

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

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 (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.

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен без письменного разрешения Ассоциации «Ростехэкспертиза»

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ТОМ 1. РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СОСУДОВ.....	9
1. Основные условные обозначения.....	9
2. Общие требования.....	13
2.1. Расчетные давления, усилия и моменты.....	13
2.2. Допускаемые напряжения, коэффициенты запаса прочности и устойчивости.....	13
2.3. Прибавки к расчетным толщинам.....	15
2.2. Коэффициенты прочности сварных швов.....	16
3. Цилиндрические обечайки.....	17
3.1. Расчетные схемы.....	17
3.2. Гладкие обечайки (без колец жесткости).....	19
3.2.1. Обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением.....	19
3.2.2. Обечайки, нагруженные наружным давлением.....	19
3.2.3. Обечайки, нагруженные осевым растягивающим усилием.....	20
3.2.4. Обечайки, нагруженные осевым сжимающим усилием.....	20
3.2.5. Обечайки, нагруженные изгибающим моментом.....	21
3.2.6. Обечайки, нагруженные поперечным усилием.....	22
3.2.7. Обечайки, работающие под совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия, изгибающего момента и поперечного усилия.....	22
3.2.8. Обечайки, работающие под совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.....	22
3.3. Обечайки, подкрепленные кольцами жесткости.....	23
3.3.1. Расчетные величины колец жесткости.....	23
3.3.2. Обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением.....	24
3.3.3. Обечайки, нагруженные наружным давлением.....	25
3.3.4. Обечайки, нагруженные осевым растягивающим или сжимающим усилием, изгибающим моментом или поперечным усилием как отдельно, так и совместно.....	26
4. Выпуклые днища.....	27
4.1. Расчетные схемы.....	27
4.2. Эллиптическое днище.....	27
4.2.1. Эллиптическое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением.....	27
4.2.2. Эллиптическое днище, нагруженное наружным давлением.....	28
4.3. Полусферическое днище.....	28
4.3.1. Полусферическое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением.....	28
4.3.2. Полусферическое днище, нагруженное наружным давлением.....	29
4.4. Торосферическое днище.....	29
4.4.1. Торосферическое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением.....	29
4.4.2. Торосферическое днище, нагруженное наружным давлением.....	31
5. Плоские днища и крышки.....	32
5.1. Плоские днища, нагруженные внутренним или наружным давлением.....	32
5.2. Плоские крышки с дополнительным краевым моментом, нагруженные внутренним давлением.....	35
5.3. Плоские днища с радиальными ребрами жесткости.....	37
6. Сферические неотбортованные днища и крышки.....	39
6.1. Расчетные схемы.....	39
6.2. Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные внутренним избыточным давлением.....	40
6.3. Сферические неотбортованные днища и крышки, нагруженные наружным давлением.....	41
7. Конические обечайки и соединения.....	42
7.1. Расчетные схемы.....	42

7.2.	Гладкие конические обечайки.....	44
7.2.1.	Конические обечайки, нагруженные внутренним избыточным давлением.....	44
7.2.2.	Конические обечайки, нагруженные наружным давлением.....	44
7.2.3.	Конические обечайки, нагруженные осевой растягивающей силой.....	45
7.2.4.	Конические обечайки, нагруженные осевой сжимающей силой.....	45
7.2.5.	Конические обечайки, нагруженные изгибающим моментом.....	45
7.2.6.	Конические обечайки, нагруженные совместным действием внутреннего давления, осевого растягивающего усилия и изгибающего момента.....	46
7.2.7.	Конические обечайки, нагруженные совместным действием наружного давления, осевого сжимающего усилия и изгибающего момента.....	46
7.3.	Соединение конических обечаек без тороидального перехода.....	46
7.3.1.	Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением.....	47
7.3.2.	Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой.....	47
7.3.3.	Соединение, нагруженное изгибающим моментом.....	47
7.3.4.	Соединение, нагруженное совместным действием нагрузок.....	47
7.4.	Соединение конических обечаек с тороидальным переходом.....	48
7.4.1.	Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением.....	48
7.4.2.	Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой.....	48
7.4.3.	Соединение, нагруженное изгибающим моментом и совместным действием нагрузок.....	49
7.5.	Соединение конических обечаек с укрепляющим кольцом.....	49
7.5.1.	Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением.....	49
7.5.2.	Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой.....	50
7.5.3.	Соединение, нагруженное изгибающим моментом и совместным действием нагрузок.....	50
7.6.	Соединение штуцера или внутреннего цилиндрического корпуса с конической обечайкой.....	51
7.6.1.	Соединение, нагруженное внутренним или наружным давлением.....	51
7.6.2.	Соединение, нагруженное осевой растягивающей или сжимающей силой.....	51
7.6.3.	Соединение, нагруженное изгибающим моментом и совместным действием нагрузок.....	52
8.	Конические днища.....	53
8.1.	Расчетные схемы.....	53
8.2.	Коническое днище с тороидальным переходом.....	53
8.2.1.	Коническое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением.....	53
8.2.2.	Коническое днище, нагруженное наружным давлением.....	54
8.3.	Коническое днище с укрепляющим кольцом.....	54
8.3.1.	Коническое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением.....	54
8.3.2.	Коническое днище, нагруженное наружным давлением.....	55
8.4.	Коническое днище без тороидального перехода и укрепляющего кольца.....	56
8.4.1.	Коническое днище, нагруженное внутренним избыточным давлением.....	56
8.4.2.	Коническое днище, нагруженное наружным давлением.....	56
9.	Воздействия опорных нагрузок.....	57
9.1.	Горизонтальные сосуды и аппараты на седловых опорах.....	57
9.1.1.	Определение расчетных усилий и моментов.....	57
9.1.2.	Несущая способность обечайки в области опорного узла.....	60
9.1.3.	Несущая способность обечайки сосуда между опорными узлами.....	66
9.1.4.	Расчет седловой опоры.....	67
9.2.	Вертикальные сосуды и аппараты на опорных лапах.....	70
9.2.1.	Расчетная схема.....	70
9.2.2.	Определение расчетных усилий.....	71
9.2.3.	Несущая способность обечайки.....	71

9.3.	Вертикальные сосуды и аппараты на опорных стойках.....	73
9.3.1.	Расчетные схемы.....	73
9.3.2.	Выпуклое днище на опорных стойках круглого сечения.....	73
9.3.3.	Эллиптическое днище на опорах-стойках.....	75
9.3.4.	Коническое днище на опорах-стойках.....	78
10.	Укрепления отверстий.....	81
10.1.	Расчетные схемы.....	81
10.2.	Определение расчетных размеров и коэффициентов.....	82
10.2.1.	Расчетные диаметры.....	82
10.2.2.	Расчетные толщины стенок.....	84
10.2.3.	Расчетные длины штуцеров.....	85
10.2.4.	Расчетная ширина.....	85
10.3.	Расчет укрепления отверстия.....	87
10.4.	Учет взаимного влияния отверстий в сосудах и аппаратах, нагруженных внутренним давлением.....	89
10.5.	Укрепление отверстий в сосудах и аппаратах, нагруженных наружным давлением.....	90
10.6.	Минимальные размеры сварных швов.....	91
11.	Прочность и герметичность фланцевых соединений сосудов и аппаратов.....	92
11.1.	Расчетные схемы.....	92
11.2.	Допускаемые напряжения.....	96
11.3.	Расчет вспомогательных величин.....	96
11.4.	Коэффициенты жесткости фланцевого соединения.....	100
11.5.	Нагрузки, действующие на болты (шпильки).....	102
11.6.	Расчет болтов (шпилек).....	104
11.7.	Расчет прокладок.....	104
11.8.	Расчет фланцев.....	105
11.8.1.	Фланцы приварные встык.....	105
11.8.2.	Фланцы плоские приварные, под зажимы и приварные кольца.....	107
11.8.3.	Фланцы свободные на приварных кольцах.....	107
11.8.4.	Фланцы контактирующие.....	108
11.9.	Жесткость фланцев.....	108
12.	Прочность и герметичность фланцевых соединений арматуры и трубопроводов.....	109
12.1.	Расчетные схемы.....	109
12.2.	Допускаемые напряжения.....	111
12.3.	Расчет вспомогательных величин.....	112
12.4.	Коэффициенты жесткости фланцевого соединения.....	114
12.5.	Нагрузки, действующие на болты (шпильки).....	114
12.6.	Моменты, действующие на фланцы.....	115
12.7.	Расчет болтов (шпилек).....	116
12.8.	Расчет прокладок.....	116
12.9.	Расчет фланцев.....	117
12.9.1.	Фланцы приварные встык и плоские приварные интегрального типа.....	117
12.9.2.	Фланцы свободные на приварных кольцах и плоские приварные свободного типа.....	118
12.10.	Жесткость фланцев.....	118
13.	Прочность и жесткость мест врезки штуцеров.....	119
13.1.	Расчетная схема.....	119
13.2.	Условия применения.....	120
13.3.	Прочность места врезки штуцера.....	121
13.3.1.	Общие положения.....	121
13.3.2.	Цилиндрическая обечайка.....	122
13.3.3.	Патрубок штуцера, соединенный с цилиндрической обечайкой.....	128

13.3.4. Сферическая оболочка.....	132
13.3.5. Патрубок штуцера, соединенный со сферической оболочкой.....	136
13.4. Жесткость места соединения штуцера.....	139
13.4.1. Общие положения.....	139
13.4.2. Цилиндрическая обечайка.....	139
13.4.3. Сферическая обечайка.....	142
14. Сосуды с рубашками.....	144
14.1. Расчетные схемы.....	144
14.2. Сосуды с U-образной рубашкой.....	146
14.2.1. Цилиндрические обечайки.....	146
14.2.2. Днища.....	147
14.2.3. Сопряжение рубашки с корпусом сосуда при помощи конуса.....	147
14.2.4. Сопряжение рубашки с корпусом сосуда при помощи кольца.....	150
14.2.5. Нагрузка от собственного веса.....	151
14.3. Сосуды с цилиндрическими рубашками.....	152
14.3.1. Цилиндрические обечайки.....	152
14.3.2. Сопряжение при помощи конуса.....	152
14.3.3. Сопряжение при помощи кольца.....	152
14.3.4. Нагрузка от собственного веса сосуда или рубашки.....	152
14.4. Сосуды, частично охваченные рубашками, сопряженными с корпусом анкерными трубами и отбортовками.....	153
14.4.1. Цилиндрическая обечайка.....	153
14.4.2. Днища.....	153
14.4.3. Плоские участки.....	153
14.5. Сосуды с каналами.....	155
14.5.1. Цилиндрическая обечайка.....	156
14.5.2. Полоса обечайки под каналами.....	156
14.5.3. Днища.....	157
14.5.4. Каналы.....	157
14.5.5. Распределительные каналы в сосудах с регистровыми каналами.....	157
15. Расчет элементов сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородсодержащих средах.....	158
15.1. Условия применения.....	158
15.2. Допускаемые напряжения, коэффициенты запаса прочности.....	158
15.3. Расчет обечаек и днищ.....	159
15.4. Расчет укрепления отверстий.....	159
15.5. Прочность места врезки штуцера.....	160
15.6. Расчет фланцевых соединений.....	160
16. Расчет сосудов и аппаратов методом конечных элементов.....	161
16.1. Общие положения.....	161
16.2. Расчет прочности и жесткости места соединения штуцера с сосудом (аппаратом) при статическом нагружении.....	162
16.2.1. Допускаемые нагрузки на штуцер.....	165
16.2.2. Жесткость врезки.....	165
16.3. Примеры расчета прочности и устойчивости сосудов и резервуаров.....	166
ТОМ 2. РАСЧЕТ АППАРАТОВ КОЛОННОГО ТИПА.....	171
1. Основные условные обозначения.....	171
2. Определение расчетных усилий.....	173
2.1. Расчетная схема.....	173
2.2. Определение периода собственных колебаний.....	174
2.3. Определение расчетного изгибающего момента от ветровой нагрузки.....	176
2.4. Определение расчетного изгибающего момента от сейсмической нагрузки.....	178

3. Расчет на прочность и устойчивость.....	180
3.1. Расчетные сечения.....	180
3.2. Расчетные нагрузки.....	180
3.2.1. Расчетные давления.....	180
3.2.2. Нагрузки от собственного веса.....	181
3.2.3. Расчетные изгибающие моменты.....	181
3.2.4. Сочетание нагрузок.....	181
3.3. Корпус аппарата.....	182
3.3.1. Проверка прочности.....	182
3.3.2. Проверка устойчивости.....	183
3.4. Опорная обечайка.....	183
3.5. Элементы опорного узла.....	184
3.6. Анкерные болты.....	187
Нормативно-технические документы.....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Допускаемые напряжения для сталей [2].....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Механические характеристики сталей [2].....	194
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Приведенные нагрузки и расстояния до центра тяжести отдельных элементов сосудов (аппаратов).....	200
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Поперечное усилие и изгибающий момент от распределенной нагрузки в обечайке.....	203
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Свойства материалов болтов (шпилек) для расчета фланцевых соединений сосудов и аппаратов [11].....	205
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Коэффициенты для расчета фланцевых соединений [40].....	207
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Свойства материалов болтов (шпилек) для расчета фланцевых соединений арматуры и трубопроводов[10, 25].....	210
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Коэффициенты для расчета укрепления отверстий сосудов и аппаратов, работающих в коррозионно-активных сероводородсодержащих средах [16].....	212
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Перемещения в элементах колонного аппарата от весовых нагрузок.....	216
ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Геометрические характеристики поперечного сечения опорной обечайки, ослабленной отверстиями.....	219

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];
- 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 численными методами расчета элементов сосудов и аппаратов, в частности, с помощью программ ANSYS, NASTRAN, COSMOS-M и др., 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.