РОССИЙСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА

Серия 03

Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр



РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СОСУДОВ И АППАРАТОВ

СА 03-004-07

2007

gost.e-ecolog.ru

РОССИЙСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ЭКСПЕРТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ
ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА

Серия 03

Нормативные документы межотраслевого применения
по вопросам промышленной безопасности и охраны недр

Рекомендовано к применению
Федеральной службой по экологическому,
Технологическому и атомному надзору.
Письмо от 27.11.2006, №КЧ-50/1220

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СОСУДОВ И АППАРАТОВ

СА 03-004-07

МОСКВА
2007

УДК 622.279-192(083.74)
ББК 33.36
Р24

РАЗРАБОТАН:
Научно-техническим предприятием «Трубопровод» (ООО «НТП «Трубопровод»)

В разработке приняли участие:
А.А.Шаталов, к.т.н.; Н.А.Хапонен (Ростехнадзор)
А.Н.Краснокутский, Л.Р.Кабо; В.Я.Магалиф (ООО НТП «Трубопровод»)

Редакционная группа:
А.З.Миркин, В.В.Усиньш, М.М.Глазман, А.И.Тимошкин (ООО НТП «Трубопровод»)

Утвержден протоколом №__19__ заседания НТС ООО «НТП «Трубопровод» и ЗАО «ИПН» от «__29__» __декабря__ 2004 г. (Стандарт предприятия СТП 10-04-02).

Рекомендован Ростехнадзором в качестве документа межотраслевого применения (письмо КЧ – 50/1220 от 27.11.2006).

Настоящий стандарт Ассоциации устанавливает методы расчета на прочность и устойчивость сосудов и аппаратов (в том числе колонного типа), работающих под внутренним избыточным давлением, вакуумом или наружным давлением или без давления (под налив), а также под действием внешних нагрузок.

Стандарт Ассоциации разработан для использования при проектировании, реконструкции и диагностике сосудов и аппаратов в нефтеперерабатывающей, химической, нефтехимической, нефтяной, газовой и других смежных отраслях промышленности.

Подписано в печать 29.06.07 Формат 60x90/16
Тираж 500 экз.

Отпечатано ЗАО «ГРАНП Полиграф»
111141, г. Москва, ул. Плеханова, д. 7 оф. 405
Тел.: 741-02-21, 672-32-84, 672-32-76
http://gost.e-ecolog.ru

ISBN 978-5-9900612-4-8

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ **12**
ТОМ 1. РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СОСУДОВ **15**
1. Основные условные обозначения **15**
2. Общие требования **21**
2.1. Расчетные давления, усилия и моменты 21
2.2. Допускаемые напряжения, коэффициенты запаса прочности и устойчивости 22
2.3. Прибавки к расчетным толщинам 24
2.4. Коэффициенты прочности сварных швов 25
3. Цилиндрические обечайки **27**
3.1. Расчетные схемы 27
3.2. Гладкие обечайки (без колец жесткости) 29
3.2.1. Обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением .. 29
3.2.2. Обечайки, нагруженные наружным давлением 29
3.2.3. Обечайки, нагруженные осевым растягивающим усилием 30
3.2.4. Обечайки, нагруженные осевым сжимающим усилием 31
3.2.5. Обечайки, нагруженные изгибающим моментом 33
3.2.6. Обечайки, нагруженные поперечным усилием 33
3.2.7. Обечайки, работающие под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия 34
3.2.8. Обечайки, работающие под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента 34
3.3. Обечайки, подкрепленные кольцами жесткости 34
3.3.1. Расчетные величины колец жесткости 35
3.3.2. Обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением .. 36
3.3.3. Обечайки, нагруженные наружным давлением 37
3.3.4. Обечайки, нагруженные осевым растягивающим или сжимающим усилием, изгибающим моментом или поперечным усилием как раздельно, так и совместно 39
4. Выпуклые днища **40**
4.1. Расчетные схемы 40
4.2. Эллиптическое днище 40
4.2.1. Эллиптическое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением 40
4.2.2. Эллиптическое днище, нагруженное наружным давлением 41
4.3. Полусферическое днище 42
4.3.1. Полусферическое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением 42
4.3.2. Полусферическое днище, нагруженное наружным давлением .. 42

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

4.4. Торосферическое днище 43
4.4.1. Торосферическое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением 43
4.4.2. Торосферическое днище, нагруженное наружным давлением 46
5. Плоские днища и крышки 47
5.1. Плоские днища, нагруженные внутренним или наружным давлением 47
5.2. Плоские крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные внутренним давлением 51
5.3. Плоские днища с радиальными ребрами жесткости 53
6. Сферические неотбортованные днища и крышки 56
6.1. Расчетные схемы 56
6.2. Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные внутренним избыточным давлением 58
6.3. Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные наружным давлением 59
7. Конические обечайки и соединения 60
7.1. Расчетные схемы 60
7.2. Гладкие конические обечайки 62
7.2.1. Конические обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением 63
7.2.2. Конические обечайки, нагруженные наружным давлением 63
7.2.3. Конические обечайки, нагруженные осевой растягивающей силой 64
7.2.4. Конические обечайки, нагруженные осевой сжимающей силой 64
7.2.5. Конические обечайки, нагруженные изгибающим моментом 64
7.2.6. Конические обечайки, нагруженные совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента 65
7.2.7. Конические обечайки, нагруженные совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия и изгибающего момента 65
7.3. Соединение конических обечаек без тороидального перехода 66
7.3.1. Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением 66
7.3.2. Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой 67
7.3.3. Соединение, нагруженное изгибающим моментом 67
7.3.4. Соединение, нагруженное совместным действием нагрузок 67
7.4. Соединение конических обечаек с тороидальным переходом 67
7.4.1. Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением 68

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

7.4.2. Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой ... 69
7.4.3. Соединение, нагруженное изгибающим моментом и совместным действием нагрузок ... 69
7.5. Соединение конических обечаек с укрепляющим кольцом ... 69
7.5.1. Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением ... 70
7.5.2. Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой ... 71
7.5.3. Соединение, нагруженное изгибающим моментом и совместным действием нагрузок ... 72
7.6. Соединение штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой ... 72
7.6.1. Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением ... 72
7.6.2. Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой ... 73
7.6.3. Соединение, нагруженное изгибающим моментом и совместным действием нагрузок ... 73
8. Конические днища ... 74
8.1. Расчетные схемы ... 74
8.2. Коническое днище с тороидальным переходом ... 75
8.2.1. Коническое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением ... 75
8.2.2. Коническое днище, нагруженное наружным давлением ... 75
8.3. Коническое днище с укрепляющим кольцом ... 76
8.3.1. Коническое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением ... 76
8.3.2. Коническое днище, нагруженное наружным давлением ... 77
8.4. Коническое днище без тороидального перехода и укрепляющего кольца ... 78
8.4.1. Коническое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением ... 78
8.4.2. Коническое днище, нагруженное наружным давлением ... 78
9. Воздействие опорных нагрузок ... 79
9.1. Горизонтальные сосуды и аппараты на седловых опорах ... 79
9.1.1. Определение расчетных усилий и моментов ... 79
9.1.2. Несущая способность обечайки в области опорного узла ... 83
9.1.3. Несущая способность обечайки сосуда между опорными узлами ... 91
9.2. Вертикальные сосуды и аппараты на опорных лапах ... 92
9.2.1. Расчетная схема ... 92
9.2.2. Определение расчетных усилий ... 93
9.2.3. Несущая способность обечайки ... 93

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

9.3. Вертикальные сосуды и аппараты на опорных стойках 95
9.3.1. Расчетные схемы 96
9.3.2. Выпуклое днище на опорных стойках круглого сечения 96
9.3.3. Эллиптическое днище на опорах-стойках 98
9.3.4. Коническое днище на опорах-стойках 103
10. Укрепление отверстий 106
10.1. Расчетные схемы 106
10.2. Определение расчетных размеров и коэффициентов 108
10.2.1. Расчетные диаметры 108
10.2.2. Расчетные толщины стенок 110
10.2.3. Расчетные длины штуцеров 111
10.2.4. Расчетная ширина 111
10.3. Расчет укрепления отверстия 113
10.4. Учет взаимного влияния отверстий в сосудах и аппаратах, нагруженных внутренним давлением 114
10.5. Укрепление отверстий в сосудах и аппаратах, нагруженных наружным давлением 116
10.6. Минимальные размеры сварных швов 117
11. Прочность и герметичность фланцевых соединений сосудов и аппаратов 118
11.1. Расчетные схемы 118
11.2. Допускаемые напряжения 123
11.3. Расчет вспомогательных величин 124
11.4. Коэффициенты жесткости фланцевого соединения 129
11.5. Нагрузки, действующие на болты (шпильки) 131
11.6. Расчет болтов (шпилек) 133
11.7. Расчет прокладок 134
11.8. Расчет фланцев 134
11.8.1. Фланцы приварные встык 135
11.8.2. Фланцы плоские приварные, под зажимы и приварные кольца 137
11.8.3. Фланцы свободные на приварных кольцах 138
11.8.4. Фланцы контактирующие 138
11.9. Жесткость фланцев 139
12. Прочность и герметичность фланцевых соединений арматуры и трубопроводов 140
12.1. Расчетные схемы 140
12.2. Допускаемые напряжения 142
12.3. Расчет вспомогательных величин 143
12.4. Коэффициенты жесткости фланцевого соединения 146
12.5. Нагрузки, действующие на болты (шпильки) 146
12.6. Моменты, действующие на фланцы 148
12.7. Расчет болтов (шпилек) 149
12.8. Расчет прокладок 150

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

12.9. Расчет фланцев 150
12.9.1. Фланцы приварные встык и плоские приварные интегрального типа 150
12.9.2. Фланцы свободные на приварных кольцах и плоские приварные свободного типа 152
12.10. Жесткость фланцев 152
13. Прочность и жесткость мест врезки штуцеров 153
13.1. Расчетная схема 153
13.2. Условия применения 154
13.3. Прочность места врезки штуцера 155
13.3.1. Общие положения 155
13.3.2. Цилиндрическая обечайка 156
13.3.3. Патрубок штуцера, соединенный с цилиндрической обечайкой 163
13.3.4. Сферическая оболочка 168
13.3.5. Патрубок штуцера, соединенный со сферической оболочкой 173
13.4. Жесткость места соединения штуцера 176
13.4.1. Общие положения 176
13.4.2. Цилиндрическая обечайка 177
13.4.3. Сферическая обечайка 180
14. Сосуды с рубашками 182
14.1. Расчетные схемы 182
14.2. Сосуды с U-образной рубашкой 184
14.2.1. Цилиндрические обечайки 185
14.2.2. Днища 186
14.2.3. Сопряжение рубашки с корпусом сосуда при помощи конуса 186
14.2.4. Сопряжение рубашки с корпусом сосуда при помощи кольца 190
14.2.5. Нагрузка от собственного веса 191
14.3. Сосуды с цилиндрическими рубашками 192
14.3.1. Цилиндрические обечайки 192
14.3.2. Сопряжение при помощи конуса 192
14.3.3. Сопряжение при помощи кольца 192
14.3.4. Нагрузка от собственного веса сосуда или рубашки 193
14.4. Сосуды, частично охваченные рубашками, сопряженными с корпусом анкерными трубами и отбортовками 193
14.4.1. Цилиндрическая обечайка 193
14.4.2. Днища 194
14.4.3. Плоские участки 194
14.5. Сосуды с каналами 196
14.5.1. Цилиндрическая обечайка 197
14.5.2. Полоса обечайки под каналами 198
14.5.3. Днища 198

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

14.5.4. Каналы 198
14.5.5. Распределительные каналы в сосудах с регистровыми каналами 199
15. Расчет элементов сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородсодержащих средах 200
15.1. Условия применения 200
15.2. Допускаемые напряжения, коэффициенты запаса прочности 201
15.3. Расчет обечаек и днищ 201
15.4. Расчет укрепления отверстий 202
15.5. Прочность места врезки штуцера 203
15.6. Расчет фланцевых соединений 203
16. Расчет сосудов и аппаратов методом конечных элементов 205
16.1. Общие положения 205
16.2. Расчет прочности и жесткости места соединения штуцера с сосудом (аппаратом) при статическом нагружении 207
16.2.1. Допускаемые нагрузки на штуцер 210
16.2.2. Жесткость врезки 211
16.3. Примеры расчета прочности и устойчивости сосудов и резервуаров 211
ТОМ 2. РАСЧЕТ АППАРАТОВ КОЛОННОГО ТИПА 216
1. Основные условные обозначения 216
2. Определение расчетных усилий 219
2.1. Расчетная схема 219
2.2. Определение периода собственных колебаний 221
2.3. Определение расчетного изгибающего момента от ветровой нагрузки 223
2.4. Определение расчетного изгибающего момента от сейсмической нагрузки 225
3. Расчет на прочность и устойчивость 228
3.1. Расчетные сечения 228
3.2. Расчетные нагрузки 229
3.2.1. Расчетные давления 229
3.2.2. Нагрузки от собственного веса 229
3.2.3. Расчетные изгибающие моменты 229
3.2.4. Сочетание нагрузок 229
3.3. Корпус аппарата 230
3.3.1. Проверка прочности 230
3.3.2. Проверка устойчивости 231
3.4. Опорная обечайка 232
3.5. Элементы опорного узла 233
3.6. Анкерные болты 237
Нормативно-технические документы 238
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Допускаемые напряжения для сталей [2] 241
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Механические характеристики сталей [2] 246

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Приведенные нагрузки и расстояния до центра тяжести отдельных элементов сосудов (аппаратов) **253**
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Поперечное усилие и изгибающий момент от распределенной нагрузки в обечайке **257**
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Свойства материалов болтов (шпилек) для расчета фланцевых соединений сосудов и аппаратов [11] **259**
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Коэффициенты для расчета фланцевых соединений [40] **261**
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Свойства материалов болтов (шпилек) для расчета фланцевых соединений арматуры и трубопроводов[10, 25] **266**
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Коэффициенты для расчета укрепления отверстий сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородсодержащих средах [16] **268**
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Перемещения в элементах колонного аппарата от весовых нагрузок **272**
ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Геометрические характеристики поперечного сечения опорной обечайки, ослабленной отверстиями **275**

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ВВЕДЕНИЕ

Стандарт Ассоциации (СА) включает нормы и методы расчета на прочность элементов сосудов и аппаратов из углеродистых и легированных сталей, применяемых в химической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности, работающих под внутренним избыточным давлением, вакуумом или наружным давлением, а также под действием осевых, поперечных усилий и изгибающих моментов.

Расчет сосудов и аппаратов на прочность и устойчивость проводится с целью оценки их несущей способности в рабочих условиях, в условиях испытаний и монтажа при соблюдении требований, установленных в [1]. Методики расчетов основаны в большинстве случаев на отечественных стандартах и нормативных документах (НД), а также на зарубежных нормах, когда использование российских норм по тем или иным причинам не представляется возможным (например, при их отсутствии).

Целью создания настоящего СА являлось объединение НД в единый сборник для облегчения их использования инженерами, занимающимися расчетами на прочность и устойчивость сосудов и аппаратов по аналогии с зарубежными национальными стандартами (ASME Sect.VIII Div.1,2; EN 13445-3; PD 5500). Одновременно в расчетные формулы внесены корректировки в тех случаях, когда были допущены опечатки и неточности. В стандарте сделана попытка унифицировать терминологию и обозначения одних и тех же элементов, содержащихся в разных НД.

Использование расчетных формул методик настоящего СА предполагает применение ЭВМ. В этой связи в ряде случаев приближенные или упрощенные формулы и графики заменены на более точные аналитические зависимости.

Расчеты производятся поэлементно и включают в себя:

- цилиндрические обечайки (гладкие и подкрепленные кольцами жесткости) [2];
- конические переходы [2];
- приварные днища (сферические, эллиптические, торосферические, конические, плоские (в том числе с ребрами жесткости), сферические неотбортованные) [2,3,12,13];
- отъемные днища (плоские, эллиптические, сферические неотбортованные) [2,3,15];
- обечайки горизонтальных сосудов и аппаратов в местах опирания на седловые опоры [4];
- обечайки и днища вертикальных сосудов и аппаратов в местах опирания на опорные стойки и лапы [4,14];
- укрепление отверстий [5];

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

- узлы врезки штуцеров в обечайки и выпуклые днища [10,42-46];
- фланцевые соединения сосудов и аппаратов [11];
- фланцевые соединения арматуры и трубопроводов [11,40];
- рубашки сосудов и аппаратов [9];
- элементы аппаратов колонного типа [6,7] и др.

Принятые в НД конфигурации сосудов и аппаратов, а также условия их нагружения не всегда позволяют выполнить расчеты в строгом соответствии с нормами без упрощений расчетных моделей, что приводит к недостаточной точности получаемых результатов. В настоящем стандарте в ряде случаев расширена область применения расчетных моделей.

При расчете горизонтальных сосудов и аппаратов на седловых опорах в отличие от методики, описанной в [4], при определении изгибающих моментов и сил, как над опорами, так и между ними сосуды могут быть произвольной конфигурации, а опоры располагаться в любом месте цилиндрических обечаек.

Для определения низшей собственной частоты колебаний колонного аппарата используется метод Рэлея [48], позволяющий рассчитывать период колебаний для аппаратов с произвольным количеством участков и учитывающий сосредоточенные весовые нагрузки (площадки, насадки, опоры трубопроводов и др.).

В случае неточности или отсутствия методик расчета в отечественных НД использованы зарубежные источники. Это касается, например, расчета прочности и жесткости узлов врезок штуцеров в цилиндрические обечайки и выпуклые днища, работающих под действием внутреннего давления и внешних нагрузок. В основу расчета положены известные зарубежные методики [42-46]. Оценка полученных напряжений выполнена с учетом [10].

Для арматурных фланцев расчет проводится в соответствии с [40]. Помимо давления, при расчете учитываются внешние нагрузки и изгибающие моменты, а также напряжения, вызванные разницей линейных удлинений фланцев и шпилек (болтов) при температурном воздействии, определяемых по [11].

Расчеты сосудов и аппаратов проводятся в условиях однократных и многократных статических нагрузок (количество циклов нагружения от давления, температурных или других воздействий не превышает 10^3).

Сосуды и аппараты, работающие при многократных нагрузках, проверяют на циклическую прочность по [8].

Расчет элементов сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородсодержащих средах, проводится с учетом [16,17].

В случае, когда ограничения условий применения той или иной методики не могут быть соблюдены, целесообразно воспользоваться

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

численными методами расчета элементов сосудов и аппаратов, реализующих метод конечных элементов (МКЭ).

В СА приведены примеры расчетов с использованием МКЭ и оценки полученных результатов. Особое внимание уделено расчету узла врезки штуцеров в обечайки и днища и определению допускаемых нагрузок, действующих на штуцер.

Методики расчета изложены в двух томах.

Том 1. Расчет вертикальных и горизонтальных сосудов.

Том 2. Расчет аппаратов колонного типа.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ТОМ 1. РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СОСУДОВ

1. Основные условные обозначения

Термин:	Условное обозначение:
Длина выступающей цилиндрической части сосуда, включая отбортовку днища; размер сварного шва плоского днища, мм	a
Расстояние между двумя смежными кольцами жесткости; ширина седловой опоры; минимальное расстояние между наружными поверхностями двух соседних штуцеров; длина основания опоры, мм	b
Ширина прокладки фланцевого соединения, мм	b_n
Сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм	c
Сумма прибавок к расчетным толщинам стенок колец жесткости, мм	c_k
Сумма прибавок к расчетной толщине втулки плоского днища с ребрами жесткости, мм	c_0
Сумма прибавок к расчетным толщинам стенок патрубков штуцеров, мм	c_s
Внутренний диаметр сосуда (аппарата), фланца, приварного кольца, мм	D
Диаметр окружности расположения болтов, мм	$D_б$
Наружный диаметр фланца, приварного кольца, мм	$D_н$
Наружный диаметр свободного фланца на приварном кольце, мм	$D_{нк}$
Средний диаметр прокладки, мм	$D_{сп}$
Расчетный диаметр гладкой конической обечайки; внутренний диаметр свободного фланца на приварном кольце; наибольший внутренний диаметр компенсатора, мм	$D_к$
Расчетный диаметр днища (крышки) и конической обечайки, мм	D_p
Наружный диаметр сосуда или аппарата; внутренний диаметр цилиндра у меньшего основания конической обечайки, мм	D_l
Диаметр отверстия в днище (крышке); наружный диаметр болта (шпильки); внутренний диаметр штуцера, мм	d
Диаметр отверстия под болты (шпильки), мм	$d_б$
Расчетный диаметр отверстия, мм	d_p
Модуль продольной упругости при расчетной температуре, МПа	E

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Термин:	Условное обозначение:
Условный модуль сжатия материала прокладки, МПа	E_n
Расстояние между центром тяжести поперечного сечения кольца жесткости и срединной поверхностью обечайки, м	e
Расчетное осевое растягивающее или сжимающее усилие (без учета нагрузки, возникающей от внутреннего избыточного или наружного давления), Н	F
Усилие, действующее на опору, Н	$F_{1(2)}$
Допускаемое растягивающее или сжимающее усилие, Н	$[F]$
Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости в пределах упругости, Н	$[F]_E$
Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности, Н	$[F]_П$
Площадь поперечного сечения болта (шпильки) по внутреннему диаметру резьбы, мм^2	$f_б$
Вес сосуда (аппарата) в условиях эксплуатации или испытаний, Н	G
Высота выпуклой части днища без учета цилиндрической части; относительный размер кольца, мм	H
Толщина фланца; высота вертикальной стойки; кольца жесткости, мм	h
Длина цилиндрической части отбортовки днищ; высота опорной лапы; ширина ленты направляющей спирали; высота упора, мм	h_1
Эффективный момент инерции расчетного поперечного сечения кольца жесткости, мм^4	I
Коэффициент ослабления плоских днищ (крышек) отверстием	K_o
Ширина зоны укрепления, прилегающей к штуцеру, мм	L_0
Расчетная длина цилиндрической обечайки, укрепленной кольцами жесткости; расчетная длина рубашки, м	L
Расчетная длина гладкой обечайки; длина конической втулки фланца, м	l
Расчетный изгибающий момент, Н·мм	M
Допускаемый изгибающий момент, Н·мм	$[M]$
Допускаемый изгибающий момент из условия устойчивости в пределах упругости, Н·мм	$[M]_E$
Допускаемый изгибающий момент из условия прочности , Н·мм	$[M]_П$
Число опор; радиальных ребер в плоской крышке; болтов (шпилек)	n
Коэффициент запаса прочности по временному	$n_в$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Термин:	Условное обозначение:
сопротивлению (пределу прочности)	
Коэффициент запаса прочности по пределу длительной прочности	$n_д$
Коэффициент запаса прочности по пределу ползучести	$n_п$
Коэффициент запаса прочности по пределу текучести	$n_т$
Коэффициент запаса устойчивости	$n_у$
Расчетное внутреннее избыточное или наружное давление, МПа	p
Расчетное давление в рубашке или в канале в состоянии эксплуатации или испытания, МПа	p_2
Допускаемое внутреннее избыточное или наружное давление, МПа	$[p]$
Допускаемое наружное давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа	$[p]_Е$
Допускаемое наружное давление из условия прочности , МПа	$[p]_п$
Допускаемое внутреннее избыточное давление или наружное, определяемое из условия прочности или устойчивости всей обечайки (с кольцами жесткости), МПа	$[p]_1$
Допускаемое наружное давление из условия устойчивости всей обечайки (с кольцами жесткости) в пределах упругости, МПа	$[p]_{1Е}$
Допускаемое наружное давление из условия прочности всей обечайки, МПа	$[p]_{1п}$
Допускаемое внутреннее избыточное давление или наружное, определяемое из условия прочности или устойчивости обечайки между двумя соседними кольцами жесткости; допускаемое внутреннее избыточное давление в рубашке или в канале, МПа	$[p]_2$
Расчетное поперечное усилие, Н	Q
Допускаемое поперечное усилие, Н	$[Q]$
Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости, Н	$[Q]_Е$
Допускаемое поперечное усилие из условия прочности, Н	$[Q]_п$
Внутренний радиус отбортовки конической обечайки (днища); радиус нейтральной линии кольца жесткости; радиус отбортовки или торовой части торообразной вставки, мм	r
Радиус кривизны в вершине днища сосуда по внутренней поверхности; радиус бурта для опирания зажима; радиус сферы сферической неотбортованной крышки, мм	R

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Термин:	Условное обозначение:
Минимальное значение предела текучести при расчетной температуре, МПа	R_e
Минимальное значение предела текучести, при температуре 20°С, МПа	R_e^{20}
Минимальное значение условного предела текучести при расчетной температуре (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 0,2%), МПа	$R_{p0,2}$
Минимальное значение условного предела текучести при температуре 20°С, МПа	$R_{p0,2}^{20}$
Минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при расчетной температуре, МПа	R_m
Минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при температуре 20°С, МПа	R_m^{20}
Среднее значение предела длительной прочности за 10^5 ч при расчетной температуре, МПа	$R_{m/10^5}$
Средний 1%-ный предел ползучести за 10^5 при расчетной температуре, МПа	$R_{p1,0/10^5}$
Минимальное значение условного предела текучести при расчетной температуре (напряжение, при котором остаточное удлинение составляет 1%), МПа	$R_{p1,0}$
Исполнительная толщина стенки обечайки, мм	s
Исполнительная толщина стенки днища (крышки); сферического сегмента; переходной части конической обечайки; стенки штуцера; толщина конической втулки в месте соединения с фланцем, мм	s_1
Исполнительная толщина стенки переходной части обечайки, подкладного листа, накладного кольца; исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки рубашки и конуса или канала, мм	s_2
Исполнительная толщина крышки вне уплотнения, внутренней части штуцера, мм	s_3
Исполнительная толщина стенки конической обечайки, мм	$s_к$
Толщина крышки в месте уплотнения, мм	s_n
Расчетная толщина стенки обечайки, мм	s_p
Расчетная толщина стенки конической обечайки, мм	$s_{к.р}$
Расчетная толщина стенки днища (крышки), сферического сегмента) или переходной части конической обечайки, мм	s_{1p}
Расчетная толщина стенки переходной части обечайки, мм	s_{2p}
Исполнительная толщина стенки тороидального перехода конической обечайки, мм	$s_т$
Исполнительная толщина стенки пологого конического	s'

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Термин:	Условное обозначение:
днища, мм	
Рабочая температура, ^{0}C	T
Ширина поперечного сечения кольца жесткости в месте его приварки к обечайке, мм	t
Момент упругого сопротивления кольца жесткости при изгибе; момент сопротивления сварного шва на единицу его длины между корпусом сосуда и кольцом, мм^3	W_I
Момент упругого сопротивления кольца жесткости при кручении, мм^3	W_K
Расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища, мм	x
Половина угла раствора при вершине конической обечайки, град	α; α_1; α_2
Температурный коэффициент линейного расширения фланца, град$^{-1}$	$\alpha_ф$
Температурный коэффициент линейного расширения болтов (шпилек) , град$^{-1}$	$\alpha_б$
Температурный коэффициент линейного расширения свободного кольца, град$^{-1}$	$\alpha_к$
Температурный коэффициент линейного расширения крышки, град$^{-1}$	$\alpha_{кр}$
Отношение допускаемых напряжений	χ
Минимальный размер сварного шва, мм	Δ
Угол охвата седловой опоры, град	δ_1
Угол охвата сосуда подкладным листом, град	δ_2
Коэффициент, учитывающий расстояние между корпусом сосуда и рубашкой	ε
Поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям; коэффициент нагружения	η
Гибкость элемента; коэффициент длины сопряжения	λ
Общие мембранные напряжения, МПа	σ_m
Допускаемое напряжение при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]$
Допускаемое напряжение при температуре 20°C, МПа	$[\sigma]^{20}$
Допускаемое напряжение для болта при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_б$
Допускаемое напряжение для болта в условиях монтажа, МПа	$[\sigma]_б^{20}$
Допускаемое напряжение для кольца жесткости при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_к$
Допускаемое напряжение для ребер жесткости плоского днища, МПа	$[\sigma]_р$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Термин:	Условное обозначение:
Допускаемое напряжение для фланца при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_ф$
Допускаемое напряжение для штуцера или сопрягаемой обечайки фланца при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_ш$
Допускаемое напряжение для кольца сопряжения или анкерной трубы при расчетной температуре; допускаемое напряжение для втулки плоской крышки с ребрами, МПа	$[\sigma]_0$
Допускаемое напряжение для плоского днища с ребрами жесткости; сферического неотбортованного днища при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_1$
Допускаемое напряжение для стенки рубашки или канала при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_2$
Допускаемое напряжение для переходных частей обечаек (цилиндрических и конических) при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_1$; $[\sigma]_2$
Коэффициент прочности сварных швов	φ
Коэффициент прочности продольного сварного шва	φ_p
Расчетный коэффициент прочности сварного шва	φ_P
Коэффициент прочности кольцевого сварного шва	φ_T

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

2. Общие требования

2.1. Расчетные давления, усилия и моменты

Под расчетным давлением для элементов сосудов и аппаратов следует понимать давление, на которое проводится их расчет на прочность и устойчивость. Расчетное давление определяется автором технологического проекта. Расчетное давление принимают, как правило, выше рабочего.

Под рабочим давлением для сосуда и аппарата следует понимать максимальное внутреннее избыточное или наружное давление, возникающее при нормальном протекании рабочего процесса, без учета гидростатического давления среды и без учета допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана или других предохранительных устройств. Если на элемент сосуда или аппарата действует гидростатическое давление, составляющее 5% и выше рабочего, то расчетное давление для этого элемента должно быть повышено на это же значение.

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

Для элементов, разделяющих пространства с разными давлениями (например, в аппаратах с обогревающими рубашками), за расчетное давление следует принимать либо каждое давление в отдельности, либо давление, которое требует большей толщины стенки рассчитываемого элемента. Если обеспечивается одновременное действие давлений, то допускается производить расчет на разность давлений. Разность давления принимается в качестве расчетного давления также для таких элементов, которые отделяют пространства с внутренним избыточным давлением от пространства с абсолютным давлением, меньшим чем атмосферное. Если отсутствуют точные данные, то абсолютное давление, меньшее чем атмосферное, принимают равным нулю.

Под пробным давлением в сосуде или аппарате следует понимать давление, при котором проводится испытание сосуда или аппарата. Расчет элементов сосудов или аппаратов при условиях испытания производится на давление, которому они подвергаются во время пробного испытания, включая гидростатическое давление. Расчет на прочность цилиндрических обечаек и конических элементов, выпуклых и плоских днищ для условий испытания проводить не требуется, если давление в

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

условиях испытания будет меньше, чем расчетное давление, умноженное на $1{,}35\,\frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]}$.

При расчете на прочность и устойчивость элементов сосудов и аппаратов помимо расчетного давления, необходимо учитывать действующие усилия и моменты. Эти усилия и моменты могут возникать в результате действия собственной массы, веса изоляции, внутренних и наружных устройств, присоединенных трубопроводов, ветровой, снеговой и других нагрузок.

2.2. Допускаемые напряжения, коэффициенты запаса прочности и устойчивости

Допускаемые напряжения при расчете по предельным нагрузкам сосудов и аппаратов, работающих при статических нагрузках [2]:

для углеродистых и низколегированных сталей

$$[\sigma]=\eta\cdot\min\left(\frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{n_т};\frac{R_m}{n_в};\frac{R_{m/10^5}}{n_д};\frac{R_{p1,0/10^5}}{n_п}\right) \qquad (2.1)$$

для аустенитных сталей

$$[\sigma]=\eta\cdot\min\left(\frac{R_{p1,0}}{n_т};\frac{R_m}{n_в};\frac{R_{m/10^5}}{n_д};\frac{R_{p1,0/10^5}}{n_п}\right) \qquad (2.2)$$

Поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям η должен быть равен единице, за исключением стальных отливок, для которых η имеет следующие значения:

0,8 - для отливок, подвергающихся индивидуальному контролю неразрушающими методами;

0,7 - для остальных отливок.

Для условий испытания допускаемое напряжение:

для углеродистых и низколегированных сталей

$$[\sigma]=\eta\frac{R_e^{20} \text{ или } R_{p0,2}^{20}}{n_Т} \qquad (2.3)$$

для аустенитных сталей

$$[\sigma]=\eta\frac{R_{p0,2}^{20} \text{ или } R_{p1,0}^{20}}{n_Т} \qquad (2.4)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Коэффициенты запаса прочности должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Условие нагружения	Коэффициент запаса прочности			
	nт	$n_в$	nд	nп
Рабочие условия	1,5	2,4	1,5	1,0
Условия испытания:				
гидравлические испытания	1,1	-	-	-
пневматические испытания	1,2	-	-	-
Условия монтажа	1,1	-	-	-

Для сосудов и аппаратов группы 3, 4 по [1] коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению $n_{\hat{a}}$ допускается принимать равным 2,2.

В случае если допускаемое напряжение для аустенитных сталей определяют по условному пределу текучести $R_{p0,2}$ запас прочности n_T для рабочих условий принимается равным 1,3.

Для сталей, широко используемых в химическом, нефтехимическом и нефтеперерабатывающем машиностроении, допускаемые напряжения для рабочих условий при $\eta = 1$ должны соответствовать значениям, приведенным в Приложении 1.

За расчетную температуру стенки сосуда принимают наибольшее значение температуры стенки. При температуре ниже 20^0С за расчетную температуру при определении допускаемых напряжений принимают температуру 20^0С.

Расчетные значения предела текучести, временного сопротивления, модуля продольной упругости и коэффициентов линейного расширения в зависимости от температуры принимаются в соответствии с Приложением 2.

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

2,4 - для рабочих условий;

1,8 - для условий испытания и монтажа.

При расчетной температуре для углеродистой стали свыше 380^0С, для низколегированной свыше 420^0С, для аустенитной свыше 525^0С необходимо учитывать ползучесть материала.

Для элементов сосудов и аппаратов, работающих в условиях ползучести при разных за весь период эксплуатации расчетных температурах, в качестве допускаемого напряжения разрешается принимать эквивалентное допускаемое напряжение:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$[\sigma_{экв}] = \frac{[\sigma]_1}{\left[\sum_1^n \frac{T_i}{T_0}\left(\frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_i}\right)^m\right]^{1/m}}, \qquad (2.5)$$

где $[\sigma]_i = [\sigma]_1$; $[\sigma]_2$;...$[\sigma]_n$ - допускаемое напряжение для расчетного срока эксплуатации при температурах t_i (i=1,2...);

T_i - длительность этапов эксплуатации элементов с температурой стенки соответственно t_i (i=1,2...);

$T_0 = \sum_1^n T_i$ - общий расчетный срок эксплуатации;

m - показатель степени в уравнениях длительной прочности стали (для легированных жаропрочных сталей при разнице расчетных температур эксплуатации не более 300С рекомендуется принимать m=8).

Этапы эксплуатации при разной температуре стенки рекомендуется принимать по ступеням температуры в 5 и 10 °С.

Для элементов сосудов и аппаратов, рассчитываемых не по предельным нагрузкам (например, узлы врезки штуцеров или фланцевые соединения) допускаемые напряжения определяются по соответствующей нормативно-технической документации [11, 10, 16, 41].

Для сосудов и аппаратов, работающих при многократных нагрузках, допускаемую амплитуду напряжений определяют по [8].

2.3. Прибавки к расчетным толщинам

При расчете сосудов и аппаратов необходимо учитывать прибавку c к расчетным толщинам элементов:

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \qquad (2.6)$$

где c_1 - прибавка для компенсации коррозии и эрозии;

c_2 - прибавка для компенсации минусового допуска;

c_3 - прибавка технологическая.

При двухстороннем контакте с коррозионной и (или) эрозионной средой прибавку c_1 для компенсации коррозии и (или) эрозии необходимо соответственно увеличивать.

Технологическая прибавка c_3 предусматривает компенсацию утонения стенки элемента сосуда или аппарата при технологических операциях - вытяжке, штамповке, гибке труб и т. д. При расчете эллиптических днищ, изготовляемых штамповкой, технологическую прибавку c_3 для компенсации утонения в зоне отбортовки не учитывают, если ее значение не превышает 15% расчетной толщины листа.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Прибавки c_2 и c_3 учитывают в тех случаях, когда их суммарное значение превышает 5% номинальной толщины листа

Если известна фактическая толщина стенки, то при поверочном расчете $c2$ и $c3$ можно не учитывать.

2.4. Коэффициенты прочности сварных швов

При расчете на прочность сварных элементов сосудов и аппаратов в расчетные формулы следует вводить коэффициент прочности сварных соединений φ.

Числовые значения этих коэффициентов должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 2.2.

Таблица 2.2

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

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Вид сварного шва	Значение коэффициентов прочности сварных швов	
	Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100%*	Длина контролируемых швов от общей длины составляет от 10 до 50%*
полуавтоматической сваркой с одной стороны с флюсовой или керамической подкладкой Стыковой, выполняемый вручную с одной стороны	0,9	0,65

*Объем контроля определяется техническими требованиями на изготовление, техническими регламентами и правилами безопасности Ростехнадзора РФ.

Для бесшовных элементов сосудов и аппаратов $\varphi = 1$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

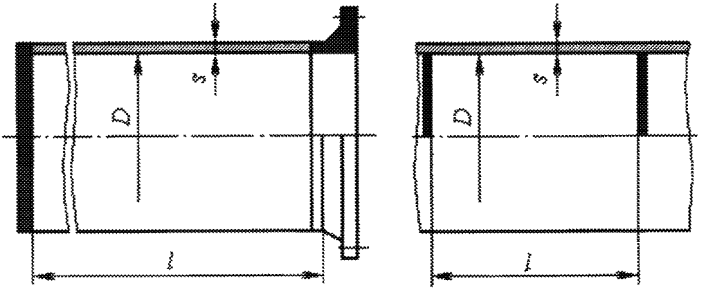
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

3. Цилиндрические обечайки

Расчет цилиндрических обечаек на прочность и устойчивость проводится на основании [2] с дополнениями по расчету характеристик колец жесткости. Добавлен расчет на прочность от изгибающего момента с учетом коэффициента прочности кольцевого сварного шва, а также от совместного действия внутреннего давления, растягивающего усилия и изгибающего момента.

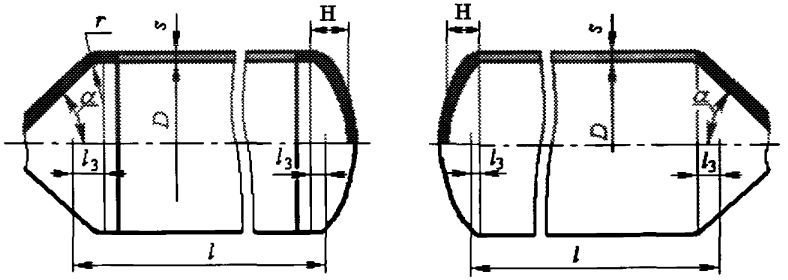
3.1. Расчетные схемы

Расчетные схемы цилиндрических обечаек приведены на рис. 3.1-3.4.



а б

Рис. 3.1. Гладкие цилиндрические обечайки
(а - обечайка с фланцем или с плоским днищем, б - обечайка с жесткими перегородками)



а б

Рис. 3.2. Гладкие обечайки с выпуклыми или коническими днищами
(а – обечайка с отбортованными днищами, б – обечайка с неотбортованными днищами)

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

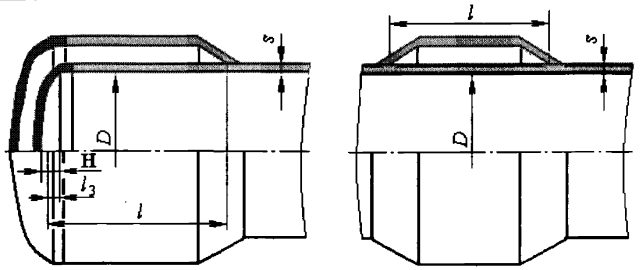


Рис.3.3. Гладкие обечайки с рубашкой

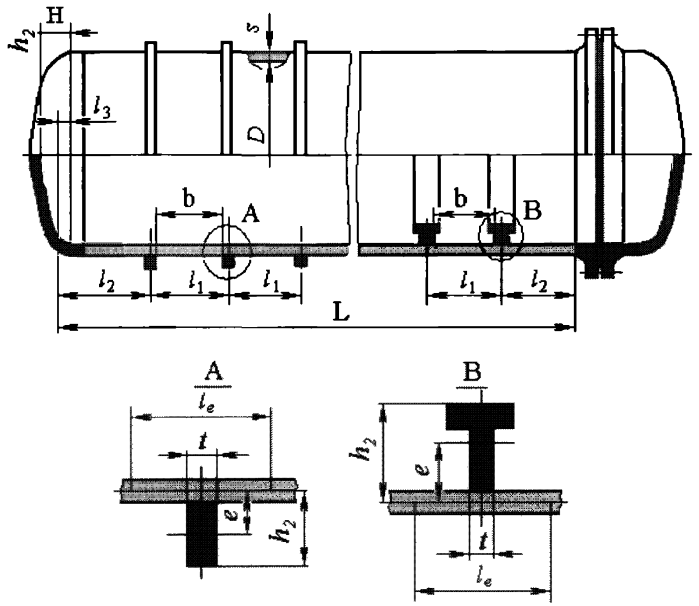


Рис. 3.4. Цилиндрические обечайки, подкрепленные кольцами жесткости

Условия применения:

$\frac{s-c}{D} \le 0{,}1$ - для обечаек и труб при $D \ge 200$ мм;

$\frac{s-c}{D} \le 0{,}3$ - для труб при $D < 200$ мм (3.1)

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетные формулы, приведенные в пп. 3.2.2; 3.2.4-3.2.7 и 3.3.3 следует применять при условии, что расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывается ползучесть материалов. При отсутствии точных данных формулы допускается применять при условии, что расчетная температура стенки обечайки из углеродистой стали не превышает 380^{0}С, из низколегированной 420^{0}С, из аустенитной 525^{0}С.

3.2. Гладкие обечайки (без колец жесткости)

3.2.1. Обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением

Расчетная толщина стенки обечайки:

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} \tag{3.2}$$

Условие выполнения прочности стенки обечайки:

$$s \geq s_p + c \tag{3.3}$$

Допускаемое избыточное внутреннее давление:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p (s-c)}{D + (s-c)} \tag{3.4}$$

3.2.2. Обечайки, нагруженные наружным давлением

Допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_П = \frac{2[\sigma](s-c)}{D + (s-c)} \tag{3.5}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} E}{n_y B_1} \frac{D}{l} \left[\frac{100(s-c)}{D}\right]^{2.5}, \tag{3.6}$$

где $B_1 = \min\left\{1{,}0;\ 9{,}45 \frac{D}{l}\sqrt{\frac{D}{100(s-c)}}\right\}$.

Допускаемое наружное давление:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$[p]=\frac{[p]_{II}}{\sqrt{1+\left(\frac{[p]_{II}}{[p]_{E}}\right)^{2}}} \tag{3.7}$$

При определении расчетной длины обечайки l длину примыкающего элемента l_3 в зависимости от его вида (рис.3.2) следует определять по формулам:

$l_3=\frac{H}{3}$ - для выпуклых днищ;

$l_3=\frac{D}{6tg\alpha}$ - для конических обечаек (днищ) без отбортовки, но не более длины конического элемента;

$l_3=\max\left\{r\cdot\sin\alpha;\frac{D}{6tg\alpha}\right\}$ - для конических обечаек (днищ) с отбортовкой, но не более длины конического элемента;

Расчетная толщина стенки обечайки s_p определяется итерационно по формулам (3.5-3.7) при заданной расчетной длине l и условии, что $[p]=p$.

Условие выполнения прочности стенки обечайки:

$$s\geq s_p+c \tag{3.8}$$

Максимально допустимая расчетная длина обечайки l_p определяется итерационно по формулам (3.5-3.7) при заданной толщине стенки с учетом суммарной прибавки $(s-c)$ и условии, что $[p]=p$.

3.2.3. Обечайки, нагруженные осевым растягивающим усилием

Расчетная толщина стенки обечайки:

$$s_p=\frac{F}{\pi\cdot D[\sigma]\varphi_T} \tag{3.9}$$

Условие выполнения прочности стенки обечайки:

$$s\geq s_p+c \tag{3.10}$$

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F]=\pi(D+s-c)(s-c)[\sigma]\varphi_T \tag{3.11}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

3.2.4. Обечайки, нагруженные осевым сжимающим усилием

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности

$$[F]_{П} = \pi(D + s - c)(s - c)[\sigma] \tag{3.12}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[F]_{E} = \min\{[F]_{E_1}; [F]_{E2}\}, \tag{3.13}$$

где $[F]_{E_1} = \dfrac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} D^2 \left[\dfrac{100(s-c)}{D}\right]^{2.5}$ - допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости;

$[F]_{E_2} = \dfrac{\pi \cdot (D + s - c)(s - c)E}{n_y}\left(\dfrac{\pi}{\lambda}\right)^2$ - допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости в пределах упругости.

Гибкость λ определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{2{,}83 l_{пр}}{D + s - c}, \tag{3.14}$$

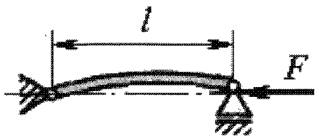
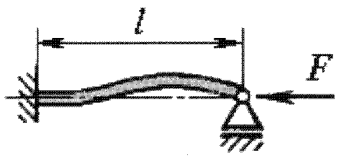
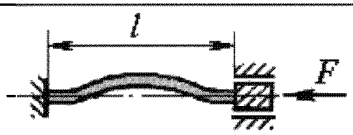
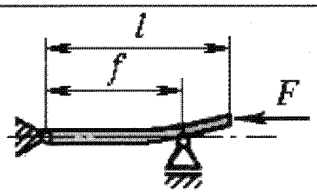
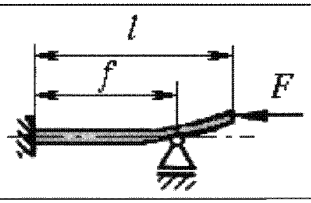
где приведенная длина $l_{пр}$ в зависимости от условий нагружения и закрепления принимается по таблице 3.1. В случае, если $\dfrac{l}{D} < 10$, $[F]_E = [F]_{E_1}$.

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{П}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[F]_{П}}{[F]_E}\right)^2}} \tag{3.15}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Таблица 3.1

Расчетная схема	$\frac{f}{l}$	$l_{пр}$
	-	l
	-	$2l$
	-	$0{,}7l$
	-	$0{,}5l$
	0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	$2{,}00l$ $1{,}73l$ $1{,}47l$ $1{,}23l$ $1{,}06l$ $1{,}00l$
	0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	$2{,}00l$ $1{,}70l$ $1{,}40l$ $1{,}11l$ $0{,}85l$ $0{,}70l$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

3.2.5. Обечайки, нагруженные изгибающим моментом

Допускаемый изгибающий момент из условия прочности:

$$[M]_{пр} = \frac{D}{4}[F] \tag{3.16}$$

где $[F]$ определяется по (3.11).

Допускаемый изгибающий момент цилиндрической обечайки:

$$[M] = \frac{[M]_{П}}{\sqrt{1+\left(\frac{[M]_{П}}{[M]_{E}}\right)^2}} \tag{3.17}$$

где $[M]_{П} = \frac{D}{4}[F]_{П}$; $[M]_{E} = \frac{D}{3{,}5}[F]_{E_1}$;

$[F]_{П}$ и $[F]_{E_1}$ берутся равными допускаемым сжимающим усилиям по (3.12) и (3.13) соответственно.

3.2.6. Обечайки, нагруженные поперечным усилием

Допускаемое поперечное усилие из условия прочности:

$$[Q]_{П} = 0{,}25\pi D(s-c)[\sigma] \tag{3.18}$$

Допускаемое поперечное усилие из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[Q]_{E} = \frac{2{,}4E(s-c)^2}{n_y}\left[0{,}18 + 3{,}3\frac{D(s-c)}{l^2}\right] \tag{3.19}$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{П}}{\sqrt{1+\left(\frac{[Q]_{П}}{[Q]_{E}}\right)^2}} \tag{3.20}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

3.2.7. Обечайки, работающие под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия

Обечайки проверяют на устойчивость по формуле:

$$\frac{p}{[p]}+\frac{F}{[F]}+\frac{M}{[M]}+\left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \le 1{,}0, \qquad (3.21)$$

где $[p]$ - допускаемое наружное давление по (3.7); $[F]$ - допускаемое осевое сжимающее усилие по (3.15); $[M]$ - допускаемый изгибающий момент по (3.17); $[Q]$ - допускаемое поперечное усилие по (3.20).

При внутреннем давлении следует принять $p = 0$.

3.2.8. Обечайки, работающие под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента

Кроме проверки условий прочности от отдельных нагрузок, необходимо проверить выполнение условия:

$$\frac{F+p\frac{\pi D^2}{4}}{[F]}+\frac{M}{[M]_{np}} \le 1{,}0, \qquad (3.22)$$

где $[F]$ и $[M]_{np}$ определяются по (3.11) и (3.16) соответственно.

3.3. Обечайки, подкрепленные кольцами жесткости

Расчетная схема цилиндрических обечаек, подкрепленных кольцами жесткости, приведена на рис.3.4.

Дополнительное условие применения:

$\frac{h_2}{D} \le 0{,}2$, где h_2 - высота сечения кольца жесткости, измеряемая от срединной поверхности обечайки

Кольца для укрепления обечайки используются единого типоразмера.

Расчетные формулы применяются при условии равномерного расположения колец жесткости. В тех случаях, когда кольца жесткости установлены неравномерно, значения b, l_1 и l_2 следует подставлять для тех участков, на которых расстояние между двумя соседними кольцами жесткости максимальное.

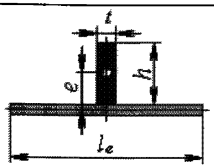
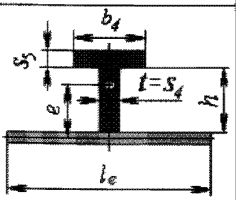
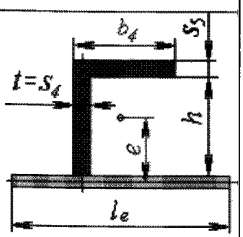
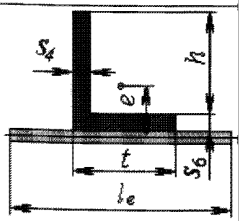
© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

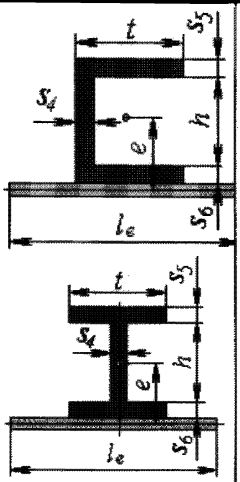
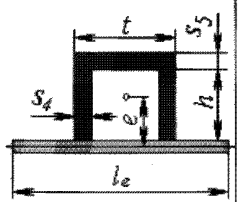
3.3.1. *Расчетные величины колец жесткости*

Расстояние между центром тяжести поперечного сечения кольца жесткости и срединной поверхности обечайки e, площадь поперечного сечения A_k и момент инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести I_k в зависимости от сечения кольца, определяются по таблице 3.2. Размеры колец жесткости принимаются с учетом суммарной прибавки c_k.

Таблица 3.2

Сечение кольца	e	A_k	I_k
	$\frac{h+s-c}{2}$	ht	$\frac{th^3}{12}$
	$\frac{th^2+b_4s_5(2h+s_5)}{2(th+b_4s_5)}+\frac{s-c}{2}$	$th+b_4s_5$	$\frac{1}{3}t\left(e_k^3+(h-e_k)^3\right)+$ $+\frac{1}{12}b_4s_5\left(s_5^2+12\left(h-e_k+\frac{s_5}{2}\right)^2\right)$ где $e_k=e-\frac{s-c}{2}$
			
	$\frac{ts_6{}^2+s_4h(h+2s_6)}{2(ts_6+s_4h)}+\frac{s-c}{2}$	ts_6+s_4h	$\frac{1}{3}s_4\left(\left(h+s_6-e_k\right)^3+\left(e_k-s_6\right)^3\right)+$ $+\frac{1}{12}ts_6\left(s_6^2+12\left(e_k-\frac{s_6}{2}\right)^2\right)$ где $e_k=e-\frac{s-c}{2}$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Сечение кольца	e	A_k	I_k
	$\frac{s_4h(h+2s_6)+ts_6^2}{2\left(t(s_5+s_6)+s_4h\right)}+$ $+\frac{ts_5(2h+2s_6+s_5)}{2\left(t(s_5+s_6)+s_4h\right)}+$ $+\frac{s-c}{2}$	$t(s_5+s_6)+$ $+s_4h$	$\frac{1}{3}s_4\left(\left(h+s_6-e_k\right)^3+\left(e_k-s_6\right)^3\right)+$ $+\frac{1}{12}ts_6\left(s_6^2+12\left(e_k-\frac{s_6}{2}\right)^2\right)+$ $\frac{1}{12}ts_5\left(s_5^2+12\left(h+s_6-e_k+\frac{s_5}{2}\right)^2\right)$ где $e_k=e-\frac{s-c}{2}$
	$\frac{2s_4h^2+ts_5(2h+s_5)}{2\left(2s_4h+ts_5\right)}+$ $+\frac{s-c}{2}$	$2s_4h+ts_5$	$\frac{2}{3}s_4\left(e_k^3+\left(h-e_k\right)^3\right)+$ $+\frac{1}{12}ts_5\left(s_5^2+12\left(h-e_k+\frac{s_5}{2}\right)^2\right)$ где $e_k=e-\frac{s-c}{2}$

3.3.2. Обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением

При выполнении п.3.2.1 расчета гладких обечаек от внутреннего давления укрепления обечайки кольцами жесткости не требуется.

При невыполнении п.3.2.1 определяется коэффициент K_4:

$$K_4=\frac{p(D+s-c)}{2\varphi_p[\sigma](s-c)}-1 \qquad (3.23)$$

В диапазоне $0<K_4<2\frac{\varphi_T}{\varphi_P}-1$ условие прочности будет выполнено в случае, если максимальное расстояние между смежными кольцами:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$b \le \sqrt{D(s-c)\left[\frac{2}{K_4} - \frac{\varphi_P}{\varphi_T}\left(1+\frac{1}{K_4}\right)\right]}, \qquad (3.24)$$

а площадь поперечного сечения кольца:

$$A_k \ge l_R (s-c)\frac{[\sigma]\cdot\varphi_P}{[\sigma]_K\cdot\varphi_K}K_4, \qquad (3.25)$$

где $l_R = \max\{l_1; l_2\}$ - расчетная длина между кольцами жесткости.

В случае если $K_4 \ge 2\frac{\varphi_T}{\varphi_P} - 1$, толщину стенки необходимо увеличить до такого размера, чтобы выполнялось условие:

$$0 < K_4 < 2\frac{\varphi_T}{\varphi_P} - 1 \qquad (3.26)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление из условия прочности всей обечайки:

$$[p]_1 = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s-c) + 2\frac{A_k}{l_R}[\sigma]_K\varphi_K}{D+(s-c)} \qquad (3.27)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление из условия прочности обечайки между двумя соседними кольцами жесткости:

$$[p]_2 = \frac{2[\sigma]\varphi_T(s-c)}{D+(s-c)}\frac{2+\lambda_{П}^{2}}{1+\frac{\varphi_T\lambda_{П}^{2}}{\varphi_P}}, \qquad (3.28)$$

где $\lambda_{П}^{2} = \frac{b^2}{D(s-c)}$.

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

$$[p] = \min\{[p]_1; [p]_2\} \qquad (3.29)$$

3.3.3. Обечайки, нагруженные наружным давлением

Расчетные параметры подкрепленной обечайки.

Эффективная длина стенки обечайки l_e:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$l_e = \min\left\{l_R ; t + 1{,}1\sqrt{D(s-c)}\right\} \tag{3.30}$$

Эффективный момент инерции поперечного сечения кольца жесткости:

$$I = I_K + \frac{l_R (s-c)^3}{10{,}9} + e^2 \frac{A_K l_e (s-c)}{A_K + l_e (s-c)} \tag{3.31}$$

Коэффициент жесткости обечайки, подкрепленной кольцами жесткости:

$$k = \sqrt{\frac{10{,}9I}{l_R (s-c)^3}} \tag{3.32}$$

Допускаемое давление из условия прочности всей обечайки:

$$[p]_{1П} = \frac{2[\sigma](s-c) + 2\dfrac{A_k}{l_R}[\sigma]_K}{D + (s-c)} \tag{3.33}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости всей обечайки в пределах упругости:

$$[p]_{1E} = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} E}{k B_2 n_y} \frac{D}{L}\left[\frac{100k(s-c)}{D}\right]^{2.5}, \tag{3.34}$$

где $B_2 = \min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\dfrac{D}{L}\sqrt{\dfrac{D}{100k(s-c)}}\right\}$.

Допускаемое давление из условия устойчивости всей обечайки:

$$[p]_1 = \frac{[p]_{1П}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[p]_{1П}}{[p]_{1E}}\right)^2}} \tag{3.35}$$

Допускаемое давление из условия прочности между кольцами жесткости:

$$[p]_{2П} = \frac{2[\sigma](s-c)}{D + (s-c)} \frac{2 + \lambda_П^2}{1 + \dfrac{\lambda_П^2}{\varphi_P}}, \tag{3.36}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Допускаемое давление из условия устойчивости между кольцами жесткости в пределах упругости:

$$[p]_{2E} = \frac{20{,}8 \cdot 10^{-6} E}{n_y B_1} \frac{D}{l} \left[\frac{100(s-c)}{D} \right]^{2{,}5}, \qquad (3.37)$$

где $l = \max\left\{ b; l_2 - \frac{t}{2} \right\}$;

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

Допускаемое давление из условий устойчивости обечайки между кольцами жесткости:

$$[p]_2 = \frac{[p]_{2П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{2П}}{[p]_{2E}} \right)^2}} \qquad (3.38)$$

Допускаемое наружное давление определяется из условия:

$$[\mathrm{p}] = \min\{[p]_1; [p]_2\} \qquad (3.39)$$

3.3.4. Обечайки, нагруженные осевым растягивающим или сжимающим усилием, изгибающим моментом или поперечным усилием как раздельно, так и совместно

Допускаемые нагрузки и проверку на устойчивость при совместном воздействии всех нагрузок определяют как для гладких обечаек при условии $l = \max\left\{ b; l_2 - \frac{t}{2} \right\}$.

При определении расчетной длины $l_{пр}$ по таблице 3.1 вместо l следует принимать общую длину L.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

4. Выпуклые днища

Расчет выпуклых днищ на прочность и устойчивость проводится на основании [2].

4.1. Расчетные схемы

Расчетные схемы выпуклых днищ приведены на рис. 4.1.

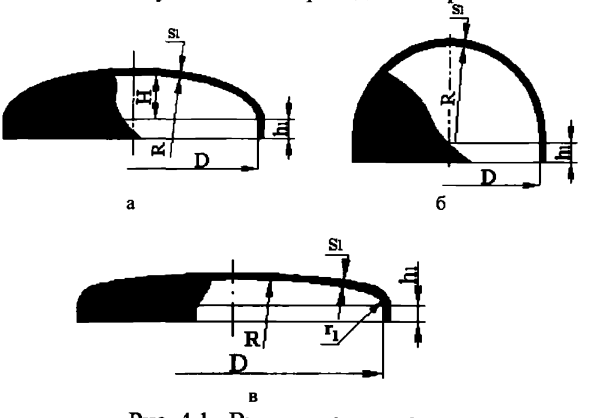


Рис. 4.1. Выпуклые днища.
а - эллиптическое днище; б - полусферическое днище; в - торосферическое днище

Условия применения:

$$0{,}002 \le \frac{s_1 - c}{D} \le 0{,}100 \;;\; 0{,}2 \le \frac{H}{D} \le 0{,}5 \;;\; R \le D \;;\; (r_1 - s) \ge 0{,}1D \qquad (4.1)$$

Формулы, приведенные в пп. 4.2.2; 4.3.2 и 4.4.2 следует применять при условии, что расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывается ползучесть материалов. При отсутствии точных данных формулы допускается применять при условии, что расчетная температура стенки обечайки из углеродистой стали не превышает 380^{0}С, из низколегированной 420^{0}С, из аустенитной 525^{0}С.

4.2. Эллиптическое днище

4.2.1. Эллиптическое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением

Радиус кривизны в вершине днища равен:

$$R = \frac{D^2}{4H} \qquad (4.2)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетная толщина стенки днища:

$$s_{1p} = \frac{pR}{2[\sigma]\varphi - 0{,}5p} \tag{4.3}$$

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \tag{4.4}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi\ (s_1 - c)}{R + 0{,}5(s_1 - c)} \tag{4.5}$$

Если длина цилиндрической части отбортованного днища $h_1 > 0{,}8\sqrt{D(s_1 - c)}$, то расчетная толщина стенки днища должна быть не менее:

$$s_{1p} = \frac{pD}{2[\sigma] - p} \tag{4.6}$$

4.2.2. Эллиптическое днище, нагруженное наружным давлением

Допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_П = \frac{2[\sigma](s_1 - c)}{R + 0{,}5(s_1 - c)} \tag{4.7}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} E}{n_y}\left[\frac{100(s_1 - c)}{K_Э R}\right]^2, \tag{4.8}$$

где $K_Э = \dfrac{1 + (2{,}4 + 8\chi)\chi}{1 + (3{,}0 + 10\chi)\chi}$ при $\chi = 10\dfrac{s_1 - c}{D}\left(\dfrac{D}{2H} - \dfrac{2H}{D}\right)$.

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_П}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[p]_П}{[p]_E}\right)^2}} \tag{4.9}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетная толщина стенки днища с учетом прибавок определяется итерационно по формулам (4.7-4.9) при условии, что $[p] = p$.

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \tag{4.10}$$

4.3. Полусферическое днище

Расчетная схема полусферического днища приведена на рис. 4.1,б.

4.3.1. Полусферическое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением

Радиус кривизны в вершине днища равен:

$$R = H = 0{,}5D \tag{4.11}$$

Расчетная толщина стенки днища:

$$s_{1p} = \frac{pR}{2[\sigma]\varphi - 0{,}5p} \tag{4.12}$$

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \tag{4.13}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi\ (s_1 - c)}{R + 0{,}5(s_1 - c)} \tag{4.14}$$

Если длина цилиндрической части отбортованного днища $h_1 > 0{,}3\sqrt{D(s_1 - c)}$, то расчетная толщина стенки днища должна быть не менее:

$$s_{1p} = \frac{pD}{2[\sigma] - p} \tag{4.15}$$

4.3.2. Полусферическое днище, нагруженное наружным давлением

Допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_{\text{П}} = \frac{2[\sigma](s_1 - c)}{R + 0{,}5(s_1 - c)} \tag{4.16}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Допускаемое давление из условия устойчивости а пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{0{,}26E}{n_y}\left[\frac{s_1 - c}{R}\right]^2 \qquad (4.17)$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_{\Pi}}{\sqrt{1+\left(\frac{[p]_{\Pi}}{[p]_E}\right)^2}} \qquad (4.18)$$

Расчетная толщина стенки днища с учетом прибавок определяется итерационно по формулам (4.16-4.18) при условии, что $[p] = p$.

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \qquad (4.19)$$

4.4. Торосферическое днище

Расчетная схема торосферического днища приведена на рис. 4.1,в.

В зависимости от соотношения параметров R, D_1, r_1 приняты следующие типы днищ:

- тип А $R \approx D_1$, $r_1 \geq 0{,}095D_1$;
- тип В $R \approx 0{,}95D_1$, $r_1 \geq 0{,}170D_1$;
- тип С $R \approx 0{,}85D_1$, $r_1 \geq 0{,}150D_1$.

4.4.1. Торосферическое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением

Расчетная толщина стенки днища в краевой зоне:

$$s_{1p} = \frac{pD_1\beta_1}{2[\sigma]\varphi}, \qquad (4.20)$$

где коэффициент β_1 определяется в зависимости от типа днища и отношения $\frac{p}{[\sigma]}$ по рис.4.2.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

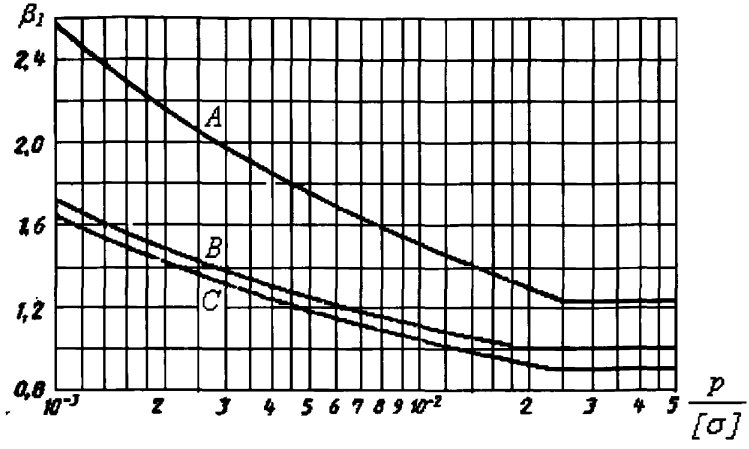


Рис. 4.2. График для определения коэффициента β_1

Для сварных днищ дополнительно определяется расчетная толщина стенки в центральной зоне:

$$s_{1p} = \frac{pR}{2[\sigma]\varphi - 0{,}5p} \tag{4.21}$$

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \tag{4.22}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление из условия прочности краевой зоны:

$$[p]_1 = \frac{2[\sigma]\varphi\ (s_1 - c)}{D_1\beta_2}, \tag{4.23}$$

где коэффициент β_2 определяется в зависимости от типа днища и отношения $\dfrac{D_1}{s_1 - c}$:

$$\text{тип А: } \beta_2 = \max\left\{1{,}25;\ 0{,}25\left(\sqrt[3]{\frac{D_1}{s_1 - c}} + 1{,}00\right)\right\}$$

$$\text{тип В: } \beta_2 = \max\left\{1{,}0;\ 0{,}12\left(\sqrt[3]{\frac{D_1}{s_1 - c}} + 3{,}75\right)\right\} \tag{4.24}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

тип С: $\beta_2 = \max\left\{0{,}9;\ 0{,}12\left(\sqrt[3]{\frac{D_1}{s_1 - c}} + 3{,}20\right)\right\}$

Для сварных днищ допускаемое внутреннее избыточное давление в центральной зоне:

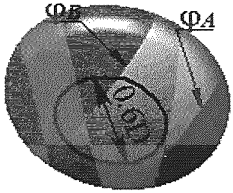
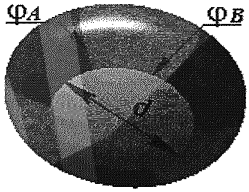
$$[p]_2 = \frac{2[\sigma]\varphi\,(s_1 - c)}{R + 0{,}5(s_1 - c)} \qquad (4.25)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

$$[p] = \min\{[p]_1; [p]_2\} \qquad (4.26)$$

Для днищ, изготовленных из целой заготовки, коэффициент $\varphi = 1$. Для днищ, изготовленных из нескольких частей, коэффициент φ определяется по таблице 4.1.

Таблица 4.1

Эскиз днища	φ для формул 4.20 и 4.23	φ для формул 4.21 и 4.25
	Для шва А	
	φ_A	1
	Для шва В	
	1	φ_B
	При $\frac{d}{D} < 0{,}6$	
	1	φ_B
	При $\frac{d}{D} \geq 0{,}6$	
	φ_B	1

В случае сварки днищ из листов различной толщины в формулы (4.23), (4.25) следует подставлять соответствующие значения толщин стенок для краевой и центральной зон.

Если длина цилиндрической части отбортованного днища $h_1 > 0{,}8\sqrt{D_1(s_1 - c)}$, то дополнительно определяется расчетная толщина цилиндрической части днища:

$$s_{1p} = \frac{pD}{2[\sigma] - p} \qquad (4.27)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

4.4.2. Торосферическое днище, нагруженное наружным давлением

Допускаемое давление из условия прочности:

$$[p]_{П} = \frac{2[\sigma](s_1 - c)}{R + 0{,}5(s_1 - c)} \tag{4.28}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y}\left[\frac{100(s_1 - c)}{R}\right]^2 \tag{4.29}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_{П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{П}}{[p]_E}\right)^2}} \tag{4.30}$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности краевой зоны:

$$[p]_1 = \frac{2[\sigma]\varphi\ (s_1 - c)}{D_1 \beta_2} \tag{4.31}$$

Расчетная толщина стенки днища с учетом прибавок определяется итерационно по формулам (4.28-4.31) при условии, что $[p] = [p]_1 = p$.

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \tag{4.32}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

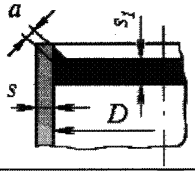
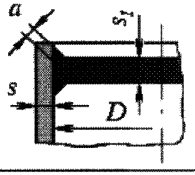
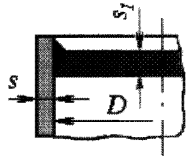
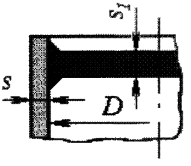
5. Плоские днища и крышки

Расчет плоских днищ на прочность и устойчивость проводится на основании [2] с дополнением расчета плоского отбортованного днища (тип 11, табл.5.1) по [13] и днищ с радиальными ребрами жесткости по [12]. В отличие от [12] при определении $[p_2]$ (формула (5.32)) учитывается прибавка на коррозию.

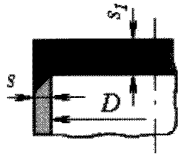
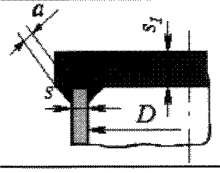
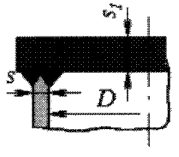
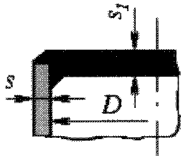
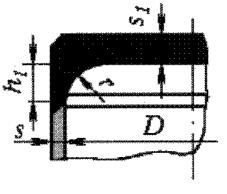
5.1. Плоские днища, нагруженные внутренним или наружным давлением

Расчетные схемы плоских днищ приведены в табл. 5.1

Таблица 5.1

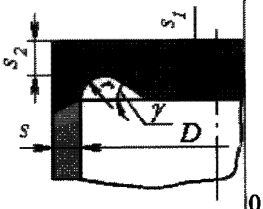
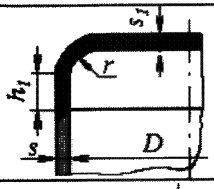
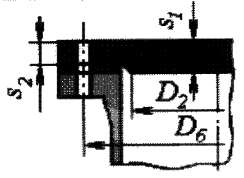
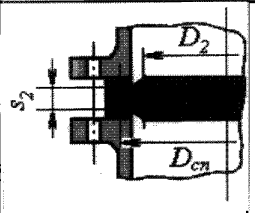
Тип	Чертеж	Условия применения днищ и крышек	K
1		$a \geq 1{,}7s$ $D_p = D$	0,53
2		$a \geq 0{,}85s$ $D_p = D$	0,50
3		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}25$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}25$ $D_p = D$	0,45 0,41
4		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}5$ $D_p = D$	0,41 0,38

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Тип	Чертеж	Условия применения днищ и крышек	K
5		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}25$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}25$ $D_p = D$	0,45 0,41
6		$a > 0{,}85s$ $D_p = D$	0,50
7		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}5$ $D_p = D$	0,41 0,38
8		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}5$ $D_p = D$	0,41 0,38
9		$\max\{s; 0{,}25s_1\} \leq r \leq \min\{s_1; 0{,}1D\}$ $h_1 \geq r$ $D_p = D - 2r$	$K = \max\left\{\begin{matrix} 0{,}41 \times \left(1 - 0{,}23\frac{s-c}{s_1-c}\right) \\ 0{,}35 \end{matrix}\right.$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Тип	Чертеж	Условия применения днищ и крышек	K
10		$\frac{s-c}{s_1-c} < 0{,}5$ $\frac{s-c}{s_1-c} \geq 0{,}5$ $D_p = D$ $0{,}25 \cdot s_1 \leq r \leq s_1 - s_2$; $30° \leq \gamma \leq 90°$	0,41 0,38
11		$D_p = D - r$ $r \geq \max\{30\text{мм}; 2s\}$	0,35
12		$D_p = D_б$	0,40
13		$D_p = D_{сп}$	0,41

Условие применения:

$$\frac{s_1 - c}{D_p} \leq 0{,}11 \qquad (5.1)$$

При $\frac{s_1 - c}{D_p} > 0{,}11$ значение допускаемого давления, рассчитанного по формуле (5.8) или (5.18), умножается на поправочный коэффициент:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$K_P = \frac{2{,}2}{1+\sqrt{1+\left(6\frac{s_1-c}{D_p}\right)^2}} \qquad (5.2)$$

Значение расчетной толщины (формулы (5.3) или (5.11) умножается на $\sqrt{\frac{1}{K_p}}$.

Расчетная толщина стенки днища:

$$s_{1P} = KK_0D_p\sqrt{\frac{p}{\varphi[\sigma]}}, \qquad (5.3)$$

где коэффициент K, расчетный диаметр D_P и некоторые ограничения определяются в зависимости от конструкции днищ по табл.5.1.

Значение коэффициента ослабления K_0 для днищ, имеющих одно отверстие:

$$K_0 = \sqrt{1+\frac{d}{D_p}+\left(\frac{d}{D_p}\right)^2} \qquad (5.4)$$

Значение коэффициента ослабления K_0 для днищ, имеющих несколько отверстий:

$$K_0 = \sqrt{1+\frac{\sum d_i}{D_p}+\left(\frac{\sum d_i}{D_p}\right)^2}, \qquad (5.5)$$

где $\sum d_i$ - максимальная сумма хорд отверстий в наиболее ослабленном диаметральном сечении днища или крышки. Значение K_0 для днищ без отверстий принимают равным 1,0.

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \qquad (5.6)$$

Во всех случаях минимальная толщина днища должна быть больше или равна толщине обечайки, рассчитанной в соответствии с п.3.2:

$$s_{1p} \geq s_p \qquad (5.7)$$

Допускаемое давление на плоское днище:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$[p]=\left(\frac{s_1-c}{KK_0D_p}\right)^2[\sigma]\varphi \qquad (5.8)$$

Толщина s_2 для типов 10,12,13 должна удовлетворять условиям:

$$s_2 \geq \begin{cases} \max\left\{1{,}1(s-c);\ \dfrac{s_1-c}{1+\dfrac{D_p-2r}{1{,}2(s_1-c)}\cdot\sin\gamma}\right\}+c \text{ - для ттип №10;} \\ \max\left\{0{,}5D_p\dfrac{p}{[\sigma]};\ (s_1-c)\sqrt{2\dfrac{D_p-D_2}{D_p}}\right\}+c \text{ - для ттипо №12,13.} \end{cases} \qquad (5.9)$$

5.2. *Плоские крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные внутренним давлением*

Расчетные схемы плоских крышек с дополнительным краевым моментом представлены на рис.5.1.

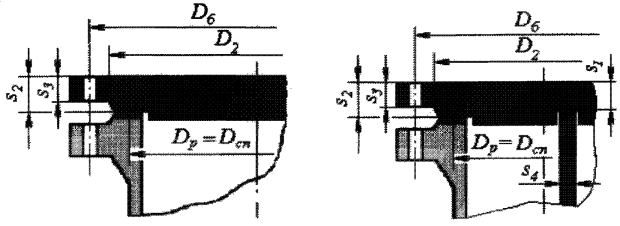


Рис. 5.1. Плоские крышки с дополнительным краевым эффектом

Дополнительное условие применения:

$$\sum d_i \leq 0{,}7D_p \qquad (5.10)$$

Расчетная толщина стенки крышки:

$$s_{1P}=K_6K_0D_p\sqrt{\frac{p}{\varphi[\sigma]}} \qquad (5.11)$$

Значения коэффициента K_6:

$$K_6=0{,}41\sqrt{\frac{1+3\psi\left(\dfrac{D_б}{D_{cn}}-1\right)}{\dfrac{D_б}{D_{cn}}}}, \qquad (5.12)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где $\psi = \max\left\{\begin{array}{l} 1+\dfrac{R_n}{Q_д} \\ \dfrac{P_б+\Delta P_б}{Q_д} \end{array}\right.$;

$Q_д$, R_n, $P_б$, $\Delta P_б$ - определяются из расчета фланцевого соединения по п.11.5.

Коэффициент ослабления отверстиями K_0 определяется по формулам (5.4), (5.5). При этом отверстия для болтов в расчет не принимают.

Условие выполнения прочности стенки плоской круглой крышки с дополнительным краевым моментом:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \tag{5.13}$$

Для крышки, имеющей паз для перегородки (рис.5.1,б) значение коэффициента K_6 для определения толщины в месте паза рассчитывается с учетом усилия от сжатия прокладки в пазе:

$$K_6 = 0{,}41\sqrt{\frac{1+3\psi\left(\dfrac{D_б}{D_{сп}}-1\right)+9{,}6\dfrac{D_б}{D_{сп}}\dfrac{s_4}{D_{сп}}}{\dfrac{D_б}{D_{сп}}}} \tag{5.14}$$

Толщина плоской круглой крышки с дополнительным краевым моментом в месте уплотнения:

$$s_2 \geq \max\left\{K_7\sqrt{\Phi};\frac{0{,}6}{D_{сп}}\Phi\right\}+c \tag{5.15}$$

где $\Phi = \max\left\{\dfrac{P_б+\Delta P_б}{[\sigma]};\dfrac{P_б}{[\sigma]^{20}}\right\}$

Значение коэффициента K_7:

$$K_7 = 0{,}8\sqrt{\frac{D_3}{D_{сп}}-1} \tag{5.16}$$

Толщина края плоской круглой крышки с дополнительным краевым моментом вне зоны уплотнения:

$$s_3 \geq \max\left\{K_7\sqrt{\Phi};\frac{0{,}6}{D_{сп}}\Phi\right\}+c, \tag{5.17}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где $\Phi = \max\left\{\dfrac{P_б + \Delta P_б}{[\sigma]_б}; \dfrac{P_б}{[\sigma]_б^{20}}\right\}$; $K_7 = 0{,}8\sqrt{\dfrac{D_3}{D_2} - 1}$

Допускаемое давление для плоской круглой крышки с дополнительным краевым моментом:

$$[p] = \left(\frac{s_1 - c}{K_0 K_6 D_p}\right)^2 [\sigma]\varphi \qquad (5.18)$$

5.3. *Плоские днища с радиальными ребрами жесткости*

Расчетные схемы плоских днищ с радиальными ребрами жесткости приведены на рис. 5.2.

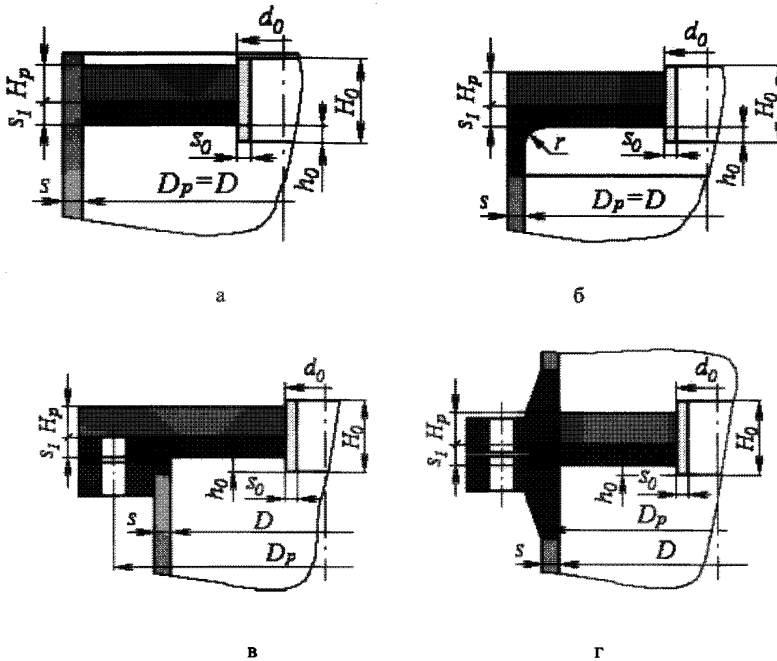


Рис. 5.2. Плоские днища с радиальными ребрами жесткости

Условия применения:

$$\frac{D_p - d_0}{2H_p} \geq 10; \quad n \geq 6; \quad \frac{nA_p[\sigma_p]}{\pi D_p s_1 [\sigma_1]} \leq 1; \quad \frac{4e_0^2}{A_p} \leq 10, \qquad (5.19)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где D_p - расчетный диаметр в зависимости от конструкции днища; H_p - высота ребра; d_0 - наружный диаметр центральной втулки; n - количество ребер.

Возможно применение ребер с произвольной формой поперечного сечения. Для профилей стандартного сечения расстояние от центра тяжести поперечного сечения ребра жесткости до его основания $e_0 = e_k$, а площадь поперечного сечения $A_p = A_k$, где e_k и A_k определяются по таблице 3.2.

Расчетное расстояние от поверхности днища до нижнего торца втулки:

$$h_{0P} = \min\left\{h_0; 0{,}27\sqrt{(d_0 - s_0)s_0}\right\}, \tag{5.20}$$

где h_0 - расстояние от нижней поверхности крышки (днища) до нижнего торца втулки; s_0 - толщина втулки.

Расчетная высота втулки:

$$H_{0P} = \min\left\{H_0; (H_p + s_1 + h_0)\right\}, \tag{5.21}$$

где H_0 - высота втулки.

Относительный наружный радиус втулки:

$$\rho_0 = \frac{d_0}{D_p} \tag{5.22}$$

Расстояние от срединной поверхности днища до нейтральной поверхности:

$$e = \frac{nA_p[\sigma_p]}{2\pi D_p[\sigma_1]} \tag{5.23}$$

Изгибающий момент втулки, отнесенный к длине контурной линии:

$$M_0 = \frac{[\sigma_0]\varphi(s_0 - c_0)}{d_0 - s_0 + c_0}\left[\left(H_{0p} - e - h_{0p} - \frac{s_1}{2}\right)^2 + \left(e + h_{0p} + \frac{s_1}{2}\right)^2\right] \tag{5.24}$$

Расчетный изгибающий момент днища, отнесенный к длине контурной линии:

$$M_1 = [\sigma_1]\left[e^2 + \left(\frac{s_1 - c}{2}\right)^2\right] \tag{5.25}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетный изгибающий момент оребренного днища, отнесенный к длине контурной линии:

$$M_2 = M_1 + \frac{[\sigma_p]\varphi n A_p}{\pi d_0}\left(e_0 - e + \frac{s_1 - c}{2}\right) \tag{5.26}$$

Расчетный обобщенный изгибающий момент, отнесенный к длине контурной линии:

$$M_{0p} = \min\{M_0; M_2\} \tag{5.27}$$

Расчетный суммарный изгибающий момент, отнесенный к длине контурной линии:

$$M_c = M_1(1-\rho_0) + M_{0p}\rho_0 \tag{5.28}$$

При отсутствии центральной втулки $(\rho_0 = 0)$ и пересечении ребер в центре, а также в случае если вместо втулки используется сплошная бобышка:

$$M_c = M_1 + \frac{[\sigma_p]\varphi n A_p}{\pi D_p}\left(e_0 - e + \frac{s_1 - c}{2}\right) \tag{5.29}$$

Условие выполнения прочности при действии дополнительного усилия, действующего на центральную часть днища (вес двигателя, редуктора и т.п.):

$$Q_0 \le 0{,}9\frac{2\pi M_c}{1-\rho_0} \tag{5.30}$$

Расчетное допускаемое давление, действующее на плоское днище в целом:

$$[p_1] = \frac{12[2\pi M_c + Q_0(1-\rho_0)]}{\pi D_p^2(1-\rho_0^2)} \tag{5.31}$$

Если действие Q_0 направлено в туже сторону, что и давление p, то в формуле (5.31) перед Q_0 следует поставить знак минус.

Расчетное допускаемое давление, действующее в промежутке между ребрами:

$$[p_2] = \frac{12[\sigma_1](s_1 - c)^2\left(1 + \sin\frac{\pi}{n}\right)^2}{D_p^2\left(\sin\frac{\pi}{n}\right)^2} \tag{5.32}$$

Допускаемое избыточное давление:

$$[p] = \min\{[p_1]; [p_2]\} \tag{5.33}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

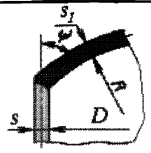
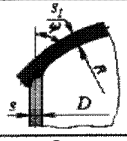
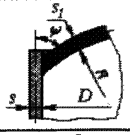
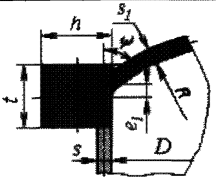
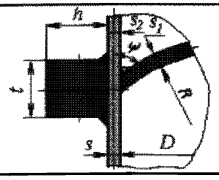
6. Сферические неотбортованные днища и крышки

Расчет сферических неотбортованных днищ на прочность и устойчивость проводится на основании [3] с дополнениями относительно расчета моментов, действующих на фланец днища типа 6 с учетом [11] и [15].

6.1. Расчетные схемы

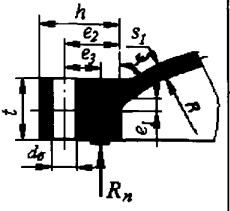
Расчетные схемы днищ приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1.

Тип	Чертеж	M	[M]	A_k
1		-	-	0
2		-	-	0
3		-	-	0
4		$\left\lvert p\frac{D^2}{4}e_1 tg\psi \right\rvert$	$\frac{\pi[\sigma]_k ht^2}{2}$	th
5		0	-	$(h+s_2)t$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Тип	Чертеж	М	[М]	A_k
6		При затяжке болтов: $P_б e_3$, где $P_б$ определяется по п.11.5 при условии отсутствия внешних сил и моментов	$\frac{\pi[\sigma]_к^{20}(h-d_б)t^2}{2}$	$(h-d_б)t$
		При рабочих условиях: $(P_б+\Delta P_б)e_3+Q_o(e_2-e_3-e_1 tg\psi)$ где $\Delta P_б$ и Q_o определяются из расчета фланцевого соединения по п.11.5.	$\frac{\pi[\sigma]_к(h-d_б)t^2}{2}$	

Условия применения:

$$\frac{s_1-c}{R}\le 0{,}1; \qquad 0{,}85D\le R\le D \tag{6.1}$$

Для днищ типа 1-3, нагруженных внутренним избыточным давлением, расчетные формулы следует применять при дополнительном условии:

$$\frac{s_1-c}{R}\ge 0{,}002 \tag{6.2}$$

Угловые швы должны быть выполнены с двусторонним сплошным проваром.

Дополнительные нагрузки на кольца не учитываются.

Формулы, приведенные в п.6.3, следует применять при условии, что расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывается ползучесть материалов. При отсутствии точных данных формулы допускается применять при условии, что расчетная температура стенки обечайки из углеродистой стали не превышает 380^{0}С, из низколегированной 420^{0}С, из аустенитной 525^{0}С.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

6.2. Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные внутренним избыточным давлением

Расчетная толщина стенки днища:

$$s_{1p} = \max\left\{\begin{array}{l}\dfrac{pR}{2[\sigma]_1\varphi - p};\\ \dfrac{pD\beta}{2[\sigma]_1\varphi_k - p}\end{array}\right. \qquad (6.3)$$

Значение коэффициента β:

$$\beta = 0{,}5 + \frac{tg\psi}{\chi_k \dfrac{4A_k}{D(s_1-c)}\sqrt{1-\dfrac{M}{[M]}} + 3\sqrt{\dfrac{s_1-c}{D}}\left[\dfrac{1}{\sqrt{\cos\psi}} + \left(\chi\dfrac{s-c}{s_1-c}\right)^{3/2} + \left(\chi_2\dfrac{s_2-c}{s_1-c}\right)^{3/2}\right]} \qquad (6.4)$$

где $\chi_k = \dfrac{[\sigma]_k}{[\sigma]_1}$; $\chi = \dfrac{[\sigma]}{[\sigma]_1}$; $\chi_2 = \dfrac{[\sigma]_2}{[\sigma]_1}$ - отношения допускаемых напряжений;

$$\psi = ar\cos(D/(2R)).$$

Величины A_k, M, $[M]$ определяются в зависимости от конструкции днищ по табл.6.1. При этом для днищ типов 4, 6 должно выполняться условие $M < [M]$. Если в днище типа 6 прокладка лежит по всей привалочной поверхности, в формуле при определении M принимается $e_3 = 0$.

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \qquad (6.5)$$

Допускаемое избыточное внутреннее давление определяется по формуле:

$$[p] = \min\left\{\begin{array}{l}\dfrac{2(s_1-c)\varphi_k[\sigma]_1}{D\beta + (s_1-c)};\\ \dfrac{2(s_1-c)\varphi[\sigma]_1}{R + (s_1-c)}\end{array}\right\} \qquad (6.6)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

6.3. Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные наружным давлением

Допускаемое давление из условия прочности в центральной зоне:

$$[p]_{\Pi} = \frac{2[\sigma](s_1 - c)}{R + (s_1 - c)} \tag{6.7}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{KE}{n_y}\left[\frac{(s_1 - c)}{R}\right]^2, \tag{6.8}$$

где коэффициент К в зависимости от параметра $\frac{R}{(s_1 - c)}$ определяется по таблице 6.2.

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \min\left\{\begin{array}{c}\dfrac{2(s_1 - c)\varphi_k[\sigma]_1}{D\beta + (s_1 - c)} \\ \dfrac{[p]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[p]_{\Pi}}{[p]_E}\right)^2}}\end{array}\right\} \tag{6.9}$$

Расчетная толщина стенки днища с учетом прибавок определяется итерационно по формулам (6.7-6.9) при условии, что $[p] = p$.

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \tag{6.10}$$

Таблица 6.2

Расчетные модели	Значение коэффициента К при отношении $\frac{R}{(s_1 - c)}$								
	5	50	75	100	150	200	250	300	≥ 350
Днище (тип 1-5)	0,33	0,19	0,17	0,15	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
Крышка (тип 6)	0,46	0,30	0,25	0,22	0,19	0,17	0,16	0,13	0,12

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

7. Конические обечайки и соединения

Расчет конических обечаек и соединений на прочность и устойчивость проводится на основании [2].

7.1. Расчетные схемы

Расчетные схемы соединения конических обечаек представлены на рис.7.1.-7.4.

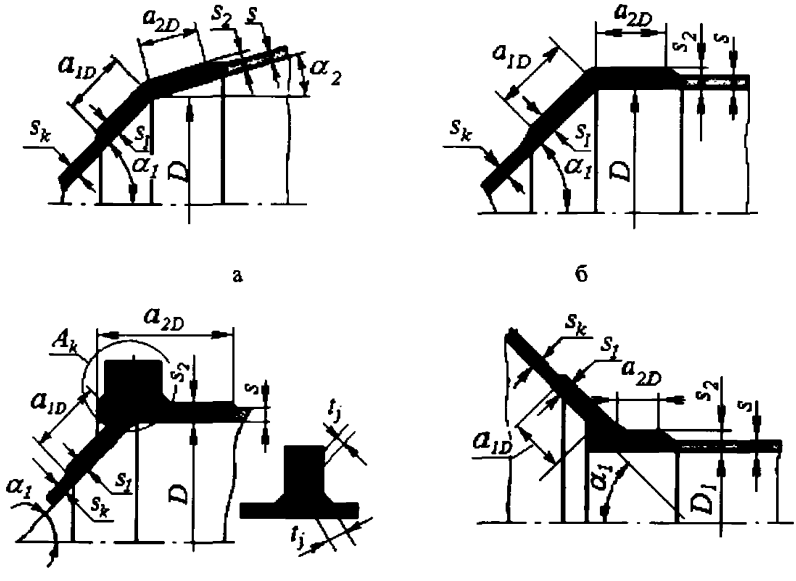


Рис.7.1. Соединение обечаек без тороидального перехода

а - соединение двух конических обечаек,
б - соединение конической и цилиндрической обечаек,
в - соединение конической и цилиндрической обечаек с укрепляющим кольцом,
г - соединение конической обечайки с цилиндрической меньшего диаметра

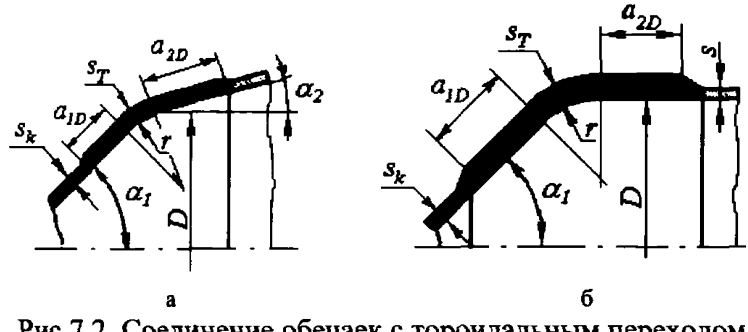


Рис.7.2. Соединение обечаек с тороидальным переходом

а - соединение двух конических обечаек, б - соединение конической и цилиндрической обечаек

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

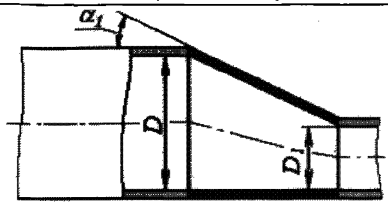


Рис.7.3. Соединение кососимметричных обечаек

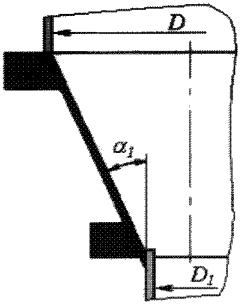


Рис.7.4. Коническая обечайка с кольцами жесткости

Общие условия применения:

$$0{,}001 \le \frac{s_1 \cos\alpha_1}{D} \le 0{,}05;$$

$$\alpha_1 \le 70^0; \quad 0 \le \alpha_2 \le \alpha_1; \quad s_1 \ge s_k; \quad s_2 \ge s_k; \quad s_T \ge s_k, \qquad (7.1)$$

где l - длина перехода; a_1 - расчетная длина переходной части.

Расчетные коэффициенты прочности сварных швов переходов обечаек определяют по табл.7.1.

Таблица 7.1

Вид соединений обечаек	Расчетный коэффициент прочности сварных швов		
	Соединение обечаек с укрепляющим кольцом	Соединение обечаек без укрепляющего кольца	Соединение штуцера или внутреннего цилиндра с конической обечайкой
Внутреннее давление или растягивающая сила	$\varphi_{\text{Р}} = \sqrt{\varphi_T}$ $\varphi_{ap} = \varphi_a$	$\varphi_{\text{Р}} = \sqrt{\varphi_T}$	$\varphi_{\text{Р}} = \min\left\{\varphi_p; \sqrt{\varphi_T}\right\}$
Наружное давление или	$\varphi_{\text{Р}} = \min\left\{\varphi_p; \sqrt{\varphi_T}\right\}$	$\varphi_{\text{Р}} = \min\left\{\varphi_p; \sqrt{\varphi_T}\right\}$	$\varphi_{\text{Р}} = \sqrt{\varphi_T}$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Вид соединений обечаек	Расчетный коэффициент прочности сварных швов		
	Соединение обечаек с укрепляющим кольцом	Соединение обечаек без укрепляющего кольца	Соединение штуцера или внутреннего цилиндра с конической обечайкой
сжимающая сила	$\varphi_{ap} = 1$		
Изгибающий момент	$\varphi_P = \min\left\{\varphi_p; \sqrt{\varphi_T}\right\}$ $\varphi_{ap} = \varphi_a$	$\varphi_P = \min\left\{\varphi_p; \sqrt{\varphi_T}\right\}$	$\varphi_P = \min\left\{\varphi_p; \sqrt{\varphi_T}\right\}$

где φ_T - коэффициент прочности кольцевого сварного шва;

φ_p - коэффициент прочности продольного сварного шва;

φ_a - коэффициент прочности поперечного сварного шва для укрепляющего кольца.

Расчетные формулы не применимы, если расстояние между двумя соседними узлами обечаек менее суммы соответствующих расчетных длин обечаек, или, если расстояние от узлов до опорных элементов сосуда (за исключением юбочных опор и опорных колец) менее удвоенной расчетной длины обечайки.

Расчетные формулы узлов конических и цилиндрических обечаек без тороидального перехода применимы при условии выполнения углового шва с двусторонним сплошным проваром.

Формулы, приведенные в пп. 7.2.2; 7.2.4; 7.2.5 и 7.2.7 следует применять при условии, что расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывается ползучесть материалов. При отсутствии точных данных формулы допускается применять при условии, что расчетная температура стенки обечайки из углеродистой стали не превышает 380^{0}С, из низколегированной 420^{0}С, из аустенитной 525^{0}С.

7.2. Гладкие конические обечайки

Расчетный диаметр конической обечайки без торроидального перехода (рис.7.1):

$$D_k = D - 1{,}4a_1 \sin\alpha_1 \qquad (7.2)$$

Расчетный диаметр конической обечайки с торроидальным переходом (рис.7.2):

$$D_k = D - 2\left[r\left(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1\right) + 0{,}7a_1 \sin\alpha_1\right] \qquad (7.3)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

7.2.1. *Конические обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением*

Расчетная толщина стенки обечайки:

$$s_{kp} = \frac{pD_k}{2[\sigma]\varphi_P - p\cos\alpha_1}\frac{1}{\cos\alpha_1} \tag{7.4}$$

Условие выполнения прочности стенки обечайки:

$$s_k \geq s_{kp} + c \tag{7.5}$$

Допускаемое внутреннее давление из условия прочности стенки обечайки:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_P(s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos\alpha_1} + (s_k - c)} \tag{7.6}$$

7.2.2. *Конические обечайки, нагруженные наружным давлением*

Допускаемое давление из условия прочности стенки обечайки:

$$[p]_{\Pi} = \frac{2[\sigma](s_k - c)}{\frac{D_k}{\cos\alpha_1} + (s_k - c)} \tag{7.7}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости обечайки в пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{20{,}8\cdot 10^{-6} E}{n_y B_1}\frac{D_E}{l_E}\left[\frac{100(s_k - c)}{D_E}\right]^{2{,}5} \tag{7.8}$$

где $B_1 = \min\left\{1{,}0;\ 9{,}45\frac{D_E}{l_E}\sqrt{\frac{D_E}{100(s_k - c)}}\right\}$;

$$l_E = \frac{D - (D_1 + 2s_2)}{2\sin\alpha_1};$$

$$D_E = \max\left\{\frac{D + D_1 + 2s_2}{2\cos\alpha_1};\ \frac{D}{\cos\alpha_1} - 0{,}3\{(D + D_1 + 2s_2)\sqrt{\frac{D + D_1 + 2s_2}{s_k - c}}tg\alpha_1\right\}.$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\Pi}}{[p]_E}\right)^2}} \tag{7.9}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

7.2.3. *Конические обечайки, нагруженные осевой растягивающей силой*

Расчетная толщина стенки обечайки конического перехода:

$$s_{kp} = \frac{F}{\pi (D_1 + 2s_2)\varphi_T [\sigma]} \frac{1}{\cos \alpha_1} \tag{7.10}$$

Условие выполнения прочности стенки обечайки:

$$s_k \geq s_{kp} + c \tag{7.11}$$

Допускаемая растягивающая сила из условия прочности обечайки:

$$[F] = \pi (D_1 + 2s_2)(s_k - c)\varphi_T [\sigma] \cos \alpha_1 \tag{7.12}$$

7.2.4. *Конические обечайки, нагруженные осевой сжимающей силой*

Допускаемая сила из условия прочности обечайки:

$$[F]_{\Pi} = \pi D_F (s_k - c)[\sigma] \cos \alpha_1, \tag{7.13}$$

где $D_F = \dfrac{0{,}9D + 0{,}1(D_1 + 2s_2)}{\cos \alpha_1}$.

Допускаемая сила из условия устойчивости обечайки:

$$[F]_E = \frac{310 \cdot 10^{-6} E}{n_y} (D_F \cos \alpha_1)^2 \left[\frac{100(s_k - c)}{D_F}\right]^{2,5} \tag{7.14}$$

Допускаемая осевая сжимающая сила конической обечайки в пределах упругости:

$$[F] = \min\left\{\frac{[F]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[F]_{\Pi}}{[F]_E}\right)^2}}; \frac{D_1 + 2s_2}{D_F}[F]_{\Pi}\right\} \tag{7.15}$$

7.2.5. *Конические обечайки, нагруженные изгибающим моментом*

Допускаемый изгибающий момент конической обечайки:

$$[M] = \frac{[M]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{[M]_{\Pi}}{[M]_E}\right)^2}} \tag{7.16}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где $[M]_{\text{П}} = \frac{D_F}{4}[F]_{\text{П}}$; $[M]_{\text{Е}} = \frac{D_F}{3{,}5}[F]_{\text{Е}}$; $[F]_{\text{П}}$ и $[F]_{\text{Е}}$ берутся равными допускаемым сжимающим силам для обечаек по (7.13) и (7.14) соответственно.

Допускаемый изгибающий момент конической обечайки из условия прочности:

$$[M]_{пр} = \frac{D_1 + 2s_2}{4}[F], \qquad (7.17)$$

где $[F]$ определяется по (7.12).

7.2.6. *Конические обечайки, нагруженные совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента*

Если сумма эквивалентных давлений от нагружения осевой силы $p_F = \frac{4F}{\pi D_p^2}$ и момента $p_M = \frac{16M}{\pi D_p^3}$ составляет для соответствующего диаметра менее 10% расчетного давления, то коническую обечайку рассчитывают только на действие давления.

Кроме проверки условий прочности от отдельных нагрузок, необходимо проверить выполнение условия:

$$\frac{F + p\frac{\pi(D_1 + 2s_2)^2}{4}}{[F]} + \frac{M}{[M]_{пр}} \le 1{,}0, \qquad (7.18)$$

где $[F]$ и $M_{пр}$ определяются по (7.12) и (7.17) соответственно.

7.2.7. *Конические обечайки, нагруженные совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия и изгибающего момента*

Конические обечайки проверяют на устойчивость по формуле:

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \le 1{,}0, \qquad (7.19)$$

где $[p]$, $[F]$ и $[M]$ определяются по (7.9), (7.15) и (7.16) соответственно.

При внутреннем давлении следует принять $p = 0$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

7.3. Соединение конических обечаек без тороидального перехода

Расчетные схемы соединения конических обечаек без тороидального перехода представлены на рис.7.1,а,б.

Дополнительные условия применения:

$a_{1D} \ge a_1$; $a_{2D} \ge a_2$. Если $a_{1D} < a_1$ и (или) $a_{2D} < a_2$ при расчете перехода от давления вместо s_1 и s_2 подставляются:

$$s_{1E} = \max\left\{\frac{a_{1D}}{a_1} s_1; s_k\right\};\ s_{2E} = \max\left\{\frac{a_{2D}}{a_2} s_2; s\right\}, \qquad (7.20)$$

где $a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)}$; $a_2 = 0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_2}(s_2 - c)}$ - расчетные длины переходных частей.

$s_1 \ge s_2$. Если $s_1 < s_2$, то при поверочном расчете следует принимать $s_1 = s_2$.

7.3.1. *Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением*

Расчетная толщина стенок соединения обечаек:

$$s_{2p} = \frac{pD\beta_1}{2[\sigma]_2\varphi_P - p} \cdot \frac{1}{\cos\alpha_2} \qquad (7.21)$$

В случае соединения конической и цилиндрической обечаек $\cos\alpha_2 = 1$.

Коэффициент формы перехода:

$$\beta_1 = \max\{0{,}5;\ \beta\}, \qquad (7.22)$$

где $$\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{(tg\alpha_1 - tg\alpha_2)\cos\alpha_2}{\frac{1}{\sqrt{\cos\alpha_2}} + \sqrt{\frac{1 + \chi\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\alpha_1}\chi\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)}} - 0{,}25$$

Условия выполнения прочности соединения обечаек:

$$s_2 \ge s_{2p} + c;\quad s_1 \ge \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right) s_{2p} + c \qquad (7.23)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Допускаемое давление из условия прочности соединения обечаек:

$$[p]=\frac{2[\sigma]_2\varphi_P(s_2-c)}{\frac{D\,\beta_1}{\cos\alpha_2}+(s_2-c)} \qquad (7.24)$$

7.3.2. *Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой*

Допускаемая осевая растягивающая или сжимающая сила из условия прочности соединения обечаек:

$$[F]=\pi\,D\frac{(s_2-c)\varphi_P[\sigma]_2\cos\alpha_2}{\beta_5}, \qquad (7.25)$$

где $\beta_5=\max\{1{,}0;\ \ (2\beta+1{,}2)\}$.

7.3.3. *Соединение, нагруженное изгибающим моментом*

Допускаемый изгибающий момент соединения обечаек из условия прочности:

$$[M]=\frac{D}{4}[F], \qquad (7.26)$$

где $[F]$ берется равной допускаемой растягивающей (сжимающей) силе для соединения обечаек по (7.25).

7.3.4. *Соединение, нагруженное совместным действием нагрузок*

При проверке прочности для совместного действия нагрузок в формулах для расчетного наружного давления подставляют минус p, а для осевой сжимающей силы минус F. Изгибающий момент M всегда принимают со знаком плюс.

Условия прочности для переходной части обечайки:

$$|p|\le[p];\ |F|\le[F];\ |M|\le[M];\ \left|\frac{p}{[p]}+\frac{F}{[F]}\right|+\frac{M}{[M]}\le 1, \qquad (7.27)$$

где $[p]$, $[F]$ и $[M]$ определяются по (7.24), (7.25) и (7.26) соответственно.

7.4. *Соединение конических обечаек с тороидальным переходом*

Расчетные схемы соединения конических обечаек с тороидальным переходом представлены на рис.7.2.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Дополнительное условие применения:

$$0 \le \frac{r}{D} < 0{,}3 \tag{7.28}$$

$a_{1D} \ge a_1$; $a_{2D} \ge a_2$; $s_1=s_2=s_T$. Если $a_{1D} < a_1$ и (или) $a_{2D} < a_2$ при расчете перехода от давления вместо s_1 и s_2 подставляются:

$$s_{1E} = \max\left\{\frac{a_{1D}}{a_1} s_T; s_k\right\};\ s_{2E} = \max\left\{\frac{a_{2D}}{a_2} s_T; s\right\}, \tag{7.29}$$

где $a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)}$; $a_2 = 0{,}5\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_2}(s_2 - c)}$ - расчетные длины переходных частей.

7.4.1. Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением

Расчетная толщина стенки тороидального перехода:

$$s_{T\text{р}} = \frac{pD\beta_3}{2[\sigma]_T \varphi_P - p} \frac{1}{\cos\alpha_2} \tag{7.30}$$

Коэффициент формы перехода:

$$\beta_3 = \max\{0{,}5; \beta \cdot \beta_T\}, \tag{7.31}$$

где $\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{(tg\alpha_1 - tg\alpha_2)\cos\alpha_2}{\frac{1}{\sqrt{\cos\alpha_2}} + \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\alpha_1}\left(\frac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)}} - 0{,}25$;

$$\beta_T = \frac{1}{1 + \frac{0{,}028 \frac{r}{D}\sqrt{\frac{D}{s_T - c}}(\alpha_1 - \alpha_2)}{\frac{1}{\sqrt{\cos\alpha_1}} + \frac{1}{\sqrt{\cos\alpha_2}}}}$$

Условие выполнения прочности стенки тороидального перехода:

$$s_T \ge s_{Tp} + c \tag{7.32}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Допускаемое избыточное внутреннее или наружное давление из условия прочности тороидального перехода:

$$[p]=\frac{2[\sigma]_T\varphi_P(s_T-c)}{\frac{D\ \beta_3}{\cos\alpha_2}+(s_T-c)} \qquad (7.33)$$

7.4.2. *Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой*

Допускаемая осевая растягивающая или сжимающая сила из условия прочности тороидального перехода:

$$[F]=\pi\ D\frac{(s_T-c)\varphi_P[\sigma]_T\cos\alpha_2}{\beta_7}, \qquad (7.34)$$

где $\beta_7=\max\{1{,}0;\quad \beta_T(2\beta+1.2)\}$.

7.4.3. *Соединение, нагруженное изгибающим моментом и совместным действием нагрузок*

Допускаемый момент, а также условия прочности и устойчивости перехода при совместном действии нагрузок определяются по пп. 7.3.3 и 7.3.4. При этом $[p]$ и $[F]$ определяются по (7.33) и (7.34) соответственно.

7.5. *Соединение конических обечаек с укрепляющим кольцом*

Расчетная схема соединения конических обечаек с укрепляющим кольцом представлена на рис.7.1, в.

Дополнительные условия применения:

$a_{1D}\ge a_1$; $a_{2D}\ge a_2$. Если $a_{1D}<a_1$ и (или) $a_{2D}<a_2$ при расчете перехода от давления вместо s_1 и s_2 подставляются:

$$s_{1E}=\max\left\{\frac{a_{1D}}{a_1}s_1;\ s_k\right\};\quad s_{2E}=\max\left\{\frac{a_{2D}}{a_2}s_2;\ s\right\}, \qquad (7.35)$$

где $a_1=0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s_1-c)}$; $a_2=0{,}7\sqrt{D(s_2-c)}$ - расчетные длины переходных частей.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$s_1 \geq s_2$. Если $s_1 < s_2$, то при поверочном расчете следует принимать $s_1 = s_2$.

Для конической обечайки с кольцами жесткости (рис. 7.4) изгибающие моменты на кольцах отсутствуют.

7.5.1. Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением

Расчетная площадь поперечного сечения укрепляющего кольца:

$$A_{kp} = \frac{pD^2 tg\alpha_1}{8[\sigma]_k \varphi_{ap}} \left(1 - \frac{\beta_A + 0{,}25}{\beta + 0{,}25}\right), \tag{7.36}$$

где

$$\beta_A = \left(\frac{2[\sigma]_2 \varphi_p}{p} - 1\right) \frac{s_2 - c}{D};$$

$$\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}} \frac{(tg\alpha_1 - tg\alpha_2)\cos\alpha_2}{\dfrac{1}{\sqrt{\cos\alpha_2}} + \sqrt{\dfrac{1 + \chi\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\alpha_1} \cdot \chi\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)}}} - 0{,}25$$

Условие выполнения прочности соединения обечаек с укрепляющим кольцом:

$$A_k \geq A_{kp} \tag{7.37}$$

При $A_{kp} \leq 0$ укрепление кольцом жесткости не требуется.

При определении площади поперечного сечения кольца A_k также учитывается сечение стенок обечаек, расположенное между наружными швами кольца и обечаек.

Допускаемое внутреннее или наружное избыточное давление из условий прочности соединения обечаек:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_P (s_2 - c)}{D\beta_2 + (s_2 - c)} \tag{7.38}$$

Общий коэффициент формы для соединения обечаек:

$$\beta_2 = \max\{0{,}5; \beta_0\}, \tag{7.39}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где $\beta_0 = \dfrac{0{,}4\sqrt{\dfrac{D}{s_2-c}}tg\alpha_1 - B_3\left[1+\sqrt{\dfrac{1+\chi\left(\dfrac{s_1-c}{s_2-c}\right)^2}{2\cos\alpha_1}\chi\left(\dfrac{s_1-c}{s_2-c}\right)}\right]}{B_2+\left[1+\sqrt{\dfrac{1+\chi\left(\dfrac{s_1-c}{s_2-c}\right)^2}{2\cos\alpha_1}\chi\left(\dfrac{s_1-c}{s_2-c}\right)}\right]}$;

$$B_2 = \frac{1{,}6A_k}{(s_2-c)\sqrt{D(s_2-c)}}\frac{[\sigma]_k\varphi_{ap}}{[\sigma]_2\varphi_p};\quad B_3 = 0{,}25;\quad \chi = \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2}.$$

Условие выполнения прочности соединения обечаек для конической обечайки с кольцами жесткости (рис7.4):

$$A_k \geq \frac{pD^2tg\alpha_1}{8[\sigma]_k\varphi_{ap}} \tag{7.40}$$

Допускаемое внутреннее или наружное избыточное давление из условий прочности соединения обечаек с кольцами жесткости (рис7.4):

$$[p] = A_k\frac{8[\sigma]_k\varphi_{aP}}{D^2tg\alpha_1} \tag{7.41}$$

Условие выполнения прочность сварного шва укрепляющего кольца:

$$\sum t_j \geq \frac{4A_{kp}}{D}, \tag{7.42}$$

где $\sum t_j$ - сумма всех эффективных ширин несущих сварных швов между укрепляющим кольцом и обечайкой (рис.7.1,в), причем расстояние между концами прерывистых сварных швов должно быть не более восьми толщин стенки обечайки и сумма всех длин сварных швов не менее половины длины контура кольца.

7.5.2. Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой

Допускаемая осевая растягивающая или сжимающая сила соединения обечаек:

$$[F] = \pi D\frac{(s_2-c)\varphi_P[\sigma]_2}{\beta_6}, \tag{7.43}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где $\beta_6 = \max\{1{,}0;\ \ 2\beta_0\}$; при определении β_0 в (7.39) следует принять $B_3 = -0{,}35$.

7.5.3. *Соединение, нагруженное изгибающим моментом и совместным действием нагрузок*

Допускаемый момент, а также условия прочности и устойчивости перехода при совместном действии нагрузок определяются по пп. 7.3.3 и 7.3.4. При этом допускаемое давление $[p]$ и осевую силу $[\mathrm{F}]$ определяются по (7.38) и (7.43) соответственно.

7.6. *Соединение штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой*

Расчетная схема соединения внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой представлена на рис.7.1,г.

Дополнительные условия применения:

при $a_{1D} < a_1$ и $a_{2D} < a_2$ при расчете перехода от давления вместо s_1 и s_2 подставляются:

$$s_{1E} = \max\left\{\frac{a_{1D}}{a_1}s_1;\ s_k\right\};\quad s_{2E} = \max\left\{\frac{a_{2D}}{a_2}s_2;\ s\right\}, \tag{7.44}$$

где $a_1 = \sqrt{\dfrac{D_1}{\cos\alpha_1}(s_1 - c)}$; $a_2 = 1{,}25\sqrt{D_1(s_2 - c)}$ - расчетные длины переходных частей.

7.6.1. *Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением*

Расчетная толщина стенки переходной части:

$$s_{2.P} = \frac{pD_1\beta_4}{2[\sigma]\varphi_P - p} \tag{7.45}$$

Коэффициент формы перехода

$$\beta_4 = \max\{1{,}0;\ \beta_н\}, \tag{7.46}$$

где

$$\beta_н = 0{,}4\sqrt{\frac{D_1}{s_2 - c}}\,\frac{tg\alpha_1}{1 + \sqrt{\dfrac{1 + \chi\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)^2}{2\cos\alpha_1}\cdot\chi\left(\dfrac{s_1 - c}{s_2 - c}\right)}} + 0{,}5$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

при $\chi\left(\frac{s_1-c}{s_2-c}\right)^2 \geq 1$;

$$\beta_н = 0{,}4\sqrt{\frac{D_1}{s_2-c}}\,\frac{tg\alpha_1}{\chi\left(\frac{s_1-c}{s_2-c}\right)\sqrt{\frac{s_1-c}{(s_2-c)\cos\alpha_1}}+\sqrt{\frac{1+\chi\left(\frac{s_1-c}{s_2-c}\right)^2}{2}}}+0{,}5$$

при $\chi\left(\frac{s_1-c}{s_2-c}\right)^2 < 1$.

Условие выполнения прочности стенки перехода:

$$s_2 \geq s_{2p} + c \tag{7.47}$$

Допускаемое избыточное внутреннее или внешнее давление из условия прочности соединения обечаек:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2 \varphi_P (s_2 - c)}{D_1 \beta_4 + (s_2 - c)} \tag{7.48}$$

7.6.2. Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой

Допускаемая осевая растягивающая или сжимающая сила соединения обечаек:

$$[F] = \pi\, D_1 \frac{(s_2 - c)\varphi_P [\sigma]_2}{\beta_8}, \tag{7.49}$$

где $\beta_8 = \max\{1{,}0;\quad (2\beta_н - 1)\}$; $\beta_н$ определяется по (7.46).

7.6.3. Соединение, нагруженное изгибающим моментом и совместным действием нагрузок

Допускаемый момент, а также условия прочности и устойчивости перехода при совместном действии нагрузок определяются по пп. 7.3.3 и 7.3.4. При этом допускаемое давление $[p]$ и осевую силу $[F]$ определяются по (7.48) и (7.49) соответственно.

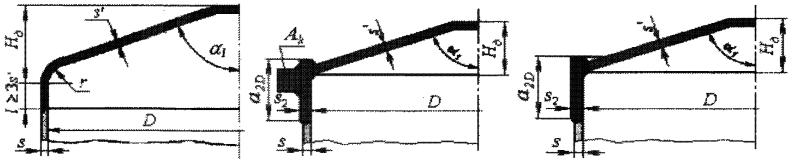
© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

8. Конические днища

Расчет конических днищ на прочность и устойчивость проводится на основании [2].

8.1. Расчетные схемы

Расчетные схемы конических днищ представлены на рис.8.1.



а б в

Рис.8.1. Пологие конические днища

а – днище с тороидальным переходом, б – днище с укрепляющим кольцом, в – днище без тороидального перехода и укрепляющего кольца

Условия применения:

$$\alpha_1 > 70^0;\ \frac{H_D\, tg\alpha_1}{D} \geq 0{,}125;\quad 0 \leq \frac{r}{D} < 0{,}3 \qquad (8.1)$$

Расчетные коэффициенты прочности сварных швов определяются, как и в случае конических переходов, по таблице 7.1.

$s' \geq s_2$. Если $s' < s_2$, то при поверочном расчете следует принимать $s' = s_2$.

В случае присоединения конического днища к цилиндрической обечайке $\cos\alpha_2 = 1$

При $\alpha_1 \leq 70^0$ расчет конических днищ осуществляется как для конических переходов (см. п.7). При этом принимается $s_k = s'$.

Расчетные формулы, приведенные в пп.8.2.2; 8.3.2; и 8.4.2 следует применять при условии, что расчетные температуры не превышают значений, при которых учитывается ползучесть материалов. При отсутствии точных данных формулы допускается применять при условии, что расчетная температура стенки обечайки из углеродистой стали не превышает 380^{0}С, из низколегированной 420^{0}С, из аустенитной 525^{0}С.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

8.2. Коническое днище с тороидальным переходом

8.2.1. Коническое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s' \geq \min\{\max\{s_{kp}+c;\ s_{Tp}+c\};\ s'_p + c\}, \qquad (8.2)$$

где $s'_p = 0{,}3(D-r)\dfrac{\alpha_1}{90}\sqrt{\dfrac{p}{[\sigma]\varphi_p}}$;

$s_{kp} = \dfrac{pD}{2\varphi_p[\sigma]-p}\dfrac{1}{\cos\alpha_1}$ - расчетная толщина гладкой конической обечайки;

$s_{Tp} = \dfrac{pD\beta_3}{2\varphi_p[\sigma]-p}$ - расчетная толщина переходной части.

Коэффициент β_3 определяется по формуле:

$$\beta_3 = \max\{0{,}5;\ \beta\beta_T\}, \qquad (8.3)$$

где

$$\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s'-c}}\frac{tg\alpha_1}{1+\dfrac{1}{\sqrt{\cos\alpha_1}}} - 0{,}25$$

$$\beta_T = \frac{1}{1+\dfrac{0{,}028\dfrac{r}{D}\sqrt{\dfrac{D}{s'-c}}\alpha_1}{1+\dfrac{1}{\sqrt{\cos\alpha_1}}}}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление на днище принимается как:

$$[p] = \max\{[p]_1; \min\{[p]_2, [p]_3\}\}, \qquad (8.4)$$

где $[p]_1 = \varphi_p[\sigma]\left[\dfrac{(s'-c)}{0{,}3(D-r)}\dfrac{90^0}{\alpha_1}\right]^2$; $[p]_2 = \dfrac{2[\sigma]\varphi_P(s'-c)}{\dfrac{D}{\cos\alpha_1}+(s'-c)}$;

$$[p]_3 = \frac{2[\sigma]\varphi_P(s'-c)}{D\ \beta_3+(s'-c)}.$$

8.2.2. Коническое днище, нагруженное наружным давлением

Допускаемое давление из условия прочности:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$[p]_{\Pi} = \frac{2[\sigma](s' - c)}{\frac{D_k}{\cos\alpha_1} + (s' - c)} \tag{8.5}$$

где $D_k = D - 2\left[r\left(1 - \cos\alpha_1\right) + 0{,}7a_1 \sin\alpha_1\right]$ - расчетный диаметр;

$a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s'-c)}$ - расчетная длина переходной части.

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости:

$$[p]_E = \frac{4EK}{n_y}\left(\frac{s'-c}{D_k}\right)^2 \cos^2\alpha_1, \tag{8.6}$$

где $K = \min\left\{0{,}36;\ \max\left\{\frac{0{,}1\xi + 5}{\xi - 4};\ 0{,}12\right\}\right\}$;

$$\xi = \frac{D_k}{2(s' - c)\cos\alpha_1}$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \frac{[p]_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\Pi}}{[p]_E}\right)^2}} \tag{8.7}$$

8.3. Коническое днище с укрепляющим кольцом

Расчетная схема конического днища с укрепляющим кольцом представлена на рис.8.1,б.

8.3.1. Коническое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением

Расчетная толщина стенки днища:

$$s'_P = \frac{pD}{2\varphi_p[\sigma] - p\cos\alpha_1}\frac{1}{\cos\alpha_1} \tag{8.8}$$

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s' \geq s'_P + c \tag{8.9}$$

Расчетная площадь поперечного сечения укрепляющего кольца:

$$A_{kp} = \frac{pD^2 tg\alpha_1}{8[\sigma]_k \varphi_{ap}}\left(1 - \frac{\beta_A + 0{,}25}{\beta + 0{,}25}\right), \tag{8.10}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где $\beta_A = \left(\frac{2[\sigma]_2\varphi_p}{p} - 1\right)\frac{s_2 - c}{D}$, $\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}}tg\alpha_1 - 0{,}25$.

При $A_{kp} \le 0$ укрепление кольцом жесткости не требуется.

Допускаемое внутреннее избыточное давление для конического днища:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_P(s' - c)}{\frac{D}{\cos\alpha_1} + (s' - c)} \tag{8.11}$$

Коэффициент формы для переходной части:

$$\beta_2 = \max\left\{0{,}5;\ \frac{0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2 - c}}tg\alpha_1 - 0{,}25}{B_2 + 1}\right\} \tag{8.12}$$

где $B_2 = \frac{1{,}6A_к}{(s_2 - c)\sqrt{D(s_2 - c)}}\frac{[\sigma]_к\varphi_{ap}}{[\sigma]_2\varphi_p}$

Допускаемое внутреннее избыточное давление для укрепляющего кольца:

$$[p] = \frac{2[\sigma]_2\varphi_p(s_2 - c)}{D\beta_2 + (s_2 - c)} \tag{8.13}$$

Условие выполнения прочность сварного шва укрепляющего кольца:

$$\Sigma t_j \ge \frac{4A_{кр}}{D}, \tag{8.14}$$

где $\sum t_j$ - сумма всех эффективных ширин несущих сварных швов между укрепляющим кольцом и обечайкой, причем расстояние между концами прерывистых сварных швов должно быть не более восьми толщин стенки обечайки и сумма всех длин сварных швов не менее половины длины контура кольца.

8.3.2. Коническое днище, нагруженное наружным давлением

Допускаемое наружное давление определяется по формулам п. 8.2.2 при условии, что:

$$D_k = D - 1{,}4a_1\sin\alpha_1, \tag{8.15}$$

где $a_1 = 0{,}7\sqrt{\frac{D}{\cos\alpha_1}(s' - c)}$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

8.4. Коническое днище без тороидального перехода и укрепляющего кольца

Расчетная схема конического днища без тороидального перехода и укрепляющего кольца представлена на рис.8.1,в.

8.4.1. Коническое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением

Условие выполнения прочности стенки днища:

$$s' \geq \min\{\max\{s_{kp}+c;\ s_{1p}+c\};\ s_p'+c\}, \qquad (8.16)$$

где $s_p' = 0{,}3D\dfrac{\alpha_1}{90^0}\sqrt{\dfrac{p}{[\sigma]\varphi_p}}$;

$s_{kp} = \dfrac{pD}{2\varphi_p[\sigma]-p\cos\alpha_1}\dfrac{1}{\cos\alpha_1}$ - расчетная толщина гладкой конической обечайки;

$s_{1P} = \left(\dfrac{s'-c}{s_2-c}\right)\dfrac{pD\beta_1}{2[\sigma]_2\varphi_P - p}$ - расчетная толщина переходной части.

Коэффициент формы перехода:

$$\beta_1 = \max\{0{,}5;\ \beta\}, \qquad (8.17)$$

где коэффициент

$$\beta = 0{,}4\sqrt{\frac{D}{s_2-c}}\frac{tg\alpha_1}{1+\sqrt{\dfrac{1+\chi\left(\dfrac{s'-c}{s_2-c}\right)^2}{2\cos\alpha_1}}\chi\left(\dfrac{s'-c}{s_2-c}\right)} - 0{,}25$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление на днище принимается как:

$$[p] = \max\{[p]_1;\ \min\{[p]_2,[p]_3\}\}, \qquad (8.18)$$

где $[p]_1 = \varphi_p[\sigma]\left[\dfrac{(s'-c)}{0.3D}\dfrac{90^0}{\alpha_1}\right]^2$; $[p]_2 = \dfrac{2[\sigma]\varphi_P(s'-c)}{\dfrac{D}{\cos\alpha_1}+(s'-c)}$;

$$[p]_3 = \frac{2[\sigma]_2\varphi_P(s_2-c)}{D\ \beta_1+(s_2-c)}.$$

8.4.2. Коническое днище, нагруженное наружным давлением

Допускаемое наружное давление определяется по п. 8.3.2.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

9. Воздействие опорных нагрузок

9.1. Горизонтальные сосуды и аппараты на седловых опорах

Расчет на прочность и устойчивость горизонтальных сосудов и аппаратов от воздействия опорных нагрузок проводится на основании [4] с дополнениями расчета сил и моментов в элементах сосудов произвольной конструкции. Приведен расчет характеристик колец жесткости, а также весовых нагрузок элементов в зависимости от их конструкции и степени заполнения рабочей жидкостью. В условиях применения расчетных формул при наличии подкладных листов используется условие $\delta_2 \geq \delta_1 + 20^0$, что при незначительном изменении условия $f \geq 0{,}1D$ (рис.9.4) позволяет при расчетах учитывать наличие подкладных листов в стандартных опорах, где $\delta_1 = 120^0$, а $\delta_2 = 140^0$.

9.1.1. Определение расчетных усилий и моментов

В случае использования сосуда с одинаковым диаметром обечайки, равномерным распределением нагрузки по длине и опирающимся симметрично на седловые опоры используются расчетные схемы, представленные на рис.9.1.

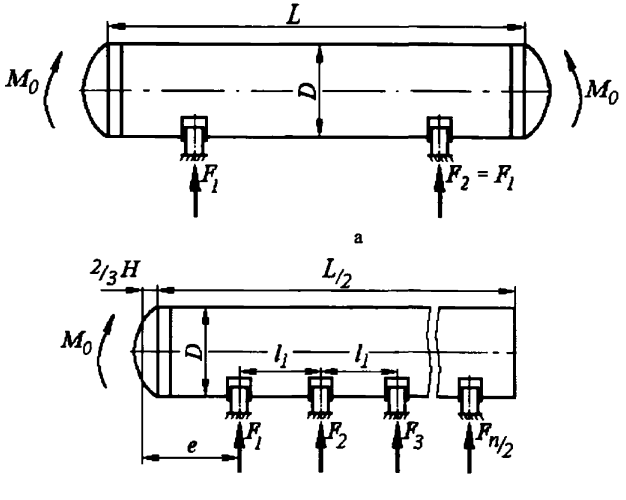


Рис.9.1. Схемы расположения седловых опор на сосуды

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Распределенная нагрузка по длине сосуда:

$$q = \frac{G}{L + \frac{4}{3}H}, \qquad (9.1)$$

где G - полный вес сосуда.

Краевой момент, определяемый смещением горизонтальной составляющей силы гидростатического давления относительно оси обечайки:

$$M_0 = q\frac{G_ж}{G}\frac{D^2}{16}, \qquad (9.2)$$

где $G_{ж}$ - вес заполняемой жидкости.

Опорное усилие:

$$F_i = \psi_i \frac{G}{n}, \qquad (9.3)$$

где $\psi_i = \begin{cases} 1{,}0 \ - \ для\ n = 2; \\ \text{по рис.9.2 - для } 3 \le n \le 8. \end{cases}$

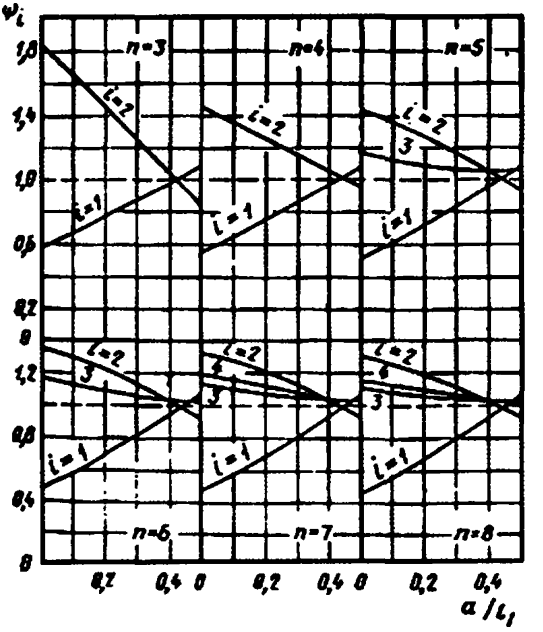


Рис.9.2. Коэффициент ψ

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Изгибающие моменты следует определять в сечениях обечайки над опорами M_i и между опорами M_{ij} в сечениях, где они имеют наибольшие значения.

Поперечные усилия следует определять в сечениях обечайки над опорами Q_i.

Момент M_i над i-й опорой:

для схемы опирания по рис.9.1,а

$$\mathrm{M}_1 = \mathrm{M}_2 = \frac{qe^2}{2} - M_0; \tag{9.4}$$

для схемы опирания по рис.9.1,б

$$\mathrm{M}_i = \begin{cases} \max\left\{\dfrac{qe^2}{2} - M_0; \dfrac{ql_1^2}{8}\right\} - для\ \mathrm{i} = 1\ и\ \mathrm{i} = \mathrm{n} \\ \dfrac{ql_1^2}{8} - для\ \mathrm{i} = 2 \ldots \mathrm{n} - 1 \end{cases} \tag{9.5}$$

Максимальный момент M_{ij} между опорами i и j:

для схемы опирания по рис.9.1,а

$$\mathrm{M}_{12} = \mathrm{M}_0 + \mathrm{F}_1\left(\frac{L}{2} - 1\right) - \frac{q}{2}\left(\frac{L}{2} + \frac{2}{3}H\right)^2; \tag{9.6}$$

M_{ij} - для схемы опирания по рис.9.2,б - не определяется.

Поперечное усилие в сечении оболочки над i-й опорой:

для схемы опирания по рис.9.1,а

$$\mathrm{Q}_1 = \mathrm{Q}_2 = F_1 \frac{L - 2a}{L + \dfrac{4}{3}H}; \tag{9.7}$$

для схемы опирания по рис.9.1,б

$$\mathrm{Q}_i \approx 0{,}5F_i. \tag{9.8}$$

В случае расчета горизонтальных сосудов и аппаратов с переменными диаметрами и произвольным расположением опор в качестве расчетной схемы для определения опорных усилий, моментов и поперечных усилий над опорами принимают как балку переменного

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

кольцевого сечения, шарнирно опертую в местах расположения опор (рис.9.3).

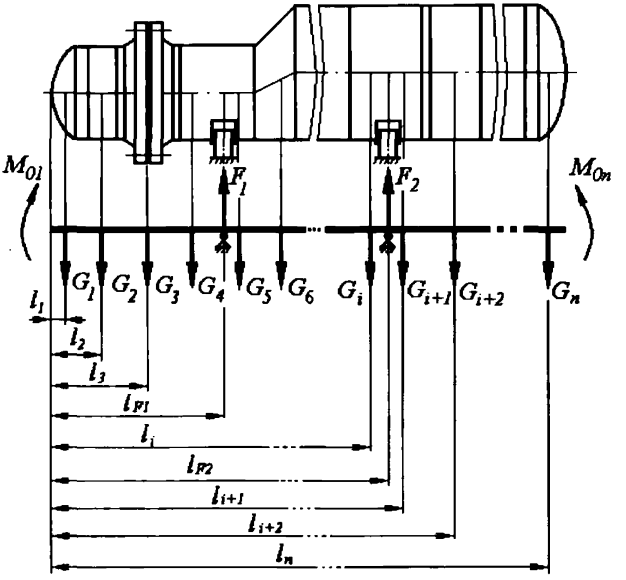


Рис. 9.3. Расчетная схема горизонтального сосуда (аппарата) на седловых опорах

$G_1,\ldots,G_n$ - сосредоточенные весовые нагрузки от веса элементов сосуда с учетом заполняемой жидкости, изоляции, внешних и внутренних устройств, площадок и др.;

F_1, F_2 - опорные нагрузки;

$l_1,\ldots,l_n$ – расстояние от края сосуда до центра приложения нагрузки;

l_{F1}, l_{F2} - расстояние от края сосуда до опорной нагрузки.

К концам расчетной модели прикладываются краевые моменты M_{01} и M_{0n}, определяемые смещением горизонтальной составляющей силы гидростатического давления относительно оси обечайки, в месте расположения седловой опоры [45]:

$$M_{01(0n)} = \xi \rho_{ж} \pi \frac{D_{F1(2)}^4}{64} g, \qquad (9.9)$$

где $D_{F1(2)}$ - диаметр обечайки в месте расположения 1(2)–ой седловой опоры;

ξ - коэффициент заполнения сосуда жидкостью;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ξ - коэффициент заполнения сосуда жидкостью;

$\rho_{ж}$ - плотность жидкости.

Определение приведенных нагрузок и расстояния до центра тяжести отдельных элементов сосудов (аппаратов) приведено в Приложении 3.

После определения весовых нагрузок G_i, длин l_i, $L_{F1(2)}$ элементов сосуда и краевых моментов $M_{01(0n)}$ определяются силы и моменты над опорами.

В случае применения двух опор

$$F_1 = \frac{-M_{01} + M_{0n} - \sum_{i=1}^{n} G_i l_i + \sum_{i=1}^{n} G_i l_{F2}}{l_{F2} - l_{F1}};\ F_2 = \sum_{i=1}^{n} G_i - F_1;$$

$$M_{F1} = \sum_{i=1}^{n1} G_i (l_{F1} - l_i) - M_{01};\ M_{F2} = -\sum_{i=n2}^{n} G_i (l_i - l_{F2}) + M_{0n} \quad (9.10)$$

где n_1 – номер последнего элемента перед *1*-ой опорой; n_2 – номер первого элемента после второй опоры.

Поперечное усилие в сечении оболочки над опорами:

$$Q_1 = \max\left\{\sum_{i=1}^{n1} G_i;\ (F_1 - \sum_{i=1}^{n1} G_i)\right\};\ Q_2 = \max\left\{\sum_{i=n2}^{n} G_i;\ (F_2 - \sum_{i=n2}^{n} G_i)\right\} \quad (9.11)$$

В случае применения 3-х и более опор расчетные усилия определяются по правилам строительной механики как статически неопределимую систему.

9.1.2. Несущая способность обечайки в области опорного узла

На рис.9.4 представлена расчетная схема седловой опоры без колец жесткости.

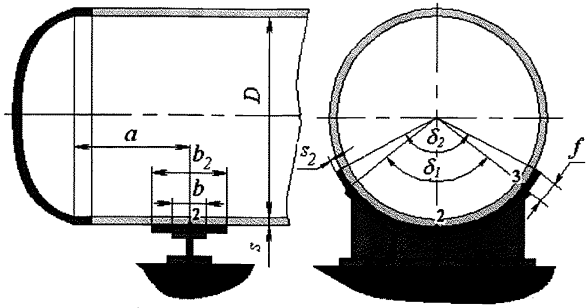


Рис.9.4. Седловая опора без колец жесткости

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

9.1.2.1. Цилиндрическая обечайка без подкладных листов и колец жесткости

Условия применения расчетных формул:

$$60^0 \le \delta_1 \le 180^0;\ \frac{s-c}{D} \le 0{,}05 \qquad (9.12)$$

Несущая способность проверяется в точках (2) и (3) каждой опоры в осевом и окружном направлениях соответственно.

Для определения допускаемых опорных усилий необходимо определить коэффициенты, учитывающие особенности геометрии и расположения опор.

Параметр, определяемый шириной пояса опоры:

$$\beta = 0{,}91\frac{b}{\sqrt{D(s-c)}} \qquad (9.13)$$

Коэффициенты, учитывающие влияние ширины пояса опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{10} = \max\left\{\frac{e^{-\beta}\sin\beta}{\beta};\ 0{,}25\right\}; \qquad (9.14)$$

$$K_{11} = \frac{1-e^{-\beta}\cos\beta}{\beta}; \qquad (9.15)$$

$$K_{17} = \frac{1}{1+0{,}6\sqrt[3]{\frac{D}{s-c}\cdot\frac{b}{D}\delta_1}}. \qquad (9.16)$$

Коэффициенты, учитывающие влияние угла охвата опоры (δ_1 подставляют в радианах):

$$K_{12} = \frac{1{,}15-0{,}1432\delta_1}{\sin(0{,}5\delta_1)}; \qquad (9.17)$$

$$K_{13} = \frac{\max\left\{1{,}7-\frac{2{,}1\delta_1}{\pi};\ 0\right\}}{\sin(0{,}5\delta_1)}; \qquad (9.18)$$

$$K_{14} = \frac{1{,}45-0{,}43\delta_1}{\sin(0{,}5\delta_1)}; \qquad (9.19)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$K_{19} = \frac{5}{6\sqrt[3]{\frac{D}{s-c}} \cdot \delta_1}. \qquad (9.20)$$

Параметр, определяемый расстоянием до днища:

$$\gamma = 2{,}83\frac{a}{D}\sqrt{\frac{s-c}{D}} \qquad (9.21)$$

Коэффициенты, учитывающие влияние расстояния до днища:

$$K_{15} = \min\left\{1{,}0;\ \frac{0{,}8\sqrt{\gamma}+6\gamma}{\delta_1}\right\}; \qquad (9.22)$$

$$K_{16} = 1 - \frac{0{,}65}{1+(6\gamma)^2}\sqrt{\frac{\pi}{3\delta_1}}. \qquad (9.23)$$

Общее осевое мембранное напряжение изгиба в области опорного узла:

$$\overline{\sigma}_{mx} = \frac{4M_F}{\pi D^2(s-c)} \qquad (9.24)$$

Предельное напряжение изгиба:

$$[\sigma_i] = K_1[\sigma]\frac{n_T}{K_2}, \qquad (9.25)$$

где

$$K_1 = \left\{\begin{array}{l}\left(\frac{1+3\vartheta_1\cdot\vartheta_2}{3\vartheta_1^2}\right)\left(\pm\sqrt{\frac{9\vartheta_1^2(1-\vartheta_2^2)}{(1+3\vartheta_1\vartheta_2)^2}+1}-1\right); \quad K_1 \geq 0 \ при\ \vartheta_1 \neq 0 \\ 1{,}5(1-\vartheta_2^2) \quad при\ \vartheta_1 = 0\end{array}\right\};$$

$$K_2 = \begin{cases}1{,}2 - для\ рабочих\ условий; \\ 1{,}0 - для\ условий\ испытания\ и\ монтажа.\end{cases}$$

Для определения $[\sigma_i]$ в расчетных точках используются значения ϑ_1 и ϑ_2, приведенные в таблице 9.1. Для ϑ_2 принимают соответственно $\vartheta_{2,1}$ или $\vartheta_{2,2}$, дающие наименьшее предельное

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

напряжение изгиба. При $\vartheta_2 < 0$ принимается $\vartheta_2 = |\vartheta_2|$, а знак коэффициента ϑ_1 меняется на противоположный.

Таблица 9.1

Расчетная точка	ϑ_1	$\vartheta_{2,1}$ ($p = 0$)	$\vartheta_{2,2}$
2	$-\frac{0{,}23 \cdot K_{13} \cdot K_{15}}{K_{12} \cdot K_{10}}$	$-\bar{\sigma}_{mx} \cdot \frac{K_2}{n_T[\sigma]}$	$\left(\frac{pD}{4(s-c)} - \bar{\sigma}_{mx}\right) \cdot \frac{K_2}{n_T[\sigma]}$
3	$-\frac{0{,}53K_{11}}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17} \cdot \sin(0{,}5\delta_1)}$	0	$\frac{pD}{2(s-c)} \cdot \frac{K_2}{n_T[\sigma]}$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в осевом направлении в т.2 (рис.9.4):

$$[F]_2 = \frac{0{,}7\,[\sigma_i]_2 \sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{10}K_{12}} \qquad (9.26)$$

Допускаемое опорное усилие от нагружения в окружном направлении в т.3 (рис.9.4):

$$[F]_3 = \frac{0{,}9\,[\sigma_i]_3 \sqrt{D(s-c)}(s-c)}{K_{14} \cdot K_{16} \cdot K_{17}} \qquad (9.27)$$

Условие прочности обечайки над опорой:

$$F_i \le \min\{[F]_2, [F]_3\} \qquad (9.28)$$

Эффективное осевое усилие от местных мембранных напряжений:

$$F_e = F\,\frac{\pi}{4}\sqrt{\frac{D}{(s-c)}}K_{13} \cdot K_{15} \qquad (9.29)$$

Условие устойчивости:

$$\frac{|p|}{[p]} + \frac{M_F}{[M]} + \frac{F_e}{[F]} + \left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \le 1, \qquad (9.30)$$

где допускаемые нагрузки $[p]$, $[M]$, $[F]$, $[Q]$ определяются из расчета элемента сосуда, находящегося над опорой (см.п.3).

Для сосудов, работающих под внутренним избыточным давлением, принимается p=0.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

9.1.2.2. Цилиндрическая обечайка с подкладными листами

Дополнительные условия применения расчетных формул:

$$s_2 \geq s\,;\ \delta_2 \geq \delta_1 + 20^0\,. \tag{9.31}$$

При выполнении условия:

$$b_2 \geq K_{19} \cdot D + 1{,}5b \tag{9.32}$$

условие прочности обечайки над опорой:

$$F_i \leq 1{,}5 \min\left\{[F]_2, [F]_3\right\} \tag{9.33}$$

В случае невыполнения условия (9.32) проверка несущей способности проверяется для следующих случаев:

Подкладной лист рассматривается как седловая опора шириной b_2 и углом охвата δ_2, при этом толщину подкладного листа не учитывают.

Подкладной лист рассматривается как усиление стенки сосуда, при этом во всех формулах при расчете допускаемых усилий вместо $(s-c)$ следует подставлять:

$$s_{ef} = (s-c)\sqrt{1+\left(\frac{s_2}{s-c}\right)^2} \tag{9.34}$$

Устойчивость во всех случаях проверяют по (9.30) без увеличения толщины стенки.

9.1.2.3. Цилиндрическая обечайка с кольцом жесткости в области опорного узла

На рис.9.5 представлена расчетная схема седловой опоры с кольцом жесткости в области опорного узла.

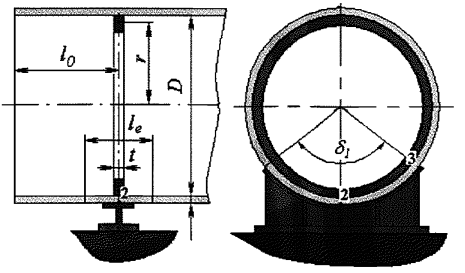


Рис.9.5. Седловая опора с кольцом жесткости

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Условие прочности сосудов, работающих под внутренним избыточным давлением:

$$\frac{pD}{4(s-c)}+\frac{4M_F}{\pi D^2(s-c)}\le[\sigma] \tag{9.35}$$

Устойчивость проверяется по (9.30), принимая F_e=0.

Эффективная толщина s_e и длина l_e обечайки:

$$s_e=(s-c)\left(1-\frac{|p|D}{4(s-c)[\sigma]}\right)\frac{[\sigma]}{[\sigma]_k} \tag{9.36}$$

$$l_e=\min\left\{t+4\sqrt{D(s-c)};\frac{A_k}{s_e}\right\}, \tag{9.37}$$

где A_k определяется по таблице 3.2.

Прочность кольца жесткости, расположенного снаружи сосуда обеспечивается выполнением условия:

$$F_i\le\frac{K_{18}[M_T]\varphi}{(0{,}5D+s+e_4)} \tag{9.38}$$

Прочность кольца жесткости, расположенного внутри сосуда обеспечивается выполнением условия:

$$F_i\le\frac{K_{18}[M_T]\varphi}{(0{,}5D-e_4)} \tag{9.39}$$

Нейтральная ось, проходящая на расстоянии e_4 от поверхности обечайки, разделяет площадь поперечного сечения профиля на две равные части.

K_{18} определяется в зависимости от угла охвата опоры и ее вида по таблице 9.2.

Таблица 9.2

δ_1	K_{18}	
	седловая опора со сплошным сечением	опора в виде двух отдельно стоящих столбиков
60^0	14	-
90^0	21	20
120^0	33	28
150^0	56	50
180^0	103	-

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

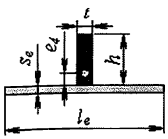
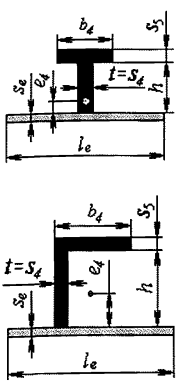
$[M_T]$, e_4 определяется в зависимости от сечения кольца по таблице 9.3. При этом размеры колец жесткости принимаются с учетом суммарной прибавки c_k.

В случае применения профиля, не представленного в табл.9.3, $[M_T]$ следует определять по формуле:

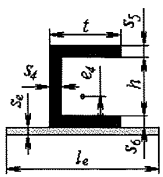
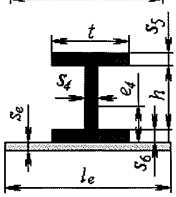
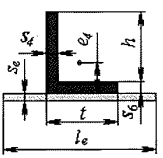
$$[M_T] = W_p[\sigma]_k, \tag{9.40}$$

где W_p - пластический момент сопротивления площади поперечного сечения профиля, включая площадь $l_e s_e$.

Таблица 9.3

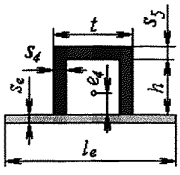
Сечение кольца	e_4	$[M_T]$
	$\dfrac{th - l_e s_e}{2t}$	$0{,}5[t(h-e_4)^2 + te_4^2 + + (2e_4 + s_e)l_e s_e][\sigma]_k$
	$\dfrac{b_4 s_5 + hs_4 - l_e s_e}{2s_4}$	$0{,}5[s_4(h-e_4)^2 + s_4 e_4^2 + + (2e_4 + s_e)l_e s_e + + (2h - 2e_4 + s_5)b_4 s_5][\sigma]_k$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Сечение кольца	e_4	$[M_T]$
	$\frac{hs_4 + ts_5 + 2s_4s_6 - ts_6 - l_e s_e}{2s_4}$, при $hs_4 + ts_5 \geq (ts_6 + l_e s_e)$	$0{,}5[s_4(h + s_6 - e_4)^2 + s_4(e_4 - s_6)^2 + + ts_5(2(h + s_6 - e_4) + s_5) + ts_6(2e_4 - s_6) + + (2e_4 + s_e)l_e s_e][\sigma]_k$
	$\frac{hs_4 + ts_5 + ts_6 - l_e s_e}{2t}$, при $l_e s_e - ts_6 \leq hs_4 + ts_5 < (ts_6 + l_e s_e)$	$0{,}5[s_4 h(2s_6 - 2e_4 + h) + t(s_6 - e_4)^2 + + ts_5(2(h + s_6 - e_4) + s_5) + te_4^2 + + (2e_4 + s_e)l_e s_e][\sigma]_k$
	$\frac{hs_4 + 2s_4s_6 - ts_6 - l_e s_e}{2s_4}$, при $hs_4 \geq (ts_6 + l_e s_e)$	$0{,}5[s_4(h + s_6 - e_4)^2 + s_4(e_4 - s_6)^2 + + ts_6(2e_4 - s_6) + (2e_4 + s_e)l_e s_e][\sigma]_k$
	$\frac{hs_4 + ts_6 - l_e s_e}{2t}$, при $(l_e s_e - ts_6) \leq hs_4 < (ts_6 + l_e s_e)$	$0{,}5[s_4 h(2s_6 - 2e_4 + h) + t(s_6 - e_4)^2 + + te_4^2 + (2e_4 + s_e)l_e s_e][\sigma]_k$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Сечение кольца	e_4	$[M_T]$
	$\dfrac{2s_4h+ts_5-l_es_e}{4s_4}$	$0{,}5[2s_4(h-e_4)^2+2s_4e_4^2+(2e_4+s_e)l_es_e+$ $+(2h-2e_4+s_5)ts_5][\sigma]_k$

9.1.3. Несущая способность обечайки сосуда между опорными узлами

Для сосудов, работающих под внутренним избыточным давлением и осевым растягивающим усилием, условие прочности для i-го элемента в случае цилиндрической обечайки:

$$\frac{pD}{4(s-c)}+\frac{1}{\pi\, D(s-c)}\left(F\pm\frac{4MK_9}{D}\right)\le[\sigma]\varphi, \qquad (9.41)$$

где $K_9=\max\{z;1{,}0\}$ - коэффициент, учитывающий частичное заполнение жидкостью.

$$z=1{,}6-0{,}20924(w-1)+0{,}028702w(w-1)+0{,}4795\cdot10^{-3}w(w-1)-0{,}2391\cdot10^{-6}wy(w-1)-$$
$$-0{,}29936\cdot10^{-2}(w-1)w^2-0{,}85692\cdot10^{-6}(w-1)y^2+0{,}88174\cdot10^{-6}w^2(w-1)y-$$
$$-0{,}75955\cdot10^{-8}y^2(w-1)w+0{,}82748\cdot10^{-4}(w-1)w^3+0{,}48168\cdot10^{-9}(w-1)y^3$$

$$y=\frac{D_p}{s-c};\ w=\frac{L_{экв}}{D_p}, \qquad (9.42)$$

где $L_{экв}$ - общая длина обечаек всего сосуда, включая отбортовки днищ.

В случае конической обечайки:

$$\frac{pD_R}{4(s-c)}+\frac{1}{\pi\, D_K\cos\alpha\,(s-c)}\left(\mathrm{F}\pm\frac{4MK_9}{D_K}\right)\le[\sigma]\varphi, \qquad (9.43)$$

где $D_K=\left(D_1+\dfrac{D_2-D_1}{L}x\right);\ D_R=\dfrac{D_K}{\cos\alpha}$.

Условие прочности для обечайки зависит от текущего положения сечения и проверяется по всей длине элемента. Определение поперечного

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

усилия и изгибающего момента для элементов сосудов (аппаратов), расположенных между опорными узлами приведено в Приложении 4.

Для элементов, работающих под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия условие устойчивости:

$$\frac{p}{[p]}+\frac{\mathrm{F}}{[\mathrm{F}]}+\frac{M}{[M]}+\left(\frac{Q}{[Q]}\right)^2 \le 1{,}0, \qquad (9.44)$$

где допускаемые нагрузки $[p]$, $[M]$, $[F]$, $[Q]$ определяются из расчета соответствующих элементов сосуда (см.пп.3,7).

Для сосудов, работающих под внутренним избыточным давлением, принимается p=0.

9.2. Вертикальные сосуды и аппараты на опорных лапах

Расчет на прочность и устойчивость цилиндрических или конических обечаек вертикальных сосудов и аппаратов от воздействия опорных усилий проводится на основании [4]. В отличие от [4] в формуле (9.39) для определения усилия, действующего на опорную лапу для 3 опор, в знаменателе вместо 0,866 подставляется 0,75.

9.2.1. Расчетная схема

На рис.9.6 показаны расчетные схемы опорных лап, присоединенных к цилиндрическим или коническим обечайкам.

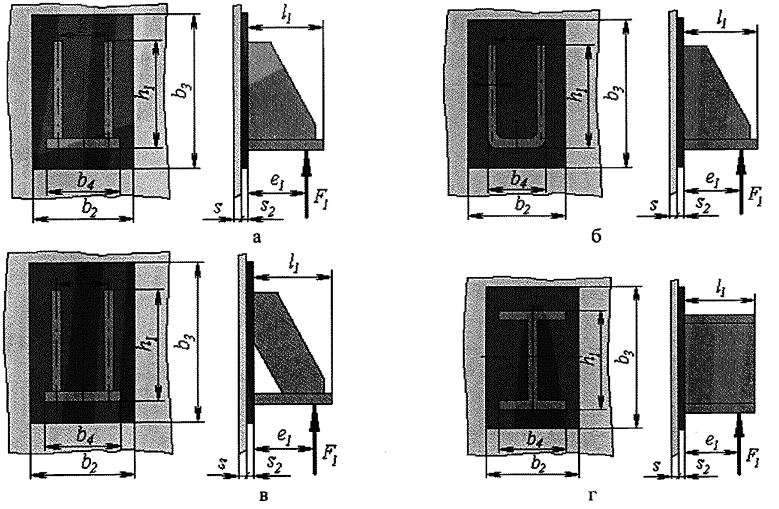


Рис.9.6. Опорные лапы

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Условия применения расчетных формул:

$$\frac{s-c}{D_p} \le 0{,}05\,, \tag{9.45}$$

где $D_p = \begin{cases} D - \text{в случае цилиндрических обечаек;} \\ \dfrac{D_K}{\cos\alpha} - \text{в случае конических обечаек.} \end{cases}$; D_K - диаметр конической обечайки в месте расположения опор.

При наличии подкладного листа:

$$s_2 \ge s\,; \quad g \ge 0{,}2h_1\,; \quad b_2 \ge 0{,}6b_3\,; \quad b_3 \le 1{,}5h_1 \tag{9.46}$$

При $b_2 < 0{,}6b_3$ значение $[F]_1$, полученное по (9.57), необходимо умножить на $\left(0{,}4 + \dfrac{b_2}{b_3}\right)$.

9.2.2. *Определение расчетных усилий*

Усилие, действующее на опорную лапу:

$$F_1 = \begin{cases} \dfrac{G}{2} + \dfrac{M}{D + 2(e_1 + s + s_2)} & - \text{для } n = 2 \text{ и } n = 4; \\ \dfrac{G}{3} + \dfrac{M}{0{,}75(D + 2(e_1 + s + s_2))} & - \text{для } n = 3. \end{cases} \tag{9.47}$$

где G - общая весовая нагрузка элементов сосуда, включая вес жидкости, внутренних и внешних устройств.

В случае конических обечаек принимается $D = D_K$.

Если точное значение e_1 неизвестно, то принимается $e_1 = \dfrac{5}{6} l_1$.

При наличии момента M аппарат допускается устанавливать на две опоры при условии действия момента в плоскости опор.

При количестве опор $n = 4$, обеспечивающих равномерное распределение нагрузок между всеми опорными лапами (точный монтаж, установка прокладок, подливка бетона и т.п.), усилие на опорную лапу определяется как:

$$F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{D + 2(e_1 + s + s_2)} \tag{9.48}$$

9.2.3. *Несущая способность обечайки*

Несущая способность обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа определяется выполнением условия:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$F_1 \le [F]_1 = \frac{[\sigma_i] h_1 (s-c)^2}{K_7 e_1} \qquad (9.49)$$

При $\frac{g}{h_1} < 0{,}5$ значение $[F]_1$, полученное по (9.49), необходимо умножить на $\left(0{,}5 + \frac{g}{h_1}\right)$.

Коэффициент K_7 определяется в зависимости от конструкции опорной лапы.

Для конструкций, соответствующих рис.9.6,а,в:

$$K_7 = z, \qquad (9.50)$$

где

$$\ln z = (-5{,}964 - 11{,}395x - 18{,}984y - 2{,}413x^2 - 7{,}286xy - 2{,}042y^2 + 0{,}1322x^3 + 0{,}4833x^2 y + 0{,}8469xy^2 + 1{,}428y^3)\cdot 10^{-2}; \quad x = \ln\left(\frac{D_p}{2(s-c)}\right); \quad y = \ln\frac{h_1}{D_R}.$$

Для конструкций, соответствующих рис.9.6,б:

$$K_7 = \min(u, z), \qquad (9.51)$$

где

$$\ln u = (-26{,}791 - 6{,}936x - 36{,}330y - 3{,}503x^2 - 3{,}357xy + 2{,}786y^2 + 0{,}2267x^3 + 0{,}2831x^2 y + 0{,}3851xy^2 + 1{,}370y^3)\cdot 10^{-2};$$

x; y; z определяются по (9.50).

Для конструкций, соответствующих рис.9.6,г:

$$\ln K_7 = (-29{,}532 - 45{,}958x - 91{,}759y - 1{,}801x^2 - 12{,}062xy - 18{,}872y^2 + 0{,}1551x^3 + 1{,}617x^2 y + 3{,}736xy^2 + 1{,}425y^3)\cdot 10^{-2}; \qquad (9.52)$$

$$x = \ln\left(\frac{D_p}{2(s-c)}\right); \quad y = \ln\frac{b_4}{D_p}.$$

Предельное напряжение изгиба $[\sigma_i]$ определяется по (9.25), причем K_1 вычисляют при $\vartheta_1 = 0{,}3$;

$$\vartheta_2 = K_2 \frac{\overline{\sigma}_m}{n_T [\sigma] \varphi} \qquad (9.53)$$

Значение мембранного напряжения $\overline{\sigma}_m$ зависит от конструкции опоры.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Для опор, соответствующих рис.9.6,а,б,в:

$$\overline{\sigma}_m = \frac{pD_p}{2(s-c)} \tag{9.54}$$

Для опоры по рис.9.6,г в случае цилиндрической обечайки:

$$\overline{\sigma}_m = \frac{pD}{4(s-c)} + \frac{1}{\pi D\ (s-c)}\left(F \pm \frac{4M}{D}\right) \tag{9.55}$$

в случае конической обечайки:

$$\overline{\sigma}_m = \frac{pD_K}{4(s-c)\cos\alpha} + \frac{1}{\pi D_K \cos\alpha (s-c)}\left(F \pm \frac{4M}{D_K}\right) \tag{9.56}$$

Несущая способность обечайки в месте приварки опорной лапы с подкладным листом определяется выполнением условия:

$$F_1 \le [F]_1 = \frac{[\sigma_i] b_3 (s-c)^2}{K_8 (e_1 + s_2)} \tag{9.57}$$

Значение коэффициента K_8:

$$K_8 = \min(v, z), \tag{9.58}$$

где

$$\ln v = (-49{,}919 - 39{,}119x - 107{,}01y_1 - 1{,}693x^2 - 11{,}920xy_1 - 39{,}276y_1^2 + 0{,}237x^3 + 1{,}608x^2y_1 + 2{,}761xy_1^2 - 3{,}854y_1^3)\cdot 10^{-2};\quad y_1 = \ln\frac{b_3}{D_p};$$

x; z определяются по (9.50).

Предельное напряжение изгиба $[\sigma_i]$ определяется по (9.25), причем K_1 вычисляют при $\vartheta_1 = 0{,}4$; ϑ_2 - по (9.53).

9.3. Вертикальные сосуды и аппараты на опорных стойках

Расчет на прочность и устойчивость выпуклых и конических днищ вертикальных сосудов и аппаратов от воздействия опорных усилий проводится на основании [4] и [14]. В отличие от [4] и [14] формулах (9.59), (9.65) для определения усилия, действующего на опоры для n=3, а также в формулах (9.61), (9.67), (9.68) в знаменателе вместо 0,866 подставляется 0,75.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

9.3.1. Расчетные схемы

На рис.9.7 показаны расчетные схемы опорных стоек, присоединенных к выпуклым и коническим днищам.

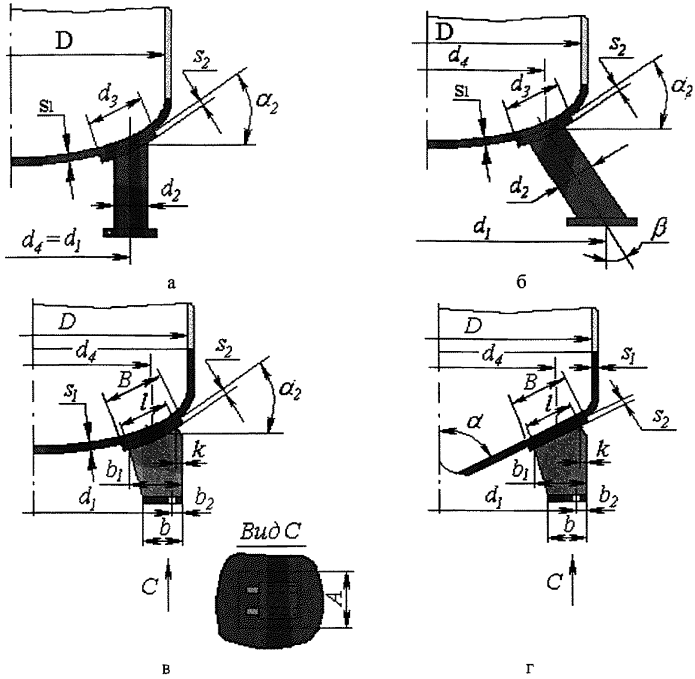


Рис.9.7. Опорные стойки

а, б – стойки круглого сечения; в, г - опоры-стойки по [27]

Область применения расчетных формул:

сосуды работают под действием внутреннего избыточного давления.

9.3.2. Выпуклое днище на опорных стойках круглого сечения

Дополнительные условия применения расчетных формул:

- диаметр подкладного листа $d_3 \le 1{,}6d_2$;

- к торосферическим днищам опорные стойки должны присоединяться в области сферического сегмента, к эллиптическим – в области $d_4 \le 0{,}8D$;

- взаимное перемещение наклонных стоек исключено.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

9.3.2.1. Определение расчетных усилий

Вертикальное усилие, действующее на опорную стойку:

$$F_1 = \begin{cases} \dfrac{G}{2} + \dfrac{M}{d_4} & - для\ n = 4; \\ \dfrac{G}{3} + \dfrac{M}{0{,}75 d_4} & - для\ n = 3. \end{cases} \qquad (9.59)$$

При количестве стоек $n = 4$, обеспечивающих равномерное распределение нагрузок между всеми опорными лапами (точный монтаж, установка прокладок, подливка бетона и т.п.), усилие определяется как:

$$F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{d_4} \qquad (9.60)$$

Действие момента M допускается только в том случае, если опорные стойки связаны между собой жесткой рамой, препятствующей взаимному перемещению стоек.

При этом должно быть выполнено условие:

$$\begin{cases} \dfrac{G}{2} > \dfrac{M}{d_4} & - для\ n = 4; \\ \dfrac{G}{3} > \dfrac{M}{0{,}75 d_4} & - для\ n = 3. \end{cases} \qquad (9.61)$$

9.3.2.2. Несущая способность днища

Несущая способность выпуклого днища в месте приварки опорной стойки определяется выполнением условий:

$$F_1 \le [F]_1; \qquad (9.62)$$

$$\frac{F_1 - p\dfrac{\pi d_e^2}{4}}{[F]_1} + \frac{p}{[p]_1} \le 1{,}0\ , \qquad (9.63)$$

где $[F]_1 = 1{,}57[\sigma](s_1 - c)^2 \dfrac{\cos\beta}{\cos(\alpha_2 - \beta)}\sqrt{1 + 5\dfrac{d_e^2}{r_m(s_1 - c)}}$ - допускаемое вертикальное усилие;

$$d_e = \begin{cases} d_2 & - для\ опорных\ стоек\ без\ подкладного\ листа; \\ d_3 & - для\ опорных\ стоек\ с\ подкладным\ листом; \end{cases}$$

$[p]_1$ - допускаемое внутреннее избыточное давление в срединной части выпуклого днища, определяемое по п.4;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

r_m и α_2 определяется в соответствии с таблицей 9.4.

Таблица 9.4

	Вид днища					
	Сферическое днище	Эллиптическое днище	Эллиптическое днище с $H = 0{,}25D$	Торосферическое днище типов		
				A	B	C
r_m	$\frac{D}{2}$	$\frac{\frac{D^2}{2H}\sqrt{1-d_4^2\frac{D^2-4H^2}{D^4}}}{1+\frac{1}{1-d_4^2\frac{D^2-4H^2}{D^4}}}$	$\frac{2D\sqrt{1-\frac{3}{4}\left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}{1+\frac{1}{1-\frac{3}{4}\left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}$	D	$0{,}9D$	$0{,}8D$
$\sin\alpha_2$	$\frac{d_4}{D}$	$\frac{d_4}{\frac{D^2}{2H}\sqrt{1-d_4^2\frac{D^2-4H^2}{D^4}}}$	$\frac{d_4}{2D\sqrt{1-\frac{3}{4}\left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}$	$\frac{d_4}{2D}$	$\frac{d_4}{1{,}8D}$	$\frac{d_4}{1{,}6D}$

9.3.3. Эллиптическое днище на опорах-стойках

Расчетная схема опор-стоек, присоединенных к эллиптическому днищу представлена на рис.9.7,в.

Дополнительные условия применения расчетных формул:

$$0{,}003 \le \frac{s_1 - c}{D} \le 0{,}02;\ \frac{d_4}{D} \ge 0{,}7;\ 0{,}1 \le \frac{l}{D} \le 0{,}35;\ B \ge 1{,}2l;\ A \ge 0{,}6B;\ s_2 \ge s_1 \quad (9.64)$$

9.3.3.1. Определение расчетных усилий

Вертикальное усилие, действующее на опору-стойку:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{G}{2} + \frac{M}{d_1} & - для\ n = 4; \\ \frac{G}{3} + \frac{M}{0{,}75d_1} & - для\ n = 3. \end{cases} \quad (9.65)$$

где $F > 0$ при внешней осевой сжимающей нагрузке; $F < 0$ при внешней осевой растягивающей нагрузке;

При количестве стоек $n = 4$, обеспечивающих равномерное распределение нагрузок между всеми опорными лапами (точный монтаж, установка прокладок, подливка бетона и т.п.), усилие определяется как:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{d_1} \tag{9.66}$$

При действии изгибающего момента M необходимо выполнить расчет на прочность фундаментного болта от действия растягивающего усилия:

$$F_б = \begin{cases} \dfrac{M}{d_1} - \dfrac{G}{2} & - для\ n = 4; \\ \dfrac{M}{0{,}75 d_1} - \dfrac{G}{3} & - для\ n = 3. \end{cases} \tag{9.67}$$

При выполнении условия:

$$\left.\begin{array}{ll} \dfrac{G}{2} > \dfrac{M}{d_4} & - для\ n = 4; \\ \dfrac{G}{3} > \dfrac{M}{0{,}75 d_4} & - для\ n = 3. \end{array}\right\} \tag{9.68}$$

расчет на прочность фундаментного болта производить не требуется.

Меридиональный момент, передаваемый на днище опорной стойкой:

$$M_1 = \frac{1}{2} F_1 (b_1 - b + k) \tag{9.69}$$

9.3.3.2. Несущая способность днища

Несущая способность днища для опор-стоек определяется выполнением условия:

$$\frac{F_1 \cos \alpha_2}{[F_1]} + \frac{M_1}{[M_1]} + \frac{p}{[p]} \le 1, \tag{9.70}$$

где $[p]$ – допускаемое внутреннее давление, определяемое по п.4.2.

α_2 определяется в соответствии с таблицей 9.4, где $d_4 = d_1 + 2b_2 - k - b_1$.

Допускаемое нормальное усилие для неподкрепленного эллиптического днища:

$$[F_1] = \frac{k_1 m_T \left(0{,}2 + \dfrac{d_4}{D}\right)}{n_{пр}}, \tag{9.71}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где $m_T = \dfrac{R_{0,2}(s-c)^2}{4}$ - предельный момент сопротивления;

$n_{пр} = \begin{cases} 2{,}4 & \text{– для рабочего режима;} \\ 1{,}8 & \text{– для режима испытаний} \end{cases}$ - коэффициент запаса прочности.

Допускаемый меридиональный момент для неподкрепленного эллиптического днища:

$$[M_1] = \frac{k_2 m_T D\left(0{,}2 + \dfrac{d_4}{D}\right)}{n_{пр}} \qquad (9.72)$$

Коэффициенты k_1 и k_2 в зависимости от относительной толщины днища $\dfrac{(s-c)}{D}$ и относительной длины линии контакта опоры с днищем $\dfrac{l}{D}$ определяются по рис.9.8 и 9.9 соответственно.

Длина линии контакта опоры с днищем:

$$l = \frac{(b_1 - k)}{\cos\alpha_2} \qquad (9.73)$$

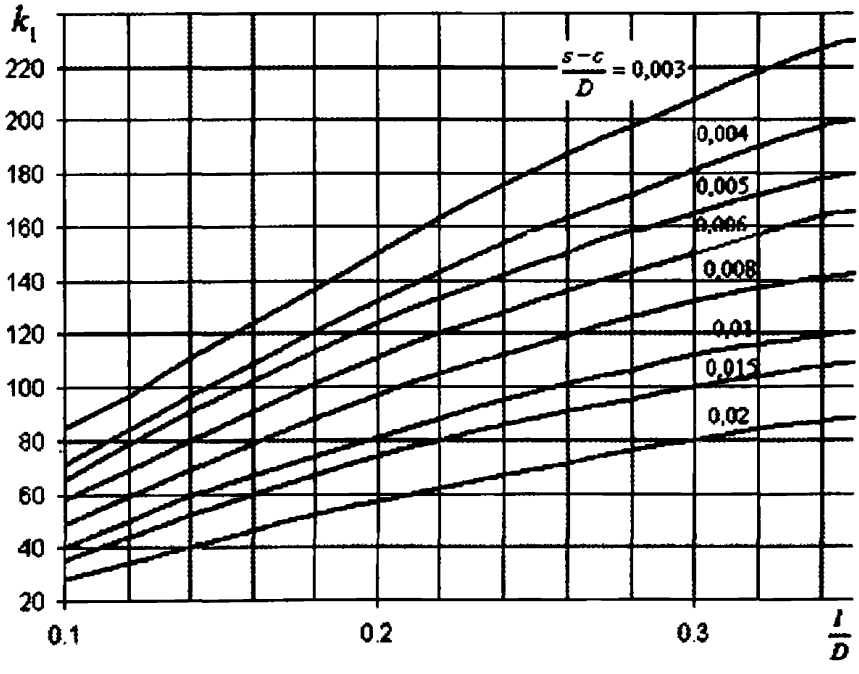


Рис.9.8

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

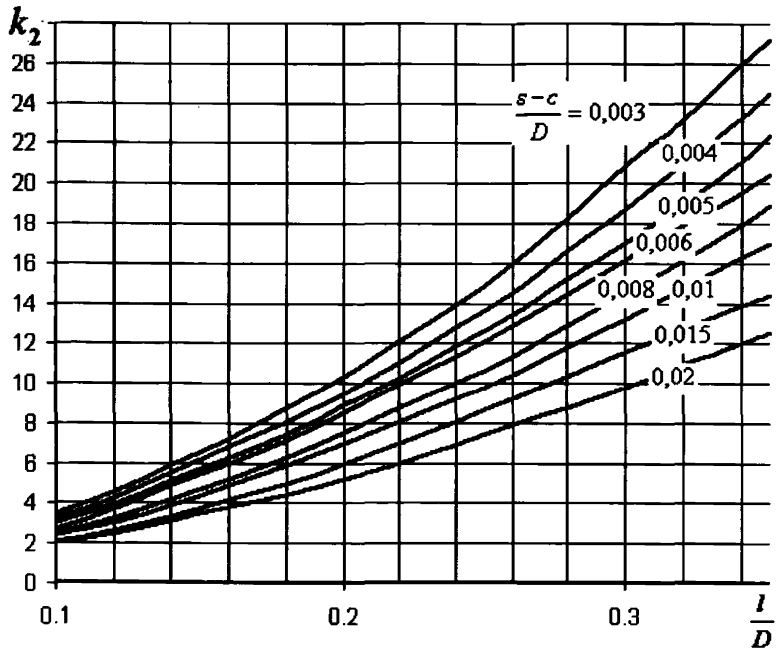


Рис.9.9

Допускаемое нормальное усилие для подкрепленного подкладным листом эллиптического днища:

$$[F_1] = \frac{k_1 k_3 m_T \left(0{,}2 + \frac{d_4}{D}\right)}{n_{пр}} \qquad (9.74)$$

Допускаемый меридиональный момент для подкрепленного подкладным листом эллиптического днища:

$$[M_1] = \frac{k_2 k_4 m_T D \left(0{,}2 + \frac{d_4}{D}\right)}{n_{пр}} \qquad (9.75)$$

Коэффициенты k_3 и k_4 определяются по рис.9.10 и 9.11 соответственно.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

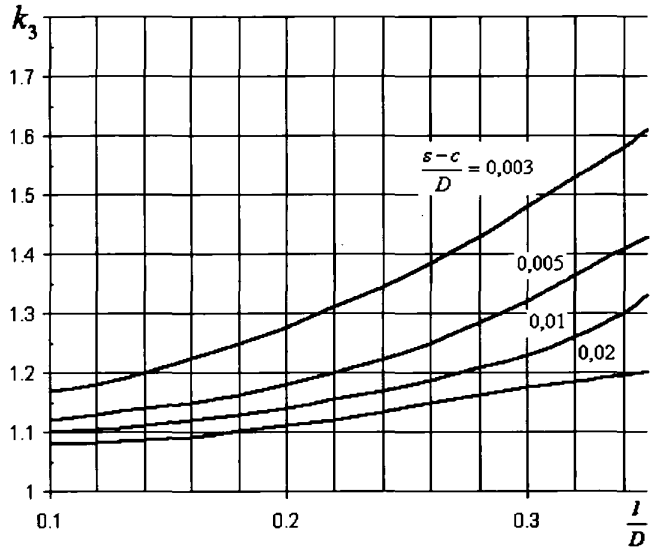


Рис.9.10

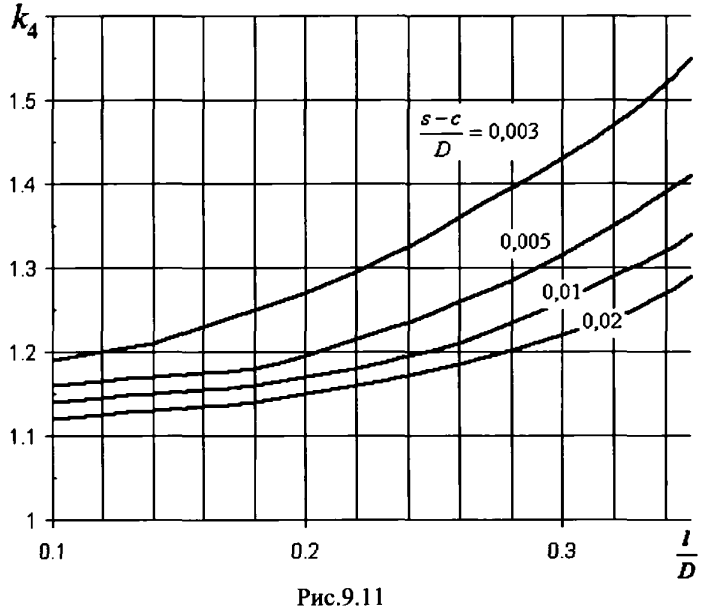


Рис.9.11

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

9.3.4. Коническое днище на опорах-стойках

Расчетная схема опор-стоек, присоединенных к коническому днищу представлена на рис.9.7,г.

Дополнительные условия применения расчетных формул:

$$0{,}002 \le \frac{s_1 - c}{D_p} \le 0{,}02;\ 0{,}1 \le \frac{l}{D_p} \le 0{,}4;\ B \ge 1{,}2l;\ A \ge 0{,}4B;\ s_2 \ge s_1;\ 60^0 \le 2\alpha \le 120^0 \quad (9.76)$$

где $D_p = \dfrac{d_1 + 2b_2 - k - b_1}{\cos\alpha}$ - расчетный диаметр.

9.3.4.1. Определение расчетных усилий

Расчетные усилия и моменты, действующие на опору-стойку, определяют по формулам (9.65-9.69).

9.3.4.2. Несущая способность днища

Несущая способность днища для опор-стоек определяется выполнением условия:

$$\frac{F_1 \sin\alpha}{[F_1]} + \frac{M_1}{[M_1]} + \frac{p}{[p]} \le 1, \quad (9.77)$$

где $[p]$ – допускаемое внутреннее давление, определяемое по п.7.

Допускаемое нормальное усилие для неподкрепленного конического днища:

$$[F_1] = \frac{k_5 m_T}{n_{пр}}, \quad (9.78)$$

где $m_T = \dfrac{R_{0,2}(s-c)^2}{4}$ - предельный момент сопротивления;

$n_{пр} = \begin{cases} 2{,}4 & \text{– для рабочего режима;} \\ 1{,}8 & \text{– для режима испытаний} \end{cases}$ - коэффициент запаса прочности.

Допускаемый меридиональный момент для неподкрепленного конического днища:

$$[M_1] = \frac{k_6 m_T D_p}{n_{пр}} \quad (9.79)$$

Коэффициенты k_5 и k_6 в зависимости от относительной толщины днища $\dfrac{(s-c)}{D_p}$ и относительной длины линии контакта опоры с днищем $\dfrac{l}{D_p}$ определяются по рис.9.12 и 9.13 соответственно.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Длина линии контакта опоры с днищем:

$$l = \frac{(b_1 - k)}{\sin\alpha} \qquad (9.80)$$

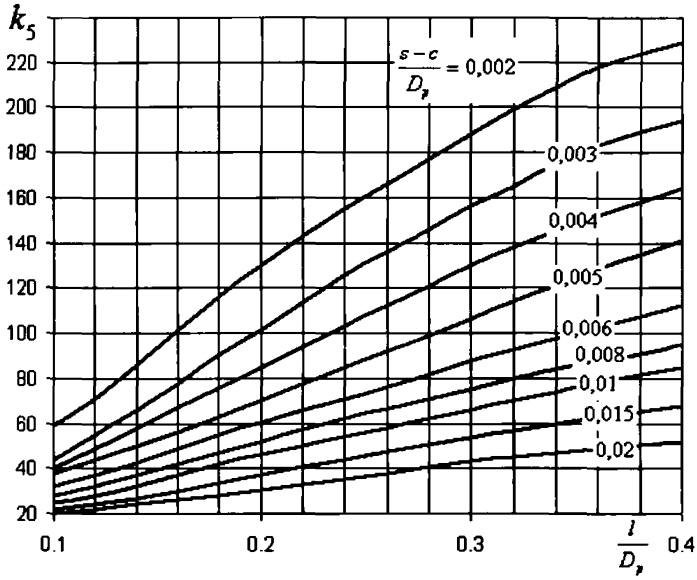


Рис.9.12

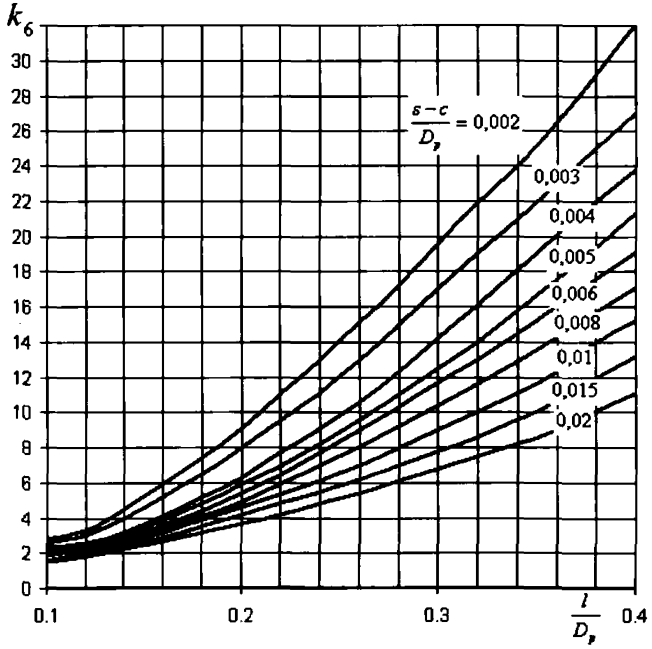


Рис.9.13

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

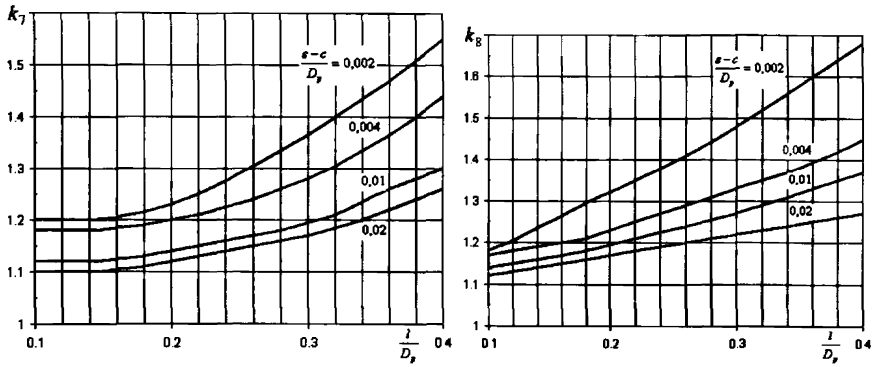
Допускаемое нормальное усилие для подкрепленного подкладным листом конического днища:

$$[F_1] = \frac{k_5 k_7 m_T}{n_{np}} \tag{9.81}$$

Допускаемый меридиональный момент для подкрепленного подкладным листом конического днища:

$$[M_1] = \frac{k_6 k_8 m_T D_p}{n_{np}} \tag{9.82}$$

Коэффициенты k_7 и k_8 определяются по рис.9.14.



а б

Рис.9.14

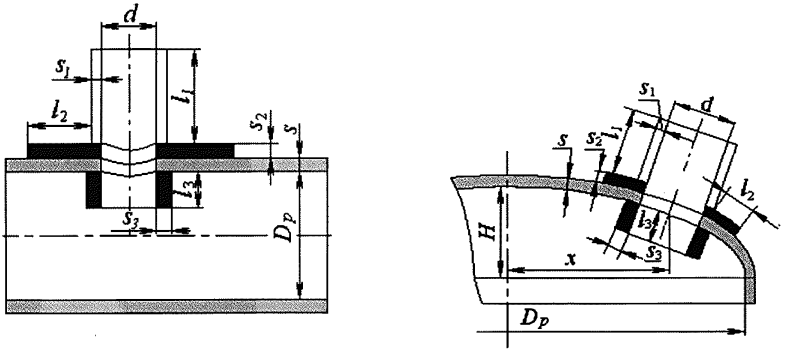
© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

10. Укрепление отверстий

Расчет на прочность укрепления отверстий проводится на основании [5]. В отличие от [5] при определении минимальных размеров сварных швов вместо расчетных величин длин и толщин подставляются исполнительные.

10.1. Расчетные схемы

На рис.10.1 представлены общие расчетные схемы соединения штуцера с обечайкой (а) и днищем (б).



а б

Рис.10.1. Расчетные схемы штуцера

Пределы применения расчетных формул и номограмм ограничиваются условиями, приведенными в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Наименование параметров	Условия применения формул для расчета укрепления отверстий		
	в цилиндрических обечайках	в конических обечайках, переходах или днищах	в эллиптических сферических и торосферических днищах
Отношение диаметров	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \le 1{,}0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D_K} \le 1{,}0$	$\frac{d_p - 2c_s}{D} \le 0{,}6$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Отношение толщины стенки обечайки или днища к диаметру	$\frac{s-c}{D} \le 0{,}1$	$\frac{s-c}{D_K} \le \frac{0{,}1}{\cos\alpha}$	$\frac{s-c}{D} \le 0{,}1$

Приведенные методы расчета применимы для определения размеров укрепляющих элементов, а также допускаемых давлений цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и конических днищ с круглыми и овальными отверстиями.

При значениях отношений, превышающих пределы, установленные в табл. 10.1, рекомендуется использовать специальные методы расчета на прочность укреплений отверстий, в частности метод конечных элементов.

При установке наклонных штуцеров с круговым поперечным сечением настоящий метод применим, если угол γ (рис.10.2,а) не превышает 45°, а отношение осей овального отверстия d_1 и d_2 (рис.10.2,б) удовлетворяет условию:

$$\frac{d_1}{d_2} \le 1 + 2\frac{\sqrt{D_p(s-c)}}{d_2} \qquad (10.1)$$

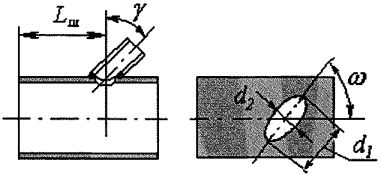


Рис.10.2. Расположение наклонного штуцера

Эти ограничения не распространяются на наклонные штуцера, ось которых лежит в плоскости поперечного сечения обечайки (рис.10.3).

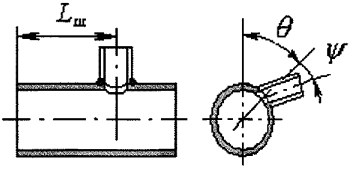


Рис.10.3. Наклонный штуцер в плоскости поперечного сечения обечайки

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Для смещенных (нецентральных) штуцеров на эллиптических днищах угол γ не должен превышать 60°.

Расстояние от края штуцера до края внешней поверхности сферического неотбортованного и торосферического днища, измеряемое по проекции образующей на плоскости основания днища, должно быть не менее $\max\{0.10(D+2s);0.09D+s\}$.

Малые отверстия, диаметр которых удовлетворяет условию:

$$d_p \le \max\left\{(s-c);0{,}2\sqrt{D_p(s-c)}\right\} \qquad (10.2)$$

допускается размещать в краевой зоне выпуклых днищ без специальных расчетных или экспериментальных обоснований.

В краевой зоне эллиптических и полусферических днищ допускается размещение отверстий без ограничений.

10.2. Определение расчетных размеров и коэффициентов

10.2.1. Расчетные диаметры

Расчетные диаметры укрепляемых элементов определяются по формулам:

$D_p = D$ - для цилиндрической обечайки и сферических днищ;

$D_p = 2\mathrm{R}$ - для торосферических днищ вне зоны отбортовки;

$D_p = \dfrac{D_k}{\cos\alpha}$ - для конической обечайки, перехода или днища;

$D_p = \dfrac{D^2}{2H}\sqrt{1-4\dfrac{(D^2-4H^2)}{D^4}\cdot x^2}$ - для эллиптических днищ

Расчетный диаметр отверстия в стенке обечайки, перехода или днища при наличии штуцера с круглым поперечным сечением, ось которого совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия, а также лежит в плоскости поперечного сечения цилиндрической или конической обечайки (рис.10.3):

$$d_p = \overline{d} + 2c_s, \qquad (10.3)$$

где $\overline{d} = d$ - для непроходящих штуцеров;

$\overline{d} = d + 2s_1(1-x_1)$ - для проходящих штуцеров (рис.10.6);

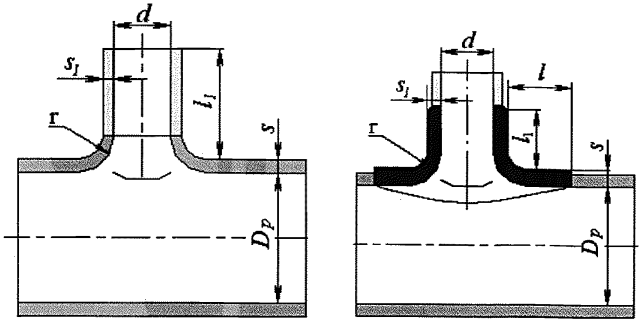
Расчетный диаметр отверстия для штуцера с круглым поперечным сечением при наличии отбортовки или торообразной вставки (рис.10.4):

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$d_p = \overline{d} + 1{,}5\left(r - s_p\right) + 2c_s, \qquad (10.4)$$

где $s_p = \dfrac{pD}{2[\sigma]\varphi - p}$ - расчетная толщина стенки обечайки.



а б

Рис.10.4. Штуцер с отбортовкой (а) и торообразной вставкой (б)

При наличии наклонного штуцера, когда большая ось овального отверстия составляет угол ω с образующей обечайкой (рис.10.2), расчетный диаметр отверстия:

$$d_p = \left(\overline{d} + 2c_s\right)\left(1 + tg^2\gamma\cos^2\omega\right) \qquad (10.5)$$

Для цилиндрических и конических обечаек, когда ось штуцера лежит в плоскости продольного сечения обечайки ($\omega = 0$), а также для всех отверстий в сферических и торосферических днищах расчетный диаметр отверстия:

$$d_p = \frac{\overline{d} + 2c_s}{\cos^2\gamma} \qquad (10.6)$$

Расчетный диаметр овального отверстия для перпендикулярно расположенного штуцера к поверхности обечайки:

$$d_p = \left(\overline{d_2} + 2c_s\right)\left[\sin^2\omega + \frac{\left(\overline{d_1} + 2c_s\right)\left(\overline{d_1} + \overline{d_2} + 4c_s\right)}{2\left(\overline{d_2} + 2c_s\right)^2}\cos^2\omega\right] \qquad (10.7)$$

Для выпуклых днищ $\omega = 0$.

Расчетный диаметр отверстия смещенного штуцера на эллиптическом днище (рис.10.1,б):

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$d_p = \frac{\overline{d} + 2c_s}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{D_p}\right)^2}} \qquad (10.8)$$

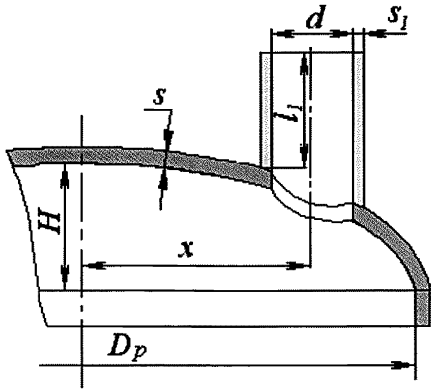


Рис.10.5. Смещенный штуцер на эллиптическом днище

10.2.2. Расчетные толщины стенок

Если ось сварного шва обечайки (днища) удалена от наружной поверхности штуцера на расстояние более чем три толщины укрепляемого элемента (3s), то коэффициент прочности этого сварного соединения следует принимать $\varphi = 1$. В исключительных случаях, когда сварной шов пересекает отверстие, или удален от наружной поверхности штуцера на расстояние менее 3s, коэффициент сварного шва принимается в зависимости от вида и качества сварного шва (таблица 2.2).

Расчетные толщины стенок укрепляемых элементов определяются в соответствии с пп.3-8.

Если плоскость, проходящая через продольный шов вальцованного штуцера и ось этого штуцера, образует угол с плоскостью продольного осевого сечения цилиндрической или конической обечайки не менее 60^0, то коэффициент сварного шва принимается $\varphi_1 = 1$. В остальных случаях $\varphi_1 \le 1$ в зависимости от вида и качества сварного шва.

Для эллиптических днищ, работающих под внутренним давлением, расчетная толщина стенки:

$$s_p = \frac{pD_p}{4\varphi[\sigma] - p} \qquad (10.9)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетная толщина стенки штуцера, нагруженного как внутренним, так и наружным давлением:

$$s_{1p} = \frac{p(d + 2c_s)}{2[\sigma]_1 \varphi_1 - p} \qquad (10.10)$$

Для овального штуцера в этой формуле $d = d_1$.

10.2.3. Расчетные длины штуцеров

Расчетные длины внешней и внутренней частей штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете:

$$l_{1p} = \min\left\{l_1 ; 1{,}25\sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)}\right\}, \qquad (10.11)$$

$$l_{3p} = \min\left\{l_3; 0{,}5\sqrt{(d + 2c_s)(s_3 - 2c_s)}\right\} \qquad (10.12)$$

Для овального штуцера в формулах (10.11) и (10.12) принимается $d = d_2$.

В случае проходящего штуцера (рис.10.6) $s_3 = s_1$.

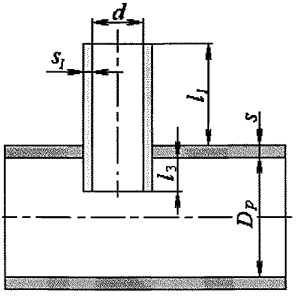


Рис.10.6. Проходящий штуцер

10.2.4. Расчетная ширина

Ширина зоны укрепления в обечайках, переходах и днищах:

$$L_0 = \sqrt{D_p(s - c)} \qquad (10.13)$$

Расчетная ширина зоны укрепления в стенке обечайки, перехода или днища в окрестности штуцера при наличии торообразной вставки (рис.10.4,б) или вварного кольца (рис.10.7):

$$l_p = \min\{l; L_0\} \qquad (10.14)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

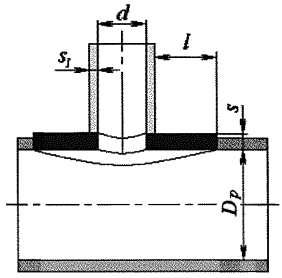


Рис.10.7. Укрепление отверстия вварным кольцом

В случае отбортовки (рис.10.4,а), а также при отсутствии торообразной вставки или вварного кольца:

$$l_p = L_0 \tag{10.15}$$

Расчетная ширина накладного кольца:

$$l_{2p} = \min\left\{l_2; \sqrt{D_p(s_2 + s - c)}\right\} \tag{10.16}$$

Для отверстий, удаленных от от других конструктивных элементов на расстояние $L_к < L_o$, расчетная ширина l_p, l_{2p} определяется следующим образом:

для зоны соединения обечайки с кольцом жесткости, плоским днищем, трубной решеткой - по формулам (10.14) или (10.15) и (10.16);

для зоны соединения конической обечайки с другой обечайкой и обечайки с коническим или выпуклым днищем, а также с фланцем или седловой опорой сосуда по формулам:

$$l_p = L_к; \quad l_{2p} = \min\left\{l_2; L_к\right\} \tag{10.17}$$

Отношения допускаемых напряжений:

1) для внешней части штуцера $x_1 = \min\left\{1{,}0; \dfrac{[\sigma]_1}{[\sigma]}\right\}$;

2) для накладного кольца $x_2 = \min\left\{1{,}0; \dfrac{[\sigma]_2}{[\sigma]}\right\}$;

3) для внутренней части штуцера $x_3 = \min\left\{1{,}0; \dfrac{[\sigma]_3}{[\sigma]}\right\}$,

где $[\sigma]_1$, $[\sigma]_2$, $[\sigma]_3$ - допускаемые напряжения для материала внешней части штуцера, накладного кольца и внутренней части штуцера при расчетной температуре соответственно.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

10.3. Расчет укрепления отверстия

Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие не оказывает на него влияния, что имеет место, когда расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров (рис.10.8) удовлетворяет условию:

$$b \geq \sqrt{D_p'(s-c)} + \sqrt{D_p''(s-c)} \qquad (10.18)$$

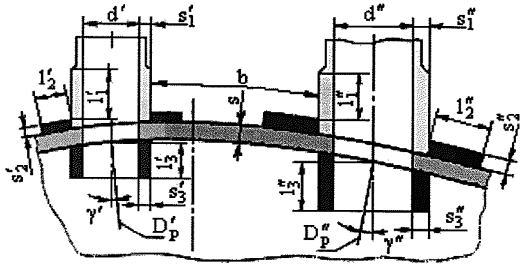


Рис.10.8. Укрепление взаимовлияющих отверстий

Расчетов укрепления одиночного отверстия не требуется, если его расчетный удовлетворяет условию:

$$d_p \leq d_0, \qquad (10.19)$$

где $d_0 = 2\left(\frac{s-c}{s_p} - 0{,}8\right)\sqrt{D_p(s-c)}$ - расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего дополнительного укрепления, при наличии избыточной толщины стенки сосуда.

В случае укрепления отверстия утолщением стенки сосуда или штуцера либо накладным кольцом, либо торообразной вставкой или отбортовкой должно выполняться условие:

$$l_{1p}(s_1 - s_{1p} - c_s)x_1 + l_{2p}s_2x_2 + l_{3p}(s_3 - c_s - c_{s1})x_3 + l_p(s - s_p - c) \geq \geq 0{,}5(d_p - d_{op})s_p \qquad (10.20)$$

где при укреплении отверстия торообразной вставкой или вварным кольцом $s = s^*$;

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

В случае укрепления отверстия без использования накладного кольца при расчете принимается $s_2 = 0$. При этом длина внешней части штуцера l_1 отсчитывается от наружной поверхности аппарата.

При укреплении отверстия штуцером произвольной формы (рис.10.9) условие укрепления выражается в общем виде:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$A_1 + A_3 \geq A = 0{,}5\left(d_p - d_{0h}\right)s_p. \qquad (10.21)$$

где площади A_1 и A_3 определяются без учета прибавок c, c_s и расчетных толщин стенок штуцера s_{1p} и сосуда s_p.

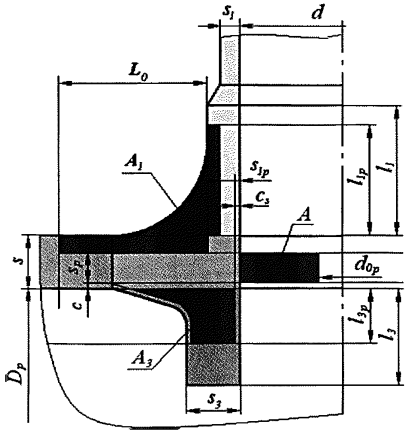


Рис.10.9. Укрепление отверстия штуцером произвольной формы

Если $s_2 > 2s$, то накладные кольца рекомендуется устанавливать снаружи и изнутри сосуда или аппарата, причем толщина наружного кольца принимается $0{,}5s_2$, внутреннего - $\left(0{,}5s_2\right)+c$.

Допускаемое внутреннее избыточное давление:

$$[p] = \frac{2K_1(s-c)\varphi[\sigma]}{D_p + (s-c)V}V, \qquad (10.22)$$

где $$V = \min\left\{1;\ \frac{1 + \dfrac{l_{1p}(s_1 - c_s)\chi_1 + l_{2p}s_2\chi_2 + l_{3p}(s_3 - 2c_s)\chi_3}{l_p(s-c)}}{1 + 0{,}5\dfrac{d_p - d_{op}}{l_p} + K_1\dfrac{d + 2c_s}{D_p}\dfrac{\varphi}{\varphi_1}\dfrac{l_{1p}}{l_p}}\right\};$$

$$K_1 = \begin{cases} 1 - \textit{для цилиндрических обечаек}; \\ 2 - \textit{для выпуклых днищ}. \end{cases}$$

Для овального штуцера в формуле (10.22) принимается $d = d_1$.

10.4. Учет взаимного влияния отверстий в сосудах и аппаратах, нагруженных внутренним давлением

Если условие расположения одиночного отверстия не выполнимо, то расчет взаимовлияющих отверстий выполняется следующим образом: вначале рассчитываются укрепления для каждого из

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

этих отверстий отдельно в соответствии с разд.10.3, затем проверяется достаточность укрепления перемычки между отверстиями, для чего определяется допускаемое давление для перемычки по формуле:

$$[p]=\frac{2K_1(s-c)\varphi[\sigma]}{0{,}5(D'_p+D''_p+(s-c))V}\cdot V, \qquad (10.23)$$

где

$$V=\min\left\{1;\frac{1+\dfrac{l'_{1p}(s'_1-c'_s)\chi'_1+l'_{2p}s'_2\chi'_2+l'_{3p}(s'_3-2c'_s)\chi'_3+l''_{1p}(s''_1-c''_s)\chi''_{11}+l''_{2p}s''_2\chi''_2+l''_{3p}(s''_3-2c''_s)\chi''_3}{b(s-c)}}{K_3\left(0{,}8+\dfrac{d'_p-d''_p}{2b}\right)+K_1\left(\dfrac{d'+2c'_s}{D'_p}\cdot\dfrac{\varphi}{\varphi'_1}\cdot\dfrac{l'_{1p}}{b}+\dfrac{d''+2c''_s}{D''_p}\cdot\dfrac{\varphi}{\varphi''_1}\cdot\dfrac{l''_{1p}}{b}\right)}\right\}.$$

При совместном укреплении двух взаимовлияющих отверстий общим накладным кольцом коэффициент понижения прочности:

$$V=\min\left\{1;\frac{1+\dfrac{l'_{1p}(s'_1-c'_s)\chi'_1+l''_{1p}(s''_1-c_s)\chi''_1+L_2s_2\chi_2+l'_{3p}(s'_3-2c'_s)\chi'_3+l''_{3p}(s''_3-2c''_s)\chi''_3}{b(s-c)}}{K_3\left(0{,}8+\dfrac{d'_p-d''_p}{2b}\right)+K_1\left(\dfrac{d'+2c}{D_p}\cdot\dfrac{\varphi}{\varphi'_1}\cdot\dfrac{l'_{1p}}{b}+\dfrac{d''+2c''_s}{D''_p}\cdot\dfrac{\varphi}{\varphi''_1}\cdot\dfrac{l''_{1p}}{b}\right)}\right\} \qquad (10.24)$$

где $L_2=\min\{b;l'_{2p}+l''_{2p}\}$.

Для овальных штуцеров в формулах (10.23) и (10.24) $d'=d'_1$ и $d''=d''_1$.

Если ось сварного шва обечайки (днища) удалена от наружных поверхностей обоих штуцеров более чем на три толщины стенки укрепляемого элемента (3s) и не пересекает перемычку, то коэффициент прочности этого сварного шва следует принимать $\varphi=1$. В остальных случаях $\varphi\le 1$ в зависимости от вида и качества этого сварного шва.

Коэффициент K_3 для цилиндрических и конических обечаек:

$$K_3=\frac{1+\cos^2\beta}{2} \qquad (10.25)$$

Угол β определяется в соответствии с рис.10.10. Для выпуклых днищ $K_3=1$.

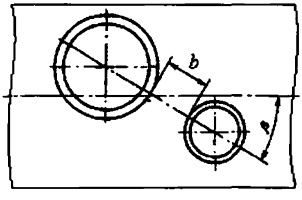


Рис.10.10. Расположение взаимовлияющих отверстий

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчет по разд.10.4 не применим, если имеются взаимовлияющие отверстия с торообразной вставкой или вварным кольцом.

При укреплении двух близко расположенных отверстий другими способами необходимо, чтобы половина площади, необходимой для укрепления в продольном сечении (рис.10.8) размещалась между этими отверстиями.

Для ряда отверстий (рис.10.11) коэффициент понижения прочности:

$$V = \min\left\{1; \frac{2b_1}{(b_1 + d + 2c_s)(1+\cos^2\beta_1)}; \frac{2b_2}{(b_2 + d + 2c_s)(1+\cos^2\beta_2)}\right\} \qquad (10.26)$$

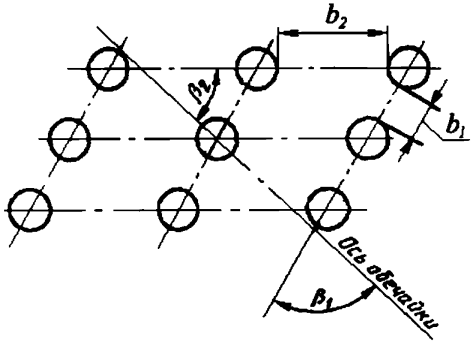


Рис.10.11. Ряды отверстий

10.5. Укрепление отверстий в сосудах и аппаратах, нагруженных наружным давлением

Допустимое наружное давление определяют по формуле:

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_p}{[p]_E}\right)^2}} \qquad (10.27)$$

где $[p]_p$ - допускаемое наружное давление в пределах пластичности, определяется по (10.21) как допускаемое внутреннее избыточное давление для сосуда или аппарата с отверстием при $\varphi = 1$; $\varphi_1 = 1$;

$[p]_E$ - допускаемое наружное давление в пределах упругости, определяемое по пп.3,4 для соответствующих обечайки или днища без отверстий.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

При наличии взаимного влияния отверстий $[p]_p$ определяется аналогично $[p]$ по (10.22) для каждого отверстия в отдельности и по (10.23) для перемычки, а затем из полученных значений принимается меньшее. При этом все коэффициенты сварных швов принимаются равными 1.

Для обечаек или днищ с кольцами жесткости расчет проводится отдельно для каждого участка с отверстиями между соседними кольцами.

10.6. Минимальные размеры сварных швов

Минимальные размеры сварных швов Δ, Δ_1, Δ_2, соединяющих приварные штуцера или накладные кольца с корпусом сосуда или аппарата, должны удовлетворять следующим условиям:

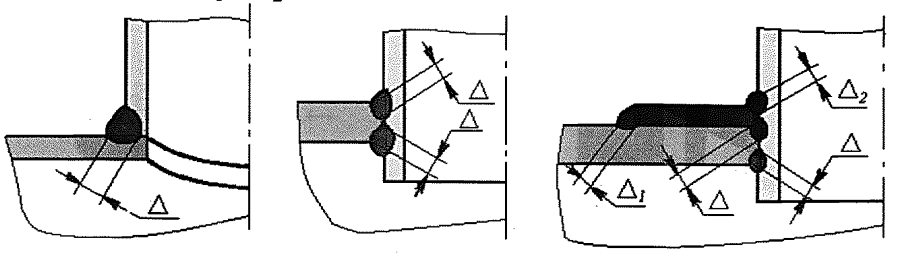
- для штуцеров в соответствии с рис.10.12, а, б

$$\Delta \geq 2{,}1\frac{l_{1p}s_{1p}}{d+2s_{1p}} \tag{10.28}$$

- для накладных колец (рис.10.12,в)

$$\left(1+\frac{2l_{2p}}{d+2s_{1p}}\right)\Delta_1+\Delta_2 \geq 2{,}1\frac{l_{2p}s_2}{d+2s_{1p}}, \tag{10.29}$$

где Δ, Δ_1, Δ_2 - минимальные размеры сечения сварных швов.



а б в

Рис.10.12. Размеры сварных швов

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

11. Прочность и герметичность фланцевых соединений сосудов и аппаратов

Расчет фланцевых соединений сосудов и аппаратов проводится на основании [11].

В отличие от [11] при определении параметров фланцев и коэффициентов жесткости учитывается прибавка на коррозию. При определении допускаемых напряжений учитываются свойства материала сопрягаемой обечайки (втулки).

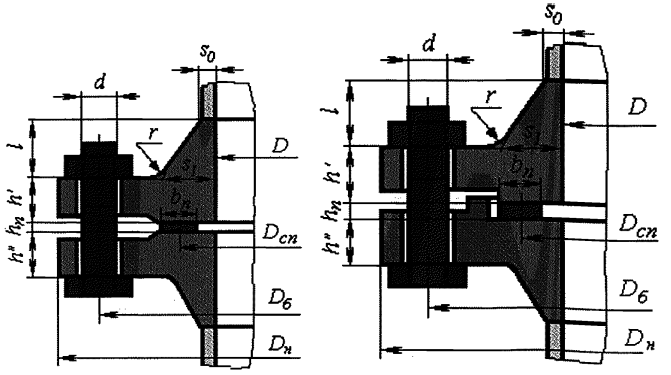
При расчете болтов, а также болтовой нагрузки в условиях монтажа для контактирующих фланцев вместо $P_{б1}$ принято обозначение $P_б$. Для определения угловой податливости эллиптических крышек использовались положения [15].

Для фланцевого соединения со свободными кольцами (черт.3 [11]) принято обозначение: *фланцы свободные на приварных кольцах* (рис11.3).

При выполнении условий применения данный расчет допускается применять для расчета фланцевых соединений трубопроводов и штуцеров.

11.1. Расчетные схемы

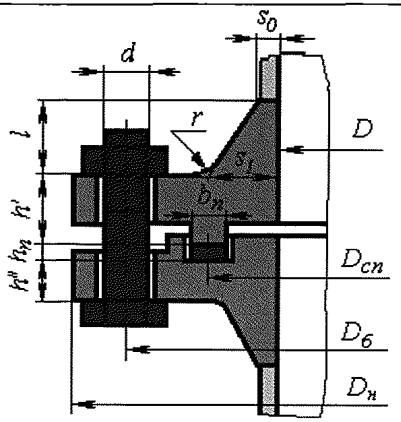
На рис.11.1.-11.5. представлены расчетные схемы фланцевых соединений.



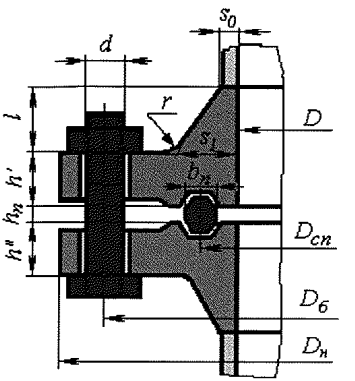
(а) исполнение 2-2 (б) исполнение 1-2 (5-6) (9-10)

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

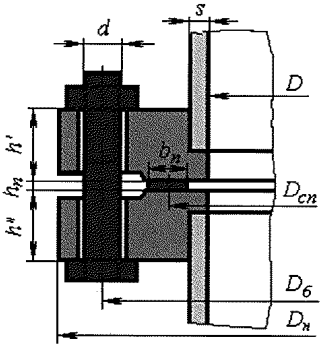


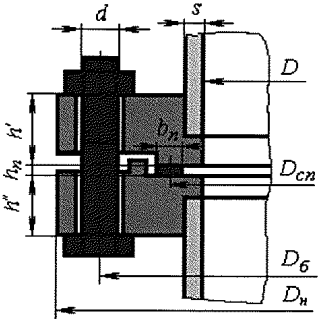
(в) исполнение 3-4 (7-8) (11-12)

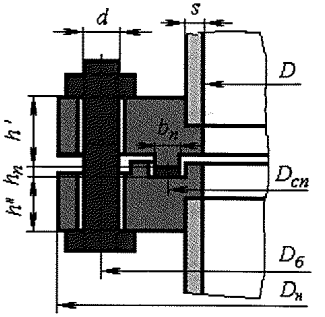


(г)

Рис.11.1. Фланцы, приварные встык по [19] (а,б,в) и [20] (г)







исполнение 1-1 (6-6) (11-11) исполнение 4-5 (9-10) (14-15)
исполнение 2-3 (7-8) (12-13)

Рис.11.2. Плоские приварные фланцы по [21]

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

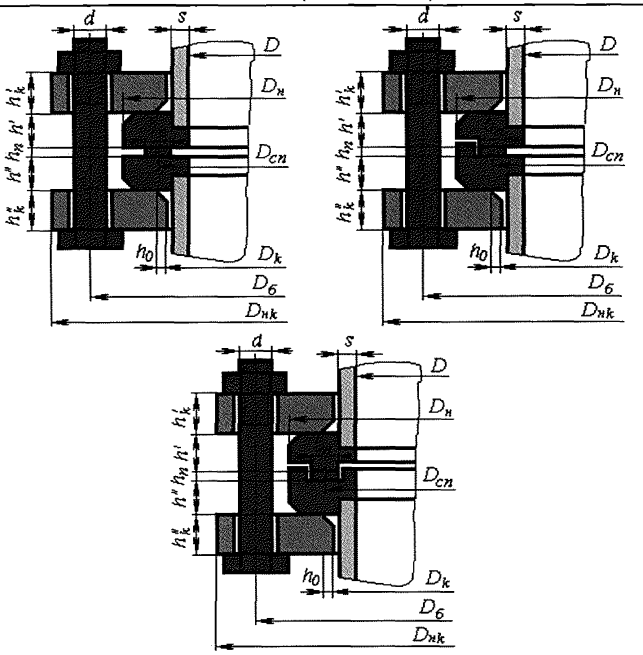
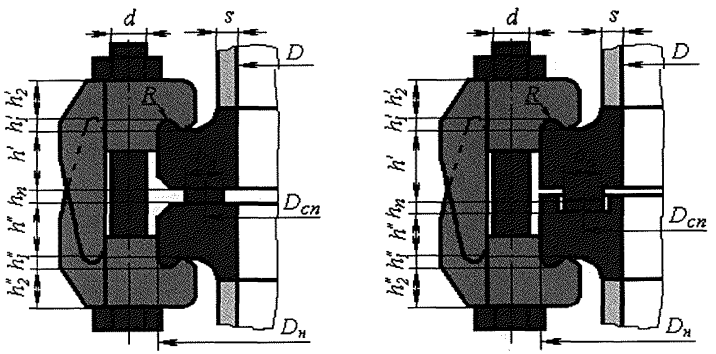


Рис.11.3. Фланцы свободные на приварных кольцах



(а) исполнение 1-1 (б) исполнение 2-3

Рис.11.4. Фланцы под зажимы по [26]

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

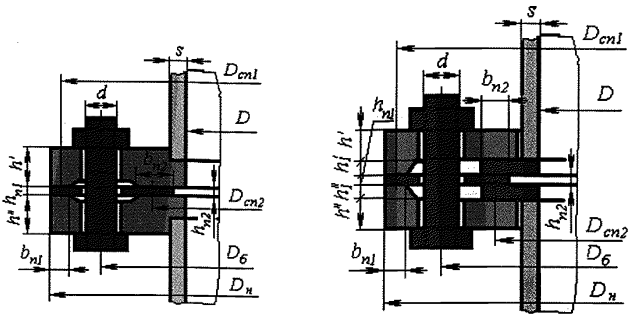


Рис.11.5. Контактирующие фланцы

Условия применения:

$$\frac{D_н}{D} \le 2; \qquad \frac{2h}{D_н - D} \ge 0{,}25 \tag{11.1}$$

В случае соединения с разными (по материалам или размерам) фланцами расчет производится для каждого фланца.

Расчетная температура элементов фланцевого соединения при расчетной температуре $t > 20^0 C$ определяется по табл.11.1.

Таблица 11.1

Тип фланцевого соединения	Изолированные			Неизолированные		
	$t_ф$	$t_к$	$t_б$	$t_ф$	$t_к$	$t_б$
Плоские, приварные встык (рис.11.1.1., 11.1.2.)	t	-	$0{,}97t$	$0{,}96t$	-	$0{,}85t$
Со свободными кольцами (рис.11.1.3.)	t	$0{,}97t$	$0{,}90t$	$0{,}96t$	$0{,}90t$	$0{,}81t$
Приварные под зажимы (рис.11.1.4.)	t	-	$0{,}55t$	$0{,}96t$	-	$0{,}55t$

Характеристики прокладки m, $q_{обж}$, K, $E_п$ принимаются по таблице 11.2.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Таблица 11.2

Тип и материал прокладки	Коэф-т m	Удельное давление обжатия $q_{обж}$, МПа	Допускаемое удельное давление $[q]$, МПа	Коэф-т обжатия К	Условный модуль сжатия $E_n \cdot 10^{-5}$, МПа
Плоская из резины по ГОСТ 7338 с твердостью по Шору А до 65 ед.	0,5	2,0	18,0	0,04	$0{,}3 \cdot 10^{-4}\left(1+\frac{b_n}{2h_n}\right)$
Плоская из резины по ГОСТ 7338 с твердостью по Шору А более 65 ед.	1,0	4,0	20,0	0,09	$0{,}4 \cdot 10^{-4}\left(1+\frac{b_n}{2h_n}\right)$
Плоская из паронита по ГОСТ 481 при толщине не более 2мм*	2,5	20,0	130,0	0,90	0,02
Плоская из картона асбестового по ГОСТ 2850 при толщине 1-3 мм	2,5	20,0	130,0	0,90	0,02
Плоская из фторопласта-4 по ГОСТ 10007 при толщине 1-3 мм	2,5	10,0	40,0	1,0	0,02
Плоская из алюминия марки АД по ГОСТ 21631	4,0	60,0	-	-	-
Плоская из латуни марки Л63 по ГОСТ 2208	4,75	90,0	-	-	-
Плоская из стали 05КП по ГОСТ 9045 или стали 08Х13 по ГОСТ 5632	5,5	125,0	-	-	-
Плоская из стали 08Х18Н10Т по ГОСТ 5632	6,5	180,0	-	-	-

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Плоская из асбеста по ГОСТ 2850 в оболочке из: - алюминия - меди или латуни - стали 05КП - стали типа 12Х18Н10Т	 3,25 3,5 3,75 3,75	 38,0 46,0 53,0 63,0	 -	 -	 0,04 0,05
Спирально-навитая СНП [10] - жидкие среды - воздух, пар, пароводяная смесь -газы с с высокой проникающей способностью (водород, гелий)	 1,5 2,5 4,0	 27,0 50,0 70,0	 -	 -	 -
Кольцо с овальным или восьмигранным сечением из: Ст. 05КП по ГОСТ 9045 или 08Х13 по ГОСТ 5632 стали 08Х18Н10Т	 5,5 6,5	 125,0 180,0	 -	 -	 -

*Для сред с высокой проникающей способностью (водород, гелий, легкие нефтепродукты, сжиженные газы и т.п.) $q_{обж}$ = 35,0 МПа.

11.2. Допускаемые напряжения

Допускаемые напряжения для материалов фланца и приварного кольца $[\sigma]_ф$, фланца свободного на приварном кольце $[\sigma]_к$, а также сопрягаемой обечайки $[\sigma]_ш$ при расчете статической прочности определяются по Приложению 1 или по формулам 2.1, 2.2. При этом коэффициенты запаса прочности определяются по таб.2.1 для рабочих условий.

Допускаемые напряжения для материалов болтов (шпилек):

а) если расчетная температура для болтов из углеродистых сталей не превышает 380^{0}С, низколегированных сталей 420^{0}С, аустенитных сталей 525^{0}С

$$[\sigma]_б = \frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{n_т} \qquad (11.2)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

б) если расчетная температура превышает указанную в п.(а)

$$[\sigma]_б = \min\left(\frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{n_т}; \frac{R_{m/10^5}}{n_д}; \frac{R_{p1,0/10^5}}{n_п} \right) \qquad (11.3)$$

Коэффициент запаса прочности n_T в зависимости от материала и условий нагружения определяется по табл.11.3.

Коэффициент запаса прочности по пределу длительной прочности $n_Д$=1,8.

Коэффициент запаса прочности по пределу ползучести $n_П$=1,1.

Допускаемые напряжения для материалов болтов (шпилек) для рабочих условий принимаются по Приложению 3 [5].

Таблица 11.3.

Материал болтов		n_T			
		Рабочие условия и условия монтажа		Условия испытаний	
		затяжка не контролируется	затяжка контролируется	затяжка не контролируется	затяжка контролируется
Углеродистые стали	$\frac{R_e}{R_m} \geq 0,7$	2,6-2,8	2,4	2,1	1,8
	$\frac{R_e}{R_m} < 0,7$	2,3	2,1	1,7	1,6
Аустенитные стали		1,9	1,8	1,4	1,3

11.3. Расчет вспомогательных величин

Эффективная ширина прокладки, мм:
для плоских прокладок

$$\begin{cases} b_0 = b_n \quad при \quad b_n \leq 15,0мм \\ b_0 = 3,8\sqrt{b_n} \quad при \quad b_n > 15,0мм \end{cases}; \qquad (11.4)$$

для прокладок овального или восьмигранного сечения

$$b_0 = 0,25 b_n . \qquad (11.5)$$

Податливость прокладки:

$$y_n = \frac{h_n K}{E_n \pi D_{cn} b_n} \qquad (11.6)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Для соединения с контактирующими фланцами податливость контактных поясов:

$$y_{n1} = \frac{h_{n1} K}{E_n \pi D_{cn1} b_{n1}}; \quad y_{n2} = \frac{h_{n2} K}{E_n \pi D_{cn2} b_{n2}} \qquad (11.7)$$

Для металлических и асбоцементных прокладок $y_n = 0$.

Расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта:

для фланцев, приварных встык и плоских - $L_{б0} = h' + h'' + h_n$;

для фланцев со свободными кольцами -

$L_{б0} = h' + h'_k + h'' + h''_k + h_n$;

для фланцев под зажимы -

$$L_{б0} = h' + h'_1 + h'_2 + h'' + h''_1 + h''_2 + h_n; \qquad (11.8)$$

для контактирующих фланцев (рис.11.1.5,а) –

$L_{б0} = h' + h'' + h_{n1}$;

для контактирующих фланцев (рис.11.1.5,б) -

$L_{б0} = h' + h'_1 + h'' + h''_1 + h_{n1}$.

Если между фланцами зажата трубная решетка или установлены дополнительные шайбы, то при определении $L_{б0}$ необходимо учесть их толщины.

Податливость болтов (шпилек):

$$y_б = \frac{L_б}{E_б^{20} f_б n}, \qquad (11.9)$$

где $L_б = L_{б0} + 0{,}28d$ - для болта;

$L_б = L_{б0} + 0{,}56d$ - для шпильки;

$f_б$ - принимается по таблице 11.4.

Таблица 11.4

Диаметр болта (шпильки) d, мм	М10	М12	М16	М20	М24	М27	М30	М36	М42	М48	М52	М56	М60
Площадь сеч. по внутр. диаметру резьбы* $f_б$, мм^2	52,2	76,2	144	225	324	430	520	760	1045	1380	1820	1960	2300

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

*В случае применения шпилек с проточкой стержня до диаметра, меньшего внутреннего диаметра резьбы, значение площади поперечного сечения определяется по диаметру проточки.

Податливость зажимов для фланцев:

$$y_з = \frac{\lambda_з}{n}, \qquad (11.10)$$

где $\lambda_з$ - принимается по таблице 11.5 [26].

Таблица 11.5

Диаметр болта *d*, мм	Нагрузочная способность зажима B_1, кН при температуре, ^{0}С			Податливость зажима $\lambda_з \cdot 10^8$, м/Н при температуре, ^{0}С		
	-70÷100	200	300	-70÷100	200	300
М12	9,5	8,55	7,4	7,71	8,14	8,61
М16	18,0	16,2	14,0	7,05	7,44	7,88
М20	28,0	25,2	21,8	6,08	6,41	6,79
М24	40,0	36,0	31,2	2,28	2,41	2,55
М27	53,0	47,6	41,2	1,47	1,55	1,64

Эквивалентная толщина втулки для фланца, приварного встык:

$$s_э = \kappa(s_0 - c), \qquad (11.11)$$

где $\kappa = 1 + (\beta - 1)\dfrac{x}{x + \dfrac{1+\beta}{4}}$; $\beta = \dfrac{(s_1 - c)}{(s_0 - c)}$; $x = \dfrac{l}{\sqrt{(D+2c)(s_0 - c)}}$

Для остальных фланцев и приварного кольца $s_э = (s - c)$.

Угловая податливость фланца и приварного кольца:

$$y_ф = \frac{[1 - \omega(1 + 0{,}9\lambda)]\psi_г}{E_ф^{20} h^3} \qquad (11.12)$$

где $\omega = \dfrac{1}{1 + 0{,}9\lambda\left(1 + \psi_1 j^2\right)}$; $\lambda = \dfrac{h}{\sqrt{(D+2c)s_э}}$; $j = \dfrac{h}{s_э}$;

$$\psi_1 = 1{,}28 \lg \frac{D_н}{(D+2c)}; \psi_г = \frac{D_н + (D+2c)}{D_н - (D+2c)}.$$

Угловая податливость фланца со сферической неотбортованной и эллиптической крышкой при $h_1 < \sqrt{Ds_1}$ (рис11.6):

$$y_{кр} = \frac{[1 - \omega_1 (1 + 1{,}285\lambda_1)]\psi_г}{E_ф^{20} h_{кр}^3}, \qquad (11.13)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где $\lambda_1 = \dfrac{h_{кр}}{(D+2c)}\sqrt{\dfrac{(R+c)}{(s_1-c)}}$; $\omega_1 = \dfrac{1}{1+1{,}285\lambda_1+1{,}274\lambda_1\psi_1 j_1^2}$;

$j_1 = \dfrac{h_{кр}}{(s_1-c)}$.

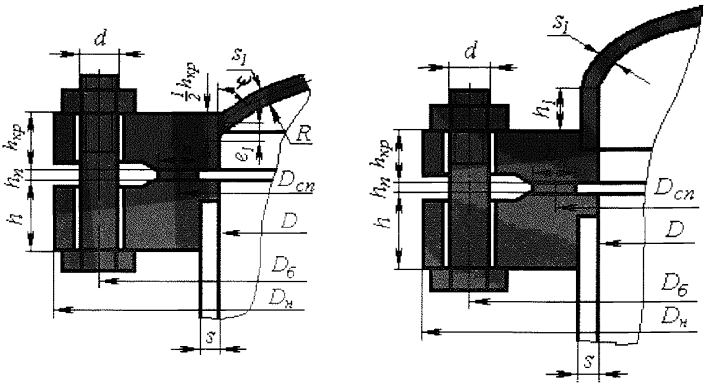


Рис.11.6. Крышки отъемные сферические неотбортованные (а) и эллиптические (б)

Угловая податливость фланца с эллиптической крышкой при $h_1 \geq \sqrt{Ds_1}$ определяется по (11.12) при $h = h_{кр}$, $s_э = s_1 - c$ и $j = \dfrac{h_{кр}}{(s_1-c)}$.

Угловая податливость фланца свободного на приварном кольце:

$$y_к = \frac{1}{E_к^{20} h_к^3 \psi_к}, \qquad (11.14)$$

где $\psi_к = 1{,}28 \lg \dfrac{D_{нк}}{D_к}$.

Угловая податливость фланца с плоской крышкой (рис.11.7):

$$y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} s_2^3}, \qquad (11.15)$$

где $x_{кр} = \dfrac{0{,}67\left[K_{кр}^2\left(1+8{,}55\lg K_{кр}\right)-1\right]}{(K_{кр}-1)\left[K_{кр}^2-1+(1{,}857K_{кр}^2+1)\left(\dfrac{s_2}{s_3}\right)^3\right]}$; $K_{кр} = \dfrac{D_н}{D_{сп}}$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

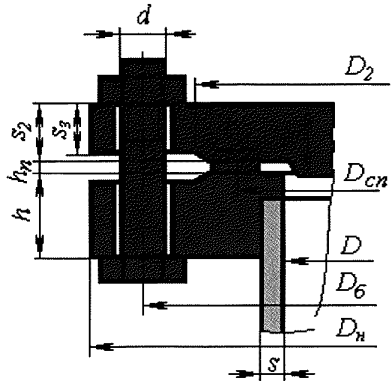


Рис.11.7. Крышки отъемные плоские

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

для фланцев, приварных встык, плоских и с зажимами

$$y_{\phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \frac{D_б}{E_\phi^{20} D_н h^3} \qquad (11.16)$$

для приварного кольца

$$y_{\phi M} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \frac{D_s}{E_\phi^{20} D_н h^3} \qquad (11.17)$$

для фланца свободного на приварном кольце

$$y_{\phi c} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \frac{D_б}{E_к^{20} D_{нк} h_к^3} \qquad (11.18)$$

Плечи моментов:

- для фланцев, приварных встык и плоских

$$b = 0{,}5(D_б - D_{сп});\ e = 0{,}5(D_{сп} - (D + 2c) - s_э) \qquad (11.19)$$

- для фланцев свободных на приварных кольцах

$$a = 0{,}5(D_б - D_s);\ b = 0{,}5(D_s - D_{сп});$$

$$e = 0{,}5(D_{сп} - (D + 2c) - s_э), \qquad (11.20)$$

где $D_s = 0{,}5(D_н + D_к + 2h_0)$;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

- для фланцев под зажимы

$$b = 0{,}5(D_н - 2R - D_{сп}); \quad e = 0{,}5(D_{сп} - (D + 2c) - s_э) \qquad (11.21)$$

- для контактирующих фланцев:

$$a = 0{,}5(D_{сп1} - D_б); \quad b = 0{,}5(D_б - D_{сп2});$$
$$e = 0{,}5(D_{сп2} - (D + 2c) - s_э) \qquad (11.22)$$

11.4. Коэффициенты жесткости фланцевого соединения

Фланцевое соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением и внешней осевой силой.

Для фланцев, приварных встык, плоских и под зажимы:

$$\alpha = 1 - \frac{y_п - (y'_ф e' b' + y''_ф e'' b'')}{\eta}, \qquad (11.23)$$

где для приварных встык и плоских фланцев

$\eta = y_п + y_б + y'_ф b'^2 + y''_ф b''^2$;

для фланцев под зажимы $\eta = y_п + y_з + y'_ф b'^2 + y''_ф b''^2$.

Для фланцев свободных на приварных кольцах: $\alpha = 1$.

Для фланцевого соединения с крышкой:

$$\alpha = 1 - \frac{y_п - (y_ф e + y_{кр} b) b}{\eta}, \qquad (11.24)$$

где $\eta = y_п + y_б + (y_ф + y_{кр}) b^2$.

Фланцевое соединение, нагруженное внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M = -(1 + \beta_M), \qquad (11.25)$$

где для фланцев, приварных встык, плоских и под зажимы:

$$\beta_M = \frac{y'_{фM} b' e' \left(1 - \frac{e'}{D_{сп}}\right) + y''_{фM} b'' e'' \left(1 - \frac{e''}{D_{сп}}\right) - y_п \left(\frac{D_б}{D_{сп}}\right)^2}{y_б + y_п \left(\frac{D_б}{D_{сп}}\right)^2 + y'_{фM} b'^2 + y''_{фM} b''^2}; \qquad (11.26)$$

для фланцев свободных на приварных кольцах:

$$\beta_M = \frac{y'_{фM} b' e' \left(1 - \frac{e'}{D_{сп}}\right) + y''_{фM} b'' e'' \left(1 - \frac{e''}{D_{сп}}\right) - y_п \left(\frac{D_б}{D_{сп}}\right)^2}{y_б + y_п \left(\frac{D_б}{D_{сп}}\right)^2 + y'_{фc} a'^2 + y''_{фc} a''^2 + y'_{фM} b'^2 + y''_{фM} b''^2}. \qquad (11.27)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Коэффициенты для фланцев с контактирующими фланцами:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\eta_2}\begin{bmatrix} y_{n2}a(y'_\phi(a+b+e') + y''_\phi(a+b+e'')) + \\ + y_{n1}\left(y_{n2} - b(y'_\phi e' + y''_\phi e'')\right) \end{bmatrix}, \tag{11.28}$$

где

$$\eta_2 = y_{n1}\left(y_б + y_{n2} + (y'_\phi + y''_\phi)b^2\right) + y_{n2}\left(y_б + (y'_\phi + y''_\phi)a^2\right) + y_б(y'_\phi + y''_\phi)(a+b)^2;$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{\eta_2}\begin{bmatrix} y_б(a+b)((y'_\phi(a+b+e') + y''_\phi(a+b+e'')) + \\ + y_{n1}\left(y_б + b(y'_\phi(b+e') + y''_\phi(b+e''))\right) \end{bmatrix} \tag{11.29}$$

$$\eta_1 = \frac{y_{n1} + (y'_\phi + y''_\phi)a(a+b)}{y_{n1} + y_{n2} + (y'_\phi + y''_\phi)(a+b)^2}; \tag{11.30}$$

$$\lambda_1 = \frac{h'}{E'_\phi\left(D'_н - D'\right)} + \frac{h''}{E''_\phi\left(D''_н - D''\right)} + \frac{h_n}{2E_n\left(b_{n1} + b_{n2}\right)}; \tag{11.31}$$

$$\rho_1 = \left(\frac{\pi D_б}{n}\right)^4 \frac{192}{\left(D'_н - D'\right)E'_\phi(h')^3 + \left(D''_н - D''\right)E''_\phi(h'')^3}; \tag{11.32}$$

$$j_1 = \frac{\frac{\lambda_1}{\rho_1} + 0{,}0106}{\frac{\lambda_1}{\rho_1} + 0{,}0019}; \tag{11.33}$$

$$K_1 = \frac{\frac{\lambda_1}{\rho_1} - 0{,}0024}{\frac{\lambda_1}{\rho_1} + 0{,}0019}; \tag{11.34}$$

$$\varepsilon = \Delta t_1 b + \Delta t_2 a - \Delta t_б(a+b); \tag{11.35}$$

$$\gamma = \Delta t_2 - \Delta t_б, \tag{11.36}$$

где $\Delta t_б = \alpha_б t_б l_{б0}$.

Для контактирующих фланцев по рис.11.5,а

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = (\alpha'_\phi h' + \alpha''_\phi h'')t_\phi \tag{11.37}$$

Для контактирующих фланцев по рис.11.5,б

$$\Delta t_1 = (\alpha'_\phi(h' + h'_1) + \alpha''_\phi(h'' + h''_1))t_\phi; \tag{11.38}$$

$$\Delta t_2 = (\alpha'_\phi(h' + s'_э) + \alpha''_\phi(h'' + s''_э))t_\phi \tag{11.39}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

11.5. Нагрузки, действующие на болты (шпильки)

Равнодействующая давления:

$$Q_д = p\frac{\pi D_{сп}^2}{4}, \qquad (11.40)$$

где для контактирующих фланцев $D_{сп} = D_{сп2}$.

Для условий вакуума или наружного давления принимается $p < 0$.

Реакция прокладки в рабочих условиях:

$$R_п = \pi D_{сп} b_0 m |p| \qquad (11.41)$$

Нагрузка от температурных деформаций:

в соединении приварных встык и плоских фланцах (рис.11.1, 11.2):

$$Q_t = \frac{1}{\eta_t}\left(\alpha'_ф h' t_ф + \alpha'_ф h'' t_ф - \alpha_б l_{б0} t_б\right), \qquad (11.42)$$

где $\eta_t = y_п + y_б \frac{E_б^{20}}{E_б} + \left(y'_ф \frac{E_ф'^{20}}{E'_ф} + y''_ф \frac{E_ф''^{20}}{E''_ф}\right) b^2$;

в соединении фланцев свободных на приварных кольцах (рис.11.3):

$$Q_t = \frac{1}{\eta_t}\left((\alpha'_ф h' + \alpha''_ф h'')t_ф + (\alpha'_к h'_к + \alpha''_к h''_к)t_к - \alpha_б l_{б0} t_б\right) \qquad (11.43)$$

где

$$\eta_t = y_п + y_б \frac{E_б^{20}}{E_б} + y'_к \frac{E_к'^{20}}{E'_к} a'^2 + y''_к \frac{E_к''^{20}}{E''_к} a''^2 + y'_ф \frac{E_ф'^{20}}{E'_ф} b'^2 + y''_ф \frac{E_ф''^{20}}{E''_ф} b''^2$$

в соединении фланцев под зажимы (рис.11.4):

$$Q_t = \frac{1}{\eta_t}\begin{pmatrix} \alpha'_ф\left(h' + h'_1\right)t_ф + \alpha''_ф\left(h'' + h''_1\right)t_ф + \\ + (\alpha'_з h'_2 + \alpha''_з h''_2)t_б - \alpha_б l_{б0} t_б \end{pmatrix}, \qquad (11.44)$$

где $\eta_t = y_п + y_з \frac{\lambda_з^{20}}{\lambda_з} + y'_ф \frac{E_ф'^{20}}{E'_ф} b'^2 + y''_ф \frac{E_ф''^{20}}{E''_ф} b''^2$;

в соединении контактирующих фланцев (рис.11.5):

$$Q_{тб} = \frac{\varepsilon\left[y_{п2} + (y'_ф + y''_ф)b(a+b)\right] + \gamma\left(b y_{п1} - a y_{п2}\right)}{b\eta_2}; \qquad (11.45)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$Q_{tc} = \frac{\varepsilon\left[(y'_{\phi} + y''_{\phi})ab - y_{б}\right] + \gamma\left(y_{б}(a+b) + by_{n1}\right)}{b\eta_2}; \qquad (11.46)$$

в соединении с крышкой:

$$Q_t = \frac{1}{\eta_t}\left(\alpha_{\phi} h t_{\phi} + \alpha_{кр} h_{кр} t_{\phi} - \alpha_{б} l_{б0} t_{б}\right), \qquad (11.47)$$

где $\eta_t = y_n + y_{б}\dfrac{E_{б}^{20}}{E_{б}} + \left(y_{\phi}\dfrac{E_{\phi}^{20}}{E_{\phi}} + y_{кр}\dfrac{E_{кр}^{20}}{E_{кр}}\right)b^2;$

α_{ϕ}, $\alpha_{к}$, $\alpha_{кр}$, E_{ϕ}, $E_{к}$, $E_{кр}$ определяются по Приложению 2;

$\alpha_{б}$, $E_{б}$ определяются по Приложению 5.

При определении нагрузок от температурных деформаций расчетную температуру фланцев, крышки, болтов (шпилек), трубной решетки, свободного кольца следует уменьшить на температуру сборки фланцевого соединения (20^0C).

Болтовая нагрузка $P_{б}$ в условиях монтажа принимается большей из следующих значений:

$$P_{б} = \max\begin{cases} \alpha(Q_{\partial} + F) + R_n - Q_t + \left|\dfrac{4\alpha_{м} M}{D_{сп}}\right| \\ 0{,}5\pi D_{сп} b_0 q_{обж} \\ 0{,}4[\sigma]_{б}^{20} n f_{б} - \textit{кроме фланцев под зажимы} \\ 0{,}4 B_1 n - \textit{для фланцев под зажимы} \end{cases}, \qquad (11.48)$$

где $F < 0$, если усилие сжимающее;

при $\alpha < 1$ в формулах (11.49) и (11.51) принимается $\alpha = 1$;

при определении $P_{б}$ нагрузка от температурных деформаций Q_t учитывается только при $Q_t < 0$;

B_1 используется в соединении фланцев под зажимы и принимается по таблице 11.5.

Для соединения с контактирующими фланцами:

$$P_{б} = \max\begin{cases} \alpha_2\left(Q_{\partial} + \dfrac{4M}{D_{сп2}} + F\right) + \pi(D_{сп1} b_{01} + D_{сп2} b_{02}) m|p| - Q_{tc} \\ 0{,}5\pi(D_{сп1} b_{01} + D_{сп2} b_{02}) q_{обж} \\ 0{,}4[\sigma]_{б}^{20} n f_{б} \end{cases} \qquad (11.49)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Приращение нагрузки в болтах (шпильках) в рабочих условиях:

$$\Delta P_б = (1-\alpha)(Q_д + F) + Q_t + \frac{4\beta_м M}{D_{сп}} \qquad (11.50)$$

Для соединения с контактирующими фланцами:

$$\Delta P_б = \alpha_1 (Q_д + \frac{4M}{D_{сп2}} + F) + Q_{tб} \qquad (11.51)$$

Реакция контактных поясов прокладки в рабочих условиях для соединения с контактирующими фланцами:

$$R_2 = \eta_1 P_б - \alpha_2 \left(Q_д + \frac{4M}{D_{сп2}} + F \right) + Q_{tc} \qquad (11.52)$$

$$R_1 = P_б + \Delta P_б - R_2 - \left(Q_д + \frac{4M}{D_{сп2}} + F \right) \qquad (11.53)$$

Расчет нагрузок, действующих на болты (шпильки) в условиях испытаний проводится для давления, сил и моментов, действующих в условиях испытаний, при этом нагрузка от температурных деформаций $Q_t = 0$.

11.6. Расчет болтов (шпилек)

Условия прочности болтов (шпилек) для фланцев приварных встык, плоских и свободных фланцев на приварных кольцах:

$$\sigma_{б1} = \frac{P_б}{n f_б} \le \xi [\sigma]_б^{20} \qquad (11.54)$$

$$\sigma_{б2} = \frac{P_б + \Delta P_б}{n f_б} \le [\sigma]_б, \qquad (11.55)$$

где $\varsigma = 1{,}1 \div 1{,}2$;

для фланцев под зажимы:

$$\sigma_{б1} = \frac{1{,}25 P_б}{n f_б} \le \xi [\sigma]_б^{20} \qquad (11.56)$$

$$\sigma_{б2} = \frac{1{,}25 (P_б + \Delta P_б)}{n f_б} \le [\sigma]_б \qquad (11.57)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

для контактирующих фланцев

$$\sigma_{б1} = \frac{P_б}{nf_б} \le 1{,}25\xi\,[\sigma]_б^{20} \qquad (11.58)$$

$$\sigma_{б2} = \frac{P_б + \Delta P_б}{nf_б} \le 1{,}25[\sigma]_б \qquad (11.59)$$

При проверке прочности болтов для рабочих условий с учетом нагрузки на болты от стесненности температурных деформаций допускаемое напряжение может быть увеличено на 30%.

11.7. Расчет прокладок

Условие допускаемого давления, действующего на мягкие прокладки:

$$q = \frac{P_б}{\pi D_{сп} b_п} \le [q] \qquad (11.60)$$

для соединения с контактирующими фланцами:

$$q = \frac{R_1}{\pi D_{сп1} b_{п1}} j_1 \le [q] \qquad (11.61)$$

Условие герметичности для соединения с контактирующими фланцами:

$$\frac{R_2}{\pi D_{сп2} b_{п2}} K_1 \ge m|p| \qquad (11.62)$$

11.8. Расчет фланцев

Угол поворота фланца (приварного кольца) при затяжке:

$$\theta = M_{01} \frac{[1 - \omega(1 + 0{,}9\lambda)]\psi_2}{E_ф^{20} h^3}, \qquad (11.63)$$

где $M_{01} = P_б b$.

Приращение угла поворота фланца (приварного кольца):

$$\Delta\theta = \Delta M_{01} \frac{[1 - \omega(1 + 0{,}9\lambda)]\psi_2}{E_ф h^3}, \qquad (11.64)$$

где $\Delta M_{01} = \Delta P_б b + \left(Q_д + \frac{4M}{D_{сп}} + F\right)e$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Максимальный изгибающий момент для соединения с контактирующими фланцами:

$$M_0 = \max\left\{\begin{array}{l} \eta_1 P_б b - (1-\eta_1) P_б a + \left(\dfrac{4M}{D_{сп2}} + F\right)(b+e) \\ \left[R_2 b - R_1 a + \left(Q_д + \dfrac{4M}{D_{сп2}} + F\right)(b+e)\right]\dfrac{[\sigma]_ф^{20}}{[\sigma]_ф} \end{array}\right\} \quad (11.65)$$

11.8.1. Фланцы приварные встык

Осевые напряжения при затяжке в обечайке (втулке) на наружной и внутренней поверхностях:

- в сечении s_1

$$\sigma_{11} = \sigma_1; \qquad \sigma_{12} = -\sigma_1, \quad (11.66)$$

где $\sigma_1 = \dfrac{T\omega M_{01}}{D^*(s_1 - c)^2}$; $T = \dfrac{\left(\dfrac{D_н}{(D+2c)}\right)^2\left[1+8{,}551\lg\left(\dfrac{D_н}{(D+2c)}\right)\right]-1}{\left[1{,}05+1{,}945\left(\dfrac{D_н}{(D+2c)}\right)^2\right]\left(\dfrac{D_н}{(D+2c)}-1\right)}$;

$D^* = (D+2c)$ при $(D+2c) \geq 20(s_1 - c)$;

$D^* = D + c + s_0$ при $(D+2c) < 20(s_1 - c)$ и $f > 1$;

$D^* = D + c + s_1$ при $(D+2c) < 20(s_1 - c)$ и $f = 1$,

где f определяется по (46) Приложения 6;

- в сечении s_0

$$\sigma_{21} = f\sigma_1; \qquad \sigma_{22} = -f\sigma_1. \quad (11.67)$$

Приращения осевых напряжений в обечайке (втулке):

- в сечении s_1

$$\Delta\sigma_{11} = \Delta\sigma_M + \Delta\sigma_1; \qquad \Delta\sigma_{12} = \Delta\sigma_M - \Delta\sigma_1, \quad (11.68)$$

где $\Delta\sigma_M = \dfrac{Q_д + \dfrac{4M}{D_{сп}} + F}{\pi(D+2c)(s_1 - c)}$; $\Delta\sigma_1 = \dfrac{T\omega\Delta M_{01}}{D^*(s_1 - c)^2}$;

- в сечении s_0

$$\Delta\sigma_{21} = \Delta\sigma_M + f\Delta\sigma_1; \qquad \Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma_M - f\Delta\sigma_1, \quad (11.69)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где $\Delta\sigma_M = \dfrac{Q_o + \dfrac{4M}{D_{cn}} + F}{\pi\,(D+2c)(s_0-c)}$.

Окружные напряжения в обечайке (втулке):

- в сечении s_1

$$\sigma_{13} = \frac{E^{20}h\theta}{(D+2c)} + 0{,}3\sigma_1;\ \sigma_{14} = \frac{E^{20}h\theta}{(D+2c)} - 0{,}3\sigma_1; \qquad (11.70)$$

- в сечении s_0

$$\sigma_{23} = 0{,}3f\sigma_1;\ \sigma_{24} = -0{,}3f\sigma_1. \qquad (11.71)$$

Приращения окружных напряжений в обечайке (втулке):

- в сечении s_1

$$\Delta\sigma_{13} = \frac{Eh\Delta\theta}{(D+2c)} + \frac{p(D+2c)}{D_н - (D+2c)} + 0{,}3\Delta\sigma_1;$$

$$\Delta\sigma_{14} = \frac{Eh\Delta\theta}{(D+2c)} + \frac{p(D+2c)}{D_н - (D+2c)} - 0{,}3\Delta\sigma_1 \qquad (11.72)$$

- в сечении s_0

$$\Delta\sigma_{23} = \frac{p(D+2c)}{2(s_0-c)} + 0{,}3f\Delta\sigma_1;\ \Delta\sigma_{24} = \frac{p(D+2c)}{2(s_0-c)} - 0{,}3f\Delta\sigma_1. \qquad (11.73)$$

Условие прочности при расчете статической прочности в сечении s_1:

- при затяжке

$$\sigma_{s1} = \max\left\{\begin{matrix}\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{11}\sigma_{13}} \\ \sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{14}^2 - \sigma_{12}\sigma_{14}}\end{matrix}\right\} \le 1{,}5[\sigma]_\phi^{20}; \qquad (11.74)$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{s1} = \max\left\{\begin{matrix}\sqrt{(\sigma_{11}+\Delta\sigma_{11})^2 + (\sigma_{13}+\Delta\sigma_{13})^2 - (\sigma_{11}+\Delta\sigma_{11})(\sigma_{13}+\Delta\sigma_{13})} \\ \sqrt{(\sigma_{12}+\Delta\sigma_{12})^2 + (\sigma_{14}+\Delta\sigma_{14})^2 - (\sigma_{12}+\Delta\sigma_{12})(\sigma_{14}+\Delta\sigma_{14})}\end{matrix}\right\} \le 1{,}5[\sigma]_\phi \qquad (11.75)$$

- в условиях испытаний:

$$\sigma_{s1} = \max\left\{\begin{matrix}\sqrt{(\sigma_{11}+\Delta\sigma_{11})^2 + (\sigma_{13}+\Delta\sigma_{13})^2 - (\sigma_{11}+\Delta\sigma_{11})(\sigma_{13}+\Delta\sigma_{13})} \\ \sqrt{(\sigma_{12}+\Delta\sigma_{12})^2 + (\sigma_{14}+\Delta\sigma_{14})^2 - (\sigma_{12}+\Delta\sigma_{12})(\sigma_{14}+\Delta\sigma_{14})}\end{matrix}\right\} \le 2{,}0[\sigma]_\phi^{20}. \qquad (11.76)$$

Условие прочности в сечении s_0:

- при затяжке

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$\sigma_{s0} = \max\left\{\begin{matrix}\sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{21}\sigma_{23}} \\ \sqrt{\sigma_{22}^2 + \sigma_{24}^2 - \sigma_{22}\sigma_{24}}\end{matrix}\right\} \le \min\left\{\begin{matrix}\left(4{,}5 - 2{,}0\dfrac{R^{20}_{e\phi}}{R^{20}_{m\phi}}\right)[\sigma]^{20}_{\phi}; \\ \left(4{,}5 - 2{,}0\dfrac{R^{20}_{eш}}{R^{20}_{mш}}\right)[\sigma]^{20}_{ш}\end{matrix}\right\}; \quad (11.77)$$

- в рабочих условиях

$$\sigma_{s0} = \max\left\{\begin{matrix}\sqrt{(\sigma_{21}+\Delta\sigma_{21})^2 + (\sigma_{23}+\Delta\sigma_{23})^2 - (\sigma_{21}+\Delta\sigma_{21})(\sigma_{23}+\Delta\sigma_{23})} \\ \sqrt{(\sigma_{22}+\Delta\sigma_{22})^2 + (\sigma_{24}+\Delta\sigma_{24})^2 - (\sigma_{22}+\Delta\sigma_{22})(\sigma_{24}+\Delta\sigma_{24})}\end{matrix}\right\} \le$$
$$\le \min\left\{\begin{matrix}\left(4{,}5 - 2{,}0\dfrac{R_{e\phi}}{R_{m\phi}}\right)[\sigma]_{\phi}; \\ \left(4{,}5 - 2{,}0\dfrac{R_{eш}}{R_{mш}}\right)[\sigma]_{ш}\end{matrix}\right\} \quad (11.78)$$

- в условиях испытаний

$$\sigma_{s0} = \max\left\{\begin{matrix}\sqrt{(\sigma_{21}+\Delta\sigma_{21})^2 + (\sigma_{23}+\Delta\sigma_{23})^2 - (\sigma_{21}+\Delta\sigma_{21})(\sigma_{23}+\Delta\sigma_{23})} \\ \sqrt{(\sigma_{22}+\Delta\sigma_{22})^2 + (\sigma_{24}+\Delta\sigma_{24})^2 - (\sigma_{22}+\Delta\sigma_{22})(\sigma_{24}+\Delta\sigma_{24})}\end{matrix}\right\} \le$$
$$\le \min\left\{\begin{matrix}\left(6{,}0 - 2{,}7\dfrac{R^{20}_{e\phi}}{R^{20}_{m\phi}}\right)[\sigma]^{20}_{\phi}; \\ \left(6{,}0 - 2{,}7\dfrac{R^{20}_{eш}}{R^{20}_{mш}}\right)[\sigma]^{20}_{ш}\end{matrix}\right\} \quad (11.79)$$

11.8.2. Фланцы плоские приварные, под зажимы и приварные кольца

Осевые напряжения при затяжке в обечайке на наружной и внутренней поверхности:

$$\sigma_{21} = \sigma_1; \qquad \sigma_{22} = -\sigma_1, \quad (11.80)$$

где $\sigma_1 = \dfrac{T\omega\, M_{01}}{(D+2c)(s-c)^2}$.

Приращения осевых напряжений:

$$\Delta\sigma_{21} = \Delta\sigma_M + \Delta\sigma_1; \quad \Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma_M - \Delta\sigma_1, \quad (11.81)$$

где $\Delta\sigma_M = \dfrac{Q_o + \dfrac{4M}{D_{cn}} + F}{\pi\,(D+2c)(s-c)}$; $\quad \Delta\sigma_1 = \dfrac{T\omega\,\Delta M_{01}}{D^*(s-c)^2}$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Окружные напряжения в обечайке (втулке):

$$\sigma_{23} = 0{,}3\sigma_1; \qquad \sigma_{24} = -0{,}3\sigma_1. \tag{11.82}$$

Приращения окружных напряжений:

$$\Delta\sigma_{23} = \frac{p(D+2c)}{2(s-c)} + 0{,}3\Delta\sigma_1; \ \Delta\sigma_{24} = \frac{p(D+2c)}{2(s-c)} - 0{,}3\Delta\sigma_1. \tag{11.83}$$

Условие прочности при расчете статической прочности при затяжке в рабочих условиях и условиях испытаний проверяется по формулам (11.78), (11.79) и (11.80) соответственно.

11.8.3. Фланцы свободные на приварных кольцах

Угол поворота фланца свободного:

$$\theta_к = \frac{P_б a}{E_к^{20} h_к^3 \psi_к} + \frac{\Delta P_б a}{E_к h_к^3 \psi_к} \tag{11.84}$$

Кольцевое напряжение:

$$\sigma_к = \frac{E_к h_к \theta_к}{D_к} \tag{11.85}$$

Условие выполнения прочности:

- в рабочих условиях

$$\sigma_к \le 1{,}5[\sigma]_k; \tag{11.86}$$

- в условиях испытаний

$$\sigma_к \le 2{,}0[\sigma]_k^{20}. \tag{11.87}$$

11.8.4. Фланцы контактирующие

Осевое напряжение в обечайке (втулке) на наружной и внутренней поверхности в рабочих условиях и условиях испытаний:

$$\sigma_{21} = \frac{Q_о + \frac{4M}{D_{сп2}} + F}{\pi(D+2c)(s-c)} + \frac{T\omega M_0}{(D+2c)(s-c)^2}; \ \sigma_{22} = \frac{Q_о + \frac{4M}{D_{сп2}} + F}{\pi(D+2c)(s-c)} - \frac{T\omega M_0}{(D+2c)(s-c)^2} \tag{11.88}$$

Окружное напряжение в обечайке (втулке):

$$\sigma_{23} = \frac{p(D+2c)}{2(s-c)} + 0{,}3\frac{T\omega M_0}{(D+2c)(s-c)^2}; \ \sigma_{24} = \frac{p(D+2c)}{2(s-c)} - 0{,}3\frac{T\omega M_0}{(D+2c)(s-c)^2} \tag{11.89}$$

Условие прочности:

- в рабочих условиях

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$\sigma_{s0} = \max\left\{\begin{matrix}\sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{21}\sigma_{23}} \\ \sqrt{\sigma_{22}^2 + \sigma_{24}^2 - \sigma_{22}\sigma_{24}}\end{matrix}\right\} \le \min\left\{\begin{matrix}\left(4{,}5 - 2{,}0\dfrac{R_{еф}}{R_{тф}}\right)[\sigma]_{ф}; \\ \left(4{,}5 - 2{,}0\dfrac{R_{еш}}{R_{тш}}\right)[\sigma]_{ш}\end{matrix}\right\} \quad (11.90)$$

- в условиях испытаний

$$\sigma_{s0} = \max\left\{\begin{matrix}\sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{21}\sigma_{23}} \\ \sqrt{\sigma_{22}^2 + \sigma_{24}^2 - \sigma_{22}\sigma_{24}}\end{matrix}\right\} \le \min\left\{\begin{matrix}\left(6{,}0 - 2{,}7\dfrac{R_{еф}^{20}}{R_{тф}^{20}}\right)[\sigma]_{ф}^{20}; \\ \left(6{,}0 - 2{,}7\dfrac{R_{еш}^{20}}{R_{тш}^{20}}\right)[\sigma]_{ш}^{20}\end{matrix}\right\} \quad (11.91)$$

11.9. Жесткость фланцев

Условие выполнения жесткости фланцев:

$$|\theta + \Delta\theta| \le [\theta] \quad (11.92)$$

где допускаемый угол поворота для фланцев приварных встык

- для рабочих условий: $[\theta] = 0{,}009$ при $D \le 2000 мм$;
  $[\theta] = 0{,}013$ при $D > 2000 мм$;
- для условий испытаний: $[\theta] = 0{,}011$ при $D \le 2000 мм$;
  $[\theta] = 0{,}015$ при $D > 2000 мм$;

для фланцев плоских приварных, под зажимы и приварных колец:

- для рабочих условий $[\theta] = 0{,}013$;
- для условий испытаний $[\theta] = 0{,}017$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

12. Прочность и герметичность фланцевых соединений арматуры и трубопроводов

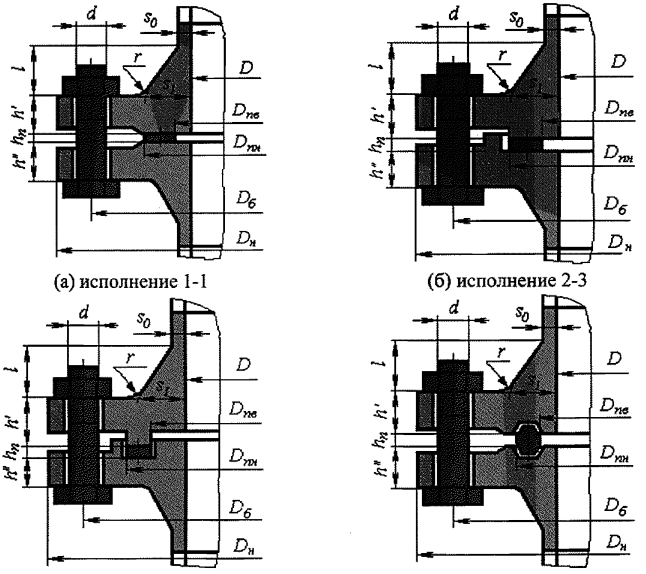
При выполнении условия (11.1) расчет фланцевых соединений арматуры и трубопроводов допускается проводить по п.11. В противном случае прочность и жесткость фланцевого соединения оценивается по Приложениям 2 и S ASME VIII-1 [40] соответственно. При этом нагрузки, действующие на элементы фланцевого соединения, помимо давления учитывают внешние усилия и моменты, а также нагрузки от температурных деформаций, принятые по аналогии с [11].

Расчет фланцевых соединений проводится для четырех случаев нагружения:

- расчет в рабочих условиях от давления и внешних усилий $(Q_t = 0)$;
- расчет в рабочих условиях с учетом температурной нагрузки;
- расчет в условиях монтажа;
- расчет в условиях испытаний.

12.1. Расчетные схемы

На рис.12.1.-12.3. представлены фланцевые соединения с исполнением уплотнительных поверхностей фланцев по [22].



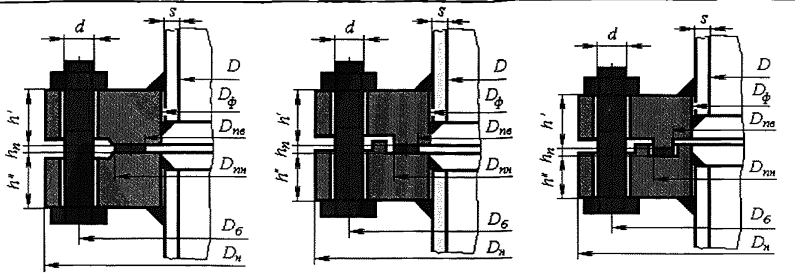
(а) исполнение 1-1 (б) исполнение 2-3

(в) исполнение 4-5 (8-9) (г) исполнение 7-7

Рис.12.1. Фланцы, приварные встык по [34]

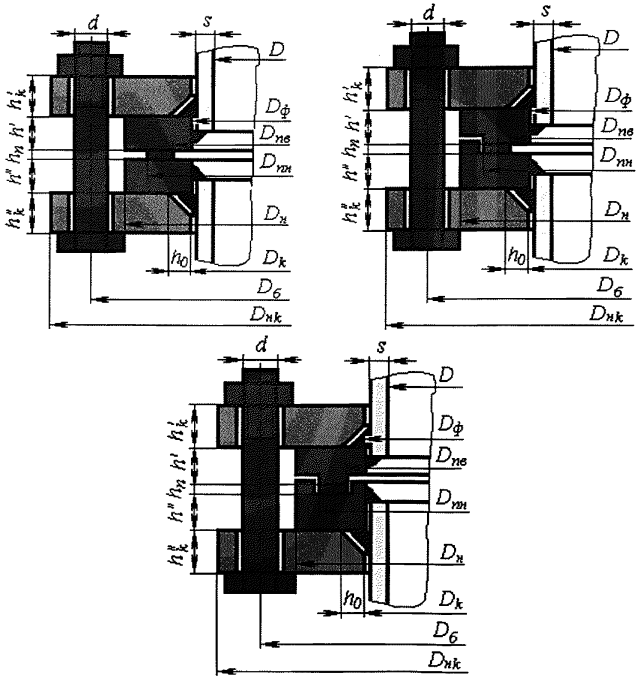
© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)



(а) исполнение 1-1 (б) исполнение 2-3 (в) исполнение 4-5 (8-9)

Рис.12.2. Плоские приварные фланцы по [23]



(а) исполнение 1-1 (б) исполнение 2-3

(в) исполнение 4-5 (8-9)

Рис.12.3. Фланцы свободные на приварных кольцах по [24]

Возможно применение соединений с разными (по материалам или размерам) фланцами, т.к. расчет производится для каждого фланца.

Плоские приварные фланцы могут быть рассчитаны как без учета присоединяемой стенки штуцера, арматуры или трубы (далее

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

свободного типа), так и с ее учетом (далее **интегрального типа**). Во втором случае, в отличие от схем рис.12.2, соединение фланцев со стенкой осуществляется в соответствии с рис.12.4.

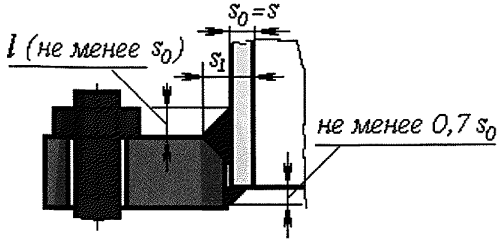


Рис.12.4.

Расчетные температуры элементов фланцевого соединения определяется по табл.11.1.

Характеристики прокладки m, $q_{обж}$, K, E_n принимаются по таблице 11.2.

12.2. Допускаемые напряжения

При расчете фланцевых соединений величины допускаемых напряжений для материалов фланца и приварного кольца $[\sigma]_\phi$, фланца свободного на приварном кольце $[\sigma]_k$, а также сопрягаемой обечайки (штуцера) $[\sigma]_ш$ в рабочих условиях (при рабочей температуре) и условиях монтажа (при t = 200С) определяются как [41]:

а) если расчетная температура из углеродистых сталей не превышает 380^{0}С, низколегированных сталей 420^{0}С, аустенитных сталей 525^{0}С

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{1,5}; \frac{R_m^{20}}{3,5}; \frac{1,1R_m}{3,5}\right); \qquad (12.1)$$

б) если расчетная температура превышает указанную в п.(а)

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{1,5}; \frac{R_m^{20}}{3,5}; \frac{1,1R_m}{3,5}; \frac{R_{m/10^5}}{1,25}; \frac{R_{p1,0/10^5}}{1,0}\right) \qquad (12.1а)$$

Допускаемые напряжения в условиях испытаний:

$$[\sigma]_u^{20} = \frac{R_e^{20} \text{ или } R_{p0,2}^{20}}{1,1} \qquad (12.2)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Механические свойства материалов патрубков, фланцев и колец принимаются по приложению 2 [1] или другой нормативной документации при расчетной температуре.

Допускаемые напряжения для материалов болтов (шпилек) $[\sigma]_б$ в рабочих условиях (при рабочей температуре) и условиях монтажа (при t=200С) определяются как [41]:

а) если расчетная температура для болтов из углеродистых сталей не превышает 380^{0}С, низколегированных сталей 420^{0}С, аустенитных сталей 525^{0}С

$$[\sigma]_б = \min\left\{\frac{R_e^{20} \text{ или } R_{p0,2}^{20}}{4}; \frac{R_m^{20}}{5}; \frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{1,5}; \frac{1,1R_m}{4}\right\}; \qquad (12.3)$$

б) если расчетная температура превышает указанную в п.(а)

$$[\sigma]_б = \min\left\{\frac{R_e^{20} \text{ или } R_{p0,2}^{20}}{4}; \frac{R_m^{20}}{5}; \frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{1,5}; \frac{1,1R_m}{4}; \frac{R_{m/10^5}}{1,25}; \frac{R_{p1,0/10^5}}{1,0}\right\} \qquad (12.3а)$$

Допускаемые напряжения в условиях испытаний:

$$[\sigma]_{би}^{20} = \frac{R_e^{20} \text{ или } R_{p0,2}^{20}}{3,0} \qquad (12.4)$$

Механические свойства для болтов арматурных фланцевых соединений приведены в Приложении 7 [10,25].

12.3. Расчет вспомогательных величин

Эффективная ширина прокладки, мм:

а) для плоских прокладок

$$b_0 = \frac{D_{пн} - D_{пв}}{2} \text{ при } \frac{D_{пн} - D_{пв}}{2} \le 12,7 \text{ мм};$$

$$b_0 = 3,56\sqrt{\frac{D_{пн} - D_{пв}}{2}} \quad \text{при} \quad \frac{D_{пн} - D_{пв}}{2} > 12,7 \text{ мм}; \qquad (12.5)$$

б) для прокладок овального или восьмигранного сечения

$$b_0 = 0,25\frac{D_{пн} - D_{пв}}{2} \qquad (12.6)$$

Средний эффективный диаметр прокладки:

а) для плоских прокладок

$$D_{сп} = D_{пн} - b_0; \qquad (12.7)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

б) для прокладок овального или восьмигранного сечения

$$D_{сп} = \frac{D_{пн} + D_{пв}}{2} \qquad (12.8)$$

Податливость прокладки:

$$y_п = \frac{h_п K}{E_п \pi D_{сп} b_0} \qquad (12.9)$$

Для металлических и асбометаллических прокладок $y_п = 0$.

Податливость болтов (шпилек) для фланцев:

$$y_б = \frac{L_б}{E_б^{20} f_б n}, \qquad (12.10)$$

где $L_б = L_{б0} + 0{,}28d$ - для болта; $L_б = L_{б0} + 0{,}56d$ - для шпильки; $f_б$ - принимается по таблице 11.4.

Эквивалентная толщина втулки для фланца приварного встык:

$$s_э = \kappa(s_0 - c), \qquad (12.11)$$

где $\kappa = 1 + (\beta - 1)\dfrac{x}{x + \dfrac{1+\beta}{4}}$; $\beta = \dfrac{(s_1 - c)}{(s_0 - c)}$; $x = \dfrac{l}{\sqrt{(D + 2c)(s_0 - c)}}$.

Для плоского приварного интегрального типа и приварного кольца (рис.12.3) $s_э = s_0 - c$.

Угловая податливость фланца приварного встык, плоского приварного интегрального типа и приварного кольца:

$$y_ф = \frac{\left[1 - \omega(1 + 0{,}9\lambda)\right]\psi_г}{E_ф^{20} h^3}, \qquad (12.12)$$

где $\omega = \dfrac{1}{1 + 0{,}9\lambda\left(1 + \psi_1 j^2\right)}$; $j = \dfrac{h}{s_э}$; $\psi_1 = 1{,}28 \lg \dfrac{D_н}{(D + 2c)}$;

$\lambda = \dfrac{h}{\sqrt{(D + 2c)s_э}}$; $\psi_г = \dfrac{D_н + (D + 2c)}{D_н - (D + 2c)}$.

Угловая податливость плоского приварного фланца свободного типа:

$$y_ф = \frac{1}{E_ф h^3 \psi_1}, \qquad (12.13)$$

где $\psi_1 = 1{,}28 \lg \dfrac{D_н}{D_ф}$;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Угловая податливость фланца свободного на приварном кольце:

$$y_k = \frac{1}{E_к^{20} h_к^3 \psi_к}, \qquad (12.14)$$

где $\psi_к = 1{,}28 \lg \frac{D_{нк}}{D_к}$.

Угловая податливость фланца со сферической неотбортованной крышкой (рис.11.6,а):

$$y_{крс} = \frac{\left[1 - \omega_1 (1 + 1{,}285\lambda_1)\right]\psi_г}{E_ф^{20} h^3}, \qquad (12.15)$$

где $\omega_1 = \frac{1}{1 + 1{,}285\lambda_1 + 1{,}274\lambda_1 \psi_1 j^2}$; $\lambda_1 = \frac{h}{(D + 2c)} \sqrt{\frac{R_s}{(s_0 - c)}}$.

Угловая податливость плоской крышки (рис.5.1.):

$$y_{кр} = \frac{x_{кр}}{E_{кр}^{20} s_2^3}, \qquad (12.16)$$

где $x_{кр} = \frac{0{,}67\left[K_{кр}^2 \left(1 + 8{,}55 \lg K_{кр}\right) - 1\right]}{(K_{кр} - 1)\left[K_{кр}^2 - 1 + (1{,}857 K_{кр}^2 + 1)\left(\frac{s_2}{s_3}\right)^3\right]}$; $K_{кр} = \frac{D_н}{D_{сп}}$.

Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

для фланцев приварных встык и плоских приварных как интегрального типа, так и свободного

$$y_{фМ} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \frac{D_б}{E_ф^{20} D_н h^3}; \qquad (12.17)$$

для приварного кольца

$$y_{фМ} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \frac{D_s}{E_ф^{20} D_н h^3}, \qquad (12.18)$$

где $D_s = 0{,}5(D_н + D_к + 2h_0)$;

для фланца свободного на приварном кольце

$$y_{фс} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \frac{D_б}{E_к^{20} D_{нк} h_к^3}. \qquad (12.19)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Плечи моментов:
для фланцев, приварных встык и плоских интегрального типа

$$b = 0{,}5(D_б - D_{сп})\,;\quad e = 0{,}5(D_{сп} - (D + 2c) - s_э)\,; \tag{12.20}$$

для плоских приварных фланцев свободного типа

$$b = 0{,}5(D_б - D_{сп})\,;\ e = 0{,}5(D_{сп} - (D_ф + 2c) - s_э)\,; \tag{12.21}$$

для фланцев свободных на приварных кольцах

$$a = 0{,}5(D_б - D_s)\,; b = 0{,}5(D_s - D_{сп})\,; e = 0{,}5(D_{сп} - (D + 2c) - s_э)\,;$$

$$D_s = 0{,}5(D_н + D_к + 2h_0) \tag{12.22}$$

12.4. Коэффициенты жесткости фланцевого соединения

Коэффициенты жесткости фланцевых соединений, нагруженных давлением, а также внешней осевой силой и изгибающим моментом, определяются по формулам для фланцевых соединений сосудов и аппаратов (п.11.4).

12.5. Нагрузки, действующие на болты (шпильки)

На рис.12.5 представлена расчетная схема для определения прочности фланца.

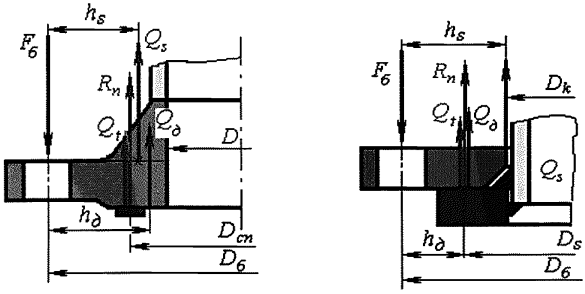


Рис.12.5. Нагрузки, действующие на фланец
а – приварной встык и плоский приварной интегрального типа, б – свободный на приварном кольце

Для соединения со свободными фланцами на приварных кольцах (рис.12.5,б) расположение силы реакции в прокладке, передающейся на фланец, не зависит от ее расположения. При этом для данного типа соединения принимается:

$$D_{сп} = D_s \tag{12.23}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Осевое усилие, действующее через обечайку смежного элемента:

$$Q_s = p\frac{\pi\,(D+2c)^2}{4} + F + \frac{4M}{D_{cn}}, \qquad (12.24)$$

где F и M внешняя осевая сила и момент, действующие на фланец ($F > 0$ при растяжении, и $F < 0$ при сжатии). Для условий вакуума или наружного давления $p < 0$.

Осевое усилие от давления на внутреннюю поверхность фланца:

$$Q_\partial = p\frac{\pi\left(D_{cn}^2 - (D+2c)^2\right)}{4} \qquad (12.25)$$

Реакция прокладки в рабочих условиях:

$$R_n = |p|\pi\, D_{cn} b_0 m \qquad (12.26)$$

Нагрузка от температурных деформаций:

в соединении для фланцев приварных встык и плоских приварных

$$Q_t = \frac{1}{\eta_t}\left(\alpha_\phi' h' t_\phi + \alpha_\phi' h'' t_\phi - \alpha_б l_{б0} t_б\right), \qquad (12.27)$$

где $\eta_t = y_n + y_б\dfrac{E_б^{20}}{E_б} + \left(y_\phi'\dfrac{E_\phi'^{20}}{E_\phi'} + y_\phi''\dfrac{E_\phi''^{20}}{E_\phi''}\right)b^2$;

в соединении для фланцев свободных на приварных кольцах

$$Q_t = \frac{1}{\eta_t}\left((\alpha_\phi' h' + \alpha_\phi'' h'')t_\phi + (\alpha_k' h_k' + \alpha_k'' h_k'')t_к - \alpha_б l_{б0} t_б\right) \qquad (12.28)$$

где

$$\eta_t = y_n + y_б\frac{E_б^{20}}{E_б} + y_k'\frac{E_к'^{20}}{E_к'}a'^2 + y_k''\frac{E_к''^{20}}{E_к''}a''^2 + y_\phi'\frac{E_\phi'^{20}}{E_\phi'}b'^2 + y_\phi''\frac{E_\phi''^{20}}{E_\phi''}b''^2$$

в соединении с крышкой

$$Q_t = \frac{1}{\eta_t}\left(\alpha_\phi h t_\phi + \alpha_{кр} h_{кр} t_\phi - \alpha_б l_{б0} t_б\right), \qquad (12.29)$$

где $\eta_t = y_n + y_б\dfrac{E_б^{20}}{E_б} + \left(y_\phi\dfrac{E_\phi^{20}}{E_\phi} + y_{кр}\dfrac{E_{кр}^{20}}{E_{кр}}\right)b^2$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Нагрузка на болты:

- в рабочих условиях

$$P_{б1} = Q_s + Q_д + R_n, \qquad (12.30)$$

- в рабочих условиях с учетом температурной нагрузки

$$P_{б2} = P_{б1} + Q_t, \qquad (12.31)$$

где Q_t учитывается только при $Q_t > 0$;

- в условиях монтажа принимается большей из следующих значений:

$$P_{б3} = \max\left\{\begin{array}{l} 0{,}5\pi D_{сп} b_0 q_{обж} \\ 0{,}5[\sigma]_б^{20}\left(nf_б + \dfrac{P_{б1}}{[\sigma]_б}\right) \\ 0{,}5[\sigma]_б^{20} nf_б + 0{,}25\pi D_{сп} b_0 q_{обж} \end{array}\right\}; \qquad (12.32)$$

- в условиях испытаний:

$$P_{б4} = Q_{s4} + Q_{д4} + R_{n4}, \qquad (12.33)$$

где Q_{s4}, $Q_{д4}$ и R_{n4} - определяются по формулам 12.24, 12.25, 12.26 соответственно для нагрузок, действующих в условиях испытаний.

12.6. Моменты, действующие на фланцы

Момент, действующий на фланец в рабочих условиях при действии внутреннего давления:

$$M_{01} = Q_s h_s + Q_д h_д + R_n 0{,}5(D_б - D_{сп}), \qquad (12.34)$$

где плечи h_s и $h_д$ в зависимости от типа фланца (рис.12.5) определяются по таблице 12.2.

Таблица12.2

Типы фланцев	h_s	$h_д$
Фланцы приварные встык и плоские приварные интегрального типа	$\dfrac{D_б - (D+2c)}{2} - 0{,}5(s_1 - c)$	$\dfrac{2D_б - (D+2c) - D_{сп}}{4}$
Плоские приварные фланцы свободного типа	$\dfrac{D_б - (D_ф + 2c)}{2}$	$\dfrac{2D_б - (D_ф + 2c) - D_{сп}}{4}$
Фланцы свободные на приварных кольцах	$\dfrac{D_б - D_k}{2}$	$\dfrac{D_б - D_s}{2}$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

При действии наружного давления:

$$M_{01}=\max\begin{cases}Q_s h_s+Q_\partial h_\partial+R_n 0{,}5(D_б-D_{сп})\\ \left(-p\dfrac{\pi(D+2c)^2}{4}-F+\dfrac{4M}{D_{сп}}\right)\left(h_s-\dfrac{D_б-D_{сп}}{2}\right)-p\dfrac{\pi\left(D_{сп}^2-(D+2c)^2\right)}{4}\left(h_\partial-\dfrac{D_б-D_{сп}}{2}\right)\end{cases} \quad (12.35)$$

Момент, действующий на фланец в рабочих условиях при действии внутреннего давления с учетом нагрузки от температурных деформаций:

$$M_{02}=M_{01}+Q_t 0{,}5(D_б-D_{сп}), \quad (12.36)$$

где Q_t учитывается только при $Q_t>0$.

При действии наружного давления:

$$M_{02}=\max\begin{cases}Q_s h_s+Q_\partial h_\partial+(R_n+Q_t)0{,}5(D_б-D_{сп})\\ \left(-p\dfrac{\pi(D+2c)^2}{4}-F+\dfrac{4M}{D_{сп}}\right)\left(h_s-\dfrac{D_б-D_{сп}}{2}\right)-p\dfrac{\pi\left(D_{сп}^2-(D+2c)^2\right)}{4}\left(h_\partial-\dfrac{D_б-D_{сп}}{2}\right)\end{cases} \quad (12.37)$$

Момент, действующий на фланец в условиях монтажа:

$$M_{03}=P_{б3}0{,}5(D_б-D_{сп}) \quad (12.38)$$

Момент, действующий на фланец в условиях испытаний:

$$M_{04}=Q_{s4}h_s+Q_{\partial 4}h_\partial+R_{n4}0{,}5(D_б-D_{сп}) \quad (12.39)$$

12.7. Расчет болтов (шпилек)

Условия прочности болтов (шпилек):

- в рабочих условиях

$$\sigma_{б1}=\frac{P_{б1}}{nf_б}\le[\sigma]_б; \quad (12.40)$$

- в рабочих условиях с учетом нагрузки от температурных деформаций

$$\sigma_{б2}=\frac{P_{б2}}{nf_б}\le 1{,}5[\sigma]_б; \quad (12.41)$$

- в условиях монтажа

$$\sigma_{б3}=\frac{P_{б3}}{nf_б}\le[\sigma]_б^{20}; \quad (12.42)$$

-в условиях испытаний

$$\sigma_{б4}=\frac{P_{б4}}{nf_б}\le[\sigma]_б. \quad (12.43)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

12.8. Расчет прокладок

Условие прочности мягких прокладок:

$$q = \frac{P_{б3}}{\pi D_{cn} b_0} \le [q] \qquad (12.44)$$

12.9. Расчет фланцев

12.9.1. Фланцы приварные встык и плоские приварные интегрального типа

Условие прочности для осевого напряжения в обечайке (втулке):

- в рабочих условиях

$$\sigma_{a1} = \frac{f\, M_{01}}{D^*(s_1 - c)^2 L} \le \min\begin{Bmatrix} 1{,}5[\sigma]_\phi; 2{,}5[\sigma]_ш - для\ приварных\ встык \\ 1{,}5[\sigma]_\phi; 1{,}5[\sigma]_ш - для\ плоских \end{Bmatrix}; \qquad (12.45)$$

- в рабочих условиях с учетом нагрузки от температурных деформаций

$$\sigma_{a2} = \frac{f\, M_{02}}{D^*(s_1 - c)^2 L} \le \min\left\{3{,}0[\sigma]_\phi; 3{,}0[\sigma]_ш\right\}; \qquad (12.46)$$

- в условиях монтажа

$$\sigma_{a3} = \frac{f\, M_{03}}{D^*(s_1 - c)^2 L} \le \min\begin{Bmatrix} 1{,}5[\sigma]^{20}_\phi; 2{,}5[\sigma]^{20}_ш - для\ приварных\ встык \\ 1{,}5[\sigma]^{20}_\phi; 1{,}5[\sigma]^{20}_ш - для\ плоских \end{Bmatrix}; \qquad (12.47)$$

-в условиях испытаний

$$\sigma_{a4} = \frac{f\, M_{04}}{D^*(s_1 - c)^2 L} \le \min\begin{Bmatrix} 1{,}5[\sigma]_\phi; 2{,}5[\sigma]_ш - для\ приварных\ встык \\ 1{,}5[\sigma]_\phi; 1{,}5[\sigma]_ш - для\ плоских \end{Bmatrix}, \qquad (12.48)$$

где f и L определяются по (46), (55) Приложения 6;

$D^* = (D + 2c)$ при $(D + 2c) \ge 20(s_1 - c)$;

$D^* = D + s_0 + c$ при $(D + 2c) < 20(s_1 - c)$ и $f > 1$;

$D^* = D + s_1 + c$ при $(D + 2c) < 20(s_1 - c)$ и $f = 1$.

Условие прочности для радиального напряжения в тарелке фланца:

- в рабочих условиях $$\sigma_{r1} = \frac{M_{01}(1{,}33he + 1)}{DLh^2} \le [\sigma]_\phi; \qquad (12.49)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

- в рабочих условиях с учетом нагрузки от температурных деформаций

$$\sigma_{r2} = \frac{M_{02}(1{,}33he+1)}{DLh^2} \le 1{,}5[\sigma]_\phi; \qquad (12.50)$$

- в условиях монтажа

$$\sigma_{r3} = \frac{M_{03}(1{,}33he+1)}{DLh^2} \le [\sigma]_\phi^{20}; \qquad (12.51)$$

-в условиях испытаний

$$\sigma_{r4} = \frac{M_{04}(1{,}33he+1)}{DLh^2} \le [\sigma]_\phi, \qquad (12.52)$$

где e определяется по (47) Приложения 6.

Условие прочности для окружного напряжения в тарелке фланца:

- в рабочих условиях

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{YM_{01}}{Dh^2} - Z\sigma_{r1} \le [\sigma]_\phi; \qquad (12.53)$$

- в рабочих условиях с учетом нагрузки от температурных деформаций

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{YM_{02}}{Dh^2} - Z\sigma_{r2} \le 1{,}5[\sigma]_\phi; \qquad (12.54)$$

- в условиях монтажа

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{YM_{03}}{Dh^2} - Z\sigma_{r3} \le [\sigma]_\phi^{20}; \qquad (12.55)$$

-в условиях испытаний

$$\sigma_{\theta 4} = \frac{YM_{04}}{Dh^2} - Z\sigma_{r4} \le [\sigma]_\phi, \qquad (12.56)$$

где Y и Z определяются по (51) (52) Приложения 6.

Кроме того, необходимо выполнение дополнительных условий прочности:

$$\frac{\sigma_{a1}+\sigma_{r1}}{2} \le [\sigma]_\phi; \quad \frac{\sigma_{a2}+\sigma_{r2}}{2} \le 1{,}5[\sigma]_\phi;$$

$$\frac{\sigma_{a3}+\sigma_{r3}}{2} \le [\sigma]_\phi^{20}; \quad \frac{\sigma_{a4}+\sigma_{r4}}{2} \le [\sigma]_\phi \qquad (12.57)$$

$$\frac{\sigma_{a1}+\sigma_{\theta 1}}{2} \le [\sigma]_\phi; \quad \frac{\sigma_{a2}+\sigma_{\theta 2}}{2} \le 1{,}5[\sigma]_\phi;$$

$$\frac{\sigma_{a3}+\sigma_{\theta 3}}{2} \le [\sigma]_\phi^{20}; \quad \frac{\sigma_{a4}+\sigma_{\theta 4}}{2} \le [\sigma]_\phi \qquad (12.58)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

12.9.2. Фланцы свободные на приварных кольцах и плоские приварные свободного типа

Условие прочности для свободных фланцев на приварных кольцах и плоских приварных фланцев свободного типа:

- в рабочих условиях

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{YM_{01}}{D_{\phi(k)} h_{(k)}^2} \le [\sigma]_{\phi(k)}; \qquad (12.59)$$

- в рабочих условиях с учетом нагрузки от температурных деформаций

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{YM_{02}}{D_{\phi(k)} h_{(k)}^2} \le 1{,}5[\sigma]_{\phi(k)}; \qquad (12.60)$$

- в условиях монтажа

$$\sigma_{\theta 3} = \frac{YM_{03}}{D_{\phi(k)} h_{(k)}^2} \le [\sigma]_{\phi(k)}^{20}; \qquad (12.61)$$

-в условиях испытаний

$$\sigma_{\theta 4} = \frac{YM_{04}}{D_{\phi(k)} h_{(k)}^2} \le [\sigma]_{\phi(k)}. \qquad (12.62)$$

12.10. Жесткость фланцев

Условие выполнения жесткости фланцев приварных в стык и плоских, выполненных как единое целое:

$$\frac{52{,}14 M_0 V}{L E_\phi (s_0 - c)^2 \sqrt{(D + 2c)(s_0 - c)} K_I} \le 1, \qquad (12.63)$$

где $M_0 = \max\{M_{01}; M_{03}\}$;

V; L определяются по (53,а); (55) Приложения 6 соответственно;

$K_I = 0{,}3$ - коэффициент жесткости для фланцев приварных в стык и плоских, выполненных как единое целое.

Условие выполнения жесткости фланцев плоских приварных свободного типа и фланцев свободных на приварных кольцах:

$$\frac{109{,}4 M_0}{E_{\phi(k)} h_{(k)}^3 \ln(K) K_L} \le 1, \qquad (12.64)$$

где K определяется по (48,б) и (48,в) Приложения 6 для фланцев плоских приварных свободного типа и колец соответственно;

$K_L = 0{,}2$ - коэффициент жесткости для фланцев плоских приварных свободного типа и фланцев свободных на приварных кольцах.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

13.Прочность и жесткость мест врезки штуцеров

Методика предназначена для расчета прочности и жесткости места соединения штуцера с сосудом (аппаратом).

Точность расчетов на прочность сосудов, аппаратов и трубопроводов в месте врезки в значительной степени определяется учетом жесткости (податливости) врезки. Как правило, при расчетах на прочность трубопроводных систем соединение трубопровода и сосуда (аппарата) заменяется мертвой опорой, что приводит к получению завышенных усилий и напряжений в узле соединения.

Методика комплексного расчета жесткости и напряженного состояния узлов врезки штуцеров создана на основании [42-46] с учетом нормативных документов [2,10], регламентирующих предельно допустимый уровень напряжений.

13.1. Расчетная схема

На рис.13.1 представлен эскиз и расчетная модель места соединения штуцера и цилиндрической обечайки.

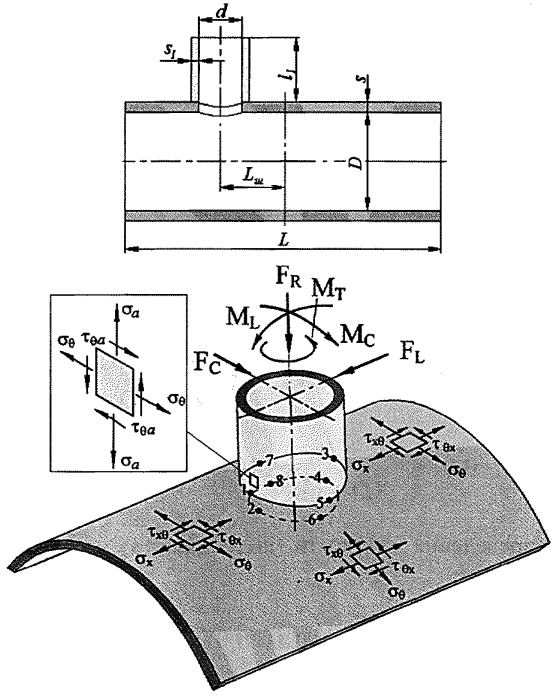


Рис.13.1. Соединение штуцера и цилиндрической обечайки

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

При определении расчетных изгибающих моментов в месте врезки помимо M_C и M_L необходимо учитывать дополнительные моменты от действия сил F_C и F_L с учетом точки приложения этих сил, соответственно.

13.2. Условия применения

Во всех расчетных случаях штуцер применяется к одиночному отверстию, при этом ось штуцера должна быть направлена по нормали к поверхности обечайки. Условия рассмотрения отверстия как одиночного рассмотрены в п.10.4.

При расчете на прочность места соединения патрубков с цилиндрическими обечайками необходимо выполнение условий:

$$0{,}0015 \le \frac{s-c}{D+s+c} \le 0{,}1; \quad 0{,}01 \le \frac{s_1-c_s}{d+2s_1} \le 0{,}1;$$

$$0{,}01 < \frac{d+2s_1}{D+s+c} < 0{,}6; 0{,}01 \le \frac{d+2s_1}{D+s+c}\sqrt{\frac{D+s+c}{s-c}} \le 10 \qquad (13.1)$$

При расчете на прочность места соединения патрубков с выпуклыми днищами:

$$0{,}0015 \le \frac{s-c}{D+s+c} \le 0{,}1; \; 0{,}01 \le \frac{s_1-c_s}{d+2s_1} \le 0{,}1;$$

$$0{,}07 < \frac{d+2s_1}{\sqrt{(D+s+c)(s-c)}} < 4; \quad 0{,}25 \le \frac{s-c}{s_1-c_s} \le 10. \qquad (13.2)$$

При определении жесткости (податливости) места соединения в цилиндрической обечайке:

$$0{,}0015 \le \frac{s}{D+s} \le 0{,}1; \; L-(2L_ш+d+2s_1) > \frac{D}{2}; \; \frac{d+2s_1}{D+s} \le 0{,}4;$$

$$0{,}2 \le \frac{s}{s_1} \le 10; \qquad 0{,}01 \le \frac{d+2s_1}{\sqrt{(D+s)s}} \le 10 \qquad (13.3)$$

При определении жесткости (податливости) места соединения в сферической обечайке:

$$0{,}0015 \le \frac{s}{D+s} \le 0{,}1; \quad \frac{d+2s_1}{D+s} \le 0{,}4; \; 0{,}07 < \frac{d+2s_1}{\sqrt{(D+s)s}} < 4 \qquad (13.4)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

В случае наклонных врезок, или не выполнении других условий применения, а также при наличии накладного (рис.10.1) или вварного кольца (рис.10.7) и торообразной вставки (рис.10.3,б) для оценки прочности и жесткости целесообразно воспользоваться методом конечных элементов (см.п.16).

13.3. Прочность места врезки штуцера

13.3.1. Общие положения

При расчете обечайки и штуцера, работающих под действием внутреннего давления p и внешних нагрузок F_R, M_C, M_L в месте соединения определяются местные мембранные $\sigma_{m\theta}$, σ_{mx} и местные изгибные $\sigma_{b\theta}$, σ_{bx} напряжения в окружном (θ) и продольном (x) (в случае штуцера осевом a) направлении соответственно (рис.13.1).

Напряжения в расчетных точках 1-8 определяются как:

$$\sigma_{\theta(x)} = \sigma_{m\theta(x)} \pm \sigma_{b\theta(x)} \qquad (13.5)$$

При определении мембранных и изгибных напряжений используются зависимости безразмерных относительных параметров напряжений от геометрических характеристик элементов врезки [15,16]. При этом, задавая нагрузки, необходимо учитывать знаки. Положительные значения должны соответствовать направлениям стрелок на расчетной схеме (рис.13.1).

При нагружении штуцера крутящим моментом M_T, и сдвиговыми силами F_C, F_L в обечайке и штуцере создаются касательные напряжения $\tau_{\theta x}$.

Для оценки прочности места соединения штуцера с сосудом (аппаратом) используются максимальные значения [10]:

- приведенных местных мембранных напряжений от давления σ_{mp};

- приведенных общих (местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + напряжения компенсации) напряжений от совместного действия давления и внешних нагрузок напряжений в расчетных точках σ_b.

Для учета влияния внешних нагрузок на местные мембранные напряжения вводится дополнительный критерий для приведенных местных мембранных напряжений от совместного действия давления и внешних нагрузок σ_{ml}.

Приведенные эквивалентные напряжения определяются по критерию максимальных касательных напряжений для плоского напряженного состояния:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$\sigma_{экв} = \max\left\{\begin{array}{l}\left|\frac{1}{2}\left|\sigma_\theta + \sigma_x \pm \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_x)^2 + 4\tau_{\theta x}^2}\right|\right|; \\ \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_x)^2 + 4\tau_{\theta x}^2}\end{array}\right\} \qquad (13.6)$$

Условие выполнения прочности **для приведенных местных мембранных напряжений от давления**:

$$\sigma_{mp} \le 1{,}3[\sigma], \qquad (13.7)$$

где $[\sigma] = \min\left\{\frac{R_{p0,2}}{1{,}5}; \frac{R_m}{2{,}6}; \frac{R_{m/10^5}}{1{,}5}\right\}$ - номинальное допускаемое напряжение.

Условие выполнения прочности для **приведенных местных мембранных напряжений от совместного действия давления и внешних нагрузок:**

$$\sigma_{ml} \le 1{,}5[\sigma] \qquad (13.8)$$

Условие выполнения прочности для **общих приведенных напряжений от совместного действия внутреннего давления и внешних нагрузок:**

$$\sigma_b \le \min\left\{\begin{array}{l}\left(2{,}5 - \frac{R_{p0,2}}{R_m}\right)\cdot R_{p0,2} \\ 2R_{p0,2} \\ R_{m/10^5}\end{array}\right\} \qquad (13.9)$$

Для аустенитных сталей вместо $\sigma_{0,2}$ принимается $\sigma_{1,0}$.

При расчетной температуре для углеродистой стали свыше 380^{0}С, для низколегированной свыше 420^{0}С, для аустенитной свыше 525^{0}С при задании значений для допускаемых напряжений необходимо учитывать ползучесть материала.

13.3.2. Цилиндрическая обечайка

При определении напряжений в цилиндрической обечайке используются относительные безразмерные усилия и моменты, которые зависят от геометрических параметров обечайки γ и штуцера β. Графики зависимостей приведены в [42].

Безразмерный геометрический параметр цилиндрической обечайки:

$$\gamma = \frac{R_m}{(s-c)}, \qquad (13.10)$$

где $R_m = \frac{D+s+c}{2}$ - средний радиус обечайки.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Безразмерный геометрический параметр штуцера:

$$\beta = \frac{0.875 r_0}{R_m}, \qquad (13.11)$$

где $r_0 = \frac{d + 2s_1}{2}$ - внешний радиус патрубка штуцера.

Относительные безразмерные усилия и моменты в окружном направлении:

$n_{\theta F}$ - мембранное усилие от действия F_R;

$m_{\theta F}$ - изгибающий момент от действия F_R;

$n_{\theta MC}$ - мембранное усилие от M_C;

$m_{\theta MC}$ - изгибающий момент от действия M_C;

$n_{\theta ML}$ - мембранное усилие от M_L;

$m_{\theta ML}$ - изгибающий момент от действия M_L.

Относительные безразмерные усилия и моменты в продольном направлении:

n_{XF} - мембранное усилие от действия F_R;

m_{XF} - изгибающий момент от действия F_R;

n_{XMC} - мембранное усилие от M_C;

m_{XMC} - изгибающий момент от действия M_C;

n_{XML} - мембранное усилие от M_L;

m_{XML} - изгибающий момент от действия M_L.

13.3.2.1. Расчет напряжений от силы F_R

Окружные мембранные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{m\theta}(F_R) = n_{\theta F} \frac{F_R}{R_m (s - c)} \qquad (13.12)$$

Окружные изгибные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{b\theta}(F_R) = m_{\theta F} \frac{6 F_R}{(s - c)^2} \qquad (13.13)$$

Продольные мембранные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{mx}(F_R) = n_{XF} \frac{F_R}{R_m (s - c)} \qquad (13.14)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Продольные изгибные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{bx}(F_R) = m_{XF}\frac{6F_R}{(s-c)^2} \tag{13.15}$$

13.3.2.2. Расчет напряжений от изгибающего момента в окружном направлении

Окружные мембранные напряжения от момента M_C:

$$\sigma_{m\theta}(M_C) = n_{\theta MC}\frac{M_C}{R_m^2\beta\,(s-c)} \tag{13.16}$$

Окружные изгибные напряжения от момента M_C:

$$\sigma_{b\theta}(M_C) = m_{\theta MC}\frac{6M_C}{R_m\beta\,(s-c)^2} \tag{13.17}$$

Продольные мембранные напряжения от момента M_C:

$$\sigma_{mx}(M_C) = n_{XMC}\frac{M_C}{R_m^2\beta\,(s-c)} \tag{13.18}$$

Продольные изгибные напряжения от момента M_C:

$$\sigma_{bx}(M_C) = m_{XMC}\frac{6M_C}{R_m\beta\,(s-c)^2} \tag{13.19}$$

13.3.2.3. Расчет напряжений от изгибающего момента в продольном направлении

Окружные мембранные напряжения от момента M_L:

$$\sigma_{m\theta}(M_L) = n_{\theta ML}\frac{M_L}{R_m^2\beta\,(s-c)} \tag{13.20}$$

Окружные изгибные напряжения от момента M_L:

$$\sigma_{b\theta}(M_L) = m_{\theta ML}\frac{6M_L}{R_m\beta\,(s-c)^2} \tag{13.21}$$

Продольные мембранные напряжения от момента M_L:

$$\sigma_{mx}(M_L) = n_{XML}\frac{M_L}{R_m^2\beta(s-c)} \tag{13.22}$$

Продольные изгибные напряжения от момента M_L:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$\sigma_{bx}(M_L) = m_{XML}\frac{6M_L}{R_m\beta\,(s-c)^2} \qquad (13.23)$$

13.3.2.4. Расчет напряжений от крутящего момента M_T

От крутящего момента в соединении штуцера и обечайки возникают касательные напряжения:

$$\tau_{\theta x} = \frac{M_T}{2\pi\, r_0^2 (s-c)} \qquad (13.24)$$

13.3.2.5. Расчет напряжений от сдвиговых сил F_C и F_L

Силы F_C и F_L создают мембранные сдвиговые напряжения в продольном (т.1-4) и окружном (т.5-8) сечении соответственно:

$$\tau_{x\theta} = \frac{F_C}{\pi\, r_0 (s-c)} \qquad (13.25)$$

$$\tau_{\theta x} = \frac{F_L}{\pi\, r_0 (s-c)} \qquad (13.26)$$

13.3.2.6. Расчет напряжений от внутреннего давления

Предложенный метод основан на двух допущениях [46].

1. Средние значения напряжений в расчетной зоне укрепления отверстия $\sigma_{\theta(x)cp}$ определяются из отношений силы давления к площади поперечного сечения в пределах расчетной области.

2. Мембранные напряжения имеют линейное распределение вдоль зоны укрепления отверстия (рис.13.2),

где $\sigma_{\theta(x)0}$ - напряжения в обечайке вне расчетной зоны;

$\sigma_{\theta(x)cp}$ - средние напряжения в расчетной зоне укрепления отверстия;

$\sigma_{\theta(x)p}$ - местные мембранные напряжения в расчетных точках сопряжения штуцера и обечайки.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

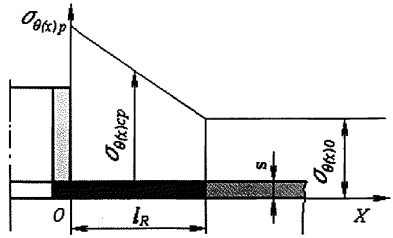


Рис.13.2. Распределение напряжений в расчетной зоне штуцера

Мембранные напряжения в расчетных точках:

$$\sigma_{\theta(x)p} = 2\sigma_{\theta(x)cp} - \sigma_{\theta(x)0} \qquad (13.27)$$

где $\sigma_{\theta(x)cp}$ - среднее напряжение в расчетной зоне укрепления отверстия;

$\sigma_{\theta(x)0}$ - напряжение в обечайке вне зоны укрепления.

Местное мембранное окружное напряжение от внутреннего давления в зоне врезки штуцера представляется в виде:

$$\sigma_{\theta p} = I_{\theta p}\, p \frac{D + (s - c)}{2(s - c)}, \qquad (13.28)$$

где $I_{\theta p}$ - коэффициент интенсификации напряжения от давления в продольном сечении обечайки (т.1-4 рис.13.2). Для поперечного сечения (т.5-8) $I_{\theta p}$ =1.

Расчетная схема для определения коэффициента интенсификации в продольном сечении представлена на рис.13.3.

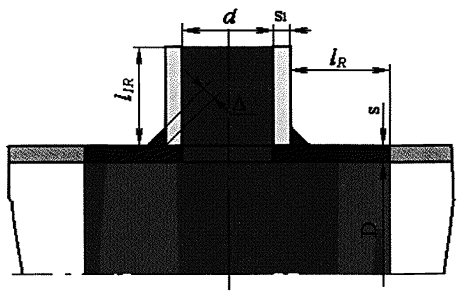


Рис.13.3. Расчетная схема штуцера в продольном сечении обечайки

Коэффициент интенсификации напряжений от внутреннего давления в продольном сечении:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$I_{\theta p}=\frac{2(s-c)\left[(d+2c_s)(l_{1R}-c)+(D+2c)(l_R+s_1+0{,}5d)\right]}{(D+s-c)\left[l_R(s-c)+l_{1R}(s_1-c_s)+\Delta^2\right]}-1 \qquad (13.29)$$

где $l_R=\min\left\{8(s-c);\ 2\sqrt{0{,}5D(s-c)}\right\}$ - расчетная длина обечайки;

$$l_{1R}=\min\left\{8(s-c);\ (s-c+0{,}55\sqrt{d(s_1-c_s)}+0{,}5\Delta)\right\}$$ -

расчетная длина внешней части штуцера;

Местное мембранное продольное напряжение от внутреннего давления:

$$\sigma_{xp}=I_{xp}p\frac{D+(s-c)}{4(s-c)} \qquad (13.30)$$

Расчетная схема для определения коэффициента интенсификации в поперечном сечении представлена на рис.13.4.

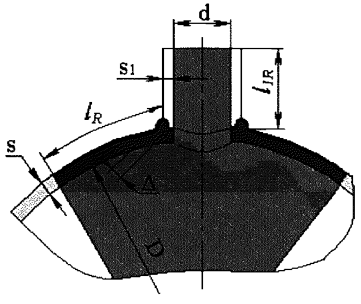


Рис.13.4. Расчетная схема штуцера в поперечном сечении обечайки

Коэффициент интенсификации напряжений от внутреннего давления в поперечном сечении:

$$I_{xp}=\frac{2(s-c)\left[2(d+2c_s)(l_{1R}-c)+(D+2c)(l_R+s_1+0{,}5d)\right]}{(D+s-c)\left[l_R(s-c)+l_{1R}(s_1-c_s)+\Delta^2\right]}-1 \qquad (13.31)$$

Для продольного сечения (т.1-4) $I_{xp}=1$.

Если расчетные коэффициенты $I_{\theta(x)p}<1$, то для определения окружных и продольных напряжений во всех расчетных точках врезки используются следующие выражения:

$$\sigma_{\theta p}=(0.5+0.5I_{\theta p})p\frac{D+(s-c)}{2(s-c)}; \qquad (13.32)$$

$$\sigma_{xp}=(0.5+0.5I_{xp})p\frac{D+(s-c)}{4(s-c)}. \qquad (13.33)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

13.3.2.7. Расчет напряжений при произвольном сложном нагружении

В общем случае все приложенные внешние нагрузки на штуцер можно разложить по трем направлениям, т.е. представить как одновременно действующие силы F_R, F_C, F_L, и моменты M_C, M_L, M_T. После определения напряжений от действующих сил и давления, суммарные напряжения в расчетных точках (1-8) определяются с учетом знаков согласно табл.13.1.

Таблица 13.1

Местные напряжения (с учетом знаков) обечайки в расчетных точках зоны врезки, нагруженной внутренним давлением и внешними нагрузками согласно [15]

Формула №	**Окружные напряжения, σ_θ**	1	2	3	4	5	6	7	8
13.12	Мембранные от F_R	-	-	-	-				
13.12	Мембранные от F_R					-	-	-	-
13.13	Изгибные от F_R	-	+	-	+				
13.13	Изгибные от F_R					-	+	-	+
13.16	Мембранные от M_C					-	-	+	+
13.17	Изгибные от M_C					-	+	+	-
13.20	Мембранные от M_L	-	-	+	+				
13.21	Изгибные от M_L	-	+	+	-				
13.28	Окружные напряжения от давления $\sigma_{\theta p}$	+	+	+	+	+	+	+	+
Суммарные мембранные окружные напряжения $\sigma_{m\theta}$									
Суммарные окружные напряжения σ_θ (13.5)									
Формула №	**Продольные напряжения, σ_X**	1	2	3	4	5	6	7	8
13.14	Мембранные от F_R	-	-	-	-				
13.14	Мембранные от F_R					-	-	-	-
13.15	Изгибные от F_R	-	+	-	+				
13.15	Изгибные от F_R					-	+	-	+

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

13.18	Мембранные от M_C					-	-	+	+
13.19	Изгибные от M_C					-	+	+	-
13.22	Мембранные от M_L	-	-	+	+				
13.23	Изгибные от M_L	-	+	+	-				
13.30	Продольные напряжения от давления σ_{xp}	+	+	+	+	+	+	+	+
Суммарные мембранные продольные напряжения σ_{mx}									
Суммарные продольные напряжения σ_x (13.5)									
13.24	Сдвиговые напряжения от M_t	+	+	+	+	+	+	+	+
13.25	Сдвиговые напряжения от F_C	+	+	-	-				
13.26	Сдвиговые напряжения от F_L					-	-	+	+
Суммарные сдвиговые напряжения $\tau_{\theta x}$									
13.9	**Приведенные общие напряжения $\sigma_{экв}$**								

13.3.3. Патрубок штуцера, соединенный с цилиндрической обечайкой

Также как и в случае цилиндрической обечайки, при расчете прочности патрубков в месте соединения используются безразмерные усилия и моменты в зависимости от геометрических параметров [43].

Безразмерные геометрические параметры:

$$\lambda = \frac{d + 2s_1}{D + s + c}\sqrt{\frac{D + s + c}{s - c}}, \qquad (13.34)$$

$$\eta = \frac{d + 2s_1}{s_1 - c_s}, \qquad (13.35)$$

$$\rho = \frac{(s - c)}{(s_1 - c_s)} \qquad (13.36)$$

Относительные безразмерные усилия и моменты в окружном (θ) направлении:

$n_{\theta F}$ - мембранное усилие от действия F_R;

$m_{\theta F}$ - изгибающий момент от действия F_R;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$n_{\theta MC}$ - мембранное усилие от M_c;

$m_{\theta MC}$ - изгибающий момент от действия M_C;

$n_{\theta ML}$ - мембранное усилие от M_L;

$m_{\theta ML}$ - изгибающий момент от действия M_L.

Относительные безразмерные усилия и моменты в осевом (а) направлении:

n_{RF} - мембранное усилие от действия F_R;

m_{RF} - изгибающий момент от действия F_R;

n_{RMC} - мембранное усилие от M_c;

m_{RMC} - изгибающий момент от действия M_C;

n_{RML} - мембранное усилие от M_L;

m_{RML} - изгибающий момент от действия M_L.

13.3.3.1. Расчет напряжений от силы F_R

Окружные мембранные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{m\theta}(F_R) = n_{\theta F}\frac{F_R}{(s-c)^2} \qquad (13.37)$$

Окружные изгибные напряжения от силы F_R по сравнению с мембранными значительно ниже, поэтому их значениями пренебрегают.

Осевые мембранные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{ma}(F_R) = \frac{F_R}{A}, \qquad (13.38)$$

где $A = \frac{\pi}{4}\left((d+2s_1)^2 - (d+2c_s)^2\right)$ - расчетная площадь поперечного сечения патрубка.

Осевые изгибные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{ba}(F_R) = \left[6m_{RF} - 3n_{RF}\right]\frac{F_R}{(s_1-c_s)^2} \qquad (13.39)$$

13.3.3.2. Расчет напряжений от изгибающего момента в окружном направлении

Окружные мембранные напряжения от момента M_C:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$\sigma_{m\theta}(M_C) = n_{\theta MC}\frac{M_C}{(s-c)^2(d+2s_1)} \qquad (13.40)$$

Окружные изгибные напряжения от момента M_C по сравнению с мембранными значительно ниже, поэтому их значениями пренебрегают.

Осевые мембранные напряжения от момента M_C:

$$\sigma_{ma}(M_C) = \frac{M_C}{W_s}, \qquad (13.41)$$

где $W_s = \dfrac{\pi\left((d+2s_1)^4 - (d+2c_s)^4\right)}{32(d+2s_1)}$ - расчетный момент сопротивления изгибу поперечного сечения патрубка.

Осевые изгибные напряжения от момента M_C:

$$\sigma_{ba}(M_C) = (6m_{RMC} - 3n_{RMC})\frac{M_c}{(s_1-c_s)^2(d+2s_1)} \qquad (13.42)$$

13.3.3.3. Расчет напряжений от изгибающего момента в продольном направлении

Окружные мембранные напряжения от момента M_L:

$$\sigma_{m\theta}(M_L) = n_{\theta ML}\frac{M_L}{(s-c)^2(d+2s_1)}, \qquad (13.43)$$

Окружные изгибные напряжения от момента M_C по сравнению с мембранными значительно ниже, поэтому их значениями пренебрегают.

Осевые мембранные напряжения от момента M_L:

$$\sigma_{ma}(M_L) = \frac{M_L}{W_s} \qquad (13.44)$$

Осевые изгибные напряжения от момента M_L:

$$\sigma_{ba}(M_L) = [6m_{RML} - 3n_{RML}]\frac{M_L}{(s_1-c_s)^2(d+2s_1)} \qquad (13.45)$$

13.3.3.4. Расчет напряжений от крутящего момента M_T

От крутящего момента в соединении штуцера и обечайки возникают касательные напряжения:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$\tau_{\theta x} = \frac{M_T}{2\pi\, r_0^2 (s_1 - c_s)} \qquad (13.46)$$

13.3.3.5. Расчет напряжений от сдвиговых сил F_C и F_L

Силы F_C и F_L создают мембранные сдвиговые напряжения в продольном (т.1-4) и окружном (т.5-8) сечении соответственно:

$$\tau_{x\theta} = \frac{F_C}{\pi\, r_0 (s_1 - c_s)}; \qquad (13.47)$$

$$\tau_{\theta x} = \frac{F_L}{\pi\, r_0 (s_1 - c_s)}. \qquad (13.48)$$

13.3.3.6. Расчет напряжений от внутреннего давления

Местные мембранные напряжения от внутреннего давления определяются в зависимости от коэффициентов интенсификации напряжения $I_{\theta(x)p}$ (13.29, 13.31).

Окружное напряжение от внутреннего давления в продольном сечении (т.1-4):

$$\sigma_{\theta p} = I_{\theta p} p \frac{D + (s - c)}{2(s - c)} \qquad (13.49)$$

Для поперечного сечения (т.5-8):

$$\sigma_{\theta p} = I_{xp} p \frac{D + (s - c)}{4(s - c)} \qquad (13.50)$$

Осевые напряжения от внутреннего давления в продольном сечении (т.1-4) определяются по формуле (13.50) при $I_{xp} = 1$. Для поперечного сечения (т.5-8) по формуле (13.49) при $I_{\theta p} = 1$.

Если расчетные коэффициенты $I_{\theta(x)p} < 1$, то для определения окружных напряжений в продольном сечении (т.1-4) и осевых в поперечном сечении (т.5-8) используется зависимость:

$$\sigma_{\theta(a)p} = (0.5 + 0.5 I_{\theta p}) p \frac{D + (s - c)}{2(s - c)} \qquad (13.51)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Для определения окружных напряжений в поперечном сечении (т.5-8) и осевых в продольном сечении (т.1-4):

$$\sigma_{\theta(a)p} = (0.5 + 0.5I_{xp})p\frac{D+(s-c)}{4(s-c)} \qquad (13.52)$$

13.3.3.7. Расчет напряжений при произвольном сложном нагружении

В общем случае все приложенные внешние нагрузки на штуцер можно разложить по трем направлениям, т.е. представить как одновременно действующие силы F_R, F_C, F_L, и моменты M_C, M_L, M_T. После определения напряжений от действующих сил и давления, суммарные напряжения в расчетных точках 1-8 (рис.13.1.1) определяются с учетом знаков согласно табл. 13.2.

Таблица 13.2

Местные напряжения (с учетом знаков) патрубка в расчетных точках зоны врезки, нагруженной внутренним давлением и внешними нагрузками согласно [16]									
формула №	**Окружные напряжения, σ_θ**	1	2	3	4	5	6	7	8
13.37	Мембранные от F_R	-	-	-	-	-	-	-	-
13.40	Мембранные от M_C					-	-	+	+
13.43	Мембранные от M_L	-	-	+	+				
13.49-13.50	Окружные напряжения от давления $\sigma_{\theta p}$	+	+	+	+	+	+	+	+
Суммарные мембранные окружные напряжения $\sigma_{m\theta}$									
Суммарные окружные напряжения σ_θ (13.5)									
	Осевые напряжения, σ_a	1	2	3	4	5	6	7	8
13.38	Мембранные от F_R	-	-	-	-	-	-	-	-
13.39	Изгибные от F_R	-	+	-	+	-	+	-	+
13.41	Мембранные от M_C					-	-	+	+
13.42	Изгибные от M_C					-	+	+	-
13.44	Мембранные от M_L	-	-	+	+				
13.45	Изгибные от M_L	-	+	+	-				

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

13.49-13.50	Осевые напряжения от давления σ_{ap}	+	+	+	+	+	+	+	+
Суммарные мембранные осевые напряжения σ_{ma}									
Суммарные осевые напряжения σ_a (13.5)									
13.46	Сдвиговые напряжения от M_t	+	+	+	+	+	+	+	+
13.47	Сдвиговые напряжения от F_C	+	+	-	-				
13.48	Сдвиговые напряжения от F_L					-	-	+	+
Суммарные сдвиговые напряжения $\tau_{\theta a}$									
13.9	**Приведенные общие напряжения $\sigma_{экв}$**								

13.3.4. Сферическая оболочка

Расчетная схема врезки штуцера в сферическую оболочку приведена на рис 13.5.

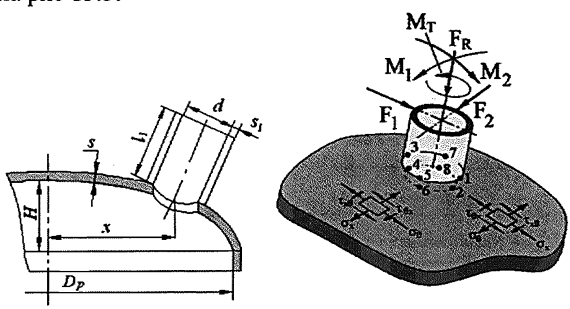


Рис. 13.5. Расчетная схема соединения штуцера со стенкой сосуда

Также как и в случае с цилиндрической обечайкой, при определении расчетных изгибающих моментов в месте врезки помимо M_1 и M_2 необходимо учитывать дополнительные моменты от действия сил F_1 и F_2 с учетом точки приложения этих сил, соответственно.

Расчетная схема врезки штуцера в сферическую оболочку может также использоваться при определении прочности и жесткости врезки штуцера в эллиптическое днище. При этом для определения R_m вместо диаметра D используется расчетный диаметр для эллиптических днищ (рис.13.5):

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$D_p = \frac{D^2}{2H}\sqrt{1-4\frac{(D^2-4H^2)}{D^4}\cdot x^2} \qquad (13.53)$$

При определении напряжений в сферической оболочке используются относительные безразмерные усилия и моменты, которые зависят от геометрических параметров оболочки и патрубка U, γ и ρ. Графики зависимостей приведены в [42].

Безразмерные геометрические параметры:

$$U = \frac{r_0}{\sqrt{R_m(s-c)}}; \qquad (13.54)$$

$$\gamma = \frac{r_m}{(s_1 - c_s)}, \qquad (13.55)$$

где $r_m = \frac{d + s_1 + c_s}{2}$ - средний радиус патрубка.

$$\rho = \frac{(s-c)}{(s_1 - c_s)} \qquad (13.56)$$

Относительные безразмерные усилия и моменты в тангенсальном (θ) направлении:

$n_{\theta F}$ - мембранное усилие от действия F_R;

$m_{\theta F}$ - изгибающий момент от действия F_R;

$n_{\theta M}$ - мембранное усилие от $M_{1(2)}$;

$m_{\theta M}$ - изгибающий момент от $M_{1(2)}$.

Относительные безразмерные усилия и моменты радиальном (X) направлении:

n_{RF} - мембранное усилие от действия F_R;

m_{RF} - изгибающий момент от действия F_R;

n_{RM} - мембранное усилие от $M_{1(2)}$;

m_{RM} - изгибающий момент от $M_{1(2)}$.

13.3.4.1. Расчет напряжений от силы F_R

Тангенсальные мембранные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{m\theta}(F_R) = n_{\theta F}\frac{F_R}{R_m(s-c)} \qquad (13.57)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Тангенсальные изгибные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{b\theta}(F_R) = m_{\theta F} \frac{6F_R}{(s-c)^2} \tag{13.58}$$

Радиальные мембранные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{mx}(F_R) = n_{RF} \frac{F_R}{(s-c)^2} \tag{13.59}$$

Радиальные изгибные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{bR}(F_R) = m_{RF} \frac{6F_R}{(s-c)^2} \tag{13.60}$$

13.3.4.2. Расчет напряжений от изгибающих моментов M_1 и M_2

Тангенсальные мембранные напряжения в расчетных точках 1-4 от момента M_1 и в точках 5-8 от момента M_2:

$$\sigma_{m\theta}(M) = n_{\theta M} \frac{M}{(s-c)^2\sqrt{R_m(s-c)}} \tag{13.61}$$

Тангенсальные изгибные напряжения от момента M_1 в точках 1-4 и от момента M_2 в точках 5-8:

$$\sigma_{b\theta}(M) = m_{\theta M} \frac{6M}{(s-c)^2\sqrt{R_m(s-c)}} \tag{13.62}$$

Радиальные мембранные напряжения от момента M_1 в точках 1-4 и от момента M_2 в точках 5-8:

$$\sigma_{mR}(M) = n_{RM} \frac{M}{(s-c)^2\sqrt{R_m s}} \tag{13.63}$$

Радиальные изгибные напряжения от момента M_1 в точках 1-4 и от момента M_2 в точках 5-8:

$$\sigma_{bR}(M) = m_{RM} \frac{6M}{(s-c)^2\sqrt{R_m s}} \tag{13.64}$$

13.3.4.3. Расчет напряжений от крутящего момента M_T

От крутящего момента в соединении штуцера и обечайки возникают касательные напряжения:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$\tau_{\theta x} = \frac{M_T}{2\pi\, r_0^2 (s-c)} \qquad (13.65)$$

13.3.4.4. Расчет напряжений от сдвиговых сил F_1 и F_2

Силы F_1 в точках 5-8 и F_2 в точках 1-4 создают мембранные сдвиговые напряжения:

$$\tau_{x\theta} = \frac{F_{1(2)}}{\pi\, r_0 (s-c)} \qquad (13.66)$$

13.3.4.5. Расчет напряжений от внутреннего давления

Местные мембранные напряжения от внутреннего давления определяются в зависимости от коэффициента интенсификации напряжения, полученного для поперечного сечения обечайки (13.31) $I_{\theta p} = I_{xp}$.

Окружное напряжение от внутреннего давления во всех расчетных точках:

$$\sigma_{\theta p} = I_{\theta p} p \frac{D + (s-c)}{4(s-c)} \qquad (13.67)$$

Продольное (радиальное) напряжение от внутреннего давления во всех расчетных точках определяется по формуле 13.67 при $I_{\theta p} = 1$.

Если расчетный коэффициент $I_{\theta p} < 1$, то для определения окружных и осевых напряжений во всех расчетных точках врезки используется коэффициент интенсификации равный $(0{,}5 + 0{,}5 I_{\theta p})$.

13.3.4.6. Расчет напряжений при произвольном сложном нагружении

В общем случае, все приложенные нагрузки на штуцер можно разложить по трем направлениям, т.е. представить как одновременно действующие силы F_R, F_1, F_2, и моменты M_1, M_2, M_T. После определения напряжений от действующих сил и давления, суммарные напряжения в расчетных точках (1-8) определяются с учетом знаков согласно табл. 13.3.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Таблица 13.3

Местные напряжения в сферической оболочке в зоне врезки штуцера, работающего под действием внутреннего давления и внешних нагрузок согласно [15]									
формула №	**Окружные (отн. патр.) напряжения, σ_θ**	1	2	3	4	5	6	7	8
13.57	Мембранные от F_R	-	-	-	-	-	-	-	-
13.58	Изгибные от F_R	-	+	-	+	-	+	-	+
13.61	Мембранные от M_1					-	-	+	+
13.62	Изгибные от M_1					-	+	+	-
13.61	Мембранные от M_2	-	-	+	+				
13.62	Изгибные от M_2	-	+	+	-				
13.67	Окружные напряжения от давления $\sigma_{\theta p}$	+	+	+	+	+	+	+	+
Суммарные мембранные окружные напряжения $\sigma_{m\theta}$									
Суммарные окружные напряжения σ_θ (13.5)									
	Радиальные (отн. патр.) напряжения, σ_x	1	2	3	4	5	6	7	8
13.59	Мембранные от F_R	-	-	-	-	-	-	-	-
13.60	Изгибные от F_R	-	+	-	+	-	+	-	+
13.63	Мембранные от M_1					-	-	+	+
13.64	Изгибные от M_1					-	+	+	-
13.63	Мембранные от M_2	-	-	+	+				
13.64	Изгибные от M_2	-	+	+	-				
13.67	Радиальные напряжения от давления σ_{xp}	+	+	+	+	+	+	+	+
Суммарные мембранные продольные напряжения σ_{mx}									
Суммарные продольные напряжения σ_x (13.5)									
13.65	Сдвиговые напряжения от M_t	+	+	+	+	+	+	+	+
13.66	Сдвиговые напряжения от F_l					-	-	+	+

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

13.66	Сдвиговые напряжения от F_2	+	+	-	-				
Суммарные сдвиговые напряжения $\tau_{\theta x}$									
13.9	**Приведенные общие напряжения $\sigma_{экв}$**								

13.3.5. Патрубок штуцера, соединенный со сферической оболочкой

При расчете патрубка используются относительные безразмерные усилия и моменты, полученные при расчете сферической оболочки.

13.3.5.1. Расчет напряжений от силы F_R

Окружные мембранные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{m\theta}(F_R) = n_{\theta F}\frac{F_R}{(s-c)^2} \qquad (13.68)$$

Окружные изгибные напряжения в патрубке от силы F_R по сравнению с мембранными значительно ниже, поэтому их значениями пренебрегают.

Осевые мембранные напряжения от силы F_R:

$$\sigma_{ma}(F_R) = \frac{F_R}{A}, \qquad (13.69)$$

где $A = \frac{\pi}{4}\left((d+2s_1)^2 - (d+2c_s)^2\right)$ - расчетная площадь поперечного сечения патрубка.

Осевые изгибные напряжения от силы F_R для всех расчетных точек:

$$\sigma_{ba}(F_R) = \left[6m_{RF} - 3n_{RF}\right]\frac{F_R}{(s_1-c_s)^2} \qquad (13.70)$$

13.3.5.2. Расчет напряжений от изгибающего момента $M_{1(2)}$

Окружные мембранные напряжения в расчетных точках 1-4 от момента M_1 и в точках 5-8 от момента M_2:

$$\sigma_{m\theta}(M) = n_{\theta M}\frac{M}{(s-c)^2(d+2s_1)} \qquad (13.71)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Окружные изгибные напряжения от момента $M_{1(2)}$ по сравнению с мембранными значительно ниже, поэтому их значениями пренебрегают.

Осевые мембранные напряжения от момента M_1 в точках 1-4 и от момента M_2 в точках 5-8:

$$\sigma_{ma}(M) = \frac{M}{W_s}, \tag{13.72}$$

где $W_s = \dfrac{\pi\left((d+2s_1)^4 - (d+2c_s)^4\right)}{32(d+2s_1)}$ - расчетный момент сопротивления изгибу поперечного сечения патрубка.

Осевые изгибные напряжения от момента M_1 в точках 1-4 и от момента M_2 в точках 5-8:

$$\sigma_{ba}(M_C) = (6m_{RM} - 3n_{RM})\frac{M_c}{(s_1 - c_s)^2(d+2s_1)}. \tag{13.73}$$

13.3.5.3. Расчет напряжений от крутящего момента M_T

От крутящего момента в соединении штуцера и обечайки возникают касательные напряжения:

$$\tau_{\theta x} = \frac{M_T}{2\pi\, r_0^2 (s_1 - c_s)} \tag{13.74}$$

13.3.5.4. Расчет напряжений от сдвиговых сил F_1 и F_2

Силы F_1 в точках 5-8 и F_2 в точках 1-4 создают мембранные сдвиговые напряжения:

$$\tau_{x\theta} = \frac{F_{1(2)}}{\pi\, r_0 (s - c)} \tag{13.75}$$

13.3.5.5. Расчет напряжений от внутреннего давления

Как и в случае для сферической обечайки, местные мембранные напряжения от внутреннего давления определяются в зависимости от коэффициента интенсификации напряжения, полученного для поперечного сечения обечайки (13.3.27) $I_{\theta p} = I_{xp}$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Окружное напряжение от внутреннего давления во всех расчетных точках:

$$\sigma_{\theta p} = I_{\theta p} p \frac{D + ((s + s_2) - c)}{4((s + s_2) - c)} \qquad (13.76)$$

Осевое напряжение от внутреннего давления во всех расчетных точках определяется по формуле 13.3.72 при $I_{\theta p} = 1$.

Если расчетный коэффициент $I_{\theta p} < 1$, то для определения окружных и осевых напряжений во всех расчетных точках врезки вместо коэффициента интенсификации в формулы (13.3.72) подставляется выражение $(0{,}5 + 0{,}5 I_{\theta p})$.

13.3.5.6. Расчет напряжений при произвольном сложном нагружении

В общем случае все приложенные внешние нагрузки на штуцер можно разложить по трем направлениям, т.е. представить как одновременно действующие силы F_R, F_C, F_L, и моменты M_C, M_L, M_T. После определения напряжений от действующих сил и давления суммарные напряжения в расчетных точках (1-8) определяются с учетом знаков согласно табл. 13.4.

Таблица 13.4

Местные напряжения (с учетом знаков) патрубка в расчетных точках зоны врезки, нагруженной внутренним давлением и внешними нагрузками согласно [15]									
формула №	**Окружные напряжения, σ_θ**	1	2	3	4	5	6	7	8
13.68	Мембранные от F_R	-	-	-	-	-	-	-	-
13.71	Мембранные от M_1					-	-	+	+
13.71	Мембранные от M_2	-	-	+	+				
13.76	Окружные напряжения от давления $\sigma_{\theta p}$	+	+	+	+	+	+	+	+
Суммарные мембранные окружные напряжения $\sigma_{m\theta}$									
13.5	Суммарные окружные напряжения σ_θ								

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

	Осевые напряжения, σ_a	1	2	3	4	5	6	7	8
13.69	Мембранные от F_R	-	-	-	-	-	-	-	-
13.70	Изгибные от F_R	-	+	-	+	-	+	-	+
13.72	Мембранные от M_1					-	-	+	+
13.73	Изгибные от M_1					-	+	+	-
13.72	Мембранные от M_2	-	-	+	+				
13.73	Изгибные от M_2	-	+	+	-				
13.76	Осевые напряжения от давления σ_{ap}	+	+	+	+	+	+	+	+
Суммарные мембранные осевые напряжения σ_{ma}									
Суммарные осевные напряжения σ_a (13.5)									
13.74	Сдвиговые напряжения от M_t	+	+	+	+	+	+	+	+
13.75	Сдвиговые напряжения от F_1					-	-	+	+
13.75	Сдвиговые напряжения от F_2	+	+	-	-				
13.5	Суммарные сдвиговые напряжения $\tau_{\theta a}$								
13.9	**Приведенные общие напряжения $\sigma_{экв}$**								

13.4. Жесткость места соединения штуцера

13.4.1. Общие положения

Расчет жесткостей (податливостей) места соединения штуцера с сосудом (аппаратом) производится в трех направлениях:

линейная жесткость вдоль оси штуцера (осевая), K_R;

угловая жесткость в поперечной плоскости обечайки, K_θ;

угловая жесткость в продольной плоскости обечайки, K_L.

Соответствующие указанным жесткостям податливости представляют собой обратные величины $\frac{1}{K_R}; \frac{1}{K_\theta}; \frac{1}{K_L}$.

Связи штуцера с обечайкой в остальных трех направлениях принимаются абсолютно жесткими. Податливости в этом случае задаются равными нулю.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

В случае если конструкция врезки штуцера и обечайки не удовлетворяет условиям применения (см. п.13.2.) (например, наклонный штуцер) целесообразно применить метод конечных элементов.

13.4.2. Цилиндрическая обечайка

Определение осевой жесткости врезки штуцера в цилиндрическую обечайку проводится с помощью зависимостей безразмерного параметра $\left[\delta \frac{ER_m}{F_R}\right]$ от геометрических характеристик деталей врезки $\left(\frac{R_ш}{s}\right)$, $\left(\frac{C}{R_ш}\right)$ и $\left(\frac{L_e}{R_m}\right)$ [44], представленных на рис.13.6,

где δ - перемещение штуцера вдоль его оси;

$R_m = \frac{D+s}{2}$ - средний радиус цилиндрической обечайки без учета коррозии;

L_e - эффективная длина цилиндрической обечайки, в случае смещения оси штуцера относительно центра обечайки на $L_ш$, $L_e = L - \frac{4L_ш^2}{L}$ (рис.13.1);

$C = 0.425(d + 2s_1)$ - приведенный радиус штуцера.

Осевая жесткость штуцера (радиальная обечайки) в месте врезки определяется как:

$$K_R = \frac{F_R}{\delta} = \frac{ER_m}{\left[\delta \frac{ER_m}{F_R}\right]} \qquad (13.77)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

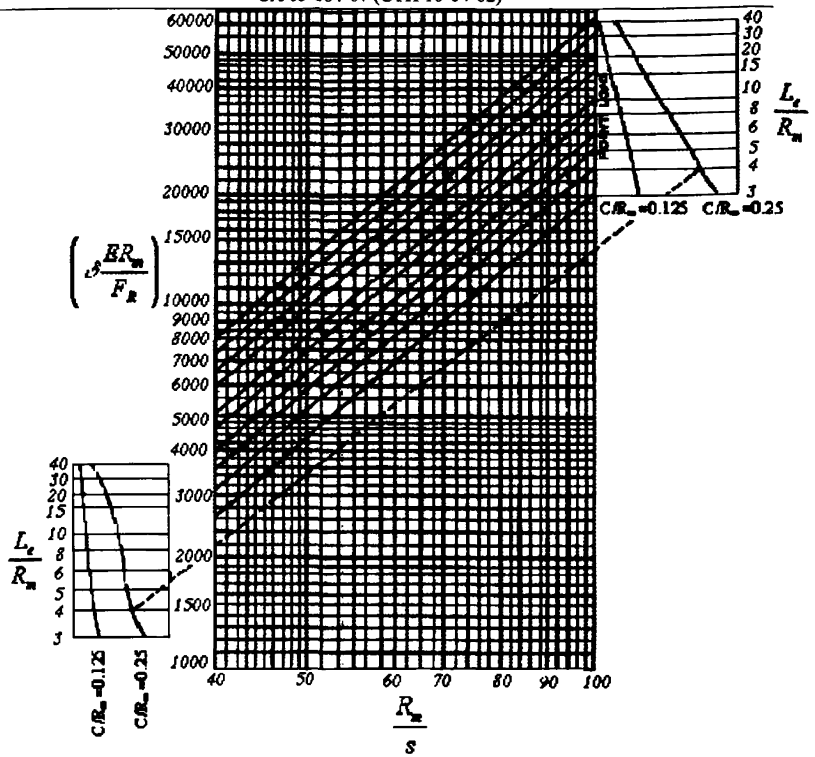


Рис.13.6. Относительное радиальное перемещение обечайки в зоне врезке штуцера

Для определения изгибной жесткости врезки штуцера в поперечной K_θ и продольной K_L плоскостях обечайки используются зависимости безразмерных параметров $\left[\frac{M_{\theta(L)}}{Es^3\varphi_{\theta(L)}}\right]$ от геометрических характеристик деталей врезки $\lambda = \frac{(d+2s_1)}{2R_m}\sqrt{\frac{2R_m}{s}}$, $\Lambda = \frac{L_{eb}}{\sqrt{2R_m s}}$ и $\left(\frac{s}{s_1}\right)$, представленных на рис. 13.7 , 13.8.

где $M_{\theta(L)}$ - изгибающий момент в поперечном (θ) и продольном (L) направлениях обечайки соответственно;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$\varphi_{\theta(L)}$ - угол поворота штуцера от изгибающего момент в поперечном (θ) и продольном (L) направлениях соответственно;

$L_{eb} = \dfrac{2L^2 - 8L_ш^2}{L + 2\sqrt{0.25L^2 - L_ш^2}}$ - эффективная длина обечайки для определения изгибной жесткости.

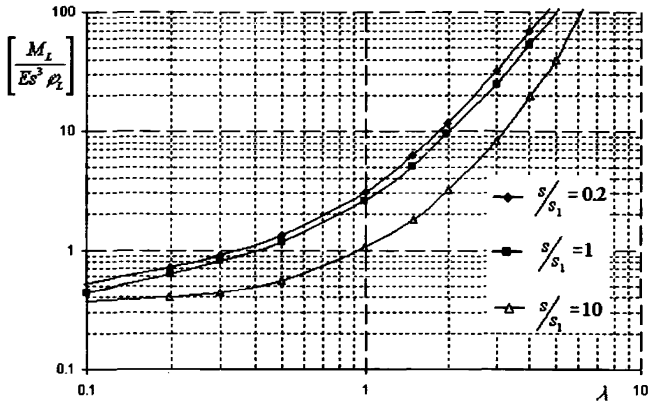


Рис.13.7. Относительное угловое перемещение в продольной плоскости при $\Lambda \geq 10$

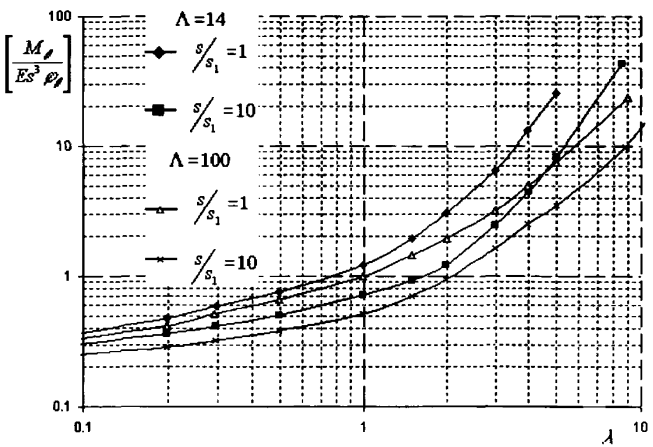


Рис.13.8. Относительное угловое перемещение в поперечной плоскости обечайки

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Изгибная жесткость в окружном и продольном направлениях:

$$K_{\theta(L)} = \frac{M_{\theta(L)}}{\varphi_{\theta(L)}} = Es^3 \left(\frac{M_{\theta(L)}}{Es^3 \varphi_{\theta(L)}} \right) \qquad (13.78)$$

13.4.3. Сферическая обечайка

Определение жесткости в месте врезки штуцера в сферическую обечайку вдоль оси штуцера производится с помощью зависимости безразмерного параметра $\left[\delta \frac{Es^2}{F_R R_m} \right]$ от геометрической характеристики деталей врезки $\left(u = \frac{0.91(d+s_1)}{\sqrt{R_m s}} \right)$ [44], представленной на рис.13.9.

Расчетная схема врезки штуцера в сферическую обечайку, как и в случае прочностных расчетов, может также использоваться при определении жесткости соединения штуцера в эллиптическое днище.

При этом для определения R_m используется расчетный диаметр для эллиптических днищ по (13.53).

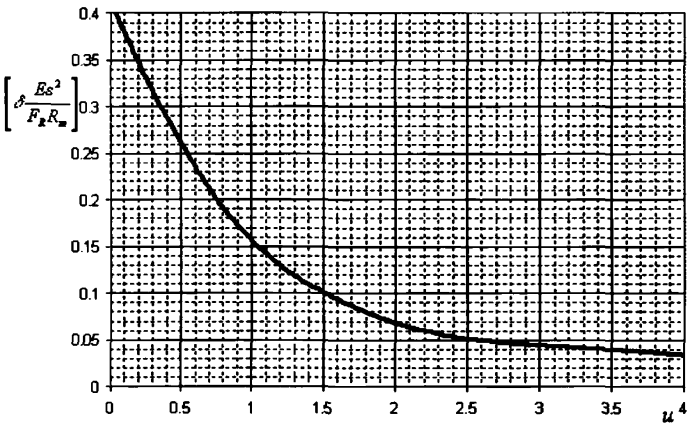


Рис.13.9. Относительное радиальное перемещение штуцера

Радиальная жесткость обечайки в месте врезки штуцера определяется как:

$$K_R = \frac{Es^2}{R_m \left[\delta \frac{Es^2}{F_R R_m} \right]} \qquad (13.79)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Для определения изгибной жесткости врезки штуцера в плоскости действия момента M используется зависимость безразмерного параметра $\left[\frac{\delta}{M}\frac{Es^2}{\sqrt{\frac{R_m}{s}}}\right]$ от геометрической характеристики деталей врезки $\left(u=\frac{0.91(d+s_1)}{\sqrt{R_m s}}\right)$, представленной на рис.13.10.

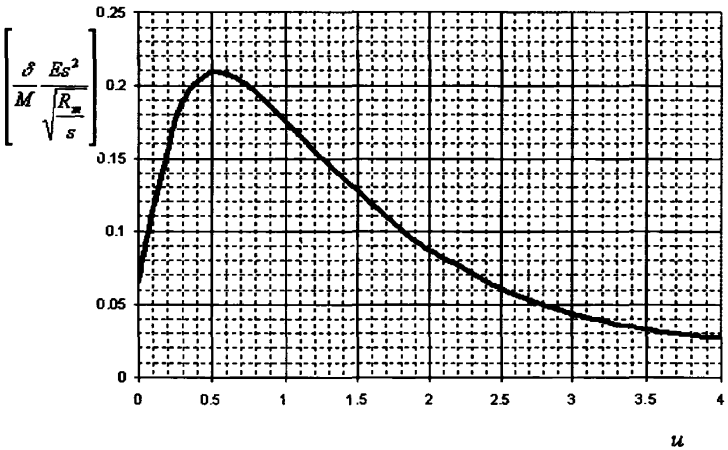


Рис.13.10. Относительное радиальное перемещение края штуцера

По полученным перемещениям определяются угловые перемещения оси штуцера:

$$\varphi=\frac{\delta}{0{,}5(d+s_1)} \tag{13.80}$$

Таким образом, изгибная жесткость врезки штуцера:

$$K_b=\frac{M}{\varphi}=\frac{0{,}5(d+s_1)Es^2}{\sqrt{\frac{R_m}{s}}\left[\frac{\delta}{M}\frac{Es^2}{\sqrt{\frac{R_m}{s}}}\right]} \tag{13.81}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

14.Сосуды с рубашками

Расчет сосудов с рубашками на прочность и устойчивость проводится на основании [9].

14.1. Расчетные схемы

Расчетные схемы сосудов с рубашками приведены на рис. 14.1-14.4.

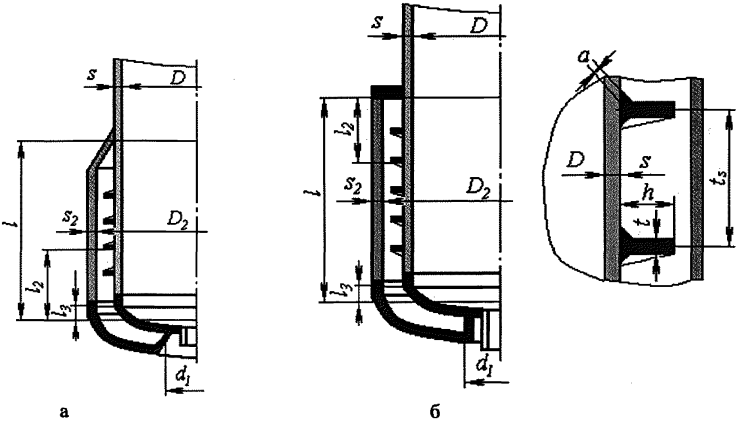


Рис. 14.1. Сосуды с U-образной рубашкой

а – с сопряжением при помощи конуса; б – с сопряжением при помощи кольца

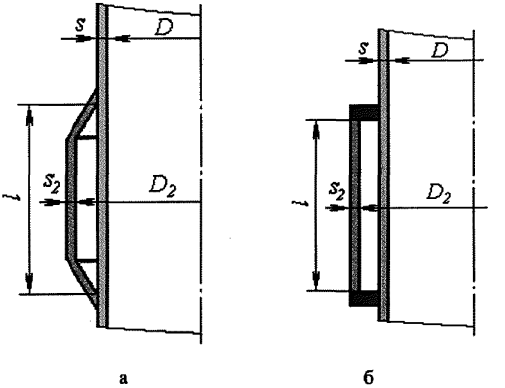
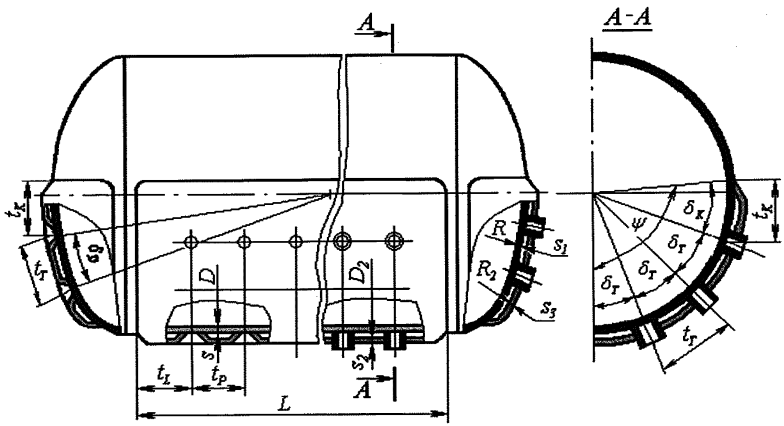


Рис. 14.2. Сосуды с цилиндрической рубашкой

а – с сопряжением при помощи конуса; б-с сопряжением при помощи кольца

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)



а б

Рис.14.3. Сосуды с рубашками, сопряженными с корпусом сосуда анкерными трубами или отбортовкой

а – с отбортовкой; б – с анкерными трубами

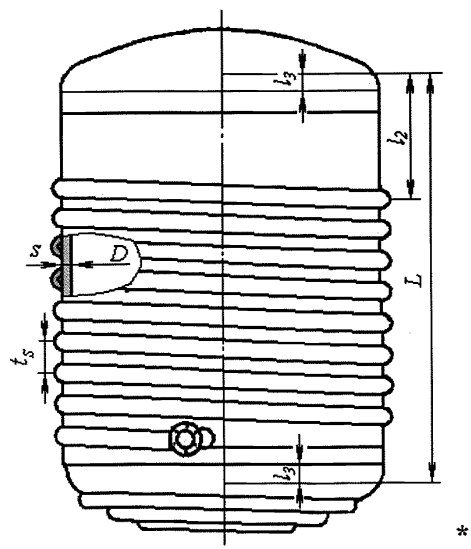


Рис. 14.4. Сосуды со змеевиковыми каналами

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

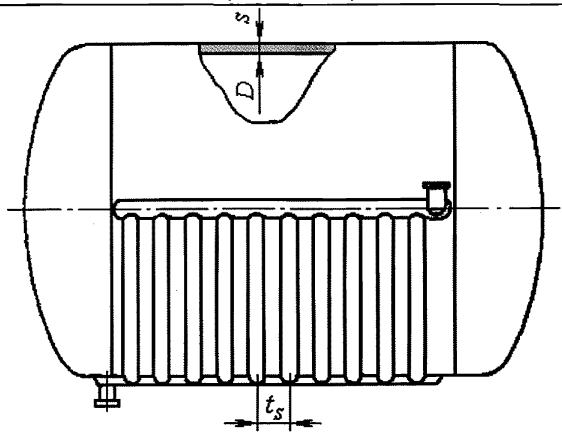


Рис.14.5. Сосуды с регистровыми каналами

Общее условие применения:

расчетные формулы применимы при условии, что в рубашке действует только избыточное внутреннее давление ($p_2 \geq 0$).

14.2. Сосуды с U-образной рубашкой

Условия применения:

$$\frac{D_2}{D} \leq 1{,}2; \quad 0{,}001 \leq \frac{s}{D} \leq 0{,}5\left(\frac{D_2}{D} - 1\right); \quad \frac{s_2}{s} \leq 1{,}2\,. \tag{14.1}$$

Для сопряжений при помощи конуса:

$\alpha = 30°$, $\alpha = 45°$; радиус отбортовки $r_0 = \dfrac{e_0 - 0{,}5s_2}{1 - \cos\alpha}$ (14.2)

Для сопряжения при помощи кольца:

$h_0 \geq 1{,}5s_2$ - для U-образной рубашки;

$0{,}5\sqrt{Ds} > h_0 \geq s_2$ - для цилиндрической рубашки. (14.3)

Диаметр окружности сопряжения рубашки с днищем сосуда:

$$d_1 \leq 0{,}4D_2 \tag{14.4}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

14.2.1. Цилиндрические обечайки

Расчет цилиндрических обечаек рубашки и сосуда на внутреннее избыточное давление проводится по п.3.2.1. Расчетное давление для рубашки равно p_2 и расчетное давление для сосуда p, если $p > 0$.

Расчет цилиндрической обечайки сосуда на наружное давление проводится по п.3.2.2. При $p < 0$ за расчетное давление для всего сосуда принимается $|p$, а для зоны рубашки $p_2 + p$. При $p > 0$ расчетное давление в зоне рубашки равно p_2. Расчетные длины для всего сосуда L и для зоны рубашки l определяются по п.3.1.

Цилиндрическая стенка сосуда с кольцами жесткости рассчитывается по п.3.3. Направляющие спирали рассматриваются как кольца жесткости, если выполнены следующие условия:

а) шаг спирали t_s должен быть не более 0,3 D. Если число витков направляющей спирали $n_1 \le 1$, то цилиндрическая обечайка рассчитывается как гладкая;

б) за расчетную длину l_2 принимается расстояние вдоль оси сосуда от конечной точки расчетной длины (рис.14.1.1) до точки замыкания первого витка направляющей спирали, охватывающего всю окружность сосуда. Для направляющих спиралей, выполненных с концевыми кольцами, длина l_2 принимается равной расстоянию вдоль оси сосуда от конечной точки расчетной длины до концевого кольца;

в) расчетные длины b, l_1 и l_2 при расчете по п.3.3 определяются по формулам:

$$b = \max\{t_s - t; l_2 - 0{,}5t\}; \tag{14.5}$$

$$l_1 = \frac{l}{n_1 - 1}; \tag{14.6}$$

$$l_e = \min\left\{t_s; t + 1{,}1\sqrt{D(s-c)}\right\} \tag{14.7}$$

г) поперечное сечение направляющей спирали должно, удовлетворять условию $\frac{h}{t} \le 8$, чтобы исключить потерю устойчивости из плоскости;

д) для обеспечения прочности обоих угловых швов на направляющей спирали должно быть выполнено условие:

$$a \ge \frac{2th}{\varphi_0 D}. \tag{14.8}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетный коэффициент сварного шва φ_0 определяется как отношение длины сварного шва к общей длине спирали. При этом расстояние между двумя концами прерванного шва не должно превышать восьмикратной толщины стенки обечайки *s*, а сумма длин сварных швов не должна быть меньше половины наружной поверхности направляющей спирали на одном витке. Оба конца спирали должны начинаться швом.

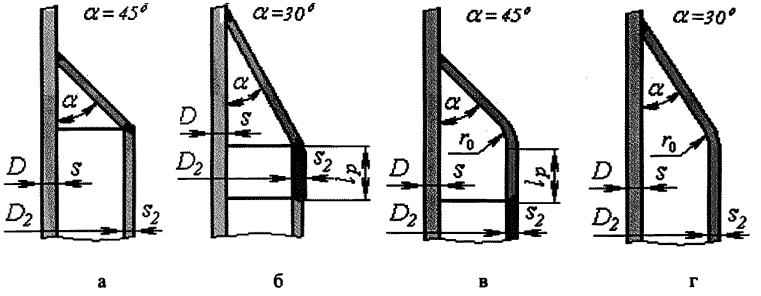
14.2.2. Днища

Расчет выпуклых днищ на внутреннее избыточное и наружное давление проводится по п.4. Расчетные давления определяются п.14.2.1.

При расчете днища рубашки отверстие диаметром d_1 не учитывается.

14.2.3. Сопряжение рубашки с корпусом сосуда при помощи конуса

На рис.14.6. представлены расчетные схемы сопряжения рубашки с корпусом.



а б в г

Рис.14.6. Сопряжение рубашки с корпусом сосуда при помощи конуса

14.2.3.1. Вспомогательные параметры.

Коэффициент осевого усилия:

$$A = \frac{DD_2 - d_1^2}{D_2^2} \qquad (14.9)$$

Коэффициент, учитывающий расстояние между корпусом сосуда и рубашкой:

$$\varepsilon = \frac{e_0}{\sqrt{D_2(s_2 - c)}} \qquad (14.10)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Коэффициент радиуса конической отбортовки:

$$\rho = \begin{cases} 0 & \text{для конусов по рис.14.2.1.а,б} \\ \dfrac{r_0 + 0{,}5s_2}{\sqrt{D_2(s_2 - c)}} & \text{для конусов почерт.14.2.1.в,г} \end{cases} \qquad (14.11)$$

Коэффициент длины сопряжения:

$$\lambda = \begin{cases} 2\varepsilon + 0{,}25\rho & для\ \alpha = 30^\circ \\ \varepsilon\sqrt{2} + 0{,}45\rho & для\ \alpha = 45^\circ \end{cases} \qquad (14.12)$$

Коэффициент отношения прочности корпуса сосуда и рубашки:

$$\chi = 1{,}25\frac{[\sigma](s-c)\sqrt{D(s-c)}}{[\sigma]_2(s_2-c)\sqrt{D_2(s_2-c)}} \cdot \left[\sqrt{1 - \frac{pD}{2[\sigma](s-c)}} + \sqrt{1 - \frac{(p-p_2)D}{2[\sigma](s-c)}}\right] \qquad (14.13)$$

Если в сосуде вакуум ($p < 0$), то в формулу (14.13) подставляют p=0.

Расчетные коэффициенты прочности сварного шва:

$$\varphi_{R1} = \varphi_{T1}; \qquad (14.14)$$

$$\varphi_{R2} = \begin{cases} \varphi_{T2}, & \text{– для конусов по рис.14.2.1.в,г} \\ \varphi_{T2}, \text{если } l_R \le 0{,}5\sqrt{D_2(s_2-c)} & \\ 1{,}0, \text{ если } l_R > 0{,}5\sqrt{D_2(s_2-c)} & \text{– для конусов по рис.14.2.1.а,б} \end{cases} \qquad (14.15)$$

Относительная эффективная несущая длина конуса:

$$\mu = \min\left\{\frac{\varepsilon}{\sin\alpha}; \sqrt{\frac{\varphi_{R1} + \varphi_{R2}}{4\cos\alpha}}\right\} \qquad (14.16)$$

Допускаемое избыточное давление в рубашке:

$$[p_2] = \frac{2[\sigma]_2(s_2 - c)\varphi_{p2}}{D_2 + (s_2 - c)} \cdot \frac{B}{A} \qquad (14.17)$$

Коэффициент сопряжения при помощи конуса

$$B = 2\sqrt{\frac{(s_2 - c)}{D_2}} \min\{X_1; X_2; X_3\}, \qquad (14.18)$$

где $X_1 = \dfrac{\cos\alpha}{\varepsilon} \cdot \left(\dfrac{\varphi_{R1} + \varphi_{R2}}{4\cos\alpha} + \lambda f_1\right)$; (14.19)

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$X_2 = f_2\sqrt{1+\varphi_{R2}}; \tag{14.20}$$

$$X_3 = \chi f_3 + (\frac{\varphi_{R1}+\varphi_{R2}}{4\mu\cos\alpha} + \mu) f_4. \tag{14.21}$$

Коэффициент прочности f_1:

$$f_1 = \begin{cases} \frac{1}{2}\left(1+\lambda+\chi-\frac{(1-\chi)^2}{4\lambda}\right) & для\ \lambda > \frac{|\chi-1|}{2}; \\ \lambda + \min\{1;\chi\} & для\ \lambda \le \frac{|\chi-1|}{2}. \end{cases} \tag{14.22}$$

Коэффициент прочности f_2:

- при $\alpha = 30^0$ $f_2 = 1{,}22(1+0{,}51\rho+2\varepsilon z)$, (14.23)

где $z = \begin{cases} 2\left(\varepsilon_0/\varepsilon\right) & для\ \varepsilon \ge \varepsilon_0 \\ 1+\left(\varepsilon_0/\varepsilon\right)^2 & для\ \varepsilon < \varepsilon_0 \end{cases}$;

$\varepsilon_0 = 0{,}38\sqrt{1+0{,}54\rho+0{,}15\rho^2}$;

- при $\alpha = 45^0$ $f_2 = 0{,}71+0{,}52\rho+\varepsilon z$, (14.24)

где $z = \begin{cases} 2\left(\varepsilon_0/\varepsilon\right) & для\ \varepsilon \ge \varepsilon_0 \\ 1+\left(\varepsilon_0/\varepsilon\right)^2 & для\ \varepsilon < \varepsilon_0 \end{cases}$;

$\varepsilon_0 = 0{,}60\sqrt{1+0{,}83\rho+0{,}37\rho^2}$

Коэффициент прочности f_3:

- при $\alpha = 30^0$ $f_3 = \sqrt{3} + \dfrac{1{,}34\rho^3\left(\dfrac{0{,}2}{\varepsilon}\right)^4}{24\varepsilon+\rho^2\max\left\{0;\left(\dfrac{0{,}5}{\sqrt{3}\varepsilon}\right)^3-1\right\}}$ (14.25)

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

- при $\alpha = 45^0$ $f_3 = 1 + \dfrac{12\rho^3\left(\dfrac{0{,}2}{\varepsilon}\right)^4}{12\varepsilon + \rho^2 \max\left\{0; \left(\dfrac{0{,}5}{\varepsilon}\right)^3 - 1\right\}}$ (14.26)

Коэффициент прочности f_4:

- при $\alpha = 30^0$

$$f_4 = \sqrt{3}\max\left\{1; \min\left\{1; 0{,}8 + \frac{4{,}56}{100\varepsilon}\right\} + \frac{\rho}{3}\min\left\{1; \frac{\frac{4}{3}}{1 + \sqrt{3}\varepsilon\left(1 + \sqrt{3}\varepsilon\left(1 + 9{,}5\varepsilon\right)\right)}\right\}\right\} \quad (14.27)$$

- при $\alpha = 45^0$

$$f_4 = \max\left\{1; \min\left\{1; 0{,}8 + \frac{6{,}0}{100\varepsilon}\right\} + \frac{\rho}{2}\min\left\{1; \frac{\frac{4}{3}}{1 + \varepsilon\left(1 + \varepsilon\left(1 + 5{,}5\varepsilon\right)\right)}\right\}\right\} \quad (14.28)$$

14.2.3.2. Определение размеров сопряжения при помощи конуса.

Толщина стенки конуса должна быть равна или больше толщины стенки сопряженной цилиндрической рубашки. Если необходимо увеличить толщину стенки конуса, то следует одновременно увеличить и толщину стенки сопряженной цилиндрической обечайки рубашки на длине

$$l_p \geq \begin{cases} 0{,}7\sqrt{D_2(s_2 - c)} & \text{для конусов по рис.14.6.}а,б; \\ 0{,}5\sqrt{D_2(s_2 - c)} & \text{для конусов по рис.14.6.}в,г. \end{cases} \quad (14.29)$$

Расчетная толщина стенки конуса:

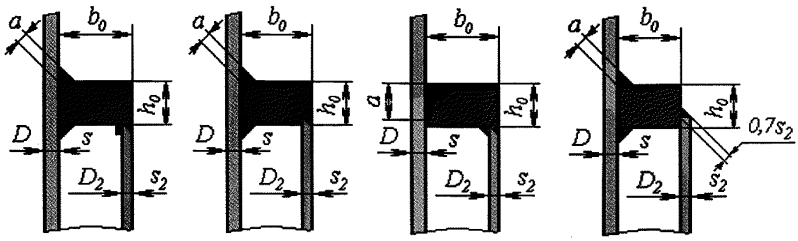
$$s_{2p} = \frac{p_2 D_2}{2[\sigma]_2 \varphi_{p2} \cdot \dfrac{B}{A} - p_2} \quad (14.30)$$

Условие выполнения прочности стенки конуса:

$$s_2 \geq s_{2p} + c \quad (14.31)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

14.2.4. Сопряжение рубашки с корпусом сосуда при помощи кольца



а б в г

Рис.14.7. Сопряжение рубашки с корпусом сосуда при помощи кольца

Вспомогательные параметры.

Расчетные коэффициенты прочности сварного шва:

$$\varphi_{R1} = \begin{cases} 1{,}0 & \text{для колец по рис.14.7.}а,б,г \\ \left(\dfrac{a}{h_0}\right)^2 \varphi_{T1} & \text{для колец по рис.14.7.}в \end{cases} \qquad (14.32)$$

$$\varphi_{R2} = \begin{cases} \varphi_{T2} & \text{для колец по рис.14.7.}б,в \\ 0 & \text{для колец по рис.14.7.}г \end{cases} \qquad (14.33)$$

Параметры кольца:

$$H = \frac{h_0 - c}{\sqrt{D(s-c)}}; \qquad (14.34)$$

$$P = \frac{p_2}{[\sigma]_0 \varphi_{p0}}; \qquad (14.35)$$

$$Q = \frac{D\varphi_{R1}}{2b_0\varphi_{p0}}. \qquad (14.36)$$

Относительный момент нагружения:

$$M_0 = \frac{\varepsilon_0}{b_0} \cdot \frac{D_2^2}{2D(s-c)} A, \qquad (14.37)$$

где A – коэффициент осевого усилия по формуле (14.9).

Относительный реактивный момент в стенке сосуда:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$M_1 = \frac{[\sigma](s-c)}{2[\sigma]_0 \varphi_{p0} b_0}\left[2 - \frac{1}{2}\left(\frac{pD}{2[\sigma](s-c)}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{(p-p_2)D}{2[\sigma](s-c)}\right)^2\right] \quad (14.38)$$

Если $p > p_2 > 0$, то в формулу (14.38) подставляют $p = 0$.

Относительный реактивный момент в стенке рубашки:

$$M_2 = \frac{[\sigma]_2(s_2-c)\varphi_{R2}}{2[\sigma]_0 \varphi_{p0} b_0} \cdot \frac{D_2(s_2-c)}{D(s-c)} \quad (14.39)$$

Относительный реактивный момент в месте сопряжения кольца со стенкой сосуда:

$$M_3 = \min\{QH^2; (1+2H)M_1\} \quad (14.40)$$

Допускаемое избыточное давление в рубашке:

$$[p_2] = (H^2 + M_2 + M_3)\frac{[\sigma]_0 \varphi_{p0}}{M_0} \quad (14.41)$$

Расчетная высота кольца:

$$h_{0p} = \sqrt{D(s-c)}\max\left\{\sqrt{\frac{PM_0 - M_2}{1+Q}}; \sqrt{PM_0 - M_1 - M_2 + M_1^2} - M_1\right\} \quad (14.42)$$

При наличии в формуле (14.42) отрицательного значения под знаком радикала соответствующий член при определении максимума не учитывают. Если в обоих членах значении под знаком радикала отрицательны, то толщину кольца определяют по (14.3).

Условие выполнения прочности стенки кольца:

$$h_0 \geq h_{0p} + c \quad (14.43)$$

Размер сварного шва между сосудом и кольцом при сопряжениях (см. рис.14.7. а,б,г) должен удовлетворять условию:

$$a \geq \frac{s-c}{2} \cdot \frac{\max\left\{\frac{p_2 D}{2(s-c)}; 2[\sigma]_0 \varphi_{p0}(PM_0 - M_2 - H^2)\frac{b_0}{h_0}\right\}}{\min\{[\sigma]_0; [\sigma]\}} \quad (14.44)$$

14.2.5. Нагрузка от собственного веса

Собственные веса G и G_2 вызывают в конусе или в кольце осевое усилие

$$F = \begin{cases} +G_2, & \text{если опоры на сосуде} \\ -G, & \text{если опоры на рубашке} \end{cases} \quad (14.45)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Несущая способность от совместного действия осевого усилия и избыточного давления в рубашке определяется по формуле:

$$\left|\frac{p_2}{[p_1]}+\frac{4F}{\pi[p_2]D_2^2A}\right|\le 1, \qquad (14.46)$$

где $[p_2]$ – допускаемое избыточное давление по формуле (14.17) для сопряжения при помощи конуса и по формуле (14.41) для сопряжения при помощи кольца;

A – коэффициент осевого усилия по формуле (14.9).

14.3. Сосуды с цилиндрическими рубашками

Условия применения расчетных формул такие же, как и для сосудов с U- образными рубашками.

14.3.1. Цилиндрические обечайки

Цилиндрические обечайки рассчитывают в соответствии с п. 14.2.1.

14.3.2. Сопряжение при помощи конуса

Конические сопряжения удовлетворяют требованиям прочности, если они выполнены с толщиной стенки, равной толщине стенки цилиндрической обечайки рубашки, и выполняется условие:

$$e_0 \le 1{,}8\sqrt{D_2(s_2-c)} \qquad (14.47)$$

14.3.3. Сопряжение при помощи кольца

Расчетная высота кольца:

$$h_{0p}=0{,}6e_0\sqrt{\frac{p_2}{[\sigma]_2}} \qquad (14.48)$$

Условие выполнения прочности стенки кольца:

$$h_0 \ge \max\{s_2; h_{0p}+c\} \qquad (14.49)$$

Размер сварного шва между сосудом и кольцом при сопряжениях по рис.14.2.*а, б, г* должен удовлетворять условию:

$$a \ge 0{,}4h_0\frac{\max\left\{p_2\frac{e_0}{h_0};\min\left\{[\sigma]_0;2[\sigma]\cdot\left(\frac{s}{h_0}\right)^2\right\}\right\}}{\min\{[\sigma]_0;[\sigma]\}} \qquad (14.50)$$

для колец при сопряжении по рис.14.2.в:

$$a=h_0 \qquad (14.51)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

14.3.4. Нагрузка от собственного веса сосуда или рубашки

Проверка несущей способности при нагружении конических или кольцевых сопряжений собственным весом сосуда или рубашки проводится по формуле:

$$|F| \le \frac{\pi}{4} D_2^2 [p_2] A, \tag{14.52}$$

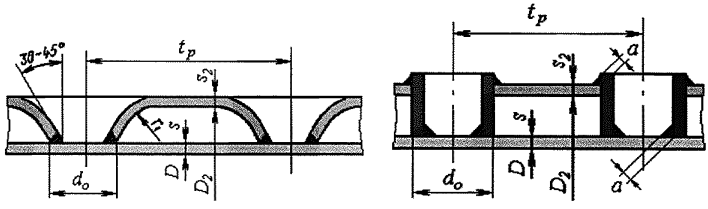
где F – осевое усилие по п. 14.2.5.;

$[p_2]$ – допускаемое избыточное давление по формуле (14.17) для сопряжения при помощи конуса и по формуле (14.41) для сопряжения при помощи кольца;

A – коэффициент осевого усилия по формуле (14.9).

При наличии компенсатора на рубашке формула (14.52) применима при условии, что опорные элементы не расположены на рубашке.

14.4. Сосуды, частично охваченные рубашками, сопряженными с корпусом анкерными трубами и отбортовками



а б

Рис.14.8. Сопряжение рубашки с корпусом сосуда
а – отбортовкой; б – анкерными трубами.

Дополнительные условия применения:

$$\delta_T \le 30^\circ \min\left\{1; 4\sqrt{\frac{L}{D}} \cdot \sqrt[4]{\frac{s-c}{D}}\right\};\ 0{,}8 \le \frac{t_p}{t_T} \le 1{,}25;\ a \ge 0{,}7 \min\{s_0; s_2\} \tag{14.53}$$

Расчетная формула для сопряжения отбортовкой применима при углах отбортовки от 30 до 45° (рис.14.8) и при проваренных сварных швах.

14.4.1. Цилиндрическая обечайка

Расчет цилиндрической обечайки сосуда на внутреннее избыточное давление проводится по п.3.2.1.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчет цилиндрической обечайки сосуда на наружное давление проводится по п.3.2.2. При $p < 0$ за расчетное давление для всего сосуда принимается p.

Части цилиндрической обечайки сосуда, охваченные рубашкой, и цилиндрические части рубашки при нагружении давлением p_2 рассчитывают по п. 14.4.3. как плоские участки.

Если $p < 0$, то чтобы исключить появление вмятин на цилиндрической обечайке сосуда необходимо, чтобы:

$$\frac{s-c}{D} \geq \sqrt[3]{4{,}5 \cdot \frac{p}{E_1}\left(\frac{\delta_T}{360^0}\right)^2} \qquad (14.54)$$

14.4.2. Днища

Расчет выпуклых днищ на внутреннее избыточное и наружное давление проводится по п.4. Расчетные давления определяются п.14.2.1.

Части днища сосуда, охваченные рубашкой, и части рубашки в зоне днища при нагружении давлением p_2 рассчитывают по п.14.4.3 как плоские участки. При этом в формулы вместо толщины стенки цилиндрической обечайки s подставляют толщину днища сосуда s_1 и вместо толщины стенки цилиндрической обечайки s_2 толщину днища рубашки s_4.

14.4.3. Плоские участки

Допускаемое избыточное давление в рубашке:

- для стенки сосуда

$$[p_2] = [\sigma]\frac{(s-c)^2}{t_p t_T} \cdot f_5 \left[1 - \left(\frac{pD_R}{2[\sigma]_1 (s-c)}\right)^2\right] \qquad (14.55)$$

- для стенки рубашки

$$[p_2] = [\sigma]_2 \cdot \frac{(s_2-c)^2}{t_p t_T} \cdot f_6 \qquad (14.56)$$

Коэффициенты прочности f_5 и f_6 определяются в зависимости от отношения d_0/t_0 и от относительного реактивного момента m:

$$f_5 = \frac{\pi}{2}\left(1 + 1{,}3\frac{1{,}8 + 2{,}3\frac{d_0}{t_0}}{\ln\frac{t_0}{d_0}}\right) \qquad (14.57)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$f_6 = \frac{\pi}{2}\left(1 + 1{,}3\frac{1{,}3 + \frac{m}{2} + (1 + 1{,}3m)\frac{d_0}{t_0}}{\ln\frac{t_0}{d_0}}\right), \qquad (14.58)$$

где $t_0 = \sqrt{t_p t_T}$ - эффективный шаг анкерных труб или отбортовок;

$$m = \begin{cases} 1{,}0 & \text{– для сопряжений отбортовкой;} \\ \min\left\{1; \left(\frac{a}{s_2}\right)^2; \left(\frac{s_0}{s_2}\right)^2\right\} & \text{–для сопряжений анкерными трубами.} \end{cases}$$

Расчетные величины шага:

$$t_1 = (s - c)\sqrt{\frac{[\sigma]}{p_2} \cdot f_5\left[1 - \left(\frac{pD_R}{2[\sigma](s - c)}\right)^2\right]}; \qquad (14.59)$$

$$t_2 = (s_2 - c)\sqrt{\frac{[\sigma]_2}{p_2} \cdot f_6} \qquad (14.60)$$

Расчетные толщины стенок:

$$s_p = t_0\sqrt{\frac{p_2}{[\sigma]f_5} + \left(\frac{pD_R}{2[\sigma]t_0}\right)^2} \qquad (14.61)$$

$$s_{2p} = t_0\sqrt{\frac{p_2}{[\sigma]_2 f_6}} \qquad (14.62)$$

Условия выполнения прочности элементов плоских участков:

$$t_0 \le \min\{t_1; t_2\}; \qquad (14.63)$$

$$s \ge s_p + c; \qquad (14.64)$$

$$s_2 \ge s_{2p} + c \qquad (14.65)$$

Размеры сопряжений при помощи конуса определяют по п. 14.3.2 и размеры сопряжений при помощи кольца – по п.14.3.3.

Расстояния от края рубашки до первого ряда анкерных труб или отбортовок должны удовлетворять условиям:

$$t_L \le t_p \min\left\{1; 0{,}5 + \sqrt{\frac{t_T}{t_p f_6}}\right\}; \qquad (14.66)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$t_K \le t_T \min\left\{1;0{,}5+\sqrt{\frac{t_p}{t_T f_6}}\right\}. \qquad (14.67)$$

Расчетная толщина отбортовки:

$$s_{2p} = \frac{p_2 t_p t_T \eta}{0{,}7\pi(d_0 - s_2)\min\{[\sigma]_t;[\sigma]_2\}}, \qquad (14.68)$$

где $\eta = 1 - \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_0}{t_0}\right)^2$.

Условия выполнения прочности стенки отбортовки:

$$s_2 = a \ge s_{2p} + c \qquad (14.69)$$

Расчетная толщина анкерных труб:

$$s_{0p} = \frac{p_2 t_p t_T \eta}{\pi(d_0 - 2s_0)\min\{[\sigma]_0;[\sigma]_t;[\sigma]_2\}} \qquad (14.70)$$

Условия выполнения прочности анкерных труб:

$$a \ge 1{,}41 s_{0p} + c; \qquad (14.71)$$

$$s_0 \ge s_{0p} + c. \qquad (14.72)$$

14.5. *Сосуды с каналами*

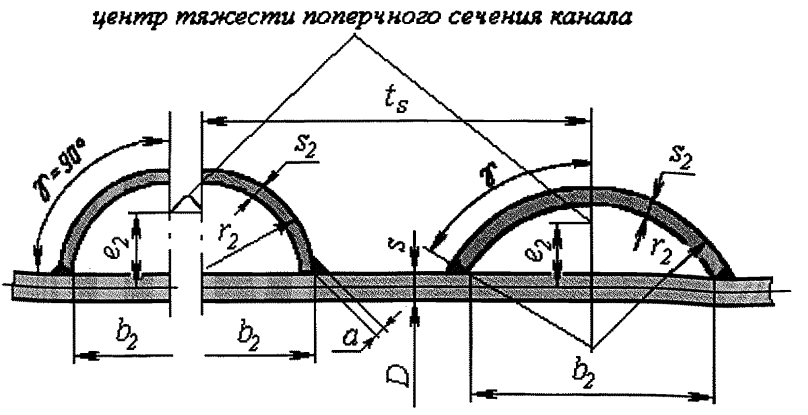


Рис.14.9. Каналы

а – полукруглое сечение с V-образным швом; б – полукруглое сечение с угловым швом; в – сегментное сечение.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Условия применения:

$$b_2 \le 0{,}1D_1; \quad h_2 \ge s_2; \quad 20^\circ \le \gamma \le 90^\circ \tag{14.73}$$

Расчетные формулы для каналов применимы при V-образных сварных швах с полным проваром, а для каналов полукруглого сечения также и при угловых швах.

14.5.1. Цилиндрическая обечайка

Расчет цилиндрической обечайки сосуда на внутреннее избыточное давление проводится по п.3.2.1.

Расчет цилиндрической обечайки сосуда на наружное давление проводится по п.3.2.2. При $p < 0$ за расчетное давление для всего сосуда принимается $|p|$.

В сосудах со змеевиковым каналом (рис.14.4) его можно рассматривать как кольцо жесткости и цилиндрическую обечайку рассчитывать как укрепленную кольцами жесткости по п.3.3. при условии, что учитываются следующие особенности:

а) шаг змеевикового канала t_s должен быть не более 0,3D. Если $n_2 \le n_3 + 1$, то цилиндрическую обечайку рассчитывается как гладкая обечайка;

б) расчетная длина l_2 при расчете по п.3.3. определяется как осевое расстояние от начала или конца расчетной длины (рис.3.1.4) до места окончания первого витка змеевикового канала, охватывающего всю окружность рубашки;

в) расчетные значения b, l_l и l_e при расчете по п.3.3 определяются по формулам:

$$b = \max\{t_s - b_2; l_2 - 0{,}5b_2; b_2\}; \; l_1 = \frac{L}{n_2 - n_3 - 1};$$

$$l_e = \min\begin{Bmatrix} t_s; 2(s_2 - c) + b_2 + 1{,}1\sqrt{D(s-c)}; t_s - b_2 + 1{,}1\sqrt{D(s-c)}; \\ 2(s_2 - c) + 1{,}1\sqrt{D(s-c)} \end{Bmatrix} \tag{14.74}$$

г) используемые в п.3.3. величины e, I_K и A_K определяют по формулам:

$$e = e_2 = \frac{s-c}{2} + 0{,}65h_2; \; I_K = r_3 h_2^2 (s_2 - c)0{,}3 \cdot \frac{\gamma}{90^\circ};$$

$$A_K = \begin{cases} r_3(s_2 - c)\pi \dfrac{\gamma}{90^\circ} & \text{для } p_1 \le 0; \\ r_3(s_2 - c)\pi \dfrac{\gamma}{90^\circ} - \dfrac{\pi}{4} \cdot \dfrac{p_2}{[\sigma]_2} \cdot h_2 b_2 & \text{для } p_1 > 0. \end{cases} \tag{14.75}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Цилиндрическую обечайку сосуда при нагружении давлением p_2 в каналах рассчитывают как полосу обечайки шириной b_2 по п. 14.5.3.

14.5.2. Полоса обечайки под каналами

Допускаемое избыточное давление в каналах по окружности цилиндрической обечайки:

$$[p_2]=\frac{4[\sigma](s-c)^2}{b_2^2+4r_3(s-c)\cos\gamma}\left(1+\frac{b_2^2}{2D(s-c)}\right) \qquad (14.76)$$

Если $p < 0$, то должно дополнительно выполняться условие:

$$\frac{p_2}{[\sigma]_2}\le 1-\left[\frac{|p|D}{4[\sigma](s-c)}\right]\left[\frac{D(s-c)+b_2^2}{D(s-c)+0{,}5b_2^2}\right] \qquad (14.77)$$

Если $p_2 > p > 0$, то должно дополнительно выполняться условие:

$$\frac{p_2-p}{[p_2]}\le 1-\left(\frac{pD}{4[\sigma](s-c)}\right) \qquad (14.78)$$

Допускаемое избыточное давление в каналах вдоль оси цилиндрической обечайки и каналах на днище:

$$[p_2]=\frac{4[\sigma](s-c)^2}{b_2^2}\left[1-\left(\frac{pD_R-2p_2r_3\cos\gamma}{2[\sigma](s-c)}\right)^2\right] \qquad (14.79)$$

14.5.3. Днища

Выпуклые днища рассчитывают по п.4 на внутреннее избыточное давление с расчетным давлением p, если $p > 0$, и на наружное давление с расчетным давлением p, если $p< 0$. Выпуклые днища при нагружении давлением p_2 в каналах рассчитывают как полосу обечайки шириной b_2 по п. 14.5.2.

14.5.4. Каналы

Вспомогательные параметры.

Коэффициент понижения прочности V в зоне сопряжения штуцера с каналом рассчитывают по п.10.4. Если канал и штуцер выполнены из трубы одинаковых размеров и материала, то коэффициент V рассчитывают по формуле:

$$V=\frac{1}{0{,}9+\sqrt{\dfrac{r_3}{8(s_2-c)}}} \qquad (14.80)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетное значение коэффициента прочности сварного шва:
для V-образного шва (рис.14.9. *а, в*)

$$\varphi_{R5} = \varphi_{R6} = \varphi_{T2}; \tag{14.81}$$

для углового шва (рис.14.9. *б*)

$$\varphi_{R5} = \min\left\{0,4;0,7\frac{a}{s_2 - c}\right\};\ \varphi_{R6} = 0,4 \tag{14.82}$$

Коэффициенты понижения прочности φ_3 и φ_4 каналов:

$$\varphi_3 = \min\{V;\varphi_{R5}\};\ \varphi_4 = \min\{V;\varphi_{R6}\} \tag{14.83}$$

Допускаемое избыточное давление в канале:

$$[p_2] = \frac{[\sigma]_2 (s_2 - c)}{r_3} \cdot \varphi_3 \tag{14.84}$$

Расчетная толщина стенки канала:

$$s_{2p} = \frac{2r_2 p_2}{2[\sigma]_2 \varphi_4 + p_2}; \tag{14.85}$$

Условия выполнения прочности стенки канала:

$$s_2 \geq s_{2p} + c \tag{14.86}$$

при этом размер сварного шва для угловых швов

$$a \geq 0,6 s_{2p} \tag{14.87}$$

14.5.5. Распределительные каналы в сосудах с регистровыми каналами

Расчет производят в соответствии с п. 14.5.4. , причем следует использовать величины V, φ_3, φ_4, определяемые по формулам:

$$V = 1 - \frac{b_2}{t_s};\ \varphi_3 = V\varphi_{R5};\ \varphi_4 = V\varphi_{R6}, \tag{14.88}$$

где $\varphi_{R5}, \varphi_{R6}$ определяются по (14.82).

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

15. Расчет элементов сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородсодержащих средах

Расчет элементов сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородсодержащих средах, проводится на основании [16,17].

15.1. Условия применения

Методика применяется для сосудов и аппаратов из углеродистых и низколегированных сталей, работающих при статических и повторностатических нагрузках и температуре не выше 200^0С и парциальном давлении сероводорода более 0,0003МПА [16].

В сосудах и аппаратах должны применяться следующие типы выпуклых днищ:

- эллиптические с отношением высоты выпуклой части к диаметру $\frac{H}{D} = 0{,}25$;
- полусферические.

Расстояние от края штуцера до края внешней поверхности выпуклого днища, измеряемое по проекции образующей на плоскости основания днища, должно быть:

при $s < 10мм$ $\quad 0{,}10(D + 2s)$;

при $s \geq 10мм$ $\quad 0{,}09D + s$.

Патрубки с внутренней части аппарата должны быть выполнены заподлицо с аппаратом.

Отношение толщины стенки патрубка к толщине стенки обечайки или днища не должно превышать 1,5.

Плоские приварные днища должны применяться только с отбортовкой (тип 11, табл.5.1.1).

Конические днища и переходы должны применяться только с отбортовкой независимо от центрального угла при вершине конуса.

Кольца жесткости применяются только с наружной стороны обечайки.

В сосудах и аппаратах, а также в трубопроводах должны применяться фланцы приварные встык на $P_y \geq 1{,}6МПа$. Допускается применять плоские приварные фланцы при $D_y \geq 400мм$ и $P_y \leq 1{,}0МПа$ при двухстороннем сплошном проваре.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

15.2. Допускаемые напряжения, коэффициенты запаса прочности

Допускаемые напряжения в рабочих условиях $[\sigma]$ при расчете по предельным нагрузкам:

$$[\sigma] = \eta \cdot \min\left(\frac{R_e \text{ или } R_{p0,2}}{n_т}; \frac{R_m}{n_в} \right) \qquad (15.1)$$

Коэффициенты запаса прочности, в зависимости от группы аппарата в рабочих условиях определяются по таблице 15.1. Группа аппарата определяется по [22].

Таблица 15.1

Группа аппарата	Коэффициент запаса прочности	
	$n_т$	$n_в$
I	2,0	3,0
II	1,8	3,0
III, IV	1,6	2,6

Допускаемые напряжения для условий монтажа, гидро- и пневмоиспытаний и коэффициенты запаса устойчивости определяются по п.2.2.

Расчетные значения предела текучести, временного сопротивления и коэффициентов линейного расширения принимаются в соответствии с Приложениями 2,3.

Для элементов сосудов и аппаратов, рассчитываемых не по предельным нагрузкам (например, узлы врезки штуцеров или фланцевые соединения) допускаемые напряжения определяются по соответствующей нормативно-технической документации [11,16,10,41].

15.3. Расчет обечаек и днищ

Расчет обечаек и днищ производится по пп. 3, 4. При этом величины допускаемых напряжений определяются по п.15.2.

Дополнительной проверке подлежит толщина цилиндрической обечайки в месте присоединения плоского отбортованного днища. Напряжения в месте присоединения должны отвечать условию:

$$\alpha_д P \frac{D + s - c}{2(s - c)} \le 1{,}5[\sigma] \qquad (15.2)$$

где $\alpha_д$ определяется в зависимости от $\dfrac{r(s-c)}{(D+s-c)^2}$ по рис.15.1.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

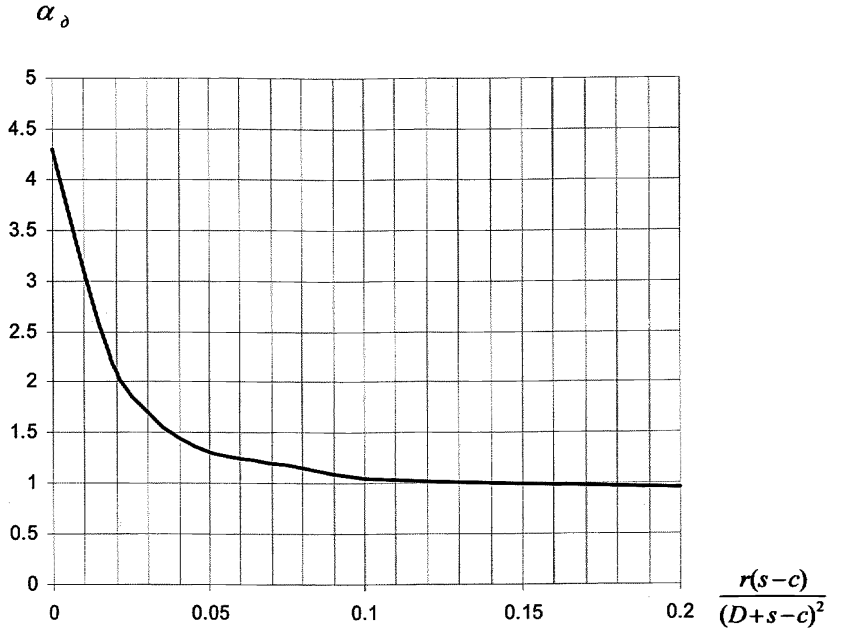


Рис.15.1.

15.4. Расчет укрепления отверстий

Расчет укрепления отверстий в обечайках и днищах проводится по п.10 с последующей проверкой условий прочности.

Расчетное напряжение в месте врезки штуцера в цилиндрическую обечайку должно отвечать условию:

$$K p \frac{D_p + s - c}{2(s-c)} \le 1{,}5[\sigma]\chi_1 \qquad (15.3)$$

Расчетное напряжение в месте врезки штуцера в выпуклое днище должно отвечать условию:

$$K_Д p \frac{D_p + s - c}{4(s-c)} \le 1{,}5[\sigma]\chi_1 \qquad (15.4)$$

Коэффициенты интенсификации напряжений K, $K_Д$ определяются по графикам Приложения 8 в зависимости от отношений $\frac{d_p}{D_p}$; $\frac{s-c}{D_p}$ и $\frac{s_1-c_s}{s-c}$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

При $\frac{d_p}{D_p} < 0{,}05$ величины $K_Д$ следует принимать как для отношения $\frac{d_p}{D_p} = 0{,}05$ для соответствующих значений $\frac{s-c}{D_p}$ и $\frac{s_1 - c_s}{s-c}$.

В случае использования накладного кольца шириной $l_2 \geq \sqrt{D_p(s-c)}$, в формулах (15.3) и (15.4), а также при определении K, $K_Д$ вместо $(s-c)$ необходимо подставлять $(s+s_2-c)$.

15.5. Прочность места врезки штуцера

Расчет на прочность места врезки радиального штуцера от действия внутреннего давления и внешних нагрузок производится по п.13.

При использовании наклонных и тангенциальных штуцеров определение расчетных растягивающих напряжений на внутренних поверхностях узлов врезок допускается производить численными методами (МКЭ) с использованием ЭВМ (см.п.16), с последующей оценкой полученных результатов в соответствии с п.13.3.1.

При этом в обоих случаях производится дополнительная проверка для максимальных растягивающих напряжений на внутренней поверхности, которые не должны превосходить $1.5[\sigma]$ для обечайки и $1.5[\sigma]\chi_1$ для патрубка штуцера.

15.6. Расчет фланцевых соединений

Расчет фланцевых соединений арматуры, сосудов и аппаратов в условиях монтажа до подачи среды, а также в условиях испытаний производится по пп.11, 12.

Условие прочности при расчете статической прочности для фланцев сосудов и аппаратов, приварных встык в сечении s_1 в рабочих условиях:

$$\sigma_{s1} = \max\left\{\begin{array}{l}\sqrt{(\sigma_{11}+\Delta\sigma_{11})^2+(\sigma_{13}+\Delta\sigma_{13})^2-(\sigma_{11}+\Delta\sigma_{11})(\sigma_{13}+\Delta\sigma_{13})} \\ \sqrt{(\sigma_{12}+\Delta\sigma_{12})^2+(\sigma_{14}+\Delta\sigma_{14})^2-(\sigma_{12}+\Delta\sigma_{12})(\sigma_{14}+\Delta\sigma_{14})}\end{array}\right\} \leq [\sigma] \quad (15.5)$$

В сечении s_0 для фланцев приварных встык и плоских:

$$\sigma_{s0} = \max\left\{\begin{array}{l}\sqrt{(\sigma_{21}+\Delta\sigma_{21})^2+(\sigma_{23}+\Delta\sigma_{23})^2-(\sigma_{21}+\Delta\sigma_{21})(\sigma_{23}+\Delta\sigma_{23})} \\ \sqrt{(\sigma_{22}+\Delta\sigma_{22})^2+(\sigma_{24}+\Delta\sigma_{24})^2-(\sigma_{22}+\Delta\sigma_{22})(\sigma_{24}+\Delta\sigma_{24})}\end{array}\right\} \leq 1{,}5[\sigma] \quad (15.6)$$

Величины расчетных напряжений определяются по п.11.8.1.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Условие прочности для арматурных фланцев, приварных в стык для максимального осевого напряжения в обечайке (втулке):

- в рабочих условиях

$$\sigma_{a1} = \frac{f\, M_{01}}{D^{*}(s_1 - c)^2 L} \le [\sigma]; \qquad (15.7)$$

- в рабочих условиях с учетом температурной нагрузки

$$\sigma_{a2} = \frac{f\, M_{02}}{D^{*}(s_1 - c)^2 L} \le 1{,}5[\sigma]. \qquad (15.8)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

16.Расчет сосудов и аппаратов методом конечных элементов

16.1. Общие положения

Многие сосуды и аппараты, вследствие сложности конструкции или условий нагружения, не могут быть рассчитаны в строгом соответствии с нормативными документами. В этом случае значительную помощь в оценке работоспособности конструкции может оказать использование численных методов расчета элементов сосудов и аппаратов. Наибольшее распространение при расчетах на прочность и устойчивость получил метод конечных элементов (МКЭ).

При заключении о работоспособности узлов сосудов и аппаратов с использованием МКЭ используются различные категории напряжений [10]:

- общие мембранные σ_m;

- местные мембранные от действия давления σ_{mp};

- местные мембранные от действия давления и внешних нагрузок σ_{mL};

- общие изгибные σ_b;

- местные изгибные σ_{bL};

- общие температурные σ_T;

- местные температурные σ_{TL};

- напряжения компенсации σ_k;

- местные напряжения в зонах концентрации напряжений (пиковые).

Общими мембранными напряжениями являются средние напряжения растяжения или сжатия по толщине стенки обечайки или днища, вызываемые действием внутреннего или наружного давления.

Местными мембранными напряжениями являются мембранные напряжения в зонах присоединения оболочек к фланцам, патрубков к обечайкам (днищам) вне зоны сварного шва и др.

Общими изгибными напряжениями являются напряжения изгиба, вызываемые действием внешних сил и моментов, действующих на сосуд в целом, а также напряжения изгиба, вызываемые действием давления на плоские крышки.

Местными изгибными напряжениями являются напряжения изгиба в зонах присоединения патрубков к обечайкам (днищам), к фланцам и др.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Общими температурными напряжениями являются напряжения, вызываемые осевым перепадом температур в цилиндрической обечайке, перепадом температур по толщине плоских днищ и крышек, в стыковых соединениях обечаек, выполненных из разнородных материалов.

Местными температурными напряжениями являются локальные напряжения, вызываемые перепадом температур на небольших участках перегрева (или охлаждения), напряжения в облицовочных и других биметаллических элементах, вызванные разностью коэффициентов линейного расширения.

Максимальные значения напряжений в зонах концентрации (так называемые «пиковые» напряжения) являются напряжения в зонах отверстий, галтелей, резьб и используются при оценке прочности с циклическими изменениями нагрузки, а также для хрупких материалов.

Напряжения, определенные при расчете на статическую прочность элементов сосудов и аппаратов не должны превышать значений, указанных в таблице 16.1.

Таблица 16.1

Допускаемые напряжения для расчетных напряжений

Расчетная группа напряжений	Вид нагружений	Категории напряжений	Допускаемые значения*
общие мембранные	давление	σ_m	$[\sigma]$
местные мембранные + общие изгибные	давление	σ_{mp}	$1{,}3[\sigma]$
местные мембранные + общие изгибные	давление, внешние нагрузки	σ_{mL}	$1{,}5[\sigma]$
местные мембранные + местные изгибные + общие температурные + напряжения компенсации	давление, внешние нагрузки	$\sigma_{mL} + \sigma_{bL} + \sigma_T + \sigma_k$	$\min\left\{\begin{array}{l}\left(2{,}5 - \dfrac{R_{p0,2}}{R_m}\right)\cdot R_{p0,2} \\ 2R_{p0,2} \\ R_{m/10^5}\end{array}\right.$

* $[\sigma] = \min\left\{\dfrac{R_{p0,2}}{1{,}5};\ \dfrac{R_m}{2{,}6};\ \dfrac{R_{m/10^5}}{1{,}5}\right\}$ - номинальное допускаемое напряжение.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

16.2. Расчет прочности и жесткости места соединения штуцера с сосудом (аппаратом) при статическом нагружении

При расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) узла врезки методом конечных элементов используются оболочковые элементы. Расчетные значения нагрузок прикладываются в центре крышки штуцера. Крышка представляет из себя плоский диск высокой жесткости. Значения и направления сил и моментов соответствуют схемам, приведенным на рис.16.1.

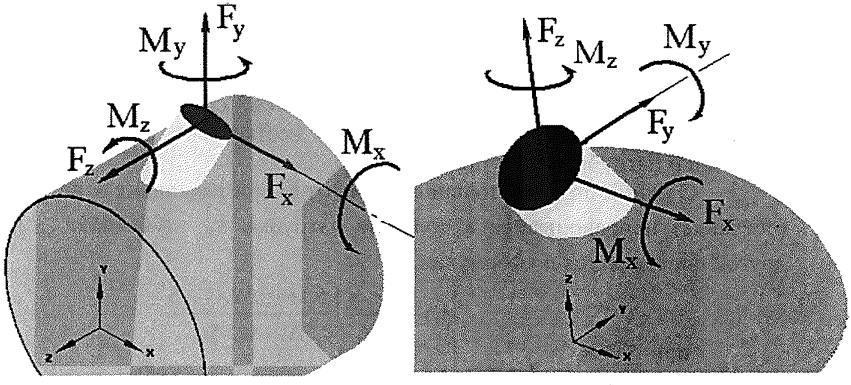


Рис.16.1.
Расчетные схемы нагружения для цилиндрической обечайки (а) и выпуклого днища (б)

При оценке прочности врезки используются общие положения изложенные в п.16.1.

При этом местные напряжения должны быть отделены от «пиковых», которые располагаются в очень малой зоне концентраторов напряжений, быстро затухают и на оценку прочности для статических расчетов конструкций из пластичных материалов практически не влияют.

Для разграничения зоны «пиковых» напряжений от зоны локальных используется подход, принятый известной компанией Paulin Research Group (создателя программ NozzlePRO, FEPipe и др.).

Конечные элементы, примыкающие непосредственно к линии пересечения патрубка и обечайки («элементы сварки»), обладают переменной толщиной, при определении которой учитываются минимальные размеры сварного шва, а также толщины обечайки и патрубка (рис.16.2).

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

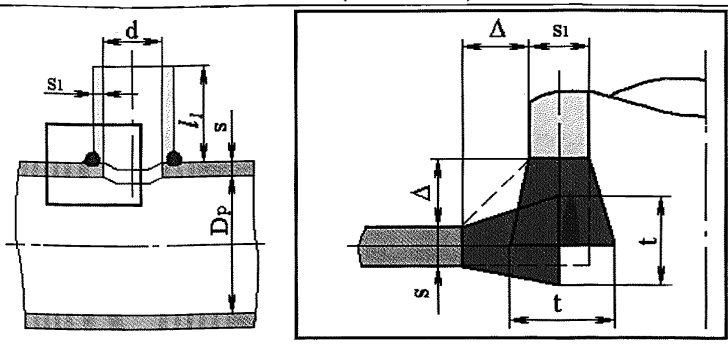


Рис.16.2. Размеры элементов в зоне врезки

При определении толщин «элементов сварки» учитывается необходимость обеспечения равенства жесткостей сварного шва, обечайки и патрубка в зоне приварки.

С одной стороны толщина элементов, примыкающих к патрубку (обечайке) приравнивается к толщине патрубка s_1 (обечайки s), с другой определяется по формулам:

$$\text{при } s \geq s_1 \qquad t = \max\begin{cases} 1{,}5\dfrac{1{,}5ss_1 + 1{,}5\Delta s + 1{,}5\Delta s_1 + \Delta^2}{2\Delta + 0{,}5\Delta s + 0{,}5\Delta s_1} \\ s + 0{,}7\Delta \\ s + 0{,}5s_1 \end{cases};$$

$$\text{при } s < s_1 \qquad t = \max\begin{cases} 1{,}5\dfrac{1{,}5ss_1 + 1{,}5\Delta s + 1{,}5\Delta s_1 + \Delta^2}{2\Delta + 0{,}5\Delta s + 0{,}5\Delta s_1} \\ s_1 + 0{,}5\Delta \\ s_1 + 0{,}5s \end{cases} \qquad (16.6)$$

Максимальные значения местных напряжений определяются для элементов непосредственно примыкающих к «элементам сварки». Напряжения для самих «элементов сварки» не определяются и не выводятся.

На полученные результаты большое влияние оказывает качество конечно-элементной разбивки, особенно непосредственно в месте врезки патрубка в обечайку, где имеет место высокий градиент напряжений. С увеличением количества элементов (уровня разбивки), описывающих место врезки возрастает точность распределения напряжений.

Кроме того, на точность полученных напряжений влияют тип врезки (наличие накладного кольца, угол наклона для косой врезки, и др.),

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

разница толщин обечайки и патрубка, толщина сварного шва, краевой эффект и др.

Пример распределения напряжений от действия момента M_z при различных видах разбивок для врезки с накладным кольцом показан на рис.16.3.

При увеличении количества элементов разбивки полученные значения максимальных напряжений возрастают. При этом максимальное влияние уровень разбивки оказывает на напряжения от действия сил и моментов, минимальное - от давления. Влияние уровня разбивки возрастает при применении накладного кольца или при увеличении толщины обечайки относительно толщины патрубка.

Качество конечно-элементной разбивки на полученные результаты необходимо учитывать при определении допускаемых напряжений для соответствующих уровней разбивки.

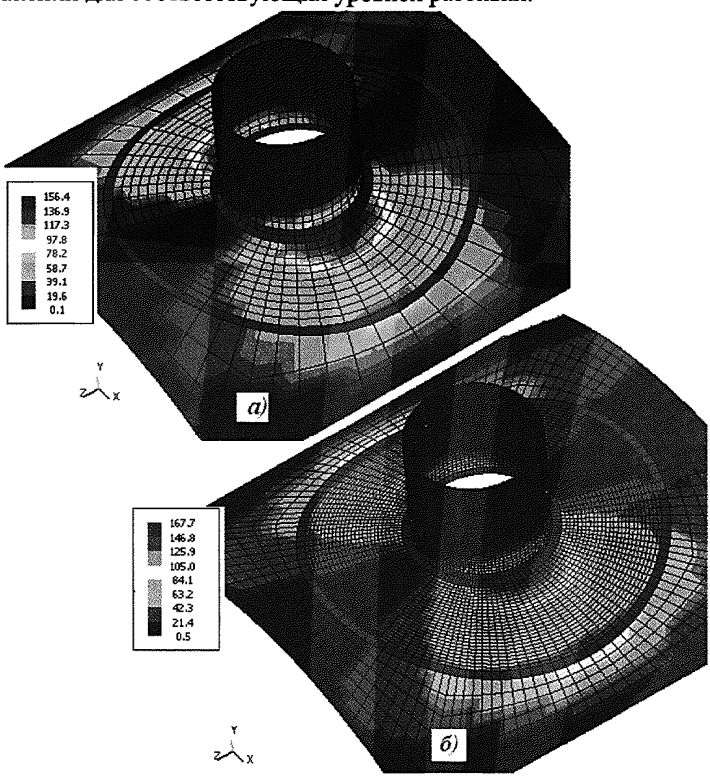


Рис.16.3. Общие (мембранные и изгибные) напряжения (МПа) на наружной поверхности в зависимости от уровней разбивки при действия момента $M_z = 10^4\ H \cdot м$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

16.2.1. Допускаемые нагрузки на штуцер

Для назначения допускаемых нагрузок, действующих на штуцер, проводятся расчеты по определению максимальных напряжений от действия единичных сил, моментов и давления поочередно. Т.е. при расчете от заданной единичной силы или момента все остальные нагрузки (включая давление) приравниваются *0*. Для каждого вида напряжений (мембранных и общих) определяется минимальный запас прочности. При определении допускаемой нагрузки ее единичная величина умножается на полученный минимальный запас прочности. Полученные значения формируют таблицу индивидуальных допускаемых нагрузок (табл.16.2).

Таблица 16.2

Допускаемые индивидуальные нагрузки на штуцер при отсутствии действия остальных, включая давление

F_x, Н	F_y, Н	F_z, Н	M_x, Нм	M_y, Нм	M_z, Нм	p, МПа

Далее определяются допускаемые нагрузки на штуцер при отсутствии давления. В этом случае допускаемые нагрузки определяются из условия, что при их одновременном действии на штуцер при отсутствии давления максимальные напряжения не превышают допускаемые. Практика расчетов показывает, что данное условие выполняется при величине нагрузок, равной $1/3$ от допускаемых индивидуальных нагрузок.

При действии расчетного давления допускаемые нагрузки дополнительно уменьшаются на величину $\left(1-0{,}87\frac{p}{[p]}\right)$, где p - расчетное давление; $[p]$ - допускаемая величина давления, которая определяется из таблицы 16.1. Коэффициент 0,87 учитывает, что при действии давления с нагрузками местные мембранные напряжения не должны превышать $1{,}5[\sigma]$, в то время как при действии только давления - $1{,}3[\sigma]$.

Полученные нагрузки формируют таблицу 16.3.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Таблица 16.3

Допускаемые индивидуальные нагрузки на штуцер при расчетном давлении*

F_x, Н	F_y, Н	F_z, Н	M_x, Нм	M_y, Нм	M_z, Нм	p, МПа

* При превышении одного или нескольких компонентов необходим дополнительный расчет на прочность

Данная таблица может быть рекомендована при назначении допускаемых нагрузок на штуцер при прочностных расчетах трубопроводных обвязок сосуда (аппарата).

Следует отметить, что допускаемые нагрузки при расчетном давлении носят консервативный характер. Как правило, при их единовременном приложении с учетом давления максимальные напряжения составляют 50-80% от допускаемых величин. Поэтому в сноске к таблице 16.2 указывается, что при превышении нагрузок над допускаемыми величинами, для заключения о работоспособности врезки необходим дополнительный расчет с полученными нагрузками.

При этом нагрузки не могут превышать значений, указанных в таблице 16.1.

16.2.2. Жесткость врезки

Жесткость врезки определяется для точки приложения усилий (крышка штуцера) в каждом направлении в глобальной системе координат. При определении жесткости врезки суммарные прибавки не учитываются.

Жесткость врезки определяется как отношение прикладываемых сил (моментов) к полученным соответствующим перемещениям (углам) (таблица 16.4).

Таблица 16.4

Жесткость врезки

Линейная, Н/мм			Угловая, Н м/гр		
C_x	C_y	C_z	MC_x	MC_y	MC_z

16.3. Примеры расчета прочности и устойчивости сосудов и резервуаров

На рис.16.4. представлена конечно-элементная модель горизонтальной емкости на седловых опорах с технологической

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

площадкой. Емкость изготовлена из стали 09Г2С. Проведена оценка ее несущей способности при одновременном действии гидростатического и внутреннего давления (Р=0,6 МПа), а также давления на технологическую площадку (Р=0,002 МПа) и собственного веса конструкции.

Гидростатическое давление определяется наливом воды (ρ=1000кг/м3) при 100% заполнении сосуда от общего объема.

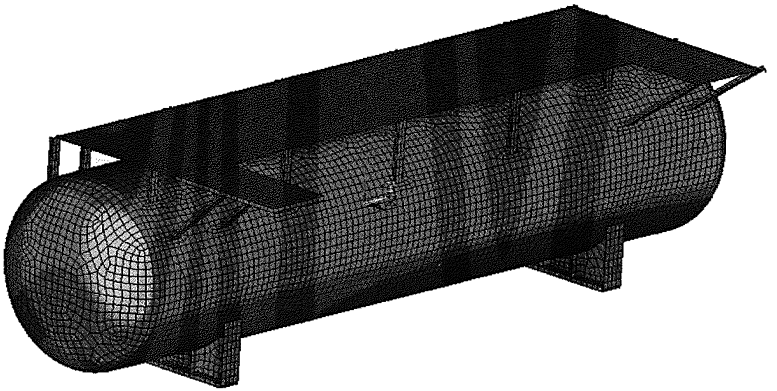


Рис.16.4. Конечноэлементная модель емкости

На рис.16.5, 16.6 представлены результаты напряженно-деформированного состояния.

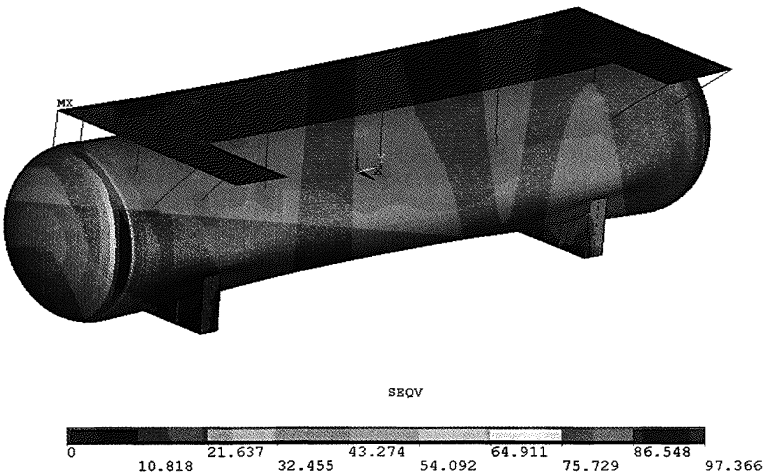


Рис.16.5. Эквивалентные мембранные напряжения, σim , МПа

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Максимальные эквивалентные мембранные напряжения находятся в зоне сопряжения обечайки и днища, определяются избыточным давлением и не превышают 100 МПа, что меньше допускаемых напряжений в рабочих условиях.

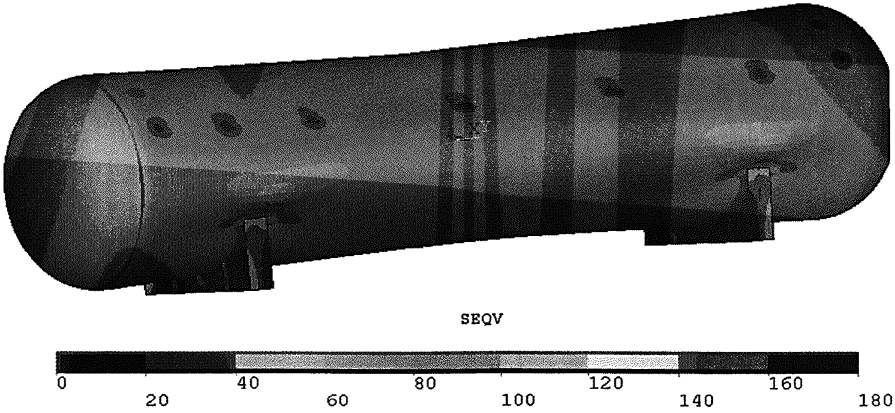


Рис.16.6. Эквивалентные суммарные напряжения, σi , МПа

Максимальные значения «упругих» местных эквивалентных суммарных напряжений имеют место в районе сопряжения обечайки с седловой опорой, носят локальный характер и достигают 180 МПа, что не превышает предельный уровень.

На рис.16.7. показаны конечно-элементная модель и низшая форма потери устойчивости стенки резервуара для хранения нефтепродуктов с крышей, усиленной ребрами жесткости от наружного избыточного давления (вакуума).

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

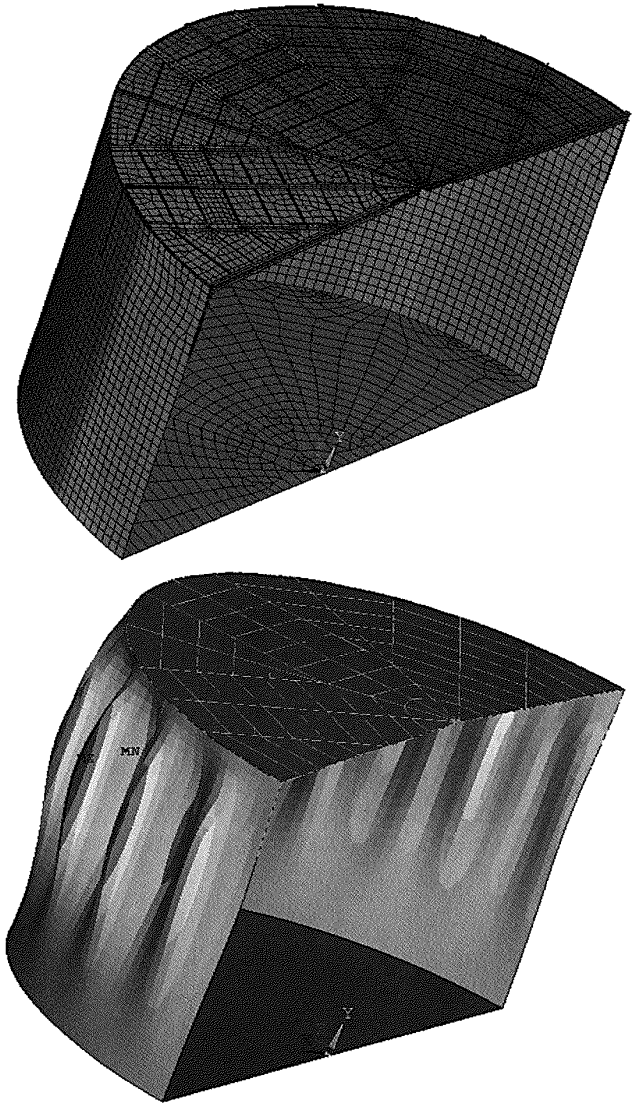


Рис.16.7. Низшая форма потери устойчивости резервуара

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

На рис.16.8. показаны конечно-элементная модель и распределение напряжений в силосе для хранения сыпучих материалов и его опоре.

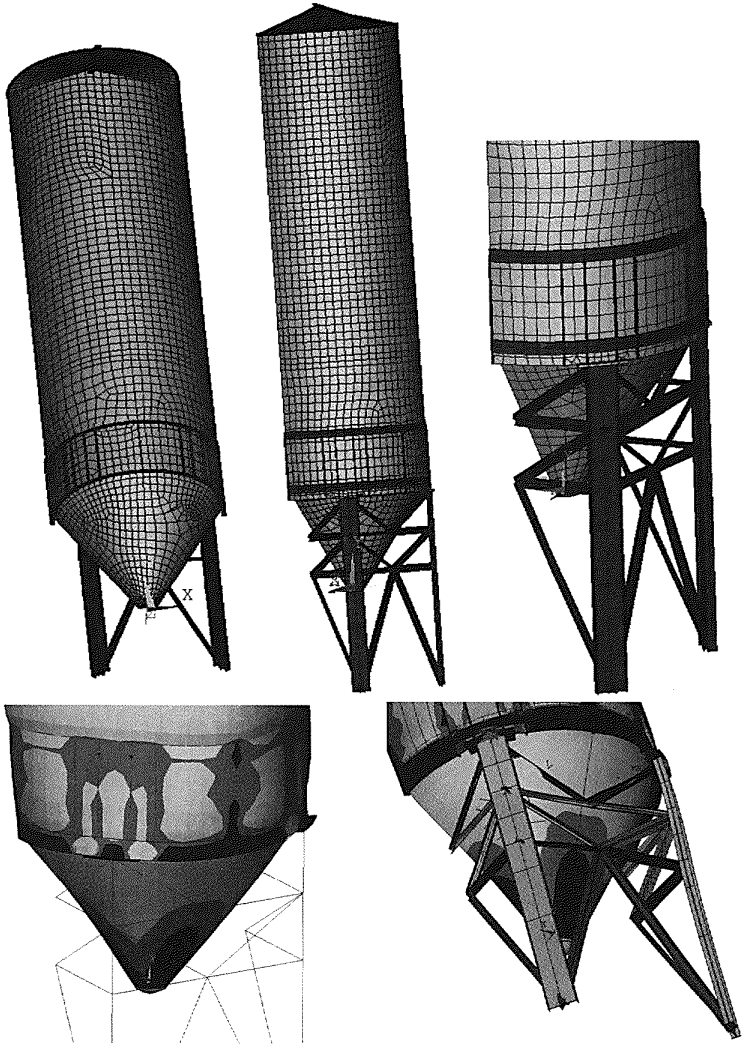


Рис.16.8.
Конечно-элементная модель и распределение напряжений в силосе сыпучих материалов

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ТОМ 2. РАСЧЕТ АППАРАТОВ КОЛОННОГО ТИПА

1. Основные условные обозначения

Термин:	Условное обозначение:
Площадь наиболее ослабленного поперечного сечения опорной обечайки, мм^2	A
Площадь поперечного сечения анкерного болта по внутреннему диаметру резьбы, мм^2	A_σ
Сумма всех прибавок к расчетной толщине, мм	c
Коэффициент неравномерности сжатия грунта, Н/мм^3	C_F
Диаметр окружности, вписанной в шестигранник гайки анкерного болта, мм	d
Внутренний диаметр резьбы анкерного болта, мм	$d_б$
Внутренний диаметр аппарата в расчетном сечении, мм	D
Внутренний диаметр опорной обечайки в расчетном сечении, мм	D_0
Диаметр окружности анкерных болтов, мм	$D_б$
Модуль продольной упругости материала стенки аппарата при расчетной температуре, МПа	E
Расстояние от оси анкерного болта до опорной обечайки, м	e
Расчетное осевое сжимающее усилие в расчетном сечении, Н:	F
- в рабочих условиях	F_1
- в условиях испытания	F_2
- в условиях монтажа	F_3
Допускаемое осевое сжимающее усилие, Н	$[F]$
Суммарная вертикальная нагрузка в расчетном сечении, Н:	
- в рабочих условиях	G_1
- в условиях испытания	G_2
- в условиях монтажа (максимальная нагрузка от собственного веса)	G_3
- в условиях монтажа (минимальная нагрузка от собственного веса)	G_4

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Термин:	Условное обозначение:
Высота аппарата, мм	H
Высота опорного узла, мм	h
Минимальный момент инерции подошвы фундамента, мм^4	I_F
Суммарный изгибающий момент у основания аппарата от действия весовых нагрузок, Н·мм	M_0
Максимальный изгибающий момент момент от действия сейсмических нагрузок в нижнем сечении аппарата, Н·мм	M_{max}
Расчетный изгибающий момент от сейсмических нагрузок, Н·мм	M_R
Изгибающие моменты в расчетных сечениях, Н·мм :	
- в рабочих условиях	M_1, M_{G_1}, M_{V_1}, M_{R_1}
- в условиях испытания	M_2, M_{G_2}, M_{V_2}, M_{R_2}
- в условиях монтажа (без изоляции)	M_3, M_{G_3}, M_{V_3}, M_{R_3}
- в условиях монтажа (с изоляцией)	M_4, M_{G_4}, M_{V_4}, M_{R_4}
Допускаемый изгибающий момент, Н·мм	$[M]$
Количество участков аппарата; количество анкерных болтов	n
Допускаемое наружное давление, МПа	$[p]$
Нормативное значение давления ветра, МПа	q_0
Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на середине i-го участка аппарата, МПа	q_{ist}
Сейсмическая нагрузка в центре тяжести i-го участка аппарата, Н	S_i
Исполнительная толщина стенки аппарата в расчетном сечении, мм	s
Исполнительная толщина стенки опорной обечайки, мм	s_0
Период низшей частоты собственных колебаний аппарата	T

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Термин:	Условное обозначение:
Наименьший момент сопротивления сечения опорной обечайки, мм^3	W
Катет сварного шва в месте приварки опорной обечайки, мм	Δ
Катет сварного шва в месте приварки опорной обечайки к нижнему кольцу, мм	Δ_1
Продольные напряжения, МПа	σ_x
Кольцевые напряжения, МПа	σ_y
Эквивалентное напряжение, МПа	σ_E
Допускаемое напряжение для соответствующего элемента опорного узла при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_A$
Допускаемое напряжение для корпуса аппарата при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_K$
Допускаемое напряжение для опорной обечайки при расчетной температуре, МПа	$[\sigma]_O$
Допускаемое напряжение для анкерных болтов, МПа	$[\sigma]_B$
Допускаемое напряжение бетона на сжатие, МПа	$[\sigma]_б$
Коэффициент прочности сварного шва	φ

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

2. Определение расчетных усилий

Аппараты, устанавливаемые на открытой площадке, подлежат расчету на ветровую нагрузку. Аппараты, предназначенные для установки в районах сейсмичностью 7 и более баллов по шкале Рихтера, подлежат расчету на сейсмическое воздействие.

Определение расчетных усилий, действующих на аппараты колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий, проводится на основании [6]. При определении расчетной сейсмической нагрузки учтено изменение № 5, утвержденное постановлением Госстроя России от 27.12.1999 г. № 91, и введенное в действие с 01.01.2000 г.

2.1. Расчетная схема

В качестве расчетной схемы колонного аппарата принимается консольный упруго защемленный стержень в нижнем сечении (рис.2.1).

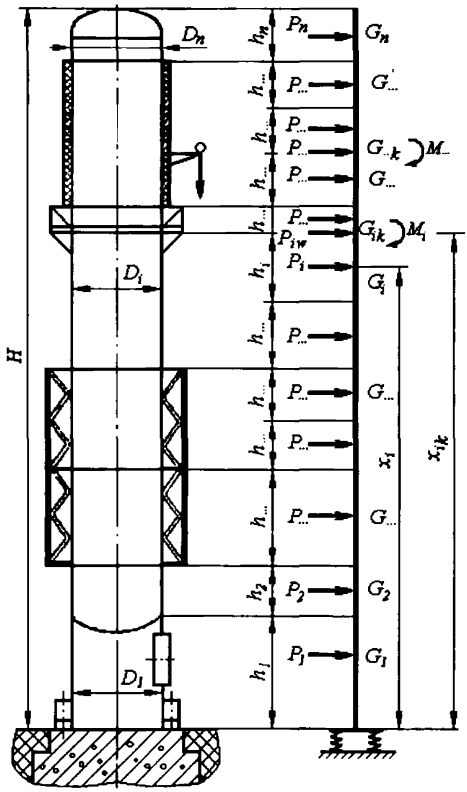


Рис. 2.1 Расчетная схема аппарата для расчета на прочность.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Аппарат по высоте разбивается на n участков постоянного поперечного сечения, при этом высота участка $h_i \le 10м$. Количество элементов в расчетной схеме зависит от количества участков колонны с постоянным сечением, а также количества сосредоточенных масс (тарелок, насадок, обслуживающих площадок, лестниц, опор трубопроводов и др.).

При определении h_2, следует учесть расстояние между опорой и осью сварного соединения днища с корпусом (рис.2.2):

$$h' = h_\partial + \frac{H_\partial + s_1}{D + 2s_1}\sqrt{(D + 2s_1)^2 - D_0^2}\,, \qquad (2.1)$$

где h_∂ - длина цилиндрической части отбортовки днища;

H_∂ - высота выпуклой части днища без учета цилиндрической части;

s_1 - исполнительная толщина стенки днища.

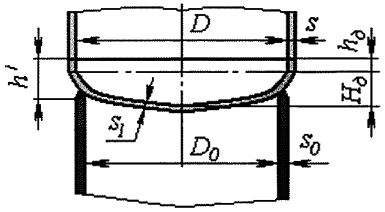


Рис.2.2 Соединение опорной обечайки с днищем корпуса.

Распределенные нагрузки от веса i-го участка колонны (включая изоляцию и рабочую среду) рассматриваются как сосредоточенные силы G_i, приложенные в центрах тяжести каждого из участков, а сосредоточенные массы G_{ik} прикладываются к краю i-го участка. Весовые нагрузки прикладываются вертикально, а ветровая P_i и сейсмическая S_i нагрузки - горизонтально. Кроме того, при эксцентричном действии весовой нагрузки (от трубопроводов, площадок, лестниц и пр.) прикладываются соответствующие изгибающие моменты M_i.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

2.2. Определение периода собственных колебаний

Для определения ветровых и сейсмических нагрузок необходимо найти низшую частоту и период собственных колебаний аппарата в рабочих условиях, а также в условиях испытаний и монтажа.

Для определения низшей собственной частоты колебаний колонного аппарата используется метод Рэлея, позволяющий рассчитывать период колебаний для аппаратов с произвольным количеством участков и учитывающий сосредоточенные весовые нагрузки (площадки, насадки, опоры трубопроводов и др.)[48].

Для аппаратов с произвольным количеством участков период собственных колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\sum\left(G_i\, y_i^2 + G_{ik} y_{ik}^2\right)}{g\sum\left(G_i\, y_i + G_{ik}\, y_{ik}\right)}}, \qquad (2.2)$$

где y_i - перемещение i-го элемента в центре тяжести только от весовой нагрузки G_i, которая прикладывается в направлении, нормальном относительно оси аппарата;

y_{ik} - перемещение края i-го элемента от весовой нагрузки G_{ik} (рис.2.3).

Для определения линии прогиба расчетная схема представляет из себя горизонтальный упруго защемленный стержень с жесткостными характеристиками сечений аппарата, нагруженный силами тяжести элементов аппарата. Расчетная схема для определения периода собственных колебаний по методу Релея представлена на рис.2.3.

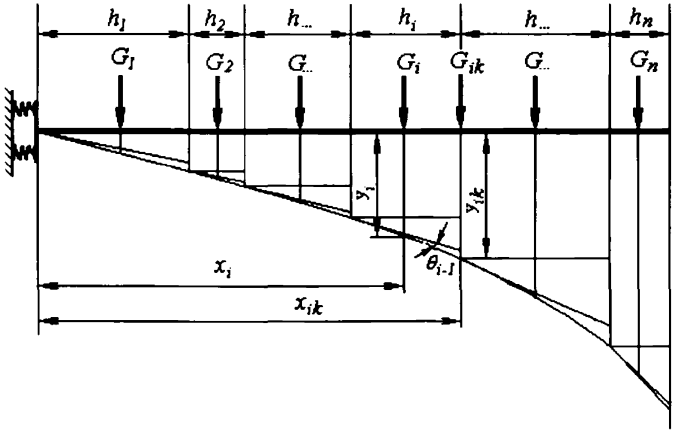


Рис.2.3 Расчетная схема для определения периода колебаний

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

При этом весовые нагрузки определяются в зависимости от вида нагружения:

- для рабочих условий учитывается вес рабочей среды, а также обслуживающих площадок, внутренних устройств, изоляции, присоединяемых трубопроводов и др.;
- при гидроиспытании учитывается вес жидкости, заполняющей аппарат, а также обслуживающих площадок и изоляции при их наличии;
- в условиях монтажа учитывается максимальный вес аппарата и внутренних устройств.

Перемещение центра тяжести каждого элемента определяется нагрузкой и расположением элемента.

Начальный угол поворота у основания аппарата:

$$\theta_0 = \frac{M_0}{C_F I_F}, \qquad (2.3)$$

где $M_o = \sum_{i=1}^{n} \left(G_i x_i + G_{ik} x_{ik}\right)$ - суммарный изгибающий момент у основания аппарата;

C_F - коэффициент сжатия неравномерности грунта, определяется по данным инженерной геологии. При отсутствии таких данных C_F выбирается в зависимости от плотности грунтов по таблице 2.1 [29].

Таблица 2.1

Грунт	Коэффициент неравномерности сжатия грунта, $\frac{H}{м^3}$
Слабые грунты (материал и шлам в пластичном состоянии, пылевой песок в состоянии средней плотности)	$6 \cdot 10^7$
Грунты средней плотности (материалы и шлам на границе течения, песок средней плотности)	$6 \cdot 10^7 \div 10^8$
Плотные грунты (твердый глинистый шлам, гравий и гравийный песок, плотный лесс)	$10^8 \div 2 \cdot 10^8$
Скальные грунты	$2 \cdot 10^8$

Перемещение у основания колонны $y_{ok} = 0$.

Нагрузки, действующие на i-ый элемент $(i = 1, n-1)$ со свободного конца определяются сосредоточенной силой G_{ik} (при их наличии), а также перерезывающей силой и изгибающим моментом от последующих элементов:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$Q_i = G_{ik} + \sum_{l=i+1}^{n}(G_l + G_{lk}); M_{Gi} = \sum_{l=i+1}^{n}(G_l(h_l - h_{ik}) + G_{lk}(h_{lk} - h_{ik})) \quad (2.4)$$

Для последнего n-го элемента $Q_n = 0$; $M_{Gn} = 0$.

Для определения перемещений y_i (y_{ik}) в местах приложения соответствующих нагрузок G_i (G_{ik}) первоначально определяются силы и изгибающие моменты, действующие на каждый элемент, начиная с последнего.

Для определения линии прогиба весовые нагрузки от обечайки, изоляции или футеровки (при их наличии), а также веса жидкости принимаются распределенными, а нагрузки от внешних и внутренних устройств (площадки, насадки, тарелки и др.) – сосредоточенными.

Определение линейных и угловых перемещений в элементах аппарата для цилиндрической обечайки (i-го элемента) в ее центре тяжести и на конце под действием распределенной и сосредоточенной нагрузки, а также изгибающего момента приведены в Приложении 9.

Для аппаратов с числом участков не более трех для определения периода колебаний можно воспользоваться методикой, описанной в [6].

Общий период колебаний для групповых аппаратов (число аппаратов z_k), установленных на общем фундаменте и жестко связанных между собой в горизонтальном направлении [6]:

$$T = 3{,}63\sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{z_k} G_l H_l^2}{gC_F I_F}}, \quad (2.5)$$

2.3. *Определение расчетного изгибающего момента от ветровой нагрузки*

Ветровая нагрузка, действующая на аппарат, складывается из нагрузки, приложенной как непосредственно на корпус аппарата, так и на его наружные конструкции – обслуживающие площадки и лестницы.

Ветровая нагрузка, приложенная к i-ому участку аппарата:

$$P_i = P_{ist} + P_{idyn}, \quad (2.6)$$

где $P_{ist} = q_{ist} D_{ni} h_i$ - средняя составляющая ветровой нагрузки на i-ом участке.

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на i-ом участке:

$$q_{ist} = q_0 \theta_i K, \quad (2.7)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

где q_0 - нормативное значение ветрового давления, принимаемый по таблице 2.2[31];

$$\theta_i = \begin{cases} 0{,}8 & при\ x_i \le 5м \\ \left(\dfrac{x_i}{10}\right)^{0{,}31} & при\ x_i > 5м \end{cases}$$ - коэффициент, учитывающий

изменение ветрового давления по высоте аппарата;

$K = 0{,}7$ - аэродинамический коэффициент для аппарата с цилиндрическим сечением.

Таблица 2.2

Нормативные значения ветрового давления

Ветровые районы*	Ia	I	II	III	IV	V	VI	VII
q_0, *кПа (кгс/м²)*	0,17 (17)	0,23 (23)	0,30 (30)	0,38 (38)	0,48 (48)	0,60 (60)	0,73 (73)	0,85 (85)

* принимаются по [31].

Пульсационная составляющая ветровой нагрузки:

$$P_{i\,dyn} = \nu\, G_i \xi\, \eta_i, \qquad (2.8)$$

где $\nu = \begin{cases} 0{,}912 & при\ x_i \le 5м \\ 0{,}968 - 0{,}025\sqrt{\text{H}} & при\ x_i > 5м \end{cases}$ - коэффициент

пространственной корреляции пульсаций давления ветра;

$\xi = 1{,}1 + \sqrt{15{,}5\varepsilon}$ -коэффициент динамичности;

$\varepsilon = \dfrac{T\sqrt{q_0}}{790}$ (q_0 в Па);

$\eta_i = y_i \dfrac{\sum_{l=1}^{n} y_l \mu_l P_{lst}}{\sum_{l=1}^{n} y_l^2 G_l}$ - приведенное относительное ускорение

центра тяжести i-го участка;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$\mu_1 = \begin{cases} 0{,}85 & при\ x_i \le 5м \\ 0{,}76\left(\dfrac{x_l}{10}\right)^{-0{,}15} & при\ x_i > 5м \end{cases}$$ - коэффициенты пульсации давления ветра для k-го участка.

Ветровая нагрузка на обслуживающей площадке i-го элемента:

$$P_{iw} = q_0 \theta_i K \left(1 + 1{,}17\xi\ \mu_{ik}\left(\frac{x_{ik}}{H}\right)^{1{,}6}\right)\sum A_{pi}, \qquad (2.9)$$

где $K = 1{,}4$ - аэродинамический коэффициент для обслуживающих площадок;

$$\mu_{ik} = \begin{cases} 0{,}85 & при\ x_{ik} \le 5м \\ 0{,}76\left(\dfrac{x_{ik}}{10}\right)^{-0{,}15} & при\ x_{ik} > 5м \end{cases}$$ - коэффициент пульсации давления ветра для обслуживающей площадки i-го элемента;

$\sum A_{pi}$ - сумма площадей всех проекций профилей площадки i-го элемента на плоскость, перпендикулярную направлению ветра.

При отсутствии точных данных о форме площадки:

$$P_{iw} = 0{,}85 q_0 \theta_i \left(1 + 1{,}17\xi\ \mu_{ik}\left(\frac{x_{ik}}{H}\right)^{1{,}6}\right)A_i, \qquad (2.10)$$

где A_i - площадь ограниченная контуром площадки i-го элемента.

Расчетный изгибающий момент в нижнем сечении i-го элемента (рис.2.1.) определяется по формуле:

$$M_{v\,i} = \sum_{l=i}^{n}\left[P_l\left(x_l - x_i + \frac{h_i}{2}\right) + P_{lw}\cdot\left(x_{lk} - x_i + \frac{h_i}{2}\right)\right] \qquad (2.11)$$

2.4. Определение расчетного изгибающего момента от сейсмической нагрузки

Сейсмическая нагрузка, приложенная в центре тяжести i-го элемента и соответствующая низшей частоте собственных колебаний аппарата:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$S_i = 0{,}375 K_s \beta G_i y_i \frac{\sum_{l=1}^{n} G_l y_l}{\sum_{l=1}^{n} G_l y_l^2}, \qquad (2.12)$$

где $\beta = 2{,}5\sqrt{\frac{0{,}8}{T}}$ - коэффициент динамичности,

при $\beta < 0{,}8$ принимается $\beta = 0{,}8$, при $\beta > 2{,}5$ принимается $\beta = 2{,}5$;

K_s - сейсмический коэффициент, выбирается в зависимости от района установки аппарата по таблице 2.3.

Таблица 2.3

Сейсмический коэффициент

Сейсмичность*, балл	7	8	9
K_s	0,1	0,2	0,4

*Интенсивность сейсмических воздействий в баллах (сейсмичность) для района строительства следует принимать на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации по [32].

Сейсмическая нагрузка, приложенная в месте сосредоточенной массы i-го элемента S_{ik} (при ее наличии) и соответствующая первому тону собственных колебаний, определяется по (2.12), где вместо G_i и y_i подставляются G_{ik} и y_{ik} соответственно.

Максимальный изгибающий момент в нижнем сечении аппарата при учете только первой формы колебаний:

$$M_{\max} = \sum_{i=1}^{n} \left(S_i x_i + S_{ik} x_{ik} \right) \qquad (2.13)$$

Приближенное выражение для расчетного изгибающего момента M_R в сечениях аппарата в зависимости от высоты с учетом влияния высших форм колебаний определяется по эпюре рис.2.4.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

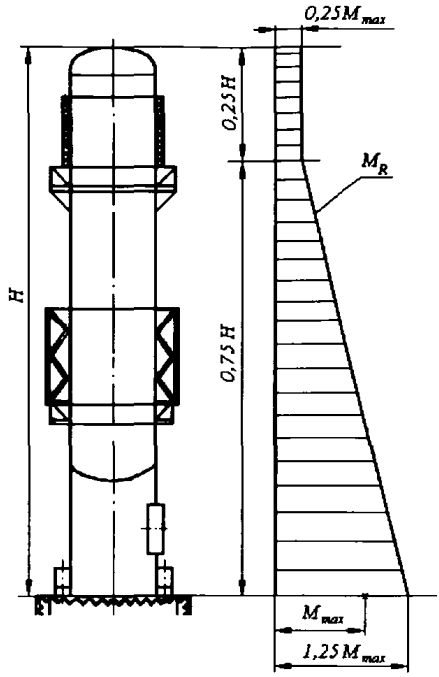


Рис.2.4 Расчетный изгибающий момент от сейсмических воздействий

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

3. Расчет на прочность и устойчивость

Расчет на прочность и устойчивость аппаратов колонного типа проводится на основании [7] с дополнением расчета опорного узла облегченной цилиндрической опоры по [30].

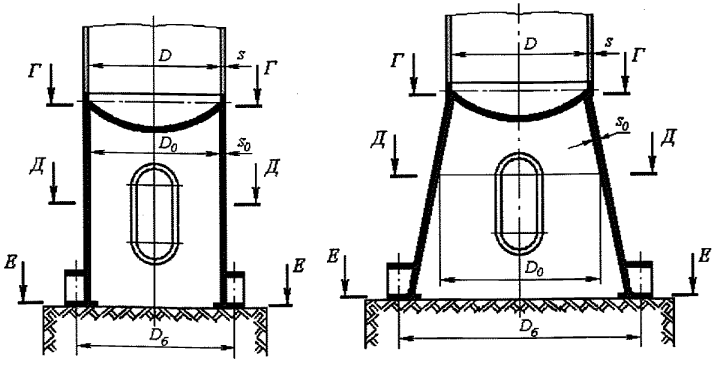
В отличие от [7] для учета усиливающей пластины, приваренной к верхнему опорному кольцу, В формуле (3.18) коэффициент χ_3 умножается на s_3, а не на s_{2p}.

Приводится расчет характеристик наиболее ослабленного отверстиями поперечного сечения опорной обечайки (Приложение 10). Приведены справочные таблицы расчетных характеристик фундаментных болтов и марок бетона.

3.1. Расчетные сечения

При расчете колонного аппарата устанавливаются следующие основные расчетные сечения :

- поперечные сечения корпуса, переменные по толщине стенки или диаметру, для аппаратов постоянного сечения (по диаметру и толщине стенки) - только поперечное сечение в месте присоединения к опорной обечайке;
- поперечное сечение опорной обечайки в месте присоединения к корпусу колонны (*Г-Г*, рис.3.1);
- поперечное сечение опорной обечайки в местах расположения отверстий (*Д-Д*, рис.3.1);
- поперечное сечение в месте присоединения опорного кольца (*Е-Е*, рис.3.1).



а) цилиндрическая б) коническая

Рис.3.1 Расчетные сечения опорной обечайки

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

3.2. Расчетные нагрузки

3.2.1. Расчетные давления

Расчетное давление p_1 в рабочих условиях и в условиях испытания p_2 устанавливается по [2].

3.2.2. Нагрузки от собственного веса

При расчете должны быть учтены следующие весовые нагрузки, действующие над расчетными сечениями:

G_1 - вес аппарата в рабочих условиях, включая вес обслуживающих площадок, лестниц, изоляции, внутренних и наружных устройств и рабочей среды;

G_2 - вес аппарата при гидроиспытании, включая вес жидкости, заполняющей аппарат;

G_3 – максимальный вес аппарата в условиях монтажа;

G_4 - минимальный вес аппарата в условиях монтажа после установки в вертикальное положение.

Необходимо учитывать, что нагрузка от веса воды, заполняющей аппарат в условиях гидроиспытаний, действует только на нижнее днище и расчетные сечения опорной обечайки.

3.2.3. Расчетные изгибающие моменты

При расчете учитываются следующие изгибающие моменты, действующие над расчетными сечениями:

M_G - максимальный изгибающий момент от действия эксцентрических весовых нагрузок, в том числе от присоединяемых трубопроводов и других нагрузок;

M_V - изгибающие моменты от действия ветровых нагрузок, определяются по п.2.3 для трех расчетных условий:

M_{V1} – для рабочих условий при нагрузке G_1;

M_{V2} - для условий испытаний при нагрузке G_2;

M_{V3} - для условий монтажа при нагрузке G_3;

M_R - изгибающие моменты от сейсмических воздействий, определяются по п.2.4 для двух расчетных условий:

M_{R1} – для рабочих условий при нагрузке G_1;

M_{R3} - для условий монтажа при нагрузке G_3;

3.2.4. Сочетание нагрузок

Аппарат рассчитывается для следующих трех условий работы:
рабочие условия;
условия испытания;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

условия монтажа.

Сочетание нагрузок для этих условий приведено в таблице 3.1

Таблица 3.1

Сочетание нагрузок

Условия работы	Расчетное давление p, МПа (кгс/см^2)	Осевое сжимающее усилие F, Н (кгс)	Расчетный изгибающий момент M, Н·мм, (кгс·см)
Рабочее условие	$p1$	$F_1 = G_1$	Большее из двух значений: $M_1 = M_{G1} + M_{v1}$ $M_1 = M_{G1} + M_{R1}$
Условие испытания	$p2$	$F_2 = G_2$	$M_2 = M_{G2} + 0{,}6\ M_{v2}$
Условие монтажа	0	$F_3 = G_3$ Для анкерных болтов $F_3 = G_4$	Большее из двух значений: $M_3 = M_{G3} + M_{v3}$ $M_3 = M_{G3} + M_{R3}$

3.3. Корпус аппарата

Стенка колонного аппарата рассчитывается на прочность и устойчивость.

Расчет прочности проводится для рабочих условий и условия монтажа.

Расчет устойчивости проводится для рабочих условий и условия испытаний.

Расчет наружных элементов корпуса аппарата (патрубки, фланцы, кольца жесткости и др.) проводится по методикам, изложенным в т.I настоящего стандарта.

3.3.1. Проверка прочности

Продольные напряжения σx следует рассчитывать:

- на наветренной стороне:

$$\sigma_{x1} = \frac{p(D+s)}{4(s-c)} - \frac{F}{\pi D(s-c)} + \frac{4M}{\pi D^2(s-c)}; \qquad (3.1)$$

- на подветренной стороне:

$$\sigma_{x2} = \frac{p(D+s)}{4(s-c)} - \frac{F}{\pi D(s-c)} - \frac{4M}{\pi D^2(s-c)}; \qquad (3.2)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Кольцевые напряжения:

$$\sigma_y = \frac{p(D+s)}{2(s-c)}; \tag{3.3}$$

Эквивалентные напряжения определяются по критерию интенсивности напряжений для плоского напряженного состояния:

- на наветренной стороне

$$\sigma_{экв1} = \sqrt{\sigma_{x1}^2 - \sigma_{x1}\sigma_y + \sigma_y^{\,2}}; \tag{3.4}$$

- на подветренной стороне

$$\sigma_{экв2} = \sqrt{\sigma_{x2}^2 - \sigma_{x2}\sigma_y + \sigma_y^{\,2}}; \tag{3.5}$$

Условия прочности проверяются:

- на наветренной стороне

$$\max\left\{\sigma_{x1}; \sigma_{экв1}\right\} \le [\sigma]_k \varphi; \tag{3.6}$$

- на подветренной стороне

$$\max\left\{\sigma_{x2}; \sigma_{экв2}\right\} \le [\sigma]_k \varphi; \tag{3.7}$$

где $[\sigma]_k$ - допускаемое напряжение для материала корпуса аппарата при расчетной температуре по Приложению 1.

φ - коэффициент прочности сварного шва по Таблице 2.2.

В случае, когда σ_{x1} и/или σ_{x2} сжимающие напряжения, значение φ в формулах (3.6), (3.7) принимается равным 1,0.

3.3.2. Проверка устойчивости

Для колонн, работающих под внутренним избыточным давлением или без давления, условие устойчивости для рабочих условий и условий испытания считается выполненным при:

$$\frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \le 1{,}0, \tag{3.8}$$

где F и M принимаются в соответствии с таблицей 3.1, а $[F]$ и $[M]$ определяются по п.3.2.4 и п.3.2.5 1-го Тома соответственно.

Для колонн, работающих под наружным давлением, условие устойчивости для рабочих условий считается выполненным при:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$\frac{p}{[p]}+\frac{F}{[F]}+\frac{M}{[M]}\le 1{,}0, \qquad (3.9)$$

где p, F и M принимаются в соответствии с таблицей 3.1, а $[p]$, $[F]$ и $[M]$ определяются по п.3.2.2, п.3.2.4 и п.3.2.5 1-го Тома соответственно.

Проверка устойчивости в условиях испытаний проводится по формуле (3.8).

3.4. Опорная обечайка

Расчет опорной обечайки проводится для рабочих условий и условий испытания в сечениях *Д-Д*, *Е-Е*, *Г-Г* (рис.3.1). Расчетные нагрузки и изгибающие моменты принимаются по таблице 3.1.

Условие прочности сварного шва, соединяющего корпус колонны с опорной обечайкой (сечение *Г-Г*), обеспечивается при:

$$\frac{1}{\pi D\Delta}\left(\frac{4M}{D_0}+F\right)\le 0{,}8\cdot\min\{[\sigma]_0;[\sigma]_k\}; \qquad (3.10)$$

Устойчивость опорной обечайки в зоне отверстия (сечение *Д-Д*, рис.3.1) определяется выполнением условия:

$$\frac{F}{\psi_1[F]}+\frac{M+F\cdot\psi_3\cdot D_3}{\psi_2[M]}\le 1{,}0, \qquad (3.11)$$

где $[F]$, $[M]$ – определяются п.3.2.4 и п.3.2.5 1-го Тома соответственно;

$\psi 1$, $\psi 2$, $\psi 3$ - коэффициенты, определяемые соответственно по формулам:

$$\psi_1=\frac{A}{\pi(D_0+s_0+c)(s_0-c)},\ \psi_2=\frac{4W}{\pi(D_0+s_0+c)^2(s_0-c)},\ \psi_3=\frac{b_s}{D_0} \qquad (3.12)$$

где A, W, b_s - соответственно площадь, наименьший момент сопротивления и расстояние от центра тяжести наиболее ослабленного поперечного сечения до оси аппарата определяются по Приложению 10.

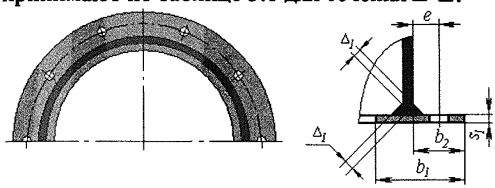
Отверстия диаметром менее $0{,}04D_0$ при расчете по формулам 3.11-3.12 не учитывают.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

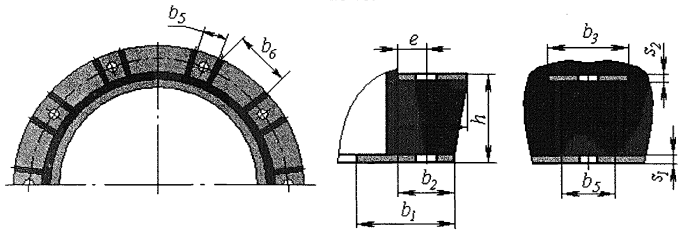
 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

3.5. Элементы опорного узла

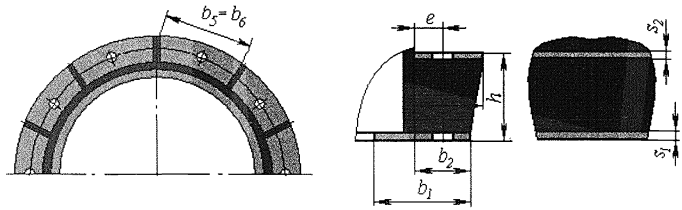
Расчет элементов опорного узла (рис.3.2) следует проводить для рабочих условий и для условий испытания. Расчетные нагрузки F и M принимают по таблице 3.1 для сечения *Е-Е*.



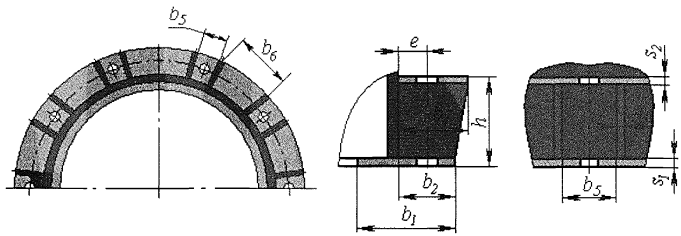
Исполнение 1



Исполнение 2



Исполнение 3



Исполнение 4

Рис.3.2 Опорный узел

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Толщина нижнего опорного кольца должна удовлетворять условию:

$$s_1 \geq \max\left\{ \chi_1 b_2 \sqrt{\frac{\frac{4M}{D_б} + F}{D_б b_1 [\sigma]_A}} + c;\ 1{,}5 s_0 \right\}, \qquad (3.13)$$

где $\chi_1 = \begin{cases} 1 & \text{– для опорного кольца исполнения 1;} \\ \left(\dfrac{1 + 1{,}81\left(\dfrac{b_2}{b_б}\right)^3}{1 + 2{,}97\left(\dfrac{b_2}{b_б}\right)^3} \right)^2 & \text{– для опорных колец исполнений 2, 3, 4;} \end{cases}$

$[\sigma]_A$ - допускаемое напряжение для материала опорного узла при расчетной температуре по Приложению 1.

Для опорного кольца исполнения 1 в случае, если $\left(\frac{4M}{D_0} - F\right) > 0$, толщина нижнего опорного кольца дополнительно должна удовлетворять условию:

$$s_1 \geq \sqrt{\left(\frac{4M}{D_0} - F\right)\frac{4e}{\pi D_0 [\sigma]_A}} + c, \qquad (3.14)$$

а толщина сварного шва в месте приварки опорной обечайки к нижнему опорному кольцу:

$$\Delta_1 \geq \frac{\frac{4M}{D_o} - F}{1{,}2\pi D_o [\sigma]_o} \qquad (3.15)$$

Ширина нижнего опорного кольца $b1$, устанавливаемого на бетонном фундаменте, должна удовлетворять условию:

$$b_1 \geq \frac{\frac{4M}{D_б} + F}{\pi D_б [\sigma]_б}, \qquad (3.16)$$

где $[\sigma]_б$ - допускаемое напряжение бетона на сжатие, определяемое в зависимости от марки бетона по таблице 3.2 [33, 34, 35].

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Таблица 3.2

Допускаемое напряжение бетона на сжатие

Класс бетона	Ближайшая марка бетона	Допускаемое напряжение на сжатие $[\sigma]_б$, МПа
B10	M150	6,0
B12,5	M150	7,5
B15	M200	8,5
B20	M250	11,5
B25	M350	14,5
B30	M400	17,0
B35	M450	19,5
B40	M550	22,0

Толщина верхнего опорного кольца должна удовлетворять условию:

$$s_2 \geq \max\left\{\chi_2\sqrt{\frac{A_\sigma[\sigma]_B}{[\sigma]_A}}+c;\ 1{,}5s_0\right\}, \qquad (3.17)$$

где $\chi_2 = \sqrt{\dfrac{3\dfrac{b_4}{b_5}}{1+\dfrac{\left(\dfrac{b_4}{b_5}\right)^2}{1-\dfrac{d}{b_5}}}}$;

$A_\sigma = \dfrac{\pi d_б^2}{4}$ - площадь поперечного сечения анкерного болта по внутреннему диаметру резьбы $d_б$, который принимается по таблице 3.3 [37, 38];

$[\sigma]_B$ - допускаемое напряжение материала анкерных болтов принимается по таблице 3.4 [7];

d - диаметр окружности, вписанной в шестигранник гайки анкерного болта принимается по таблице 3.3 [38,39].

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Таблица 3.3

Расчетные характеристики анкерных болтов

Номинальный диаметр резьбы, мм	Внутренний диаметр резьбы $d_б$, мм	Диаметр окружности, вписанной в шестигранник гайки d, мм
12	9,853	16,5
16	13,546	22,0
20	16,933	27,7
24	20,319	33,2
30	25,706	42,7
36	31,093	51,1
42	36,479	59,9
48	41,866	69,4
56	49,252	78,7
64	56,639	88,2
72	64,639	97,7
80	72,639	107,2
90	82,639	121,1
100	92,639	135,4
110	102,639	144,9
125	117,639	168.6
140	132,639	187.2

Таблица 3.4

Допускаемые напряжения анкерных болтов при температуре 200С

Марка стали	ВСт3	16ГС, 09Г2С, 10Г2С1
Допускаемое напряжение $[\sigma]_B$, МПа	140	170

При наличии усиливающей пластины, приваренной к верхнему опорному кольцу, вместо условия (3.17), необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$(s_2 + \chi_3 s_3) \geq \chi_2 \sqrt{\frac{A_\sigma [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} + c, \qquad (3.18)$$

где $\chi_3 = \frac{b_7}{b_4}\left(\frac{s_3}{s_2}\right)^2$ при выполнении условий $0{,}2 \leq \frac{s_3}{s_2} \leq 1$ и $0{,}5 \leq \frac{b_7}{b_4} \leq 1$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Толщина ребра должна удовлетворять условию:

$$s_4 \geq \max\left\{\frac{A_\sigma[\sigma]_B}{\chi_4 b_2[\sigma]_A} + c;\ 0{,}4s_1\right\}, \tag{3.19}$$

где

$$\chi_4 = \begin{cases} 2{,}0 - \text{для опорного узла исполнений 2 и 4 (рис.3.2);} \\ 1{,}0 - \text{для опорного узла исполнения 3 (рис.3.2).} \end{cases}$$

Прочность опорной обечайки в зоне верхнего опорного кольца обеспечивается при выполнении условия:

$$\frac{6\chi_5 A_\sigma[\sigma]_B e}{(s_0 - c)^2 h} \leq 1{,}5[\sigma]_0, \tag{3.20}$$

где $\chi_5 = -0{,}0248\left\{\ln\left(\frac{N}{1100}\right) - \sqrt{\left[\ln\left(\frac{N}{1100}\right)\right]^2 + 2{,}628}\right\} + K$;

$$N = \frac{D_0}{2(s_0 - c)}\left(\frac{10b_3}{D_0}\right)^{2{,}05};$$

$$K = \begin{cases} 0, \text{ при } N \leq 10^4 \\ -0{,}002\ln(10\text{-}4\ N), \text{ при } N > 10^4; \end{cases}$$

$$b_3 = \begin{cases} b_4 - \text{для опорного узла исполнений 3 (рис.3.2);} \\ (b_5 + b_6) - \text{для опорного узла исполнения 4 (рис.3.2).} \end{cases}$$

3.6. *Анкерные болты*

Расчет прочности анкерных болтов следует производить для условий монтажа, если $M_3 > 0{,}44F_3D_б$. В случае, если $M_3 \leq 0{,}44F_3D_б$, диаметр и количество болтов принимают конструктивно.

Внутренний диаметр резьбы анкерных болтов:

$$d_б \geq \chi_6\sqrt{\frac{M_3 - 0{,}44F_3 \cdot D_б}{n[\sigma]_B \cdot D_б}}, \tag{3.21}$$

где $\chi_6 = \begin{cases} 2{,}25 + 0{,}3\dfrac{F_3D_б}{M_3}, & \textit{при}\ \dfrac{F_3D_б}{M_3} < 0{,}5 \\ 2{,}7 - 2\dfrac{F_3D_б}{M_3} + 3{,}7\left(\dfrac{F_3D_б}{M_3}\right)^2 - 2{,}5\left(\dfrac{F_3D_б}{M_3}\right)^3 + 0{,}65\left(\dfrac{F_3D_б}{M_3}\right)^4, & \textit{при}\ \dfrac{F_3D_б}{M_3} \geq 0{,}5 \end{cases}$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Нормативно-технические документы

1. ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.
2. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
3. ГОСТ 25221-82. Сосуды и аппараты. Днища и крышки сферические неотбортованные. Нормы и методы расчета на прочность.
4. ГОСТ 26202-84. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок.
5. ГОСТ 24755-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий.
6. ГОСТ Р 51273-99. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий.
7. ГОСТ Р 51274-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность.
8. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.
9. ГОСТ 25867-83. Сосуды и аппараты. Сосуды с рубашками. Нормы и методы расчета на прочность.
10. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. –М.: Энергоатомиздат, 1989.
11. РД 26-15-88. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность и герметичность фланцевых соединений.
12. РД РТМ 26-01-96-83. Крышки и днища плоские круглые с радиальными ребрами жесткости сосудов и аппаратов.
13. РД 10-249-98. Нормы и расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды.
14. РД 26-01-169-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность днищ в местах крепления опор-стоек.
15. РД 24.200.21-91. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность элементов плавающих головок кожухотрубчатых теплообменных аппаратов.
16. РД 26-02-62-98. Расчет на прочность элементов сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородсодержащих средах.
17. РД 26-02-63-87. Технические требования к конструированию и изготовлению сосудов, аппаратов и технологических блоков установок подготовки нефти и газа, работающих в средах, вызывающих сероводородное коррозионное растрескивание.
18. ГОСТ 27772-88. Прокат для строительных стальных конструкций.
19. ГОСТ 28759.3-90 Фланцы сосудов и аппаратов стальные приварные встык. Конструкция и размеры

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

20. ГОСТ 28759.4-90 Фланцы сосудов и аппаратов стальные приварные встык под прокладку восьмиугольного сечения.
21. ГОСТ 28759.2-90 Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные.
22. ГОСТ 12815-80. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на P_y от 0,1 до 20,0 МПа (от 1 до 200 Кгс/см^2). Типы. Присоединительные размеры и размеры уплотнительных поверхностей.
23. ГОСТ 12821-80. Фланцы стальные приварные встык на P_y от 0,1 до 20,0 МПа (от 1 до 200 Кгс/см^2). Конструкция и размеры.
24. ГОСТ 12820-80. Фланцы стальные плоские приварные на P_y от 0,1 до 20,0 МПа (от 1 до 200 Кгс/см^2). Конструкция и размеры.
25. ГОСТ 20700-75. Болты, шпильки, гайки и шайбы для фланцевых и анкерных соединений, пробки и хомуты с температурой среды от 0 до 650 °С.
26. ОСТ 26-01-64-83. Зажимы. Конструкция и размеры.
27. ОСТ 26-665-87. Опоры-стойки вертикальных аппаратов. Типы, конструкция и размеры
28. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий.
29. ГОСТ 24756-81. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий.
30. ГОСТ 24757-81. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность.
31. СНИП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. 1996г.
32. СНиП II-7-81. Строительство в сейсмических районах. 2000г.
33. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции.
34. Пособие по проектированию анкерных болтов для крепления строительных конструкций и оборудования (к СНиП 2.09.03)
35. ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.
36. ГОСТ 24379.1-80. Болты фундаментные. Конструкция и размеры.
37. ГОСТ 24705-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры.
38. ГОСТ 5915-70. Гайки шестигранные класса точности В. Конструкция и размеры.
39. ГОСТ 10605-94. Гайки шестигранные с диаметром резьбы свыше 48мм класса точности В. Технические условия.
40. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec.VIII, Div 1, 2002.
41. ASME Materials Sec.II, Part D – Properties. 2002.
42. WRC-107 Welding Research Council. Bulletin. "Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings". 1979.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

43. WRC-297 Welding Research Council. Bulletin. "Local Stresses in Cylindrical Shells due to External Loadings on Nozzles – Supplement to WRC Bulletin №107". 1987.
44. BS-5500: Specification for Unfired fusion welded pressure vessels. British Standards Institution. 1976.
45. WRC-368 Welding Research Council. Bulletin. "Stresses in Intersecting Cylinders subjected to Pressure". 1991. –32 p.
46. Bildy, Les M., 2000, "A Proposed Method for Finding Stress and Allowable Pressure in Cylinders with Radial Nozzles," PVP Vol. 399, ASME, New York, NY, pp. 77-82.
47. Zick, L.P., "Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports", Welding Research Journal Supplement, September,1951.
48. C. E. FREESE. Vibrations of Vertical Pressure Vessels. Journal of Engineering for Industry.1959.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Допускаемые напряжения для сталей [2]

Таблица 1

Допускаемые напряжения для углеродистых и низколегированных сталей

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение [σ], МПа (кгс/см^2), для сталей марок							
	ВСт3		09Г2С, 16ГС		20, 20К	10	10Г2, 09Г2	17ГС, 17Г1С, 10Г2С1
	толщина, мм							
	до 20	свыше 20	до 32	свыше 32	до 160			
20	154(1540)	140(1400)	196(1960)	183(1830)	147(1470)	130(1300)	180(1800)	183(1830)
100	149(1490)	134(1340)	177(1770)	160(1600)	142(1420)	125(1250)	160(1600)	160(1600)
150	145(1450)	131(1310)	171(1710)	154(1540)	139(1390)	122(1220)	154(1540)	154(1540)
200	142(1420)	126(1260)	165(1650)	148(1480)	136(1360)	118(1180)	148(1480)	148(1480)
250	131(1310)	120(1200)	162(1620)	145(1450)	132(1320)	112(1120)	145(1450)	145(1450)
300	115(1150)	108(1080)	151(1510)	134(1340)	119(1190)	100(1000)	134(1340)	134(1340)
350	105(1050)	98(980)	140(1400)	123(1230)	106(1060)	88(880)	123(1230)	123(1230)
375	93(930)	93(930)	133(1330)	116(1160)	98(980)	82(820)	108(1080)	116(1160)
400	85(850)	85(850)	122(1220)	105(1050)	92(920)	77(770)	92(920)	105(1050)
410	81(810)	81(810)	104(1040)	104(1040)	86(860)	75(750)	86(860)	104(1040)
420	75(750)	75(750)	92(920)	92(920)	80(800)	72(720)	80(800)	92(920)
430	71* (710)	71*(710)	86(860)	86(860)	75(750)	68(680)	75(750)	86(860)
440	-	-	78(780)	78(780)	67(670)	60(600)	67(670)	78(780)
450	-	-	71(710)	71(710)	61(610)	53(530)	61(610)	71(710)
460	-		64(640)	64(640)	55(550)	47(470)	55(550)	64(640)
470	-	-	56(560)	56(560)	49(490)	42(420)	49(490)	56(560)
480	-	-	53(530)	53(530)	46* (460)	37(370)	46** (460)	53(530)

* Для расчетной температуры стенки 425°С.

** Для расчетной температуры стенки 475°С.

Примечания:

1. Для листового проката, изготовляемого согласно техническим условиям по двум группам прочности, допускаемые напряжения для первой группы принимают по таблице 1. Для листового проката второй группы прочности для сталей ВСт3 и 09Г2С допускаемое напряжение увеличивают на 6%, а для стали 09Г2 – на 7%. При применении стали Вст3 второй группы прочности при температуре выше 250^{0}С, а сталей 09Г2С и 092Г при температуре выше 300^{0}С допускаемые напряжения принимают такими же, как для стали первой группы.

2. При расчетных температурах ниже 20°С допускаемые напряжения принимают такими же, как при 20°С, при условии допустимого применения материала при данной температуре.

3. Для промежуточных расчетных температур стенки допускаемое напряжение определяют линейной интерполяцией с

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

округлением результатов до 0,5 МПа (5 кгс/см^2) в сторону меньшего значения.

4. Для стали марки 20 при $R_e^{20} < 220 МПа$ (2200 кгс/см^2) допускаемые напряжения, указанные в табл. 1, умножают на отношение $R_e^{20}/220$ ($R_e^{20}/2200$).

5. Для стали марки 10Г2 при $R_{P0,2}^{20}$<270 МПа (2700 кгс/см^2) допускаемые напряжения, указанные в табл. 1, умножают на отношение $R_{P0,2}^{20}/270$ ($R_{P0,2}^{20}/2700$).

Таблица 2

Допускаемые напряжения для теплоустойчивых хромистых сталей

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение [σ], МПа (кгс/см^2), для сталей марок				
	12ХМ	12МХ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	147(1470)	147(1470)	155(1550)	146(1460)	240(2400)
100	146,5(1465)	146,5(1465)	153(1530)	141(1410)	235(2350)
150	146(1460)	146(1460)	152,5(1525)	138(1380)	230(2300)
200	145(1450)	145(1450)	152(1520)	134(1340)	225(2250)
250	145(1450)	145(1450)	152(1520)	127(1270)	220(2200)
300	141(1410)	141(1410)	147(1470)	120(1200)	210(2100)
350	137(1370)	137(1370)	142(1420)	114(1140)	200(2000)
375	135(1350)	135(1350)	140(1400)	110(1100)	180(1800)
400	132(1320)	132(1320)	137(1370)	105(1050)	170(1700)
410	130(1300)	130(1300)	136(1360)	103(1030)	160(1600)
420	129(1290)	129(1290)	135(1350)	101(1010)	150(1500)
430	127(1270)	127(1270)	134(1340)	99(990)	140(1400)
440	126(1260)	126(1260)	132(1320)	96(960)	135(1350)
450	124(1240)	124(1240)	131(1310)	94(9*40)	130(1300)
460	122(1220)	122(1220)	127(1270)	91(910)	126(1260)
470	117(1170)	117(1170)	122(1220)	89(890)	122(1220)
480	114(1140)	114(1140)	117(1170)	86(860)	118(1180)
490	105(1050)	105(1050)	107(1070)	83(830)	114(1140)
500	96(960)	96(960)	99(990)	79(790)	108(1080)
510	82(820)	82(820)	84(840)	72(720)	97(970)
520	69(690)	69(690)	74(740)	66(660)	85(850)
530	60(600)	57(570)	67(670)	60(600)	72(720)
540	50(500)	47(470)	57(570)	54(540)	58(580)
550	41(410)	-	49(490)	47(470)	52(520)
560	33(330)	-	41(410)	40(400)	45(450)
570	-	-	-	35(350)	40(400)
580	-	-	-	30(300)	34(340)
590	-	-	-	28(280)	30(300)
600	-	-	-	25(250)	25(250)

Примечания:

1. При расчетных температурах ниже 20°С допускаемые напряжения принимают такими же, как при 20°С при условии допустимого применения материала при данной температуре.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

2. Для промежуточных расчетных температур стенки допускаемое напряжение определяют линейной интерполяцией с округлением результатов до 0,5 МПа (5 кгс/см^2) в сторону меньшего значения.

3. При расчетных температурах ниже 200°С сталь марок 12МХ, 12ХМ, 15ХМ применять не рекомендуется.

Таблица 3

Допускаемые напряжения для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение [σ], МПа (кгс/см^2), для сталей марок				
	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т
20	180(1800)	160(1600)	153(1530)	168(1680)	184(1840)
100	173(1730)	133(1330)	140(1400)	156(1560)	174(1740)
150	171(1710)	125(1250)	130(1300)	148(1480)	168(1680)
200	171(1710)	120(1200)	120(1200)	140(1400)	160(1600)
250	167(1670)	115(1150)	113(1130)	132(1320)	154(1540)
300	149(1490)	112(1120)	103(1030)	123(1230)	148(1480)
350	143(1430)	108(1080)	101(1010)	113(1130)	144(1440)
375	141(1410)	107(1070)	90(900)	108(1080)	140(1400)
400	140(1400)	107(1070)	87(870)	103(1030)	137(1370)
410	-	107(1070)	83(830)	102(1020)	136(1360)
420	-	107(1070)	82(820)	101(1010)	135(1350)
430	-	107(1070)	81(810)	100,5(1005)	134(1340)
440	-	107(1070)	81(810)	100(1000)	133(1330)
450	-	107(1070)	80(800)	99(990)	132(1320)
460	-	-	-	98(980)	131(1310)
470	-	-	-	97,5(975)	130(1300)
480	-	-	-	97(970)	129(1290)
490	-	-	-	96(960)	128(1280)
500	-	-	-	95(950)	127(1270)
510	-	-	-	94(940)	126(1260)
520	-	-	-	79(790)	125(1250)
530	-	-	-	79(790)	124(1240)
540	-	-	-	78(780)	111(1110)
550	-	-	-	76(760)	111(1110)
560	-	-	-	73(730)	101(1010)
570	-	-	-	69(690)	97(970)
580	-	-	-	65(650)	90(900)
590	-	-	-	61(610)	81(810)
600	-	-	-	57(570)	74(740)
610	-	-	-	-	68(680)
620	-	-	-	-	62(620)
630	-	-	-	-	57(570)
640	-	-	-	-	52(520)
650	-	-	-	-	48(480)
660	-	-	-	-	45(450)
670	-	-	-	-	42(420)
680	-	-	-	-	38(380)
690	-	-	-	-	34(340)
700	-	-	-	-	30(300)

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Примечания:

1. При расчетных температурах ниже 20°С допускаемые напряжения принимают такими же, как и при 20°С, при условии допустимого применения материала при данной температуре.

2. Для промежуточных расчетных температур стенки допускаемое напряжение определяют интерполяцией двух ближайших значений, указанных в таблице, с округлением результатов до 0,5 МПа (5 кгс/см^2) в сторону меньшего значения.

3. Для поковок из стали марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т допускаемые напряжения, приведенные в табл. 3 при температурах до 550°С, умножают на 0,83.

4. Для сортового проката из стали марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т допускаемые напряжения, приведенные в табл. 3 при температурах до 550°С, умножают на отношение $\frac{R^*_{p0,2}}{240}\left(\frac{R^*_{p0,2}}{2400}\right)$,

где $R^*_{p0,2}$ – предел текучести материала сортового проката определен по ГОСТ 5949; для сортового проката из стали марки 03Х18Н11 допускаемые напряжения умножаются на 0,8.

5. Для поковок и сортового проката из стали марки 08Х18Н10Т допускаемые напряжения, приведенные в табл. 7 при температурах до 550°С, умножают на 0,95.

6. Для поковок из стали марки 03Х17Н14М3 допускаемые напряжения, приведенные в табл. 3, умножают на 0,9.

7. Для поковок из стали марки 03Х18Н11 допускаемые напряжения, приведенные в табл. 3, умножают на 0,9; для сортового проката из стали марки 03Х18Н11 допускаемые напряжения умножают на 0,8.

8. Для труб из стали марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) допускаемые напряжения, приведенные в табл. 3, умножают на 0,88.

9. Для поковок из стали марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35.) допускаемые напряжения, приведенные в табл. 3, умножают на отношение

$$\frac{R^*_{p0,2}}{250}\left(\frac{R^*_{p0,2}}{2500}\right),$$

где $R^*_{p0,2}$ – предел текучести материала поковок, определен по ГОСТ 25054 (по согласованию).

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Таблица 4

Допускаемые напряжения для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного и аустенито-ферритного класса

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Допускаемое напряжение [σ], МПа (кгс/см^2), для сталей марок					
	08Х18Г8Н2Т (КО-3)	07Х13АГ20 (ЧС-46)	02Х8Н22С6 (ЭП-794)	15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ-654)	06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т
20	230(2300)	233(2330)	133(1330)	233(2330)	147(1470)	233(2330)
100	206(2060)	173(1730)	106,5(1065)	220(2200)	138(1380)	200(2000)
150	190(1900)	153(1530)	100(1000)	206,5(2065)	130(1300)	193(1930)
200	175(1750)	133(1330)	90(900)	200(2000)	124(1240)	188,5(1885)
250	160(1600)	127(1270)	83(830)	186,5(1865)	117(1170)	166,5(1665)
300	144(1440)	120(1200)	76,5(765)	180(1800)	110(1100)	160(1600)
350	-	113(1130)	-	-	107(1070)	-
375	-	110(1100)	-	-	105(1050)	-
400	-	107(1070)	-	-	103(1030)	-

Примечания:

1. При расчетных температурах ниже 20°С допускаемые напряжения принимают такими же, как и при 20°С, при условии допустимого применения материала при данной температуре.

2. Для промежуточных расчетных температур стенки допускаемое напряжение определяют интерполяцией двух ближайших значений, указанных в таблице, с округлением до 0,5 МПа (5 кгс/см^2) в сторону меньшего значения.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Механические характеристики сталей [2]

Механические характеристики:

для углеродистых и низколегированных сталей – табл. 1 и 2;

для теплоустойчивых хромистых сталей – табл. 3 и 4;

для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного и аустенито-ферритного класса – табл. 5 и 6;

для жаропрочных, жаростойких и коррозионностойких сталей аустенитного класса– табл. 7, 8 и 9.

Таблица 1

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение предела текучести Re, МПа (кгс/см^2), для сталей марок							
	ВСт3		09Г2С, 16ГС		20 и 20К	10	10Г2, 09Г2	17ГС, 17Г1С, 10Г2С1
	толщина, мм							
	до 20	свыше 20	до 32	свыше 32	до 160			
20	250(2500)	210(2100)	300(3000)	280(2800)	220(2200)	195(1950)	270(2700)	280(2800)
100	230(2300)	201(2010)	265,5(2655)	240(2400)	213(2130)	188(1880)	240(2400)	240(2400)
150	224(2240)	197(1970)	256,5(2565)	231(2310)	209(2090)	183(1830)	231(2310)	231(2310)
200	223(2230)	189(1890)	247,5(2475)	222(2220)	204(2040)	177(1770)	222(2220)	222(2220)
250	197(1970)	180(1800)	243(2430)	218(2180)	198(1980)	168(1680)	218(2180)	218(2180)
300	173(1730)	162(1620)	226,5(2265)	201(2010)	179(1790)	150(1500)	201(2010)	201(2010)
350	167(1670)	147(1470)	210(2100)	185(1850)	159(1590)	132(1320)	185(1850)	185(1850)
375	164(1640)	140(1400)	199,5(1995)	174(1740)	147(1470)	123(1230)	162(1620)	174(1740)
400	-	-	183(1830)	158(1580)	-	-	-	158(1580)
410	-	-	-	156(1560)	-	-	-	156(1560)
420	-	-	-	138(1380)	-	-	-	138(1380)

Таблица 2

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение временного сопротивления Rт, МПа (кгс/см^2), для сталей марок						
	ВСт3		09Г2С, 16ГС		20 и 20К	10	10Г2, 09Г2, 17ГС, 17Г1С, 10Г2С1
	толщина, мм						
	до 20	свыше 20	до 32	свыше 32	до 160		
20	460(4600)	380(3800)	470(4700)	440(4400)	410(4100)	340(3400)	440(4400)
100	435(4350)	360(3600)	425(4250)	385(3850)	380(3800)	310(3100)	385(3850)
150	460(4600)	390(3900)	430(4300)	430(4300)	425(4250)	340(3400)	430(4300)
200	505(5050)	420(4200)	439(4390)	439(4390)	460(4600)	382(3820)	439(4390)
250	510(5100)	435(4350)	444(4440)	444(4440)	460(4600)	400(4000)	444(4440)
300	520(5200)	440(4400)	445(4450)	445(4450)	460(4600)	374(3740)	445(4450)
350	480(4800)	420(4200)	441(4410)	441(4410)	430(4300)	360(3600)	441(4410)
375	450(4500)	402(4020)	425(4250)	425(4250)	410(4100)	330(3300)	425(4250)

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Таблица 3

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение предела текучести $Rp_{0,2}$, МПа (кгс/см^2), для сталей марок				
	12МХ	12ХМ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	220(2200)	220(2200)	233(2330)	220(2200)	400(4000)
100	219(2190)	219(2190)	230(2300)	210(2100)	352,5(3525)
150	218(2180)	218(2180)	229(2290)	207(2070)	345(3450)
200	217,5(2175)	217,5(2175)	228(2280)	201(2010)	337,5(3375)
250	217,5(2175)	217,5(2175)	228(2280)	190(1900)	330(3300)
300	212(2120)	212(2120)	220(2200)	180(1800)	315(3150)
350	206(2060)	206(2060)	213(2130)	171(1710)	300(3000)
375	202(2020)	202(2020)	210(2100)	164(1640)	270(2700)
400	198(1980)	198(1980)	205(2050)	158(1580)	255(2550)
410	195(1950)	195(1950)	204(2040)	155(1550)	240(2400)
420	194(1940)	194(1940)	202(2020)	152(1520)	225(2250)

Таблица 4

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение временного сопротивления Rт, МПа (кгс/см^2), для сталей марок				
	12МХ	12ХМ	15ХМ	15Х5М	15Х5М-У
20	450(4500)	450(4500)	450(4500)	400(4000)	600(6000)
100	440(4400)	440(4400)	440(4400)	380(3800)	572(5720)
150	434(4340)	434(4340)	434(4340)	355(3550)	555(5550)
200	430(4300)	430(4300)	430(4300)	330(3300)	535(5350)
250	440(4400)	437(4370)	437(4370)	320(3200)	520(5200)
300	454(4540)	445(4450)	445(4450)	318(3180)	503(5030)
350	437(4370)	442(4420)	442(4420)	314(3140)	492(4920)
375	427(4270)	436(4360)	436(4360)	312(3120)	484(4840)
400	415(4150)	426(4260)	426(4260)	310(3100)	472(4720)
410	413(4130)	424(4240)	424(4240)	306(3060)	468(4680)
420	410(4100)	421(4210)	421(4210)	300(3000)	462(4620)

Таблица 5

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение предела текучести $Rp_{0,2}$, МПа (кгс/см^2), для сталей марок					
	08Х18Г8Н2Т (КО-3)	07Х13АГ20 (ЧС-46)	02Х8Н22С6 (ЭП-794)	15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ-654)	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	06ХН28МДТ, 03ХН28мдт
20	350(3500)	350(3500)	200(2000)	350(3500)	350(3500)	220(2200)
100	328(3280)	260(2600)	160(1600)	330(3300)	300(3000)	207(2070)
150	314(3140)	230(2300)	150(1500)	310(3100)	280(2900)	195(1950)
200	300(3000)	200(2000)	135(1350)	300(3000)	283(2830)	186(1860)
250	287(2870)	190(1900)	125(1250)	280(2800)	250(2500)	175(1750)
300	274(2740)	180(1800)	115(1150)	270(2700)	240(2400)	165(1650)
350	-	170(1700)	-	-	-	160(1600)
375	-	165(1650)	-	-	-	157,5(1575)
400	-	160(1600)	-	-	-	155(1550)

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Таблица 6

Расчетная температура стенки сосуда, или аппарата, °С	Расчетное значение временного сопротивления Rт, МПа (кгс/см^2), для сталей марок				
	08Х18Г8Н2Т (КО-3)	07Х13АГ20 (ЧС-46)	02Х8Н22С6 (ЭП-794)	15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ-654)	06ХН28МДТ, 03ХН28мдт
20	600(6000)	670(6700)	550(5500)	700(7000)	550(5500)
100	535(5350)	550(5500)	500(5000)	640(6400)	527,5(5275)
150	495(4950)	520(5200)	480(4800)	610(6100)	512,5(5125)
200	455(4550)	490(4900)	468(4680)	580(5800)	500(5000)
250	415(4150)	485(4850)	450(4500)	570(5700)	490(4900)
300	375(3750)	480(4800)	440(4400)	570(5700)	482,5(4825)
350	-	465(4650)	-	-	478(4780)
375	-	458(4580)	-	-	474(4740)
400	-	450(4500)	-	-	470(4700)

Таблица 7

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение предела текучести $Rp_{1,0}$, МПа (кгс/см^2), для сталей марок				
	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3
20	276(2760)	252(2520)	270(2700)	240(2400)	230(2300)
100	261(2610)	234(2340)	260(2600)	200(2000)	210(2100)
150	252(2520)	222(2220)	257(2570)	187,5(1875)	195(1950)
200	240(2400)	210(2100)	257(2570)	180(1800)	180(1800)
250	231(2310)	198(1980)	250(2500)	173(1730)	170(1700)
300	222(2220)	184,5(1845)	223(2230)	168(1680)	155(1550)
350	216(2160)	169,5(1695)	215(2150)	162(1620)	152(1520)
375	210(2100)	162(1620)	212(2120)	160(1600)	135(1350)
400	205,5(2055)	154,5(1545)	210(2100)	160(1600)	130(1300)
410	204(2040)	153(1530)	-	160(1600)	125(1250)
420	202,5(2025)	151,5(1515)	-	160(1600)	123(1230)
430	201(2010)	150,75(1508)	-	160(1600)	122(1220)
440	199,5(1995)	150(1500)	-	160(1600)	121(1210)
450	198(1980)	148,5(1485)	-	160(1600)	120(1200)
460	196,5(1965)	147(1470)	-	-	-
470	195(1950)	146(1460)	-	-	-
480	193,5(1935)	145,5(1455)	-	-	-
490	192(1920)	144(1440)	-	-	-
500	190,5(1905)	142,5(1425)	-	-	-
510	189(1890)	141(1410)	-	-	-
520	187,5(1875)	139,5(1395)	-	-	-
530	186(1860)	138(1380)	-	-	-

Примечание. Предел текучести для поковок, сортового проката и труб при 20°С следует принимать:

для поковок из стали марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т – $\frac{R^{20}_{p1,0}(\text{листа})}{1,2}$;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

для поковок и сортового проката из стали марки 08Х18Н10Т - $\frac{R^{20}_{p1,0}(\text{листа})}{1,05}$;

для сортового проката из стали марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т - $\frac{1,15\ R^{20}_{p0,2}(\text{сорта})}{}$;

для поковок из стали марок 03Х17Н14М3, 03Х18Н11 - $\frac{R^{20}_{p1,0}(\text{листа})}{1,11}$;

для сортового проката из стали марки 03Х18Н11 - $\frac{R^{20}_{p1,0}(\text{листа})}{1,25}$;

для труб из стали марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) - $\frac{R^{20}_{p1,0}(\text{листа})}{1,14}$;

для поковок из стали марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) - $\frac{1,08\ R^{20}_{p0,2}}{}$ (поковки)

где $R^{20}_{p0,2}$ предел текучести материала поковок определен по ГОСТ 25054 (по согласованию).

Таблица 8

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение предела текучести $R_{p0,2}$ МПа (кгс/см^2), для сталей марок				
	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н13М3Т	03Х21Н21М4ГБ	03Х18Н11	03Х17Н14М3
20	240(2400)	210*(2100)	250(2500)	200(2000)	200(2000)
100	228(2280)	195(1950)	240(2400)	160(1600)	180(1800)
150	219(2190)	180(1800)	235(2350)	150(1500)	165(1650)
200	210(2100)	173(1730)	235(2350)	140(1400)	150(1500)
250	204(2040)	165(1650)	232(2320)	135(1350)	140(1400)
300	195(1950)	150(1500)	205(2050)	130(1300)	126(1260)
350	190(1900)	137(1370)	199(1990)	127(1270)	115(1150)
375	186(1860)	133(1330)	195(1950)	125(1250)	108(1080)
400	181(1810)	129(1290)	191(1910)	122,5(1225)	100(1000)
410	180(1800)	128(1280)	-	121,5(1215)	98(980)
420	180(1800)	128(1280)	-	121(1210)	97,5(975)
430	179(1790)	127(1270)	-	120,5(1205)	97(970)
440	177(1770)	126(1260)	-	120(1200)	96(960)
450	176(1760)	125(1250)	-	120(1200)	95(950)
460	174(1740)	125(1250)	-	-	-
470	173(1730)	124(1240)	-	-	-
480	173(1730)	123(1230)	-	-	-
490	171(1710)	122(1220)	-	-	-
500	170(1700)	122(1220)	-	-	-
510	168(1680)	120(1200)	-	-	-
520	168(1680)	119(1190)	-	-	-
530	167(1670)	119(1190)	-	-	-

* Для сталей 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т предел текучести при 20°С равен 200 (2000) МПа (кгс/см^2).

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Примечания:

1. Для поковок из стали марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, пределы текучести, приведенные в табл. 7 и 8, умножают на 0,83.

2. Для сортового проката из стали марок 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т пределы текучести, приведенные в табл. 8, умножают на

$$\frac{R^*_{p0,2}}{240}\left(\frac{R^*_{p0,2}}{2400}\right),$$

где $R^*_{p0,2}$ – предел текучести материала сортового проката определен по ГОСТ 5949.

3. Для поковок и сортового проката из стали марки 08Х18Н10Т пределы текучести, приведенные в табл. 16, умножают на 0,95.

4. Для поковок из стали марки 03Х17Н14М3 пределы текучести, приведенные в табл. 8, умножают на 0,9.

5. Для поковок из стали марки 03Х18Н11 пределы текучести, приведенные в табл. 8, умножают на 0,9; для сортового проката из стали марки 03Х18Н11 пределы текучести умножают на 0,8.

6. Для труб из стали марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) пределы текучести, приведенные в табл. 8, умножают на 0,88.

7. Для поковок из стали марки 03Х21Н21М4ГБ (ЗИ-35) пределы текучести, приведенные в табл. 8, умножают на отношение

$$\frac{R^*_{p0,2}}{250}\left(\frac{R^*_{p0,2}}{2500}\right),$$

где $R^*_{p0,2}$ – предел текучести материала поковок определен по ГОСТ 25054 (по согласованию).

Таблица 9

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение временного сопротивления Rт, МПа (кгс/см^2), для сталей марок					
	03Х21Н21М4ГБ	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т
20	550(5500)	600(6000)	500(5000)	520(5200)	520(5200)	540(5400)
100	540(5400)	583(5830)	474(4740)	450(4500)	480(4800)	500(5000)
150	535(5350)	550(5500)	453(4530)	433(4330)	455(4550)	475(4750)
200	535(5350)	515(5150)	432(4320)	415(4150)	430(4300)	450(4500)
250	534(5340)	503(5030)	412(4120)	405(4050)	424(4240)	443(4430)
300	520(5200)	500(5000)	392(3920)	397(3970)	417(4170)	440(4400)
350	518(5180)	-	376(3760)	394(3940)	408(4080)	438(4380)
375	517(5170)	-	368(3680)	392(3920)	405(4050)	437(4370)
400	516(5160)	-	360(3600)	390(3900)	402(4020)	436(4360)
410	-	-	358(3580)	388(3880)	400(4000)	434(4340)

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	Расчетное значение временного сопротивления Rт, МПа (кгс/см^2), для сталей марок					
	03Х21Н21М4ГБ	08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	03Х17Н14М3	03Х18Н11	08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т
420	-	-	356(3560)	386(3860)	398(3980)	432(4320)
430	-	-	354(3540)	384(3840)	396(3960)	431(4310)
440	-	-	352(3520)	382(3820)	394(3940)	430(4300)
450	-	-	350(3500)	380(3800)	392(3920)	428(4280)
460	-	-	-	-	390(3900)	426(4260)
470	-	-	-	-	388(3880)	424(4240)
480	-	-	-	-	386(3860)	422(4220)
490	-	-	-	-	385(3850)	421(4210)
500	-	-	-	-	383(3830)	420(4200)
510	-	-	-	-	381(3810)	418(4180)
520	-	-	-	-	380(3800)	416(4160)
530	-	-	-	-	374*(3740)	412*(4120)

* Для расчетной температуры стенки 550°С.

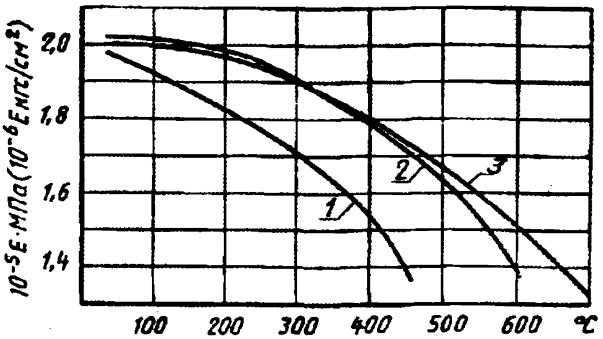
Коэффициенты линейного расширения

Таблица 10

Марка стали	Расчетное значение коэффициента $\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$, при температуре, °С				
	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500
ВСт3, 20, 20К, 09Г2С, 16ГС, 17ГС, 17Г1С, 10Г2С1, 10Г2	11,6	12,6	13,1	13,6	14,1
12ХМ, 12МХ, 15ХМ, 15Х5М, 15Х5М-У	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0
08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т	9,6	13,8	16,0	16,0	16,5
12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т, 03Х17Н14М3, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 03Х18Н11, 08Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т	16,6	17,0	18,0	18,0	18,0
03Х21Н21М4ГБ	14,9	15,7	16,6	17,3	17,5
06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ	15,3	15,9	16,5	16,9	17,3
08Х18Г8Н2Т	12,3	13,1	14,4	14,4	15,3

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетные значения модуля упругости



1 – углеродистые в низколегированные стали; *2* – теплоустойчивые и коррозионно-стойкие хромистые стали; *3* – жаропрочные, жаростойкие и коррозионно-стойкие аустенитные стали

Таблица 11

Сталь	Модуль продольной упругости 10^5 *E*, МПа (10^{-6} *E* кгс/см^2) при температуре, °С													
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Углеродистые и низколегированные стали	1,99	1,91	1,86	1,81	1,76	1,71	1,64	1,55	1,40	-	-	-	-	-
Теплоустойчивые и коррозионно-стойкие хромистые стали	2,15	2,15	2,05	1,98	1,95	1,90	1,84	1,78	1,71	1,63	1,54	1,40	-	-
Жаропрочные и жаростойкие аустенитные стали	2,00	2,00	1,99	1,97	1,94	1,90	1,85	1,80	1,74	1,67	1,60	1,52	1,43	1,32

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Приведенные нагрузки и расстояния до центра тяжести отдельных элементов сосудов (аппаратов)

Цилиндрическая обечайка

Вес цилиндрической обечайки и залитой жидкости (весовая нагрузка):

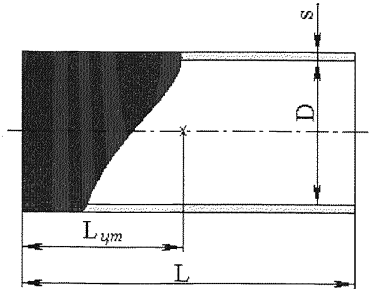
$$G = \left[\rho_{ст} \pi \, Ls(D+s) + \xi \, \rho_{ж} \pi \, L \frac{D^2}{4} \right] g$$

где $\rho_{ст}$ - плотность материаластенки;

$\rho_{ж}$ - плотность жидкости;

ξ - степень заполнения сосуда.

Расстояние от края элемента до центра тяжести $L_{цт} = \frac{L}{2}$

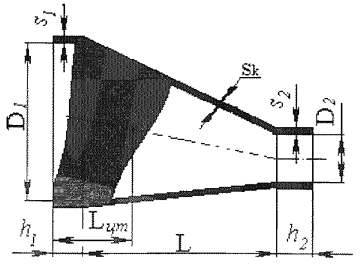


Конический переход

Конический переход представляется тремя элементами: двумя цилиндрическими и одной конической обечайками.

Весовая нагрузка левой цилиндрической части перехода:

$$G_1 = \left[\rho_{ст} \pi \, h_1 s_1 (D_1 + s_1) + \xi \, \rho_{ж} \pi \, h_1 \frac{D_1^2}{4} \right] g$$



Весовая нагрузка правой цилиндрической части перехода:

$$G_2 = \left[\rho_{ст} \pi \, h_2 s_2 (D_2 + s_2) + \xi \, \rho_{ж} \pi \, h_2 \frac{D_2^2}{4} \right] g$$

Весовая нагрузка конической обечайки элемента:

$$G_k = \left[\rho_{ст} \pi \frac{1}{2} \, Ls_k (D_1 + D_2 + 2s_k) + \xi \, \rho_{ж} \frac{1}{12} \pi \, L(D_1^2 + D_1 D_2 + D_2^2) \right] g$$

Расстояние от края конического перехода до центра тяжести конической обечайки:

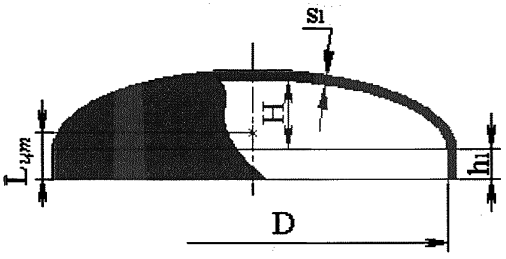
$$L_k = h_1 + \frac{1}{3} L \frac{\rho_{ст} s_k (D_1 + 2D_2 + 3s_k) + \xi \, \rho_{ж} \frac{1}{8} \left(D_1^2 + 2D_1 D_2 + 3D_2^2 \right)}{\rho_{ст} \, s_k (D_1 + D_2 + 2s_k) + \xi \, \rho_{ж} \frac{1}{6} \left(D_1^2 + D_1 D_2 + D_2^2 \right)}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расстояние от края элемента до центра тяжести

$$L_{цт} = \frac{G_1 \frac{h_1}{2} + G_k (h_1 + L_k) + G_2 \left(h_1 + L + \frac{h_2}{2} \right)}{G}$$

Эллиптическое днище



Весовая нагрузка:

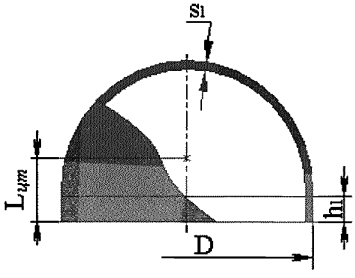
$$G = \left[\begin{array}{l} \rho_{ст} \frac{1}{6} \pi \; s_1 (4DH + 4Hs_1 + D^2 + 4Ds_1 + 4s_1^2 + 6Dh_1 + 6h_1 s_1) + \\ + \xi \rho_{ж} \pi \frac{D^2}{4} \left(\frac{2}{3} H + h_1 \right) \end{array} \right] g$$

Расстояние от края элемента до центра тяжести:

$$L_{цт} = \frac{1}{4} \frac{3H^2 + 8Hh_1 + 6h_1^2}{2H + 3h_1}$$

Полусферическое днище

Весовая нагрузка и расстояние до центра тяжести для полусферического днища определяются по формулам эллиптического днища при $H = \frac{D}{2}$.



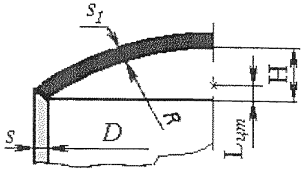
© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Сферическое неотбортованное днище

Весовая нагрузка:

$$G = \left[\begin{array}{l} \rho_{ст}\ \pi\ s_1(2RH + Rs_1 + Hs_1 + \frac{2}{3}s_1^2) + \\ + \xi\ \rho_{ж}\ \pi\ H^2\left(R - \frac{1}{3}H\right) \end{array} \right] g,$$



где $H = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}$ - высота днища.

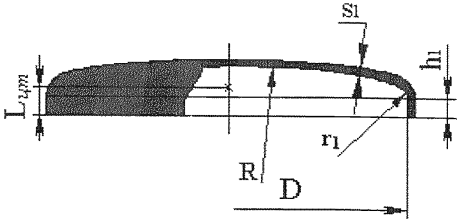
Расстояние от края элемента до центра тяжести

$$L_{цт} = \frac{1}{4} H \frac{4R - H}{3R - H}$$

Торосферическое днище

Весовая нагрузка и расстояние до центра тяжести без учета отбортовки определяются по формулам сферического неотбортованного днища при

$$H = R - \sqrt{(R - r_1)^2 - \left(\frac{D}{2} - r_1\right)^2}.$$



Весовая нагрузка с учетом отбортовки:

$$G = G_д + G_1,$$

где $G_1 = \left[\rho_{ст}\pi\, h_1 s_1 (D + s_1) + \xi\, \rho_{ж}\pi\ h_1 \frac{D^2}{4}\right] g$ - весовая нагрузка переходной части днища, а $G_д$ определяется по формуле сферического неотбортованного днища.

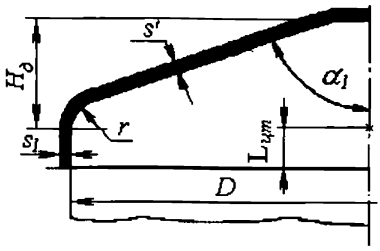
Расстояние от края элемента до центра тяжести:

$$L_{цт} = \frac{G_д L_д + G_1 \frac{h_1}{2}}{G},$$

где $L_д$ определяется по формуле сферического неотбортованного днища.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Коническое днище



Весовая нагрузка:

$$G = G_1 + G_k,$$

где $G_1 = \left[\rho_{ст} \pi h_1 s_1 (D + s_1) + \xi \rho_{ж} \pi h_1 \frac{D^2}{4} \right] g$ - весовая нагрузка переходной части днища;

$$G_k = \left[\rho_{ст} \pi s' \left(H_д (D - H_д tg\alpha_1 + s') + \frac{1}{4} (D - 2H_д tg\alpha_1)^2 \right) + \right.$$

$$\left. + \xi \rho_{ж} \frac{1}{12} \pi H_д (3D^2 - 6DH_д tg\alpha_1 + 4H_д^2 tg^2\alpha_1) \right] g$$ - весовая нагрузка конической обечайки днища.

Расстояние от края элемента до центра тяжести:

$$L_{цт} = \frac{G_k L_k + G_1 \frac{h_1}{2}}{G},$$

где

$$L_k = h_1 + H_д \frac{\frac{1}{6} \rho_{ст} \pi s' H_д (3D - 4H_д tg\alpha_1 + 3s') g + \xi \rho_{ж} \pi \frac{1}{24} H_д \left(3D^2 - 8DH_д tg\alpha_1 + 6(H_д tg\alpha_1)^2\right) g}{G_k} +$$

$$+ H_д \frac{\frac{1}{4} \rho_{ст} \pi s' (D - 2H_д tg\alpha_1)^2 g}{G_k}$$

- расстояние от края элемента до центра тяжести конической обечайки.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Поперечное усилие и изгибающий момент от распределенной нагрузки в обечайке

В качестве расчетной схемы для определения усилий, моментов и напряжений в i-ом элементе вне опор в общем случае рассматривается коническая обечайка, как балка переменного кольцевого сечения, находящаяся под действием распределенной нагрузки от веса жидкости и самого элемента (рис.1). В целях упрощения i-ые индексы при описании расчетной схемы элемента опущены. Цилиндрическая обечайка является частным случаем конической при условии $D = D_1 = D_2$; $s = s_k$. Левый конец элемента нагружен перерезывающей силой и моментом от действия предыдущих элементов.

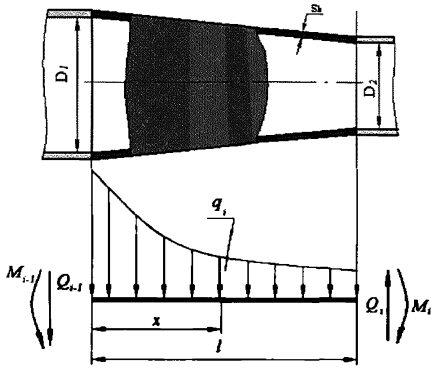


Рис.1 Расчетная схема элемента между опорами

Распределенная нагрузка по длине элемента:

$$q(x) = \rho_{cm}\pi\, s_k\left(D_1 + s_k + \frac{D_2 - D_1}{1}x\right)g + \xi\,\rho_{ж}\,\frac{1}{4}\pi\left(D_1 + \frac{D_2 - D_1}{l}x\right)^2 g$$

Поперечное усилие

Поперечное усилие для всех элементов, кроме первых после опор ($i = 1, n1$; $i = n1 + 2, n2 - 1$; $i = n2 + 1, n$) (рис.9.1):

$$Q(x) = Q_{i-1} + \int_0^x q(x)dx = Q_{i-1} + \rho_{cm}\pi\, s_k x\left(D_1 + s_k + \frac{D_2 - D_1}{2l}x\right)g +$$

$$+\,\xi\,\rho_{ж}\,\frac{1}{12}\pi\, x\left(3D_1^2 + 3D_1\frac{D_2 - D_1}{l}x + \left(\frac{D_2 - D_1}{l}\right)^2 x^2\right)g$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

для первого элемента после первой ($i = n1+1$) и второй ($i = n2$) опоры:

$$Q(x) = Q_{i-1} - F_{1(2)} + \rho_{cm}\pi\, s_k x\left(D_1 + s_k + \frac{D_2 - D_1}{2l}x\right)g +$$

$$+\xi\,\rho_{ж}\frac{1}{12}\pi\, x\left(3D_1{}^2 + 3D_1\frac{D_2 - D_1}{l}x + \left(\frac{D_2 - D_1}{l}\right)^2 x^2\right)g$$

Изгибающий момент

Для всех элементов, кроме первых после опор ($i = 1, n1$; $i = n1+2, n2-1$; $i = n2+1, n$):

$$M(x) = M_{i-1} + Q_{i-1}x + \int_0^x Q(x)dx = M_{i-1} + Q_{i-1}x +$$

$$+\rho_{cm}\frac{1}{2}\pi\, s_k x^2\left(D_1 + s_k + \frac{2(D_2 - D_1)}{3l}x\right)g + \qquad (1)$$

$$+\xi\,\rho_{ж}\frac{1}{8}\pi\, x^2\left(D_1{}^2 + \frac{4}{3}D_1\frac{D_2 - D_1}{l}x + \frac{1}{2}\left(\frac{D_2 - D_1}{l}\right)^2 x^2\right)g$$

для первого элемента после первой ($i = n1+1$) и второй ($i = n2$) опоры:

$$M(x) = M_{i-1} + \left(Q_{i-1} - F_{1(2)}\right)x + \int_0^x Q(x)dx = M_{i-1} + \left(Q_{i-1} - F_1\right)x +$$

$$+\rho_{cm}\frac{1}{2}\pi\, s_k x^2\left(D_1 + s_k + \frac{2(D_2 - D_1)}{3l}x\right)g + \qquad (2)$$

$$+\xi\,\rho_{ж}\frac{1}{8}\pi\, x^2\left(D_1{}^2 + \frac{4}{3}D_1\frac{D_2 - D_1}{l}x + \frac{1}{2}\left(\frac{D_2 - D_1}{l}\right)^2 x^2\right)g$$

Результирующая перерезывающая сила и момент после i-го элемента:

$$Q_i = Q(L); \quad M_i = M(L) \qquad (3)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Свойства материалов болтов (шпилек) для расчета фланцевых соединений сосудов и аппаратов [11]

Таблица 1

				Допускаемое напряжение болтов (шпилек) $[\sigma]_б$, МПа для сталей марок			
Расчетная температура	35, 40	12Х18Н10Т 10Х17Н13М2Т	45Х14Н14В2М	08Х15Н24В4ТР	35Х, 40Х, 38ХА, 37Х12Н8Г8МФБ 20ХН3А	30ХМА	ХН35ВТ
	130,0	110,0	160,0	231,0	230,0	230,0	208,0
100	126,0	105,0	150,0	226,0	230,0	230,0	196,0
200	120,0	98,0	150,0	221,0	225,0	200,0	186,0
250	107,0	95,0	144,0	219,0	222,0	182,0	186,0
300	97,0	90,0	139,0	217,0	222,0	174,0	186,0
350	86,0	86,0	128,0	215,0	185,0	166,0	186,0
375	80,0	85,0	128,0	214,0	175,0	166,0	186,0
400	75,0	83,0	128,0	213,0	160,0	166,0	186,0
425	68,0	82,0	125,0	213,0	153,0	161,0	186,0
450		80,0	123,0	213,0		156,0	186,0
475		79,0	120,0	213,0			186,0
500		78,0	118,0	208,0			186,0
510			117,0	205,0			185,0
520			116,0	202,0			184,0
530			115,0	199,0			183,0
540			114,0	196,0			181,0
550			113,0	195,0			180,0
560				183,0			165,0
570				171,0			150,0
580				169,0			135,0
590				157,0			110,0
600				147,0			110,0
610							110,0
620							105,0
630							100,0
640							94,0
650							88,0
Расчетная температура	20Х 13	25Х1МФ	25Х2М1Ф	18Х12ВМБФР	20Х1МФ1БР	07Х16Н6	14Х17 Н2
20	195,0	238,0	238,0	238,0	238,0	321,0	298,0
100	182,0	227,0	232,0	234,0	234,0	314,0	294,0
200	165,0	217,0	231,0	231,0	224,0	312,5	287,0
250	157,5	210,0	224,0	227,0	213,0	309,8	284,0
300	150,0	199,0	220,0	227,0	202,0	307,0	280,0
350	147,0	185,0	213,0	220,0	185,0	307,0	280,0
375	146,0	180,0	209,0	216,0	183,0		
400	145,0	175,0	206,0	213,0	182,0		
425	143,5	168,0	202,0	208,0	178,0		

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

450	142,0	161,0	199,0	203,0	175,0		
475	100,0	152,0	195,0	196,0	171,0		
500		143,0	192,0	189,0	167,0		

Таблица 2

Марка стали	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6 \frac{1}{град}$ в зависимости от температуры, 0С					
	20-100	200	300	400	500	600
35	11,1	11,9		13,4	-	-
40	11,3	12,0	13,3	13,3	-	-
20Х13	10,4	10,9	11,4	11,8	-	-
14Х17Н2, 07Х16Н6	10,6	10,8	11,0	11,1	11,3	-
35Х,40Х,38ХА	13,4	13,3	-	14,8	-	-
20ХН3А	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	14,5
30ХМА	12,3	12,6	12,9	13,9	-	14,4
25Х1МФ	11,3	12,7	-	13,9	-	14,6
25Х2М1Ф, 20Х1МФ1БР	12,5	12,9	13,3	13,7	14,0	14,7
18Х12ВМБФР	11,2	11,3	11,4	11,8	12,0	-
37Х12Н8Г8МФБ	15,9	18,0	19,2	21,5	22,4	21,0
12Х18Н10Т 10Х17Н13М2Т	16,6	17,0	18,0	18,0	18,0	-
45Х14Н14В2М	16,6	17,0	18,0	18,0	18,0	18,0
ХН35ВТ	14,8	15,1	15,5	15,9	16,1	16,6
08Х15Н24В4	14,5	15,5	16,3	16,8	17,2	17,4

Таблица 3

Марка стали	Модуль продольной упругости 10^5 $E_б$, мпа (10^{-6} $E_б$, кгс/см^2) при температуре, °С											
	20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
35, 40	2,10	2,05	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,67	1,60	-	-
20Х13, 14Х17Н2, 18Х12ВМБФР, 20ХН3А	2,20	2,15	2,12	2,10	2,05	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70
07Х16Н6, 35Х, 40Х, 38ХА, 30ХМА, 25Х1МФ, 25Х2М1Ф	2,15	2,10	2,07	2,05	2,02	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70
20Х1МФ1БР	2,10	2,05	2,02	2,00	1,97	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70	1,65
12Х18Н10Т,ХН35ВТ 10Х17Н13М2Т, 45Х14Н14В2М, 08Х15Н24В4ТР, 37Х12Н8Г8МФБ	2,05	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70	1,67	1,65	1,62	1,60

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Коэффициенты для расчета фланцевых соединений [40]

(1) $A = \dfrac{s_1 - c}{s_0 - c} - 1$;

(2) $C = 43{,}68\left(\dfrac{l}{\sqrt{(D+2c)(s_0-c)}}\right)^4$;

(3) $C_1 = \dfrac{1}{3} + \dfrac{A}{12}$;

(4) $C_2 = \dfrac{5}{42} + \dfrac{17A}{336}$;

(5) $C_3 = \dfrac{1}{210} + \dfrac{A}{360}$;

(6) $C_4 = \dfrac{11}{360} + \dfrac{59A}{5040} + \dfrac{1+3A}{C}$;

(7) $C_5 = \dfrac{1}{90} + \dfrac{5A}{1008} - \dfrac{(1+A)^3}{C}$;

(8) $C_6 = \dfrac{1}{120} + \dfrac{17A}{5040} + \dfrac{1}{C}$;

(9) $C_7 = \dfrac{215}{2772} + \dfrac{51A}{1232} + \dfrac{\dfrac{60}{7} + \dfrac{225A}{14} + \dfrac{75A^2}{7} + \dfrac{5A^3}{2}}{C}$;

(10) $C_8 = \dfrac{31}{6930} + \dfrac{128A}{45045} + \dfrac{\dfrac{6}{7} + \dfrac{15A}{7} + \dfrac{12A^2}{7} + \dfrac{5A^3}{11}}{C}$;

(11) $C_9 = \dfrac{533}{30240} + \dfrac{653A}{73920} + \dfrac{\dfrac{1}{2} + \dfrac{33A}{14} + \dfrac{39A^2}{28} + \dfrac{25A^3}{84}}{C}$;

(12) $C_{10} = \dfrac{29}{3780} + \dfrac{3A}{704} - \dfrac{\dfrac{1}{2} + \dfrac{33A}{14} + \dfrac{81A^2}{28} + \dfrac{13A^3}{12}}{C}$;

(13) $C_{11} = \dfrac{31}{6048} + \dfrac{1763A}{665280} + \dfrac{\dfrac{1}{2} + \dfrac{6A}{7} + \dfrac{15A^2}{28} + \dfrac{5A^3}{42}}{C}$;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

(14) $$C_{12} = \frac{1}{2925} + \frac{71A}{300300} + \frac{\frac{8}{35} + \frac{18A}{35} + \frac{156A^2}{385} + \frac{6A^3}{55}}{C};$$

(15) $$C_{13} = \frac{761}{831600} + \frac{937A}{1663200} + \frac{\frac{1}{3} + \frac{6A}{35} + \frac{11A^2}{70} + \frac{3A^3}{70}}{C};$$

(16) $$C_{14} = \frac{197}{415800} + \frac{103A}{332640} - \frac{\frac{1}{35} + \frac{6A}{35} + \frac{17A^2}{70} + \frac{A^3}{10}}{C};$$

(17) $$C_{15} = \frac{233}{831600} + \frac{97A}{554400} + \frac{\frac{1}{35} + \frac{3A}{35} + \frac{A^2}{14} + \frac{2A^3}{105}}{C};$$

(18) $$C_{16} = C_1C_7C_{12} + C_2C_8C_3 + C_3C_8C_2 - \left(C_3^2C_7 + C_8^2C_1 + C_2^2C_{12}\right);$$

(19) $$C_{17} = \frac{C_4C_7C_{12} + C_2C_8C_{13} + C_3C_8C_9 - \left(C_{13}C_7C_3 + C_8^2C_4 + C_{12}C_2C_9\right)}{C_{16}};$$

(20) $$C_{18} = \frac{C_5C_7C_{12} + C_2C_8C_{14} + C_3C_8C_{10} - \left(C_{14}C_7C_3 + C_8^2C_5 + C_{12}C_2C_{10}\right)}{C_{16}};$$

(21) $$C_{19} = \frac{C_6C_7C_{12} + C_2C_8C_{15} + C_3C_8C_{11} - \left(C_{15}C_7C_3 + C_8^2C_6 + C_{12}C_2C_{11}\right)}{C_{16}};$$

(22) $$C_{20} = \frac{C_1C_9C_{12} + C_4C_8C_3 + C_3C_{13}C_2 - \left(C_3^2C_9 + C_{13}C_8C_1 + C_{12}C_4C_2\right)}{C_{16}};$$

(23) $$C_{21} = \frac{C_1C_{10}C_{12} + C_5C_8C_3 + C_3C_{14}C_2 - \left(C_3^2C_{10} + C_{14}C_8C_1 + C_{12}C_5C_2\right)}{C_{16}};$$

(24) $$C_{22} = \frac{C_1C_{11}C_{12} + C_6C_8C_3 + C_3C_{15}C_2 - \left(C_3^2C_{11} + C_{15}C_8C_1 + C_{12}C_6C_2\right)}{C_{16}};$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

(25) $C_{23} = \dfrac{C_1C_7C_{13} + C_2C_9C_3 + C_4C_8C_2 - \left(C_3C_7C_4 + C_8C_9C_1 + C_2^2C_{13}\right)}{C_{16}}$;

(26) $C_{24} = \dfrac{C_1C_7C_{14} + C_2C_{10}C_3 + C_5C_8C_2 - \left(C_3C_7C_5 + C_8C_{10}C_1 + C_2^2C_{14}\right)}{C_{16}}$;

(27) $C_{25} = \dfrac{C_1C_7C_{15} + C_2C_{11}C_3 + C_6C_8C_2 - \left(C_3C_7C_6 + C_8C_{11}C_1 + C_2^2C_{15}\right)}{C_{16}}$;

(28) $C_{26} = -\left(\dfrac{C}{4}\right)^{0,25}$;

(29) $C_{27} = C_{20} - C_{17} - \dfrac{5}{12} + C_{17}C_{26}$;

(30) $C_{28} = C_{22} - C_{19} - \dfrac{1}{12} + C_{19}C_{26}$;

(31) $C_{29} = -\left(\dfrac{C}{4}\right)^{0,5}$;

(32) $C_{30} = -\left(\dfrac{C}{4}\right)^{0,75}$;

(33) $C_{31} = \dfrac{3A}{2} - C_{17}C_{30}$;

(34) $C_{32} = \dfrac{1}{2} - C_{19}C_{30}$;

(35) $C_{33} = 0,5C_{26}C_{32} + C_{28}C_{31}C_{29} - -\left(0,5C_{30}C_{28} + C_{32}C_{27}C_{29}\right)$;

(36) $C_{34} = \dfrac{1}{12} + C_{18} - C_{21} - C_{18}C_{26}$;

(37) $C_{35} = -C_{18}\left(\dfrac{C}{4}\right)^{0,75}$;

(38) $C_{36} = \dfrac{C_{28}C_{35}C_{29} - C_{32}C_{34}C_{29}}{C_{33}}$;

(39) $C_{37} = \dfrac{0,5C_{26}C_{35} + C_{34}C_{31}C_{29} - -\left(0,5C_{30}C_{34} + C_{35}C_{27}C_{29}\right)}{C_{33}}$;

(40) $E_1 = C_{17}C_{36} + C_{18} + C_{19}C_{37}$;

(41) $E_2 = C_{20}C_{36} + C_{21} + C_{22}C_{37}$;

(42) $E_3 = C_{23}C_{36} + C_{24} + C_{25}C_{37}$;

(43) $E_4 = \dfrac{1}{4} + \dfrac{C_{37}}{12} + \dfrac{C_{36}}{4} - \dfrac{E_3}{5} - -\dfrac{3E_2}{2} - E_1$;

(44) $E_5 = E_1\left(\dfrac{1}{2} + \dfrac{A}{6}\right) + E_2\left(\dfrac{1}{4} + \dfrac{11A}{84}\right) + E_3\left(\dfrac{1}{70} + \dfrac{A}{105}\right)$;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

(45) $E_6 = E_5 - C_{36}\left(\frac{7}{120} + \frac{A}{36} + \frac{3A}{C}\right) - \frac{1}{40} - \frac{A}{72} - C_{37}\left(\frac{1}{60} + \frac{A}{120} + \frac{1}{C}\right)$;

(46) $f = \max\begin{cases} \frac{C_{36}}{1+A}; \\ 1{,}0 \end{cases}$

(47,а) $e = -\frac{E_6}{\left(\frac{C}{2{,}73}\right)^{0{,}25} \frac{(1+A)^3}{C} \sqrt{(D+2c)(s_0-c)}}$ - для фланцев по рис.12.1;

(47,б) $e = -\frac{C_{18}\left(\frac{1}{2} + \frac{A}{6}\right) + C_{21}\left(\frac{1}{4} + \frac{11A}{84}\right) + C_{24}\left(\frac{1}{70} + \frac{A}{105}\right) - \left(\frac{1}{40} + \frac{A}{72}\right)}{\left(\frac{C}{2{,}73}\right)^{0{,}25} \frac{(1+A)^3}{C} \sqrt{(D+2c)(s_0-c)}}$ -

для фланцев по рис.12.2, 12.3;

(48,а) $K = \frac{D_н}{D+2c}$ для фланцев по рис.12.1;

(48,б) $K = \frac{D_н}{D_ф + 2c}$ для фланцев по рис.12.2;

(48,в) $K = \frac{D_{нк}}{D_k}$ для фланцев по рис.12.3;

(49) $T = \frac{K^2(1+8{,}55246\lg K)-1}{(1{,}0472+1{,}9448K^2)(K-1)}$;

(50) $U = \frac{K^2(1+8{,}55246\lg K)-1}{1{,}36136(K^2-1)(K-1)}$;

(51) $Y = \frac{1}{K-1}\left(0{,}66845 + 5{,}7169\frac{K^2\lg K}{K^2-1}\right)$;

(52) $Z = \frac{K^2+1}{K^2-1}$;

(53,а) $V = \frac{E_4}{\left(\frac{2{,}73}{C}\right)^{0{,}25}(1+A)^3}$ - для фланцев по рис.12.1.1;

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

(53,б) $V = \dfrac{\dfrac{1}{4} - \dfrac{C_{24}}{5} - \dfrac{3C_{21}}{2} - C_{18}}{\left(\dfrac{2{,}73}{C}\right)^{0.25}(1+A)^3}$ - для фланцев по рис.12.1.2, 12.1.3;

(54) $d = \dfrac{U}{V}\sqrt{(D+2c)(s_0-c)}(s_0-c)^2$;

(55) $L = \dfrac{he+1}{T} + \dfrac{h^3}{d}$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Свойства материалов болтов (шпилек) для расчета фланцевых соединений арматуры и трубопроводов[10, 25]

Таблица 1

Расчетная температура	Расчетное значение предела текучести болтов (шпилек) R_e, МПа для сталей марок						
	35	40	45	09Г2С	20Х13	30Х13	35Х
20	275	295	315	245	590	590	590
50	255	265	304	235	559	579	579
100	235	255	304	235	549	569	569
150	225	235	294	226	520	559	549
200	225	216	274	216	520	549	520
250	186	216	255	216	481	540	520
300	147	216	245	196	471	530	491
350	127	196	225	177	460		471
400				157	454		461
450				157	445		392
500							333
Расчетная температура	40Х	30ХМА	35ХМ	25Х1МФ	20Х1М1 Ф1БР	18Х12В МБФР	31Х19Н9 МВБТ
0	590	640	640	670	670	670	315
50	569	617	611	638	670	667	314
100	569	608	588	638	657	657	314
150	549	568	588	628	647	647	314
200	530	529	588	608	627	647	314
250	500	480	562	589	598	638	314
300	500	461	536	559	568	638	314
350	441	441	500	520	519	618	294
400	421	441	484	490	510	598	284
450	392	412	460	452	490	569	275
500	304	382	408	402	470	530	275
550							265
600							196

Таблица 2

Расчетная температура	Расчетное значение временного сопротивления болтов (шпилек) R_m, МПа для сталей марок						
	35	40	45	09Г2С	20Х13	30Х13	35Х
20	530	549	569	432	785	785	736
50	530	520	569	432	755	755	726
100	530	520	569	432	736	736	726
150	520	510	569	432	716	716	706
200	510	510	569	432	687	687	706
250	500	510	549	432	667	667	706
300	500	500	530	432	638	647	706
350	500	471	510	432	625		628
400				432	616		510
450				392	604		510
500							383

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расчетная температура	Расчетное значение предела текучести болтов (шпилек) R_m, МПа для сталей марок						
	40Х	30ХМА	35ХМ	25Х1МФ	20Х1М1 Ф1БР	18Х12В МБФР	31Х19Н9 МВБТ
20	736	785	784	785	785	785	589
50	726	775	765	775	775	775	589
100	726	755	749	775	765	755	569
150	706	746	732	765	755	746	549
200	697	706	732	765	746	726	530
250	697	697	717	755	736	706	510
300	697	687	701	725	726	687	491
350	628	687	701	695	716	667	471
400	540	669	651	645	697	628	441
450	461	598	586	589	647	589	441
500	461	530	505	529	598	549	412
550							392
600							392

Таблица 3

Марка стали	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6 \frac{1}{град}$ в зависимости от температуры, 0С											
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
35, 40, 45, 09Г2С, 35Х, 40Х, 30ХМА, 35ХМ, 25Х1МФ, 20Х1МФ1БР	11,5	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,4	13,6	13,8	14,0	14,2	14,4
20Х13,30Х13, 18Х12ВМБФР	10,0	10,3	10,6	10,8	11,0	11,2	11,4	11,5	11,7	11,8	11,9	12,0
31Х19Н9МВБТ	16,4	16,6	16,8	17,0	17,2	17,4	17,6	17,8	18,0	18,2	18,4	18,5

Таблица 4

Марка стали	Модуль упругости $E \cdot 10^{-5}, МПа$ в зависимости от температуры, 0С												
	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
35,40,45,	2,10	2,07	2,05	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60	
09Г2С, 20Х1МФ1БР	2,10	2,07	2,05	2,02	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,67	1,60	
35Х,40Х,30ХМА, 35ХМ, 25Х1МФ,	2,15	2,12	2,10	2,07	2,05	2,02	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70
20Х13,30Х13, 18Х12ВМБФР	2,20	2,17	2,15	2,12	2,10	2,05	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70
31Х19Н9МВБТ	2,05	2,02	2,00	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,70	1,67	1,65	1,62	1,60

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Коэффициенты для расчета укрепления отверстий сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородсодержащих средах [16]

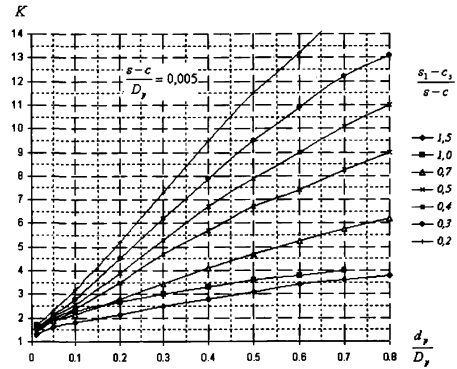


Рис.1. Коэффициент интенсификации напряжений в цилиндрической обечайке

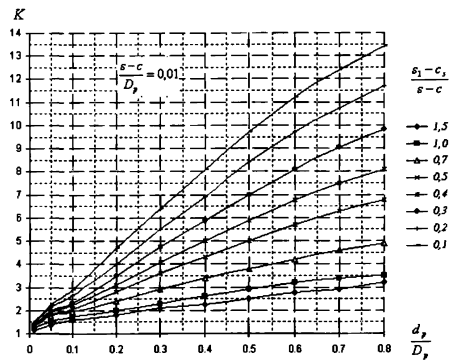


Рис.2. Коэффициент интенсификации напряжений в цилиндрической обечайке

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

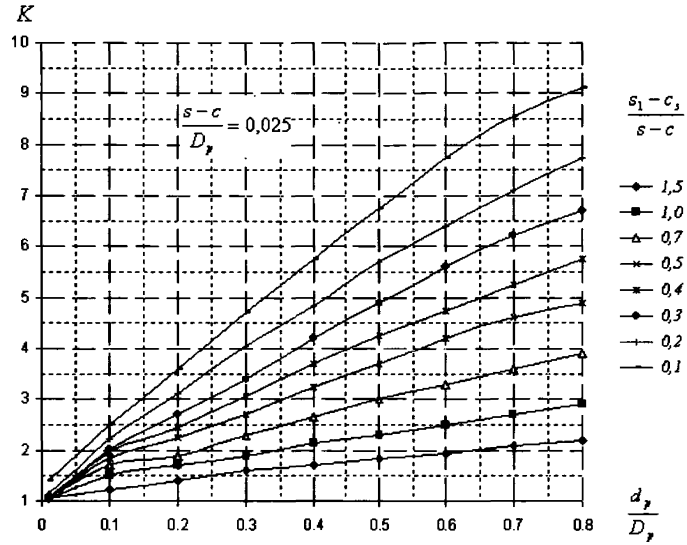


Рис.3. Коэффициент интенсификации напряжений в цилиндрической обечайке

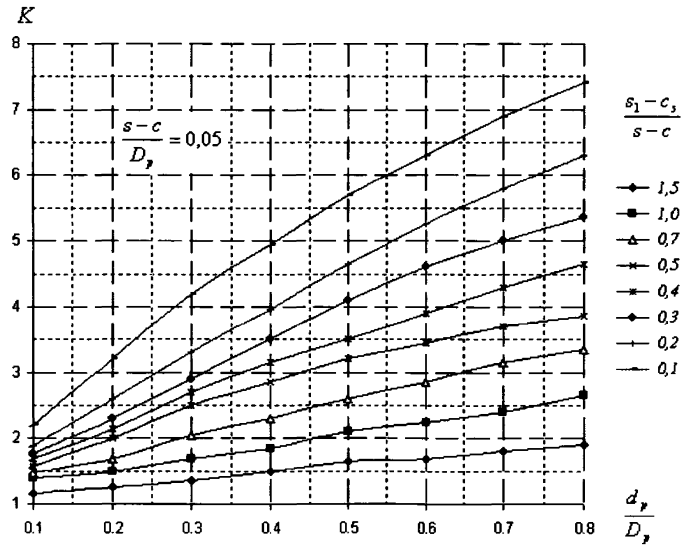


Рис.4. Коэффициент интенсификации напряжений в цилиндрической обечайке

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

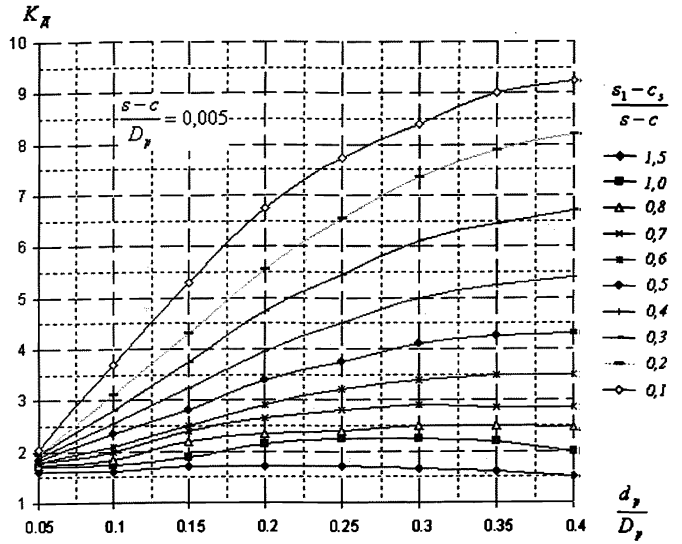


Рис.5. Коэффициент интенсификации напряжений в выпуклом днище

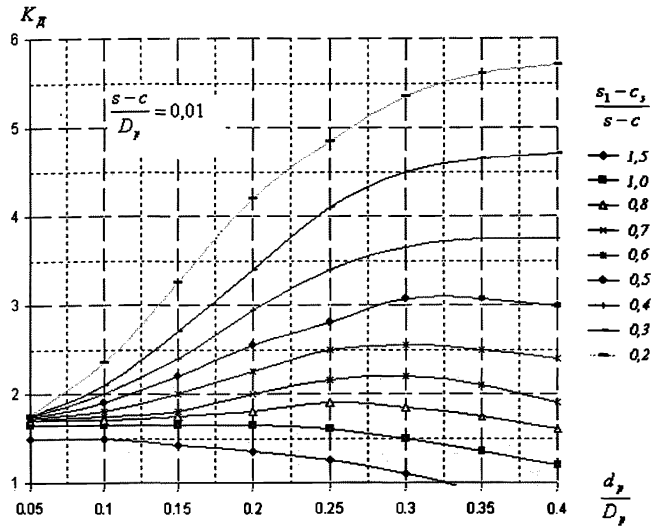


Рис.6. Коэффициент интенсификации напряжений в выпуклом днище

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

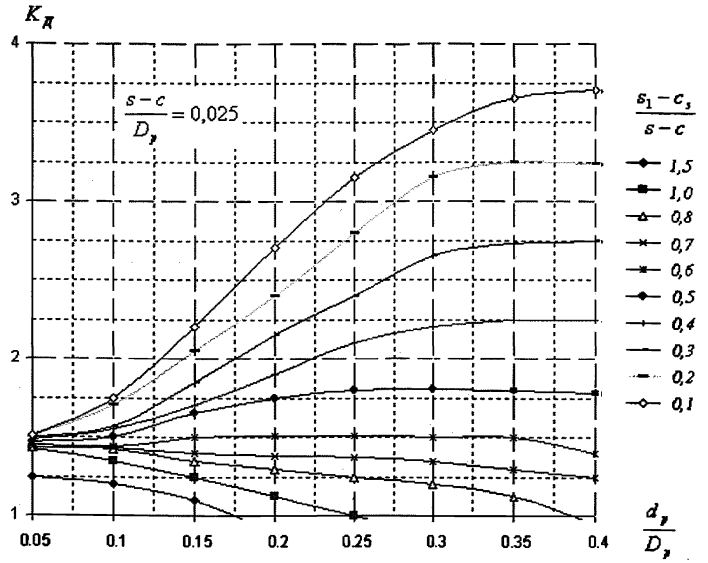


Рис.7. Коэффициент интенсификации напряжений в выпуклом днище

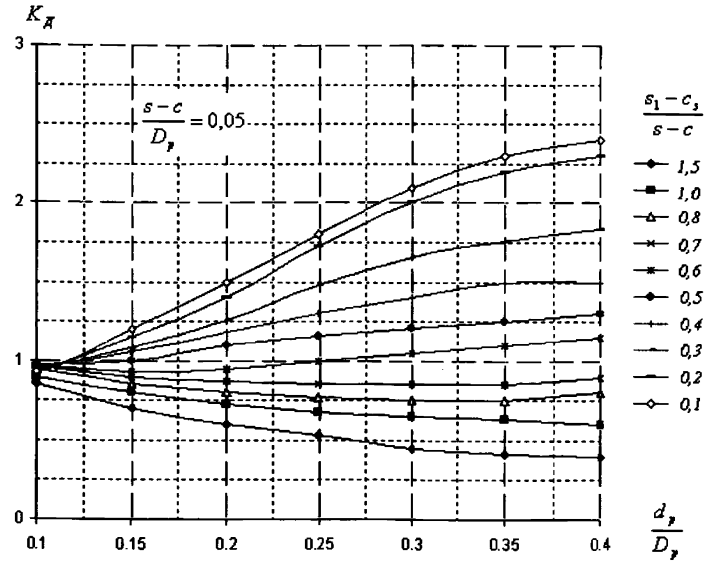


Рис.8. Коэффициент интенсификации напряжений в выпуклом днище

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Перемещения в элементах колонного аппарата от весовых нагрузок

В качестве расчетной схемы для определения перемещений от распределенных нагрузок, в i-ом элементе в общем случае рассматривается цилиндрическая обечайка с изоляцией, внутренней футеровкой и рабочим продуктом (в случае их наличия) как балка кольцевого сечения (рис.1), где $q_i = \dfrac{G_i}{h_i}$ - расчетная распределенная нагрузка.

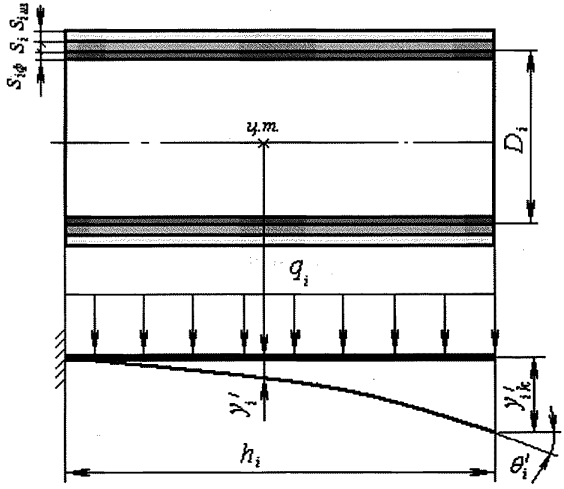


Рис.1 Цилиндрический элемент с распределенной нагрузкой

Общее усилие от распределенных весовых нагрузок, действующих на элемент:

$$G_i = G_{ioo} + G_{iиu} + G_{iф} + G_{inn},$$

где $G_{ioo} = \rho_{ст} \pi\, s_i (D_i + s_i) h_i g$ - вес самой обечайки;

$G_{iиu} = \rho_{iиu} \pi\, s_{iиu} (D_i + 2s_i + s_{iиu}) h_i g$ - вес внешней изоляции;

$G_{iф} = \rho_{iф} \pi\, s_{iф} (D_i - s_{iф}) h_i g$ - вес футеровки;

$G_{inn} = \xi\, \rho_{iж} \dfrac{\pi (D_i - 2s_{iф})^2}{4} h_i g$ - вес продукта.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Перемещения от действия распределенной нагрузки:

$$\begin{cases} y_i' = \dfrac{17G_i h_i^3}{48E\pi(D_i + s_i)^3 s_i} - \textit{в центре тяжести элемента} \\ y_{ik}' = \dfrac{G_i h_i^3}{E\pi(D_i + s_i)^3 s_i} - \textit{на конце элемента} \end{cases}$$

Угол поворота сечения в конце цилиндрической обечайки (i-го элемента) под действием распределенной нагрузки:

$$\theta_i' = \frac{4G_i h_i^2}{3E\pi(D_i + s_i)^3 s_i}$$

Перемещения ^{i}цилиндрической обечайки под действием сосредоточенной нагрузки:

$$\begin{cases} y_i'' = \dfrac{5G_{ik} h_i^3}{6E\pi(D_i + s_i)^3 s_i} - \textit{в центре тяжести элемента} \\ y_{ik}'' = \dfrac{8G_{ik} h_i^3}{3E\pi(D_i + s_i)^3 s_i} - \textit{на конце элемента} \end{cases}$$

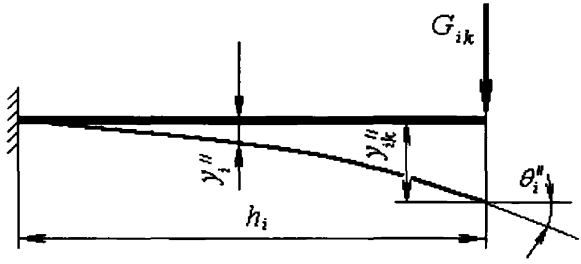


Рис.2 Цилиндрический элемент с сосредоточенной нагрузкой.

Угол поворота сечения в конце элемента под действием сосредоточенной нагрузки:

$$\theta_i'' = \frac{4G_{ik} h_i^2}{E\pi(D_i + s_i)^3 s_i}$$

Перемещения цилиндрической обечайки под действием изгибающего момента:

$$\begin{cases} y_i''' = \dfrac{M_{Gi} h_i^2}{E\pi(D_i + s_i)^3 s_i} - \textit{в центре тяжести элемента} \\ y_{ik}'' = \dfrac{4M_{Gi} h_i^2}{E\pi(D_i + s_i)^3 s_i} - \textit{на конце элемента} \end{cases}$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

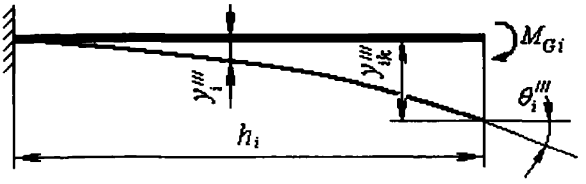


Рис.3 Цилиндрический элемент с изгибающим моментом.

Угол поворота сечения в конце элемента под действием изгибающего момента:

$$\theta_i''' = \frac{8M_{Gi}h_i}{E\pi(D_i + s_i)^3 s_i}$$

Угол поворота сечения в конце элемента под действием распределенной и сосредоточенной нагрузки с учетом перемещений предыдущих элементов:

$$\theta_i = \theta_{(i-1)} + \theta_i' + \theta_i'' + \theta_i'''$$

Перемещения в цилиндрической обечайке при одновременном действии распределенной и сосредоточенной нагрузки, а также изгибающего момента с учетом перемещений предыдущих элементов:

$$\begin{cases} y_i = y_{(i-1)k} + \theta_{i-1} \cdot \dfrac{h_i}{2} + y_i' + y_i'' + y_i''' - \textit{в центре тяжести элемента} \\ y_{ik} = y_{(i-1)k} + \theta_{i-1} \cdot h_i + y_{ik}' + y_{ik}'' + y_{ik}''' - \textit{на конце элемента} \end{cases}$$

Для упрощенного расчета перемещений в конической обечайке диаметр эквивалентного цилиндра принимается равным $D = 0{,}5(D_1 + D_2)$, а $s = s_k$.

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Геометрические характеристики поперечного сечения опорной обечайки, ослабленной отверстиями

На рис.1 представлено расчетное сечение опорной обечайки, ослабленное несколькими отверстиями. Укрепление отверстий патрубками и накладными кольцами не учитывается.

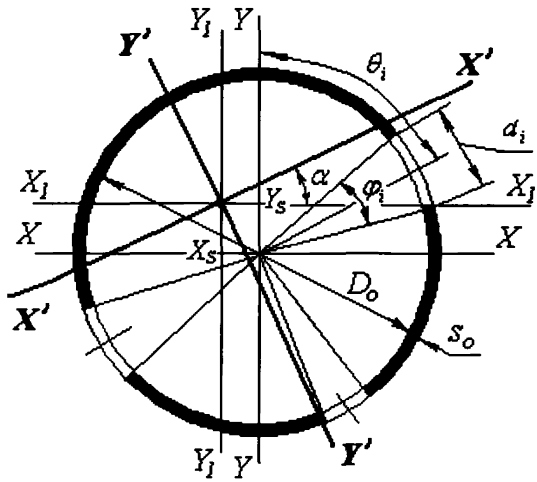


Рис.1 Расчетное сечение опорной обечайки, ослабленное отверстиями

Площадь расчетного сечения:

$$A = D_0(s_0 - c)\left(\pi - 0{,}5\sum_{i=1}^{n}\varphi_i\right), \qquad (1)$$

где $\varphi_i = 2\arcsin\left(\frac{d_i}{D_0}\right)$;

n - количество отверстий в расчетном сечении.

Координаты центра центра тяжести сечения:

$$x_s = \frac{1}{A}\int_A xdA = \frac{1}{2\pi}(0{,}5D_0 + s_0 - c)\sum_{i=1}^{n}\left(\cos\left(\theta_i + \frac{\varphi_i}{2}\right) - \cos\left(\theta_i - \frac{\varphi_i}{2}\right)\right) \qquad (2)$$

$$y_s = \frac{1}{A}\int_A ydA = \frac{1}{2\pi}(0{,}5D_0 + s_0 - c)\sum_{i=1}^{n}\left(\sin\left(\theta_i - \frac{\varphi_i}{2}\right) - \sin\left(\theta_i + \frac{\varphi_i}{2}\right)\right) \qquad (3)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

Расстояние от центра тяжести наиболее ослабленного поперечного сечения до оси аппарата:

$$b_s = \sqrt{x_s^2 + y_s^2} \tag{4}$$

Моменты инерции расчетного сечения относительно осей *X-X* и *Y-Y* (рис.3.2):

$$I_X = \int_A y^2 dA = \frac{1}{8}\pi D_0^3 s_0 \left(1 - \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{2}\varphi_i + \frac{1}{4}\left(\sin(2\theta_i + \varphi_i) - \sin(2\theta_i - \varphi_i)\right)\right]\right) \tag{5}$$

$$I_Y = \int_A x^2 dA = \frac{1}{8}\pi D_0^3 s_0 \left(1 - \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{2}\varphi_i - \frac{1}{4}\left(\sin(2\theta_i + \varphi_i) - \sin(2\theta_i - \varphi_i)\right)\right]\right) \tag{6}$$

Центробежный момент инерции относительно системы координат *X-Y*:

$$I_{XY} = \int_A xy dA = \frac{1}{8}\pi D_0^3 s_0 \left(1 - \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{4}\left(\cos(2\theta_i - \varphi_i) + \cos(2\theta_i + \varphi_i)\right)\right]\right) \tag{7}$$

Для определения минимального момента сопротивления расчетного сечения изгибу W необходимо определить расположение главных осей *X'-X'* и *Y'-Y'*, проходящих через центр тяжести.

Моменты инерции относительно осей $X_1 - X_1$ и $Y_1 - Y_1$, проходящих через центр тяжести и параллельных осям *X-X* и *Y-Y* (рис.3.2):

$$I_{X1} = I_X - y_s A \tag{8}$$

$$I_{Y1} = I_Y - x_s A \tag{9}$$

Центробежный момент инерции относительно системы координат $X_1 - Y_1$:

$$I_{X1Y1} = I_{XY} - x_s y_s A \tag{10}$$

Угол поворота главных осей относительно $X_1 - X_1$ и $Y_1 - Y_1$:

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} arctg \frac{2I_{X1Y1}}{I_{Y1} - I_{X1}} \tag{11}$$

Главные моменты инерции сечения:

$$I_X^{'} = \frac{1}{2}\left(I_{X1} + I_{Y1}\right) - \frac{1}{2}\left(I_{Y1} - I_{X1}\right)\sqrt{1 + \frac{4I_{X1Y1}^2}{\left(I_{Y1} - I_{X1}\right)^2}} \tag{12}$$

$$I_Y^{'} = \frac{1}{2}\left(I_{X1} + I_{Y1}\right) + \frac{1}{2}\left(I_{Y1} - I_{X1}\right)\sqrt{1 + \frac{4I_{X1Y1}^2}{\left(I_{Y1} - I_{X1}\right)^2}} \tag{13}$$

Относительно главных осей определяются моменты сопротивления $W_X^{'}$ и $W_Y^{'}$:

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»

 © Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

$$W_X^{'} = \frac{I_X^{'}}{0{,}5D_0 + \left|x_s \sin\alpha + y_s \cos\alpha\right|} \quad (14)$$

$$W_Y^{'} = \frac{I_Y^{'}}{0{,}5D_0 + \left|x_s \cos\alpha - y_s \sin\alpha\right|} \quad (15)$$

Наименьший момент сопротивления расчетного сечения:

$$W = \min\left\{W_X^{'}; W_Y^{'}\right\} \quad (16)$$

© Ассоциация «Ростехэкспертиза»
© Научно-техническое предприятие Трубопровод (ООО «НТП Трубопровод»)

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ,
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И
АТОМНОМУ НАДЗОРУ**

109147 Москва, ул. Таганская, д. 34
Телефон: 912-39-11
Телетайп: 111633 "БРИДЕР"
Телефакс: (095) 912-40-41
E-mail: gost.e-ecolog.ru

27.11.2006 № КЧ-50/1220

На № _____ от _____

Президенту НО Ассоциация
«Ростехэкспертиза»

Е.А. Малову

Уважаемый Евгений Арсентьевич!

Ростехнадзор рассмотрел представленный Вами стандарт Ассоциации «Ростехэкспертиза» «Расчет на прочность сосудов и аппаратов».

Считаем возможным использование указанного стандарта в качестве рекомендательного нормативного документа межотраслевого применения.

Статс-секретарь-заместитель
руководителя Ростехнадзора К.Л. Чайка

Исп. Шаталов А.А.
т. 911-64-94

gost.e-ecolog.ru