления днища;

D_p – расчетный диаметр днища, мм;

P – расчетное внутреннее избыточное или наружное давление, МПа;

φ – коэффициент прочности сварных швов днища;

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

Значение коэффициента ослабления K_o для днищ, имеющих одно отверстие, определяют по формуле

$$K_o = \sqrt{1 + \frac{d}{D_p} + \left(\frac{d}{D_p}\right)^2}, \qquad (92)$$

где d – диаметр отверстия в днище, мм.

Значение коэффициента K_o для днищ, имеющих несколько отверстий, определяют по формуле

$$K_o = \sqrt{\frac{1 - \sum\left(d_i / D_p\right)^3}{1 - \sum d_i / D_p}}, \qquad (93)$$

где d_i –диаметр отверстия в днище, мм $\left(i = 1,2,3\ldots n\right)$;

n – количество отверстий в днищах.

Коэффициент K_o определяют для наиболее ослабленного диаметрального сечения. Максимальную сумму для длин хорд отверстий в наиболее ослабленном диаметральном сечении определяют в соответствии с рисунком 14*а* по формуле

$$\sum d_i = max\left\{\left(d_1 + d_3\right);\ \left(b_2 + b_3\right)\right\}. \qquad (94)$$

Основные расчетные размеры отверстий указаны на рисунке 14.

Для днищ без отверстий коэффициент ослабления K_o принимают равным 1.

Во всех случаях присоединения днища к обечайке минимальная толщина плоского днища должна быть не менее толщины обечайки.

Допускаемое давление на плоское днище определяют по формуле

$$[P] = \left(\frac{S_1 - C}{K \cdot K_o \cdot D_p}\right)^2 \cdot [\sigma], \qquad (95)$$

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

Толщину S_2 для соединения типа 10 определяют по формуле

$$S_2 \geq max\left\{1{,}1 \cdot S;\quad \frac{S_1}{1+\frac{D_p - 2\cdot r}{1{,}2\cdot S_1}\cdot \sin\gamma}\right\}. \qquad (96)$$

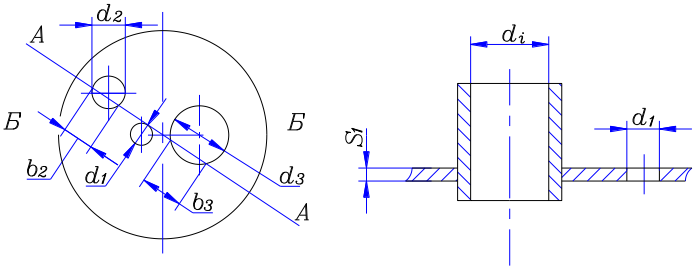


Рисунок 14 – Основные расчетные размеры отверстий

Пример 16

Рассчитать толщину плоского днища аппарата, работающего под внутренним избыточным давлением. Расчетное давление аппарата 0,6 МПа; расчетная температура 100° С; внутренний диаметр аппарата 400 мм; толщина стенки цилиндрической обечайки 5 мм; материал – сталь 20К. Прибавку для компенсации коррозии принять равной 2 мм. На днище расположен штуцер с условным проходом $d_y = 100$.

Допускаемые напряжения при расчетной температуре 100 °С для стали 20К определяем по таблице А.1 приложения А методических указаний [21]

$$[\sigma] = 142 \text{ МПа}.$$

Для днища, изготовленного из заготовки, не имеющей сварных швов, принимаем коэффициент прочности сварных швов $\varphi = 1$.

Расчетную толщину плоского днища определяем по формуле (91). Значение коэффициента K *определяем по таблице 3. Значение ко-*

эффициента K зависит от отношения $\frac{S-C}{S_1-C}$. Так как толщина плоского днища S_1 неизвестна, то для предварительного расчета принимаем значение $K=0{,}41$, соответствующее отношению $\frac{S-C}{S_1-C}<0{,}5$. Коэффициент ослабления днища отверстием определяем по формуле (91). Расчетный диаметр днища для данной конструкции в соответствии с таблицей 3 $D_p=D=400$ мм. Для штуцера условного прохода $d_y=100$ примем трубу $Ø\,108\times4$ по стандарту [4]. Внутренний диаметр штуцера $d=100$ мм.

$$K_o=\sqrt{1+\frac{100}{400}+\left(\frac{100}{400}\right)^2}=1{,}146.$$

Расчетная толщина днища

$$S_{1p}=0{,}41\cdot1{,}146\cdot400\cdot\sqrt{\frac{0{,}6}{1\cdot142}}=12{,}2\text{ мм}.$$

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии по условию равна $C_1=2$ мм. Прибавка для компенсации минусового допуска C_2 учитывается только тогда, когда сумма прибавок C_2+C_3 превышает 5 % номинальной толщины листа. Для листов толщиной от 8 до 25 мм минусовой допуск $C_2=0{,}8$ мм, а $C_3=0$ [21] и их сумма не превышает 5 % от исполнительной толщины листа, которую определяем по формуле (102). Поэтому сумма прибавок $C=C_1$, то есть

$$S_1\geq12{,}2+2=14{,}2\text{ мм}.$$

Принимаем исполнительную толщину плоского днища из листового проката $S_1=16$ мм.

Проверяем правильность выбора коэффициента K. Отношение

$$\frac{S-C}{S_1-C}=\frac{5-2{,}5}{16-2}=0{,}157<0{,}5.$$

Следовательно, коэффициент K выбран правильно.

Проверяем допускаемое давление по формуле (95)

$$[P]=\left(\frac{16-2}{0{,}41\cdot 1{,}146\cdot 400}\right)^2\cdot 1\cdot 142=0{,}78\ МПа.$$

Условие прочности выполняется: $0{,}6<0{,}78$ *(МПа).*

Проверяем условия применения расчетных формул.

$$\frac{16-2}{400}=0{,}033<0{,}11.$$

Условие выполняется.

Пример 17

Рассчитать толщину плоского кованого днища аппарата, работающего под внутренним избыточным давлением. Расчетное давление аппарата 3,2 МПа; расчетная температура 150° С; внутренний диаметр аппарата 600 мм; материал – сталь 16ГС; группа аппарата – 1. Прибавку для компенсации коррозии принять равной 2 мм.

Допускаемые напряжения при расчетной температуре 150 °С для стали 16ГС определяем по таблице А.1 приложения А методических указаний [21]

$$[\sigma]=171\ МПа.$$

Радиус внутреннего скругления днища принимаем конструктивно, с учетом требований отраслевого стандарта [15] его значение должно быть $r\geq 2{,}5\,S$, *где* S *– исполнительная толщина обечайки. Определяем расчетную толщину обечайки [21]:*

$$S_p=\frac{P\cdot D}{2\cdot[\sigma]\cdot\varphi-P},$$

$$S_p=\frac{3{,}2\cdot 600}{2\cdot 171\cdot 1-3{,}2}=5{,}67\ мм,$$

Исполнительная толщина обечайки

$$S\geq 5{,}67+2{,}8=8{,}47\ мм.$$

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

$$r\geq 2{,}5\cdot 10=25\ мм.$$

Принимаем $r = 25$ *мм.*

Расчетный диаметр днища в соответствии с таблицей 3

$$D_p = 600 - 2 \cdot 25 = 550 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину днища определяем по формуле (91). Значение коэффициента K *для предварительного расчета примем равным 0,35:*

$$S_{1p} = 0{,}35 \cdot 1 \cdot 550 \cdot \sqrt{\frac{3{,}2}{1 \cdot 171}} = 26{,}3 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину днища определяем по формуле (90). Прибавку к расчетной толщине кованого днища принимаем равной прибавке для компенсации коррозии. Прибавку для компенсации минусового допуска не учитываем, так как днище изготавливается ковкой и затем подвергается механической обработке.

$$S_1 \geq 26{,}3 + 2 = 28{,}3 \text{ мм.}$$

Принимаем $S_1 = 30$ *мм.*

Проверяем условия применения расчетных формул.

$$\frac{30 - 2}{600} = 0{,}049 < 0{,}11,$$

$$\max\{10; 0{,}25 \cdot 30\} \leq r \leq \min\{30; 0{,}1 \cdot 600\},$$

$$10 < r < 30.$$

Условия выполняются.

Уточняем значение коэффициента K *:*

$$K = \max\left\{0{,}41 \cdot \left(1 - 0{,}23\frac{10 - 2{,}8}{30 - 2}\right); 0{,}35\right\} = \max\{0{,}386;\ 0{,}35\} = 0{,}386\ .$$

Уточняем значение расчетной и исполнительной толщины днища

$$S_{1p} = 0{,}386 \cdot 1 \cdot 550 \cdot \sqrt{\frac{3{,}2}{1 \cdot 171}} = 29{,}02 \text{ мм,}$$

$$S_1 \geq 29{,}02 + 2 = 31{,}02 \text{ мм.}$$

Принимаем $S_1 = 32$ *мм.*

Так как исполнительная толщина днища не совпала со значением, принятым для определения коэффициента K, уточняем значение коэффициента K:

$$K = max\left\{0{,}41 \cdot \left(1 - 0{,}23\frac{10-2{,}8}{32-2}\right); 0{,}35\right\} = max\{0{,}387;\ 0{,}35\} = 0{,}387.$$

Уточняем значение расчетной и исполнительной толщины днища

$$S_{1p} = 0{,}387 \cdot 1 \cdot 550 \cdot \sqrt{\frac{3{,}2}{1 \cdot 171}} = 29{,}15\ мм,$$

$$S_1 \geq 29{,}15 + 2 = 31{,}15\ мм.$$

Принимаем $S_1 = 32$ мм. Значение исполнительной толщины совпало со значением, принятым для определения коэффициента K.

Проверяем допускаемое давление по формуле (95)

$$[P] = \left(\frac{32-2}{0{,}387 \cdot 1 \cdot 550}\right)^2 \cdot 171 = 3{,}39\ МПа.$$

Условие прочности выполняется: $3{,}2 < 3{,}39$ (МПа).

Проверяем условия применения расчетных формул.

$$\frac{32-2}{550} = 0{,}055 < 0{,}11.$$

Условие выполняется.

Пример 18

Рассчитать толщину плоского днища с кольцевой проточкой аппарата, работающего под внутренним избыточным давлением. Расчетное давление аппарата 3,2 МПа; расчетная температура 150° С; обечайка аппарата изготовлена из трубы Ø273×7; материал – сталь 20. Прибавку для компенсации коррозии принять равной 2 мм.

Допускаемые напряжения при расчетной температуре 150 °С для стали 20 определяем по таблице А.1 приложения А методических указаний [21]

$$[\sigma] = 139\ МПа.$$

Расчетный диаметр днища в соответствии с таблицей 3

$$D_p = D = 273 - 2 \cdot 7 = 259 \text{ мм.}$$

Расчетную толщину днища определяем по формуле (91). Для предварительного расчета примем значение $K = 0{,}41$, *соответствующее отношению* $\frac{S - C}{S_1 - C} < 0{,}5$.

$$S_{1p} = 0{,}41 \cdot 1 \cdot 259 \cdot \sqrt{\frac{3{,}2}{1 \cdot 139}} = 14{,}53 \text{ мм.}$$

Исполнительную толщину днища определяем по формуле (90).

$$S_1 \geq 14{,}53 + 2 = 16{,}53 \text{ мм.}$$

Принимаем $S_1 = 18$ *мм.*

Проверяем правильность выбора коэффициента K. *Отношение*

$$\frac{S - C}{S_1 - C} = \frac{7 - 3{,}05}{18 - 2} = 0{,}247 < 0{,}5.$$

Следовательно, коэффициент выбран правильно. Сумму прибавок к расчетной толщине обечайки, изготовленной из трубы определяем как сумму прибавки для компенсации коррозии $C_1 = 2$ *мм и прибавки для компенсации минусового допуска* $C_2 = 0{,}15 \cdot 7 = 1{,}05$ *мм. Сумма прибавок к расчетной толщине днища равна прибавке для компенсации коррозии* $C_1 = 2$ *мм.*

Радиус кольцевой проточки принимаем конструктивно, с учетом требований отраслевого стандарта [15] его значение должно быть $r \geq 0{,}25\,S$, *но не менее 8 мм, а наименьшая толщина днища в месте кольцевой проточки* $S_2 \geq 0{,}8\,S$, *но не менее* S, *где* S *– толщина цилиндрической обечайки.*

$$r \geq 0{,}25 \cdot 7 = 1{,}75 \text{ мм.}$$

Принимаем $r = 8$ *мм.*

Толщину днища в месте кольцевой проточки определяем по формуле (96)

$$S_2 \geq \max\left\{1{,}1 \cdot 7;\quad \frac{18}{1 + \frac{259 - 2 \cdot 8}{1{,}2 \cdot 18} \cdot \sin 45^\circ}\right\} = \{7{,}7;\ 1{,}04\} = 7{,}7 \text{ мм.}$$

Наименьшая толщина в месте кольцевой проточки $S_2 \geq 0{,}8 \cdot 7 = 5{,}6$ *мм, но не менее 7 мм. Принимаем* $S_2 = 8$ *мм.*

Проверяем условие закрепления в соответствии с таблицей 3

$$0{,}25 \cdot 7 \leq r \leq 18 - 8,$$

$$1{,}75 \leq 8 \leq 10.$$

Условие выполняется.

Проверяем допускаемое давление по формуле (95)

$$[P] = \left(\frac{18-2}{0{,}41 \cdot 1 \cdot 259} \right)^2 \cdot 139 = 3{,}88 \text{ МПа}.$$

Условие прочности выполняется

$$3{,}2 < 3{,}88 \text{ (МПа)}.$$

Проверяем условия применения расчетных формул.

$$\frac{18-2}{259} = 0{,}062 < 0{,}11.$$

Условие выполняется.

5.4 Расчет плоских круглых крышек с дополнительным краевым моментом

Расчетная схема плоской крышки с дополнительным краевым моментом приведена на рисунке 15

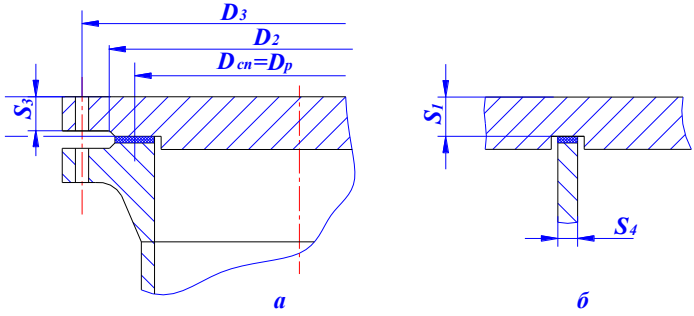


Рисунок 15 – Плоская крышка с дополнительным краевым моментом *а* – без паза; *б* – с пазом (например, под продольную перегородку в распределительной камере теплообменника)

Расчетную толщину плоских круглых крышек с дополнительным краевым моментом в соответствии с рисунком 15*а*, нагруженных внутренним избыточным давлением, определяют по формуле

$$S_{1p} = K_o \cdot K_6 \cdot D_p \cdot \sqrt{\frac{P}{\varphi \cdot [\sigma]}}, \qquad (97)$$

где K_6 безразмерный коэффициент;

–

D_p – расчетный диаметр крышки, мм, равный среднему диаметру прокладки D_{cn} в соответствии с рисунком 15*а*.

$$K_6 = 0{,}41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot (D_3 / D_{cn} - 1)}{D_3 / D_{cn}}}, \qquad (98)$$

где ψ – безразмерный коэффициент;

D_3 – диаметр болтовой окружности, мм.

Значение ψ определяют по формуле

$$\psi = max \begin{Bmatrix} 1 + F_n / F_Q \\ F_{бм} / F_Q \end{Bmatrix}, \qquad (99)$$

где F_n – реакция прокладки, Н;

$F_{бм}$ – болтовая нагрузка в условиях монтажа, Н;

F_Q – равнодействующая внутреннего давления, Н.

Равнодействующую внутреннего давления определяют по формуле

$$F_Q = 0{,}785 \cdot P \cdot D_{cn}^2. \qquad (100)$$

Расчет реакции прокладки F_n и болтовой нагрузки $F_{бм}$ приводится в [23].

Значение коэффициента ослабления K_o определяют по формуле (92) или по формуле (93), если $\sum d_i \le 0{,}7 \cdot D_p$. Отверстия для болтов в расчет не принимают.

Для крышки, имеющей паз для перегородки, значение коэффициента K_6 для определения толщины S_1 в месте паза в соответствии с рисунком 15*б* рассчитывают с учетом усилия от сжатия прокладки в пазе по формуле

$$K_6 = 0{,}41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot (D_3 / D_{cn} - 1) + 9{,}6 \cdot D_3 \cdot S_4 / D_{cn}^2}{D_3 / D_{cn}}}, \qquad (101)$$

где S_4 – толщина перегородки, мм, в соответствии с рисунком 15*б*.

Толщину плоской крышки в месте уплотнения S_2 в соответствии с рисунком 15*а* определяют по формуле

$$S_2 \geq max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi};\ 0{,}6 \cdot \Phi / D_{cn} \right\} + C; \qquad (102)$$

$$\Phi = max \left\{ F_{бр} / [\sigma]_{бр};\ F_{бм} / [\sigma]_{бм} \right\}, \qquad (103)$$

где $F_{бр}$ – болтовая нагрузка в рабочих условиях, Н;

$[\sigma]_{бр}$ – допускаемое напряжение материала болтов в рабочих условиях, МПа;

$[\sigma]_{бм}$ – допускаемое напряжение материала болтов в условиях монтажа, МПа;

Значение коэффициента K_7 определяют по формуле

$$K_7 = 0{,}8 \cdot \sqrt{(D_3 / D_{cn}) - 1}. \qquad (104)$$

Толщину края плоской круглой крышки вне зоны уплотнения S_3 (рисунок 15*а*) определяют по формуле

$$S_3 \geq max \left\{ K_7 \cdot \sqrt{\Phi};\ 0{,}6 \cdot \Phi / D_2 \right\} + C, \qquad (105)$$

где D_2 – наименьший диаметр наружной утоненной части крышки, мм, в соответствии с рисунком 15*а*.

Исполнительную толщину крышек определяют с учетом прибавки по формуле (90).

Допускаемое давление, МПа, для плоской круглой крышки с дополнительным краевым моментом определяют по формуле

$$[P] = \left(\frac{S_1 - C}{K_o \cdot K_6 \cdot D_p} \right)^2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi. \qquad (106)$$

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

Пример 19

Рассчитать толщину плоской крышки люка аппарата, работающего под внутренним избыточным давлением. Расчетное давление аппарата 1,0 МПа; расчетная температура 165° С; внутренний диаметр люка 400 мм; толщина стенки цилиндрической обечайки люка 8 мм; материал крышки – сталь Ст3сп5, материал болтов – сталь 40. Размеры фланцевого соединения и расчетные нагрузки определены по методическим указаниям [23]. Средний диаметр прокладки $D_{сп} = 442$ *мм, диаметр болтовой окружности* $D_б = 495$ *мм. Расчетные нагрузки: реакция прокладки* $F_п = 5{,}207 \cdot 10^4$ *Н; болтовая нагрузка в условиях монтажа* $F_{бм} = 3{,}040 \cdot 10^5$ *Н, болтовая нагрузка в рабочих условиях* $F_{бр} = 2{,}121 \cdot 10^5$ *Прибавку для компенсации коррозии принять равной 2 мм. Уплотнительная поверхность фланцевого соединения – гладкая. Фланцевое соединение – изолированное.*

Допускаемые напряжения при расчетной температуре $t = 165$ *°С определяем методом линейной интерполяции. Для этого определяем допускаемые напряжения для стали Ст3сп5 по таблице А.1 приложения А [21]:*

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

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

Допускаемое напряжение при температуре 165 °С

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

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

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

$$[\sigma] = 144{,}0 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение при температуре 20 °С $[\sigma]_{20} = 154$ *МПа. Расчетная температура болтов для изолированного фланца составляет* $0{,}97\,t = 0{,}97 \cdot 165 = 160$ *°С.*

Допускаемое напряжение материала болтов при расчетной температуре определяем методом интерполяции по методическим ука-

заниям [15]: $[\sigma]_{бр} = 122{,}0$ *МПа, допускаемое напряжение при температуре 20 С* $[\sigma]_{бм} = 130$ *МПа.*

Расчетный диаметр крышки

$$D_p = D_{сп} = 442 \text{ мм}.$$

Равнодействующую внутреннего давления определяем по формуле (100):

$$F_Q = 0{,}785 \cdot 1{,}0 \cdot 442^2 = 1{,}534 \cdot 10^5 \text{ Н}.$$

Для определения расчетной толщины крышки находим коэффициенты, входящие в расчетную формулу. Коэффициент ослабления для крышек без отверстий $K_0 = 1$. *Коэффициент* K_6 *определяем по формуле (98), предварительно вычислив коэффициент* ψ *по формуле (99):*

$$\psi = \max \begin{Bmatrix} 1 + 5{,}207 \cdot 10^4 / 1{,}534 \cdot 10^5 \\ 3{,}040 \cdot 10^5 / 1{,}534 \cdot 10^5 \end{Bmatrix} = \max\{1{,}339; 1{,}982\} = 1{,}982.$$

$$K_6 = 0{,}41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot 1{,}982 \cdot (495/442 - 1)}{495/442}} = 0{,}507.$$

Расчетную толщину крышки определяем по формуле (97)

$$S_{1p} = 1 \cdot 0{,}507 \cdot 442 \cdot \sqrt{\frac{1{,}0}{1 \cdot 144}} = 19{,}1 \text{ мм}.$$

Исполнительную толщину крышки определяем по формуле (90)

$$S_1 \geq 19{,}1 + 2 = 21{,}1 \text{ мм}.$$

Принимаем исполнительную толщину крышки по стандарту [18] $S_1 = 26$ *мм.*

Толщину плоской крышки в месте уплотнения определяем по формуле (102), предварительно вычислив значение коэффициентов Φ *по формуле (103) и* K_7 *по формуле (104):*

$$\Phi = \max \left\{ 2{,}121 \cdot 10^5 / 122; 3{,}040 \cdot 10^5 / 130 \right\} = \max\{1738 : 2338\} = 2338,$$

$$K_7 = 0{,}8 \cdot \sqrt{(495/442) - 1} = 0{,}277,$$

$$S_2 \geq max\left\{0{,}277 \cdot \sqrt{2338}\,;\, 0{,}6 \cdot 2338/442\right\} + 2 = max\{13{,}4;3{,}2\} + 2 =$$
$$= 13{,}4 + 2 = 15{,}4 \text{ мм.}$$

Принимаем толщину крышки в месте уплотнения по стандарту [18]

$S_2 = 23$ *мм.*

Проверяем допускаемое давление по формуле (106)

$$[P] = \left(\frac{26-2}{1 \cdot 0{,}507 \cdot 442}\right)^2 \cdot 144 = 1{,}65 \text{ МПа.}$$

Условие прочности выполняется: $1{,}0 < 1{,}65$ *(МПа).*

Проверяем условие применения расчетных формул.

$$\frac{26-2}{442} = 0{,}054 < 0{,}11.$$

Условие выполняется.

ПРИЛОЖЕНИЕ А – Выпуклые днища

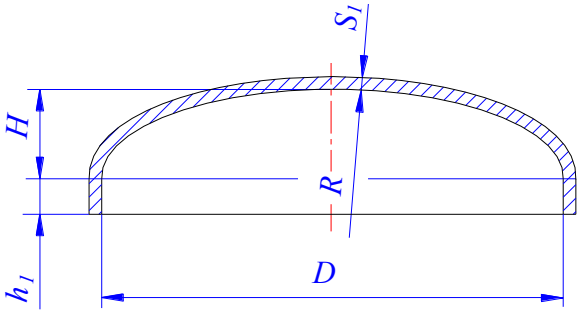


Рисунок А.1 – Эллиптическое днище

Таблица А.1 – Основные параметры эллиптических днищ с внутренними базовыми размерами и высотой выпуклой части $H = 0{,}25\,D$

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
250	25	62	4	0,09	3,3	2,8
			5			3,6
			6			4,3
			8			5,9
			10			7,4
			12			9,1
			14			10,8
			16			12,5
300		75	4	0,12	5,3	3,9
			5			4,9
			6			6,0
			8			8,0
			10			10,2
			12			12,4
			14			14,7
			16			17,0
350		88	4	0,16	8,0	5,2
			5			6,5
			6			7,8
			8			10,6

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
350	25	88	10	0,16	8,0	13,4
			12			16,2
			14			19,2
			16			22,2
400		100	4	0,20	11,5	6,6
			5			8,3
			6			10
			8			13,4
			10			17,0
			12			20,6
			14			24,3
			16			28,0
			18			31,9
			20			35,8
			22			39,8
			25			45,9
	40		28	0,22	13,4	56,6
			30			61,3
(450)	25	112	4	0,25	15,8	8,2
			5			10,3
			6			12,4
			8			16,6
			10			21,0
			12			25,5
			14			30,0
			16			34,6
			18			39,3
			20			44,1
500		125	4	0,31	21,2	9,9
			5			12,5
			6			15,0
			8			20,2
			10			25,5
			12			30,8
			14			36,3
			16			41,8
			18			47,4

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
500	25	125	20	0,31	21,2	53,2
	40		22	0,33	24,1	63,2
			25			72,7
			28			82,5
			30			89,1
			32			95,8
			36			109,5
(550)	25	137	4	0,37	27,6	11,8
			5			14,9
			6			17,8
			8			24,1
			10			30,3
			12			36,7
			14			43,2
			16			49,7
			18			56,4
	40		20	0,40	31,2	67,3
600	25	150	4	0,44	35,2	13,9
			5			17,5
			6			21,1
			8			28,3
			10			35,6
			12			43,1
			14			50,6
			16			58,3
	40		18	0,47	39,5	70,2
			20			78,5
			22			87,0
			25			99,9
			28			113,1
			30			122,0
			32			131,0
			36			149,4
			40			168,3
(650)	25	162	4	0,51	44,1	16,2
			5			20,3
			6			24,5
			8			32,9

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
(650)	25	162	10	0,51	44,1	41,4
			12			50,0
			14			58,7
	40		16	0,54	49,1	71,5
			18			81,0
			20			90,6
700	25	175	4	0,59	54,3	18,7
			5			23,4
			6			28,2
			8			37,8
			10			47,5
			12			57,4
			14			67,4
	40		16	0,62	60,1	81,8
			18			92,5
			20			103,5
			22			114,5
			25			131,3
			28			148,4
			32			171,7
			36			195,4
	60		40	0,66	67,8	234,4
800	25	200	4	0,76	79,3	24,0
			5			30,1
			6			36,3
			8			48,6
			10			61,1
			12			73,8
	40		14	0,79	86,8	90,8
			16			104,3
			18			118,0
			20			131,8
			22			145,8
			25			167,0
			28			188,5
			30			203,1
			32			217,8
	60		34	0,84	96,9	246,6

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
800	60	200	36	0,84	96,9	262,5
			38			278,5
			40			294,6
			45			335,7
			50			377,8
900	25	225	5	0,95	110,9	37,7
			6			45,4
			8			60,8
			10			76,4
	40		12	0,99	120,4	96,2
			14			112,8
			16			129,6
			18			146,5
			20			163,5
			22			180,8
			25			206,9
			28			233,4
	60		30	1,05	133,1	265,1
			32			284,1
1000	25	250	5	1,16	149,9	46,2
			6			55,5
			8			74,4
			10			93,4
	40		12	1,21	161,7	117,1
			14			137,2
			16			157,5
			18			178,0
			20			198,7
			22			219,5
			25			251,1
	60		28	1,27	177,4	294,2
			30			319,9
			32			342,6
			34			365,6
			36			388,8
			38			412,1
			40			435,6
			45			495,2

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
1000	60	250	50	1,27	177,4	556,0
			55			618,0
	80		60	1,34	193,1	712,6
			65			779,8
			70			848,2
			80			988,8
(1100)	25	275	6	1,40	197,2	66,7
			8			89,3
	40		10	1,45	211,4	116,2
			12			140,0
			14			164,0
			16			188,2
			18			212,6
			20			237,2
			22			262,0
	60		25	1,52	230,4	313,4
			28			353,1
			30			379,8
			32			406,7
1200	25	300	6	1,65	253,4	78,9
			8			105,6
	40		10	1,71	270,4	137,0
			12			165,0
			14			193,2
			16			221,7
			18			250,3
			20			279,3
	60		22	1,79	293,0	321,5
			25			367,3
			28			413,7
			30			444,8
			32			476,2
			34			507,8
			36			539,6
			38			571,6
			40			603,8
			45			685,4

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
1200	80	300	50	1,86	315,6	799,2
			55			886,7
			60			975,7
			65			1066,2
			70			1158,0
			80			1346,2
	100		90	1,94	338,2	1585,3
			100			1786,3
(1300)	25	325	6	1,93	319,5	92,1
			8			123,3
	40		10	2,00	339,4	159,5
			12			192,0
			14			224,0
			16			257,8
			18			291,1
			20			324,5
	60		22	2,08	365,9	372,6
			25			425,5
			28			479,0
			30			514,9
			32			551,1
1400	25	350	6	2,23	396,0	106,4
	40		8	2,30	419,1	146,4
			10			183,6
			12			221,1
			14			258,8
			16			296,7
			18			334,9
	60		20	2,39	449,9	387,3
			22			427,4
			25			488,0
			28			549,1
			30			590,2
			32			631,5
			34			673,5
			36			714,9
			38			757,0

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
1400	60	350	40	2,39	449,9	799,3
	80		45	2,48	480,7	938,3
			50			1050,5
			55			1164,3
			60			1279,8
			65			1396,8
			70			1489,2
	100		80	2,56	511,4	1816,5
			90			2073,4
			100			2337,3
(1500)	25	375	6	2,56	484,0	121,6
	40		8	2,63	510,4	167,1
			10			209,5
			12			252,2
			14			295,1
			16			338,3
	60		18	2,72	545,8	395,2
			20			440,5
			22			485,9
			25			554,7
			28			624,0
			30			670,5
			32			717,3
			34			764,4
			36			811,7
			38			859,4
	80		40	2,82	581,4	937,6
			45			1062,4
			50			1188,9
			55			1317,1
			60			1447,1
(1550)	40	388	8	2,80	560,7	177,4
			10			222,3
			12			267,5
1600	25	400	6	2,90	584,0	137,9
	40		8	2,98	614,1	189,1
			10			237,1

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
1600	40	400	12	2,98	614,1	285,3
			14			333,9
			16			382,6
	60		18	3,08	654,3	446,1
			20			497,0
			22			548,2
			25			625,6
			28			703,6
			30			756,0
			32			808,6
			34			861,5
			36			914,7
	80		38	3,18	694,5	998,9
			40			1054,3
			45			1194,2
			50			1335,8
			55			1479,3
			60			1624,6
	100		65	3,28	734,7	1825,2
			70			1978,5
			80			2290,8
			90			2610,7
			100			2938,3
	120		110	3,38	774,9	3346,4
(1700)	40	425	6	3,35	731,0	159,0
			8			212,5
			10			266,4
			12			320,5
			14			375,0
	60		16	3,45	776,3	443,2
			18			500,0
			20			557,0
			22			610,0
			28			782,5
			32			897,5
	80		36	3,56	821,7	1045,8
			40			1176,1
			50			1474,7

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
(1750)	40	438	8	3,54	794,5	221,1
			10			280,8
			12			337,7
1800	40	450	6	3,74	861,7	177,5
			8			237,3
			10			297,4
			12			357,8
			14			418,5
	60		16	3,85	912,6	493,8
			18			556,9
			20			620,4
			22			684,1
			25			780,3
			28			877,2
			30			942,2
			32			1007,5
	80		34	3,96	963,4	1103,9
			36			1171,7
			38			1239,8
			40			1308,2
			45			1408,7
			50			1655,2
			55			1831,8
	100		60	4,08	1014,3	2065,4
			65			2250,8
			70			2438,3
			80			2819,5
			90			3209,2
	120		100	4,19	1065,2	3701,1
(1900)	40	475	6	4,15	1007,2	197,1
			8			263,4
			10			330,1
			12			397,1
	60		14	4,27	1063,8	477,6
			26			547,1
			18			617,0
			20			687,1

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
(1950)	40	488	8	4,36	1076,6	276,3
			10			346,0
			12			416,0
2000	40	500	6	4,59	1168,1	217,7
			8			290,9
			10			364,5
			12			438,4
			14			526,5
	60		16	4,71	1230,9	603,1
			18			680,0
			20			757,3
			22			834,9
			25			952,0
			28			1069,9
	80		30	4,84	1293,7	1178,9
			32			1260,3
			34			1342,0
			36			1424,1
			38			1506,6
			40			1589,4
			45			1797,9
			50			2008,7
	100		55	4,96	1356,5	2277,5
			60			2498,0
			65			2720,7
			70			2945,8
			80			3402,8
	120		90	5,09	1420,0	3961,8
			100			4448,2
			110			4926,1
			120			5426,0
2200	40	550	8	5,52	1539,5	350,0
			10			438,4
	60		12	5,66	1615,5	540,2
			14			631,6
			16			723,3
			18			815,4
			20			907,9

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
2200	60	550	22	5,66	1615,5	1000,8
			25			1140,8
	80		28	5,80	1691,5	1312,4
			30			1409,0
			32			1506,0
			34			1603,3
			36			1701,1
			38			1799,2
			40			1897,8
			45			2145,8
	100		50	5,94	1767,5	2451,7
			55			2710,3
			60			2971,3
			65			3198,6
			70			3500,9
	120		80	6,08	1844,4	4130,5
			90			4691,8
			100			5263,4
			110			5830,5
			120			6414,9
2400	40	600	8	6,54	1982,3	414,5
			10			519,1
	60		12	6,70	2072,7	638,4
			14			746,2
			16			854,4
			18			963,1
			20			1072,1
			22			1181,6
	80		25	6,85	2163,1	1376,4
			28			1545,9
			30			1659,5
			32			1773,4
			34			1887,8
			36			2002,6
			38			2117,8
			40			2233,4
	100		45	7,00	2253,6	2578,5

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
2400	100	550	50	7,00	2253,6	2878,2
			55			3180,6
			60			3485,6
			65			3793,3
	120		70	7,15	2345,2	4189,0
			80			4830,6
			90			5483,1
			100			6146,8
			110			6810,2
			120			7485,0
2500	40	625	8	7,09	2232,3	448,7
			10			562,0
	60		12	7,25	2330,5	690,5
			14			807,1
			16			924,1
			18			1041,5
			20			1159,3
			22			1277,6
	80		25	7,40	2428,6	1479,9
			28			1669,9
			30			1792,4
			32			1915,3
			34			2038,7
			36			2162,5
			38			2286,7
			40			2411,4
	100		45	7,56	2526,7	2781,5
			50			3104,2
			55			3429,8
			60			3758,1
	120		65	7,72	2626,2	4171,5
			70			4511,8
			80			5201,1
			90			5901,8
			100			6614,0
2600	40	650	8	7,65	2502,6	484,4
	60		10	7,82	2608,7	619,5

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
2600	60	650	12	7,82	2608,7	744,7
			14			870,3
			16			996,4
			18			1123,0
			20			1249,9
			22			1377,3
	80		25	7,98	2714,9	1601,7
			28			1798,6
			30			1930,4
			32			2062,7
			34			2195,4
			36			2328,5
			38			2446,5
	100		40	8,14	2821,0	2648,3
			45			2992,1
			50			3338,8
			55			3688,3
			60			4040,7
	120		65	8,31	2928,6	4481,5
			70			4846,4
			80			5585,2
			90			6335,7
			100			7098,2
2800	40	700	8	8,85	3106,7	559,8
	60		10	9,03	3229,8	714,8
			12			859,1
			14			1004,0
			16			1149,3
			18			1295,1
	80		20	9,20	3352,9	1441,4
			22			1618,8
			25			1844,0
			28			2060,4
			30			2221,7
			32			2373,7
			34			2526,1
			36			2679,1

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
2800	100	700	38	9,38	3476,0	2885,7
			40			3042,4
			45			3436,4
			50			3833,4
			55			4233,5
			60			4721,4
	120		65	9,55	3600,9	5134,9
			70			5551,3
			80			6394,3
			90			7249,6
			100			8117,7
3000	40	750	8	10,13	3801,0	640,6
	60		10	10,32	3942,3	816,9
			12			981,8
			14			1147,2
			16			1313,1
			18			1479,5
	80		20	10,51	4083,6	1676,2
			22			1846,7
			25			2103,3
			28			2361,0
			30			2533,5
			32			2706,5
			34			2880,0
	100		36	10,70	4224,9	3108,0
			38			3285,6
			40			3463,7
			45			3911,2
			50			4362,1
	120		55	10,89	4368,1	4899,1
			60			5364,1
			65			5832,5
			70			6304,3
			80			7257,8
			90			8224,8
			100			9205,4

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
3200	60	800	10	11,70	4752,3	925,8
			12			1112,6
			14			1299,9
			16			1487,8
			18			1676,2
	80		20	11,90	4913,1	1896,9
			22			2089,6
			25			2379,6
			28			2670,9
			30			2865,7
			32			3061,2
	100		34	12,10	5073,8	3311,4
			36			3511,1
			38			3711,4
			40			3912,2
			45			4416,8
			50			4924,8
	120		55	12,30	5237,3	5524,6
			60			6047,8
			65			6574,5
			70			7104,7
			80			8175,9
			90			9261,3
			100			10361,1
3400	60	850	12	13,17	5666,2	1251,6
			14			1462,2
			16			1673,4
	80		18	13,38	5847,7	1915,5
			20			2131,2
			22			2347,5
			25			2673,0
			28			2999,8
			30			3218,4
	100		32	13,60	6029,2	3491,4
			34			3714,9
			36			3938,7
			38			4163,1

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
3400	100	850	40	13,60	6029,2	4388,0
			45			4952,9
	120		50	13,81	6213,8	5606,6
			55			6187,6
			60			6772,3
			65			7360,7
			70			7952,9
			80			9148,5
			90			10359,1
			100			11586,0
			110			12804,9
			120			14057,8
3600	60	900	12	14,73	6690,2	1398,8
			14			1634,0
			16			1869,9
	80		18	14,95	6893,6	2138,4
			20			2379,1
			22			2620,3
			25			2983,4
			28			3347,8
	100		30	15,18	7097,1	3645,2
			32			3893,1
			34			4141,7
			36			4390,8
			38			4640,6
			40			4891,0
	120		45	15,40	7304,3	5600,7
			50			6242,4
			55			6888,1
			60			7537,6
			65			8191,2
			70			8848,6
			80			10175,5
			90			11518,2
			100			12877,0
			110			14237,0
			120			15611,5

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
3800	60	950	14	16,37	7830,5	1815,4
	80		16	16,61	8057,2	2107,4
			18			2373,7
			20			2640,6
			22			2908,2
			25			3310,8
	100		28	16,84	8283,9	3767,7
			30			4041,7
			32			4316,3
			34			4591,6
			36			4867,5
			38			5144,1
			40			5421,3
	120		45	17,08	8514,9	6202,6
			50			6912,2
			55			7626,0
			60			8343,9
			65			9065,9
			70			9792,1
			80			11257,0
			90			12738,6
			100			14237,0
4000	80	1000	16	18,35	9344,6	2327,2
			18			2621,7
			20			2915,8
			22			3211,0
			25			3655,2
	100		28	18,60	9595,8	4156,6
			30			4458,6
			32			4761,3
			34			5064,6
			36			5368,7
			38			5673,4
			40			5978,2
	120		45	18,85	9852,0	6835,2
			50			7616,1
			55			8401,4

Продолжение таблицы А.1

Размеры в мм

D	h_1	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, дм^3	Масса, кг
4000	120	1000	60	18,85	9852,0	9190,9
			65			9984,9
			70			10783,3
			80			12393,0
			90			14020,3
4500	80	1125	16	23,08	13152,9	2924,5
			18			3293,5
			20			3663,2
			22			4033,7
	100		25	23,36	13471,0	4646,7
			28			5212,2
			30			5590,3
			32			5669,0
			34			6348,6
			36			6728,9

Примечания.
1. Днища с диаметрами, заключенными в скобки, допускается применять для котлов и рубашек сосудов и аппаратов.
2. Днища из двухслойной стали допускается изготовлять с толщиной стенки 24 и 26 мм вместо 25 мм.

Пример условного обозначения днища с внутренним диаметром $D = 2000$ мм, толщиной стенки $S = 10$ мм и высотой эллиптической части $H = 500$ мм:

Днище $2000 - 10 - 500$ *ГОСТ* $6533 - 78$

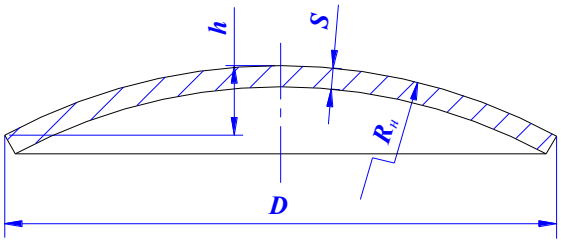


Рисунок А.2 – Сферическое неотбортованное днище

Таблица А.2 – Днища сферические неотбортованные при $R_н = D$

Размеры в миллиметрах

D	h	Наружная поверхность F, м^2	Масса Q, кг и емкость V, л при толщине стенки S									
			4		6		8		10		12	
			Q	V	Q	V	Q	V	Q	V	Q	V
400	53,6	0,134	4,28	3,34	6,38	3,30	8,47	3,24				
450	60,3	0,170	5,42	4,78	8,09	4,72	10,70	4,65	13,40	4,59		
500	67,0	0,210	6,70	6,58	10,00	6,49	13,30	6,42	16,50	6,34		
600	80,4	0,303	9,66	11,40	14,40	11,30	19,20	11,20	23,90	11,10		
700	93,8	0,412	13,20	18,10	19,70	18,00	26,20	17,90	32,60	17,70	39,0	17,5
800	107,0	0,539	17,20	27,20	25,70	27,00	34,20	26,70	42,70	26,60	51,1	26,4
900	121,0	0,682			32,60	38,50	43,40	38,30	54,10	38,00	64,7	37,0
1000	134,0	0,842			40,30	52,00	53,60	52,60	66,80	52,30	80,0	52,0
1100	147,0	1,020			48,70	70,50	64,90	70,10	80,90	69,70	96,9	69,4
1200	161,0	1,210			58,00	92,70	77,20	91,20	96,40	90,80	116,0	90,3
1400	188,0	1,650			79,00	146,00	105,00	145,00	131,00	145,00	157,0	144,0
1600	214,0	2,150			103,00	218,00	138,00	217,00	172,00	217,00	206,0	216,0
1800	241,0	2,730			131,00	311,00	174,00	310,00	218,00	309,00	261,0	308,0
2000	268,0	3,370			162,00	427,00	215,00	426,00	269,00	424,00	322,0	423,0
2200	295,0	4,070					260,00	567,00	325,00	566,00	390,0	564,0
2400	322,0	4,850					310,00	738,00	387,00	736,00	464,0	734,0
2600	348,0	5,690					364,00	937,00	455,00	936,00	545,0	934,0
2800	375,0	6,600					422,00	1172,00	527,00	1170,00	632,0	1167,0
3000	402,0	7,570					485,00	1441,00	506,00	1440,00	726,0	1437,0

Примечание. Масса днищ подсчитана при плотности стали 7,85 г/см^3

Пример условного обозначения днища диаметром 400 мм с толщиной стенки 8 мм из стали 09Г2С

Днище 400 – 8 – 09Г2С ОСТ 26 – 01 – 1297 – 75

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Конические днища

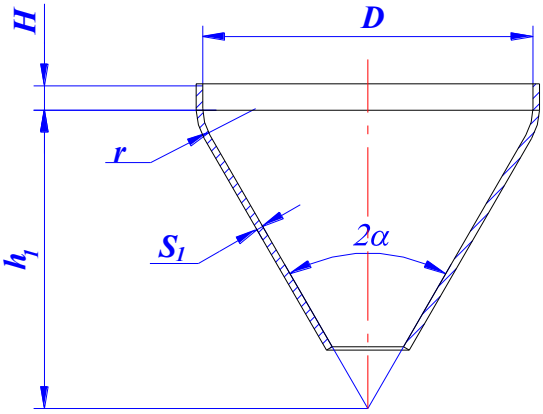


Рисунок Б.1 – Коническое отбортованное днище

Таблица Б.1 – Основные параметры конических отбортованных днищ с внутренними базовыми размерами и углом при вершине 60 º

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
400	367	80	30	3	0,32	0,020	7,8
				4			10,4
				6			15,8
				8			21,4
				10			27,0
(450)	411			3	0,40	0,028	9,5
				4			12,7
				6			19,3
				8			26,0
				10			32,8
500	452			3	0,48	0,038	11,4
				4			15,2
				6			23,1
				8			31,1

Продолжение таблицы Б.1

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
500	452	80	40	10	0,49	0,040	40,6
(550)	497		30	4	0,56	0,049	18,0
				6			27,7
				8			36,6
			40	10	0,58	0,052	47,7
600	541		30	4	0,66	0,063	21,0
				6			31,7
				8			42,6
			40	10	0,68	0,066	55,3
				12			66,9
(650)	584		30	4	0,76	0,079	24,2
				6			36,5
				8			49,0
			40	10	0,78	0,082	63,5
				12			76,8
700	627		30	4	0,87	0,097	27,6
				6			41,7
			40	8	0,89	0,101	57,5
				10			72,3
			50	12	0,92	0,105	89,6
800	735	160	30	4	1,22	0,152	38,7
				6			58,4
			40	8	1,25	0,157	80,1
				10			100,7
			50	12	1,28	0,162	124,2
				14			145,7
900	821		30	4	1,50	0,211	47,6
				6			71,7
			40	8	1,53	0,217	98,1
			50	10	1,56	0,224	125,7
				12			151,6
			60	14	1,59	0,230	181,2
1000	908		30	4	1,81	0,283	57,3
			40	6	1,84	0,291	88,0
				8			117,9
			50	10	1,88	0,299	150,7
				12			181,7
			60	14	1,91	0,307	216,7

Продолжение таблицы Б.1

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
1000	908	160	60	16	1,91	0,307	248,3
(1100)	997		40	6	2,19	0,380	104,2
				8			139,5
			50	10	2,22	0,389	178,0
			60	12	2,26	0,399	218,0
				14			225,5
			70	16	2,30	0,408	298,0
1200	1080		40	6	2,55	0,485	121,7
			50	8	2,60	0,496	165,5
				10			207,6
			60	12	2,64	0,508	253,9
				14			297,4
			70	16	2,68	0,519	346,3
				18			391,0
(1300)	1168		40	6	2,95	0,608	140,6
			50	8	3,00	0,621	190,9
				10			239,4
			60	12	3,04	0,634	292,5
			70	14	3,08	0,647	347,3
				16			398,3
			80	18	3,13	0,661	456,0
				20			508,3
1400	1254		50	6	3,43	0,765	163,1
				8			218,1
			60	10	3,47	0,780	277,2
				12			333,8
			70	14	3,52	0,795	395,9
				16			453,9
			80	18	3,57	0,811	519,0
				20			578,6
(1500)	1340		50	6	3,89	0,929	184,8
				8			247,2
			60	10	3,94	0,946	313,9
				12			377,8
			70	14	3,99	0,964	447,6
			80	16	4,04	0,982	519,5
				18			586,2
			100	20	4,14	1,017	669,5

Продолжение таблицы Б.1

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
(1500)	1340	160	100	22	4,14	1,017	738,6
1600	1439	200	50	6	4,49	1,136	213,2
				8			285,1
			60	10	4,54	1,156	361,6
			70	12	4,59	1,177	440,2
				14			515,0
			80	16	4,65	1,197	597,1
				18			673,6
			100	20	4,76	1,237	767,9
				22			847,0
				25			966,5
(1700)	1525		50	6	5,01	1,348	238,0
				8			318,1
			60	10	5,07	1,371	403,2
			70	12	5,12	1,394	490,5
				14			573,8
			80	16	5,18	1,416	664,8
			100	18	5,29	1,462	766,3
1800	1612		50	6	5,56	1,585	264,1
			60	8	5,62	1,611	356,8
				10			447,1
			70	12	5,68	1,636	543,6
			80	14	5,74	1,662	642,5
				16			736,1
			100	18	5,86	1,712	847,5
				20			944,0
				22			1041,0
				25			1187,3
(1900)	1698		50	6	6,15	1,850	291,6
			60	8	6,20	1,880	393,7
				10			493,3
			70	12	6,27	1,910	599,4
			80	14	6,33	1,930	708,0
				16			811,0
			100	18	6,46	1,990	932,7
2000	1785		50	6	6,76	2,139	320,5
			60	8	6,82	2,170	432,4
			70	10	6,89	2,201	547,0

Продолжение таблицы Б.1

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
2000	1785	200	70	12	6,89	2,201	657,9
			80	14	6,95	2,233	776,6
			100	16	7,09	2,296	906,5
				18			1022,0
				20			1138,2
				22			1254,9
			120	25	7,22	2,358	1457,6
				28			1638,0
				30			1759,0
2200	1958		60	8	8,14	2,845	515,3
			70	10	8,20	2,883	651,2
			80	12	8,28	2,921	789,9
				14			923,5
			100	16	8,42	2,997	1076,0
				18			1213,0
				20			1350,7
				22			1488,8
			120	25	8,57	3,073	1726,2
				28			1939,3
				30			2082,2
2400	2130		60	8	9,56	3,647	605,5
			70	10	9,64	3,693	764,5
			80	12	9,72	3,738	926,6
			100	14	9,88	3,828	1100,5
				16			1260,1
				18			1420,4
			120	20	10,04	3,919	1606,3
				22			1770,3
				25			2017,5
				28			2266,1
2500	2218		60	8	10,32	4,100	653,3
			70	10	10,40	4,149	824,6
			80	12	10,48	4,198	999,0
			100	14	10,65	4,296	1185,7
				16			1357,6
				18			1530,2
			120	20	10,81	4,394	1729,4
				22			1905,8

Продолжение таблицы Б.1

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
2500	2218	200	120	25	10,81	4,394	2171,7
2600	2303		70	8	11,20	4,640	708,2
			80	10	11,28	4,693	893,5
				12			1074,1
			100	14	11,45	4,800	1274,1
				16			1458,3
				18			1644,0
			120	20	11,62	4,906	1857,0
				22			2046,3
2800	2478		70	8	12,86	5,737	813,3
			80	10	12,95	5,799	1025,4
			100	12	13,13	5,922	1249,7
				14			1460,5
				16			1671,9
			120	18	13,31	6,045	1910,0
				20			2125,8
				22			2342,3
3000	2650		80	10	14,74	7,065	1166,5
			100	12	14,93	7,026	1420,2
				14			1659,6
				16			1899,6
			120	18	15,13	7,348	2168,1
3200	2837	250	80	10	16,92	8,611	1337,8
			100	12	17,12	8,771	1627,3
				14			1901,3
				16			2176,1
			120	18	17,33	8,932	2481,3
3400	3010		100	10	19,17	10,426	1515,4
				12			1821,0
				14			2127,5
			120	16	19,39	10,608	2462,6
				18			2774,3
3600	3185		100	12	21,33	12,277	2025,7
				14			2366,5
			120	16	21,57	12,480	2737,4
				18			3083,7
3800	3357		100	12	23,61	14,334	2241,3
			120	14	23,86	14,560	2645,1

Продолжение таблицы Б.1

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
3800	3357	250	120	16	23,86	14,560	3026,7
				18			3409,3
4000	3535		100	12	26,01	16,608	2467,8
			120	14	26,26	16,859	2910,8
				16			3330,6
Примечание. Диаметры днищ, заключенные в скобки, предусмотрены для обогревающих или охлаждающих рубашек сосудов и аппаратов.							

Таблица Б.2 – Основные параметры конических отбортованных днищ с внутренними базовыми размерами и углом при вершине 90 º

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
400	232	80	30	3	0,27	0,016	6,5
				4			8,7
				6			13,3
				8			17,9
				10			22,6
(450)	257			3	0,32	0,021	7,8
				4			10,4
				6			15,8
				8			21,3
				10			26,9
500	282			3	0,38	0,028	9,1
				4			12,2
				6			18,5
				8			24,9
			40	10	0,40	0,030	33,0
(550)	307		30	4	0,44	0,036	14,2
				6			21,5
				8			28,9
			40	10	0,46	0,039	38,1
600	332		30	4	0,51	0,046	16,3
				6			24,6
				8			33,1

Продолжение таблицы Б.2

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
600	332	80	40	10	0,53	0,048	43,5
				12			52,6
(650)	357		30	4	0,58	0,056	18,5
				6			28,0
				8			37,5
			40	10	0,60	0,062	49,3
				12			59,6
700	382		30	4	0,65	0,069	20,9
				6			31,6
			40	8	0,68	0,073	44,0
				10			55,5
			50	12	0,70	0,076	69,4
800	466	160	30	4	1,00	0,115	31,7
				6			47,9
			40	8	1,03	0,120	66,2
				10			83,3
			50	12	1,06	0,125	103,4
				14			121,4
900	516		30	4	1,20	0,156	38,1
				6			57,5
			40	8	1,23	0,162	79,1
			50	10	1,26	0,169	102,2
				12			123,3
			60	14	1,30	0,175	148,4
1000	566		30	4	1,42	0,206	45,0
			40	6	1,45	0,214	69,6
				8			93,3
			50	10	1,49	0,222	120,1
				12			144,8
			60	14	1,53	0,229	173,9
				16			199,7
(1100)	616		40	6	1,69	0,275	81,0
				8			108,6
			50	10	1,73	0,284	139,5
			60	12	1,77	0,294	171,9
				14			201,4
			70	16	1,81	0,303	236,4
1200	666		40	6	1,95	0,346	93,3

Продолжение таблицы Б.2

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
1200	666	160	50	8	1,99	0,357	127,6
				10			160,2
			60	12	2,04	0,368	197,2
				14			231,0
			70	16	2,08	0,380	270,6
				18			305,7
(1300)	716		40	6	2,23	0,428	106,5
			50	8	2,28	0,441	145,4
				10			182,5
			60	12	2,32	0,454	224,2
			70	14	2,37	0,468	267,7
				16			307,2
			80	18	2,41	0,481	353,6
				20			394,4
1400	766		50	6	2,58	0,537	122,8
				8			164,3
			60	10	2,62	0,553	210,0
				12			252,9
			70	14	2,67	0,568	301,6
				16			346,0
			80	18	2,72	0,584	397,8
				20			443,6
(1500)	816		50	6	2,89	0,646	137,8
				8			184,4
			60	10	2,94	0,664	235,4
				12			283,5
			70	14	2,99	0,682	337,6
			80	16	3,05	0,699	393,8
				18			444,6
			100	20	3,68	0,903	512,5
				22			565,6
1600	882	200	50	6	3,40	0,802	161,8
				8			216,4
			60	10	3,45	0,822	275,8
			70	12	3,51	0,843	337,3
				14			394,8
			80	16	3,57	0,863	459,9
				18			519,0

Продолжение таблицы Б.2

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
1600	882	200	100	20	3,68	0,903	596,6
				22			658,4
				25			751,7
(1700)	932		50	6	3,76	0,944	178,9
				8			239,4
			60	10	3,82	0,966	304,8
			70	12	3,88	0,969	372,4
				14			435,8
			80	16	3,94	1,012	507,2
			100	18	4,06	1,057	589,4
1800	982		50	6	4,14	1,100	197,0
			60	8	4,20	1,126	267,4
				10			335,2
			70	12	4,26	1,151	409,3
			80	14	4,33	1,177	485,8
				16			556,8
			100	18	4,45	1,228	646,1
				20			719,9
				22			794,2
				25			906,5
(1900)	1032		50	6	4,54	1,273	215,9
			60	8	4,61	1,302	292,8
				10			367,1
			70	12	4,67	1,330	447,8
			80	14	4,74	1,358	531,1
				16			608,7
			100	18	4,87	1,415	705,4
2000	1082		50	6	4,96	1,463	235,8
			60	8	5,03	1,495	319,4
			70	10	5,09	1,526	405,7
				12			488,1
			80	14	5,16	1,557	578,5
			100	16	5,30	1,620	680,2
				18			767,3
				20			854,8
				22			942,8
			120	25	5,44	1,683	1103,2
				28			1240,4

Продолжение таблицы Б.2

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
2000	1082	200	120	30	5,44	1,683	1332,4
2200	1182		60	8	5,92	1,935	376,1
			70	10	6,00	1,973	477,1
			80	12	6,07	2,011	580,9
				14			679,4
			100	16	6,22	2,087	797,1
				18			898,9
				20			1001,3
			120	22	6,37	2,163	1130,3
				25			1289,1
				28			1448,9
				30			1556,2
2400	1282		60	8	6,90	2,454	437,4
			70	10	6,97	2,499	554,3
			80	12	7,06	3,544	674,2
			100	14	7,21	2,635	805,9
				16			923,2
				18			1041,0
			120	20	7,38	2,725	1184,8
				22			1306,3
				25			1489,4
				28			1673,7
2500	1332		60	8	7,41	2,745	469,8
			70	10	7,49	2,794	595,0
			80	12	7,57	2,843	723,4
			100	14	7,74	2,941	864,1
				16			989,8
				18			1115,9
			120	22	7,90	3,039	1269,1
				25			1399,0
				28			1595,0
2600	1382		70	8	8,03	3,110	508,7
			80	10	8,11	3,163	643,9
				12			774,4
			100	14	8,28	3,269	924,3
				16			1058,6
				18			1193,5
			120	20	8,45	3,375	1356,2

Продолжение таблицы Б.2

Размеры в мм

D	h_1	r	H	S_1	Внутренняя поверхность F, м^2	Объем V, м^3	Масса, кг
2600	1382	200	120	22	8,45	3,375	1495,0
2800	1482		70	8	9,15	3,812	579,6
			80	10	9,24	3,874	733,2
			100	12	9,42	3,997	898,8
				14			1050,7
				16			1203,2
			120	18	9,61	4,120	1382,5
				20			1539,2
				22			1696,5
3000	1582		80	10	10,44	4,683	828,2
			100	12	10,64	4,824	1014,0
				14			1185,2
				16			1357,1
			120	18	10,84	4,965	1557,5
3200	1704	250	80	10	12,13	5,762	960,8
			100	12	12,34	5,923	1174,7
				14			1372,9
				16			1571,8
			120	18	12,55	6,084	1801,3
3400	1804		100	10	13,72	6,989	1086,5
				12			1305,9
				14			1526,1
			120	16	13,95	7,170	1775,0
				18			2000,2
3600	1904		100	12	15,18	8,175	1444,0
				14			1687,4
			120	16	15,42	8,378	1960,9
				18			2209,5
3800	2004		100	12	16,72	9,486	1589,1
			120	14	16,96	9,713	1883,8
				16			2156,1
				18			2429,3
4000	2104		100	12	18,32	10,930	1741,2
			120	14	18,58	11,181	2062,5
				16			2360,6

Пример условного обозначения днища с углом при вершине 90°, внутренним диаметром $D = 2000$ мм, толщиной стенки $S = 10$ мм:

Днище $90 - 2000 - 10$ *ГОСТ* $12619 - 78$

ПРИЛОЖЕНИЕ В – Плоские днища

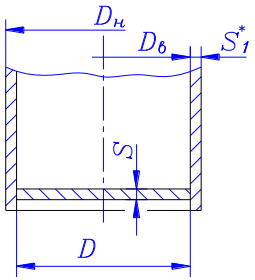


Рисунок В.1 – Плоское неотбортованное днище для работы под давлением и под налив

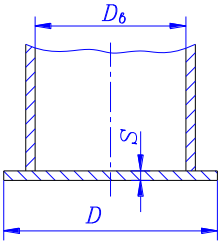


Рисунок В.2 – Плоское неотбортованное днище для работы только под налив

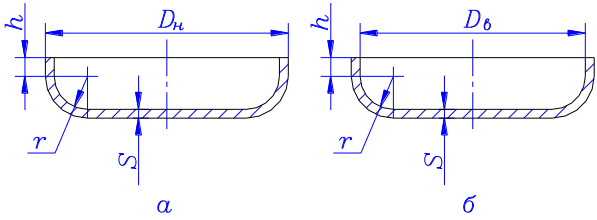


Рисунок В.3 – Плоское отбортованное днище для работы под налив
а – с наружным базовым диаметром, *б* – с внутренним базовым диаметром.

Таблица В.1 –Днища плоские неотбортованные в соответствии с рисунком В.1

Размеры в мм

$D_н$	$D_в$	S_1	D	S										
				4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25
				Масса, кг										
133		5	119	0,35	0,52	0,70	0,87	1,05	1,22	1,39	1,57	1,75	1,92	2,18
159		6	143	0,50	0,76	1,00	1,26	1,51	1,76	2,02	2,27	2,52	2,77	3,15
168			152	0,57	0,85	1,14	1,42	1,70	1,99	2,28	2,56	2,85	3,13	3,56
219		7	203	1,02	1,52	2,03	2,54	3,03	3,56	4,06	4,57	5,08	5,59	6,35
273	–		255	1,60	2,40	3,21	4,00	4,81	5,61	6,41	7,22	8,02	8,82	10,02
325		8	305	2,30	3,44	4,59	5,74	6,88	8,03	9,18	10,32	11,47	12,62	14,34
377		9	355	3,10	4,64	6,18	7,73	9,27	10,82	12,36	13,90	15,45	17,00	19,32
–	400	–	396	3,87	5,80	7,34	9,67	11,60	13,54	13,47	17,40	19,34	21,27	24,17
426	–	10	402	4,00	5,98	7,97	9,96	11,96	13,95	15,94	17,93	19,93	21,92	24,91
480			456	5,13	7,69	10,26	12,82	15,38	17,95	20,51	23,08	25,64	28,20	32,05
–	500	–	496	6,07	9,10	12,13	15,17	18,20	21,24	24,65	27,30	30,34	33,36	37,92

Примечания

1. Для труб с толщиной стенки, не указанной в таблице, диаметр D и масса днища должны корректироваться с учетом зазора 2 мм между стенкой корпуса и днищем.
2. Отклонение массы днища должно быть в пределах $\pm$ 3 %.

Пример условного обозначения днища диаметром $D = 400$ мм толщиной $S = 8$ мм: Днище 400 – 8 ГОСТ 12623–78

Таблица В.2 –Днища плоские неотбортованные в соответствии с рисунком В.2

Размеры в мм

$D_в$	D	S									
		3	4	6	8	10	12	14	16	20	25
		Масса, кг									
400	430	3,4	4,6	6,8	–	–	–	–	–	–	–
500	530	5,2	6,9	10,4							
600	630	–	9,8	14,7							
700	740		13,5	20,3	27,0	33,8					
800	840		17,4	26,4	34,8	43,5					
900	940		21,8	32,7	43,6	54,5	65,4				
1000	1040		26,5	40,0	53,3	66,7	79,9				
1200	1240		37,9	56,9	75,8	94,8	113,7				
1400	1440		51,1	76,7	102,2	127,8	153,3				
1600	1640		66,3	99,6	132,6	165,7	198,9				
1800	1840		83,5	125,2	166,9	208,6	250,4	292,1			
2000	2040		102,6	153,9	205,2	256,5	307,8	359,1			
2200	2250		–	187,3	249,7	312,0	374,6	437,0	499,4		
2400	2450			222,0	296,0	370,0	443,9	518,0	592,0		
2500	2550			240,4	320,7	400,9	481,0	561,2	641,4		
2600	2650			259,4	346,2	432,7	519,3	605,9	692,4		
2800	2850			300,3	400,4	500,5	600,6	700,7	800,8		
3000	3060			346,2	461,6	577,0	692,4	808,2	923,2		

Продолжение таблицы В.2

Размеры в мм

$D_в$	D	S									
		3	4	6	8	10	12	14	16	20	25
		Масса, кг									
3200	3260	–	–	393,0	524,0	655,0	786,0	917,3	1041,4	–	–
3400	3460			442,6	590,0	737,6	885,1	0133,4	1180,9		
3600	3660			495,4	660,5	825,7	990,8	1156,2	1320,8	1650,9	
3800	3860			550,8	734,5	918,1	1101,7	1286,0	1469,0	1836,3	
4000	4060			609,3	812,4	1015,4	1218,6	1422,0	1625,2	2031,5	
4500	4560			–	1025,1	1281,3	1537,6	1794,0	2050,2	2562,7	3203,4
5000	5060				1262,2	1577,8	1893,3	2208,9	2524,4	3155,5	3944,4
5600	5660				1579,3	1974,1	2369,0	2763,8	3988,2	3948,2	4935,3

Пример условного обозначения днища диаметром $D = 2040$ мм толщиной $S = 8$ мм:

Днище 2040 – 8 ГОСТ 12623–78

Таблица В.3

Размеры в мм

$D_н$	h	r	S								
			4			6			8		
			F, м^2	V, м^3	Масса, кг	F, м^2	V, м^3	Масса, кг	F, м^2	V, м^3	Масса, кг
219	25	30	0,06	0,002	2,1	0,06	0,002	3,1	–	–	–
273			0,09	0,003	2,9	0,09	0,003	4,3			
325			0,12	0,004	3,9	0,12	0,004	5,0			
377			0,16	0,006	5,0	0,16	0,006	7,4			
426			0,19	0,008	6,2	0,19	0,007	9,2			
480			0,24	0,010	7,6	0,24	0,009	11,4			
530			0,28	0,012	9,0	0,28	0,011	13,5			
630			0,38	0,016	12,3	0,38	0,016	18,5			
720			0,49	0,022	15,6	0,49	0,021	23,5			
820	30		0,64	0,030	20,3	0,63	0,030	30,3			
920			0,79	0,039	25,0	0,78	0,038	37,5			
1020			0,95	0,048	30,3	0,95	0,047	45,3	0,94	0,047	60,3
1120						1,13	0,057	53,9	1,11	0,057	71,7
1220						1,32	0,068	63,2	1,31	0,068	84,2
1320						1,54	0,080	73,3	1,53	0,079	97,6
1420						1,76	0,093	84,1	1,75	0,092	111,9
Примечание. F – внутренняя поверхность днища, V – объем днища.											

Условное обозначение днища диаметром $D_н = 630$ мм толщиной $S = 6$ мм

Днище 630 – 6 ГОСТ 12622 – 78

Таблица В.4

Размеры в мм

$D_в$	h	r	S					F, м^2	V, м^3
			4	6	8	10	12		
			Масса, кг						
400	25	30	5,7	8,7	–	–	–	0,18	0,007
500			8,4	12,7				0,26	0,010
600			11,6	17,5				0,36	0,015
700			15,2	23,0				0,48	0,021
800	30		19,7	29,8				0,62	0,030
900			24,4	37,1				0,77	0,038
1000			29,6	44,7				0,93	0,046
1200			–	62,5	83,7			1,30	0,067
1400				83,5	111,4			1,75	0,091
1600				106,9	143,1			2,95	0,120
1800				133,6	178,7			2,80	0,152
2000				163,2	218,3			3,43	0,187
2200				–	261,3	328,1		4,12	0,227
2400					309,3	387,5		4,88	0,270
2500					334,5	419,1		5,28	0,293
2600					360,7	451,9		5,69	0,317
2800					416,0	521,1		6,57	0,368
3000					475,3	595,3		7,50	0,422
3200					538,5	674,5	810,9	8,51	0,500
3400					–	758,5	911,5	9,58	0,565
3600						847,5	1018,7	10,70	0,633
3800						941,4	1131,5	11,90	0,706
4000						1040,2	1250,2	13,15	0,782

Примечание. F – внутренняя поверхность днища, V – объем днища.

Условное обозначение днища диаметром $D_в = 1600$ мм толщиной $S = 8$ мм

Днище 1600 – 8 ГОСТ 12622–78

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. ГОСТ 6533–78. Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1985.
3. ГОСТ 8731–74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования. М.: Изд–во стандартов, 1978. – 7 с.
4. ГОСТ 8732–74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент. М.: Изд–во стандартов, 1978. – 11 с.
5. ГОСТ 12619–78. Днища конические отбортованные с углами при вершине 60 и 90°. Основные размеры. М.: Изд–во стандартов, 1978. – 22 с.
6. ГОСТ 12620–78. Днища конические неотбортованные с углами при вершине 60, 90 и 120º. Основные размеры. М.: Изд–во стандартов, 1978. – 11 с.
7. ГОСТ 12621–78. Днища конические неотбортованные с углом при вершине 140º. Основные размеры. М.: Изд–во стандартов, 1978. – 3 с.
8. ГОСТ 12622–78. Днища плоские отбортованные. Основные размеры. М.: Изд–во стандартов, 1978. – 4 с.
9. ГОСТ 12623–78. Днища плоские неотбортованные. Основные размеры. М.: Изд–во стандартов, 1978. – 4 с.
10. ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – М.: Издательство стандартов, 1989.
11. ГОСТ 25221–82. Сосуды и аппараты. Днища и крышки сферические неотбортованные. Нормы и методы расчета на прочность. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 6 с.
12. ГОСТ 25867–89. Сосуды и аппараты. Сосуды с рубашками. Нормы и методы расчета на прочность. М.: Изд–во стандартов, 1989. – 79 с.
13. ГОСТ 28759.2-90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. М.: Изд–во стандартов, 1991. – 26 с.
14. ГОСТ 28759.6-90. Прокладки из неметаллических материалов. Конструкция и размеры. Технические требования. М.: Изд–во стандартов, 1991. – 10 с.
15. ГСТУ 3–17–191–2000. Посудини та апарати стальні зварні. Загальні технічні умови. Державний комітет промислової політики України, 2000.– 301 с.
16. ОСТ 26–2002–83. Люки с плоскими крышками стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция. Издание официальное, 1991. – 13 с.
17. ОСТ 26–2003–83. Люки с сферическими крышками стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция. Издание официальное, 1991. – 7 с.

18. ОСТ 26–2008–83. Крышки плоские люков стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция. Издание официальное, 1991. – 15 с.
19. ОСТ 26–2009–83. Крышки сферические люков стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция. Издание официальное, 1991. – 10 с.
20. РД 26–11–05–85. Сосуды и аппараты из двухслойной стали. Нормы и методы расчета на прочность.
21. Методические указания к расчету цилиндрических обечаек стальных сварных сосудов и аппаратов для студентов специальности 7.090220. Северодонецк: СТИ, 2002. – 83 с.
22. Методические указания к расчету на прочность и устойчивость колонных аппаратов для студентов специальности 7.090220. Северодонецк: СТИ, 1996. – 28 с.
23. Методические указания к расчету на прочность, жесткость и герметичность фланцевых соединений сосудов и аппаратов для студентов специальности 7.090220. Северодонецк: СТИ, 2002. – 36 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, Денис Алексеевич Куликов, Владимир Георгиевич Табунщиков, Геннадий Владимирович Тараненко, Юрий Николаевич Штонда.

Расчет выпуклых и плоских днищ и крышек, конических обечаек, днищ и переходов стальных сварных сосудов и аппаратов. Методика и примеры расчета

Редактор Белых З.Д.

Тираж 200 экземпляров

СТИ Северодонецк