



РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

ЦИРКУЛЯРНОЕ ПИСЬМО

№ 382-04-1859ц

от 21.11.2022

Касательно:

изменений к Нормативно-методическим указаниям по проектированию, изготовлению, эксплуатации и ремонту сосудов под давлением для хранения и перевозки опасных грузов, 2021, НД № 2-090104-004

Объект(ы) наблюдения:

контейнеры

Дата вступления в силу:¹

21.11.2022

Отменяет/изменяет/дополняет циркулярное письмо №

от

Количество страниц: 1+24

Приложения:

Приложение 1: информация об изменениях, внесенных циркулярным письмом

Приложение 2: текст изменений к аннотации и текст новых частей IV «Расчеты прочности конструкций съемных цистерн (контейнеров-цистерн) методом конечных элементов» и V «Расчеты прочности конструкций офшорных контейнеров методом конечных элементов»

Генеральный директор

К.Г. Пальников

Текст ЦП:

Настоящим информируем, что в Нормативно-методические указания по проектированию, изготовлению, эксплуатации и ремонту сосудов под давлением для хранения и перевозки опасных грузов вносятся изменения, приведенные в приложениях к настоящему циркулярному письму

Необходимо выполнить следующее:

1. Довести содержание настоящего циркулярного письма до сведения инспекторского состава подразделений РС, заинтересованных организаций и лиц в регионе деятельности подразделений РС.

Перечень измененных и/или дополненных пунктов/глав/разделов:

аннотация;

часть IV;

часть V

Исполнитель: Д.И. Ярвепер

382

+7 (812) 315-46-98

Система «Тезис» № 22-151665

¹ Служебные отметки для ГУР (*ненужное зачеркнуть*): ~~связано~~ / не связано с вступлением в силу обязательных международных / национальных требований / ~~требуется срочное внедрение~~ / ~~требуется отложенное внедрение~~.

**Информация об изменениях, внесенных циркулярным письмом
(для включения в Перечень изменений к соответствующему Изданию РС)**

№	Изменяемые пункты/главы/разделы	Информация по изменениям ¹	№ и дата циркулярного письма, которым внесены изменения	Дата вступления в силу
1	Нормативно-методические указания по проектированию, изготовлению, эксплуатации и ремонту сосудов под давлением для хранения и перевозки опасных грузов	Название заменено на «Нормативно-методические указания по проектированию, изготовлению, эксплуатации и ремонту сосудов под давлением для хранения и перевозки опасных грузов. Расчет прочности конструкций офшорных контейнеров»	382-04-1859ц от 21.11.2022	21.11.2022
2	Аннотация	В аннотацию внесены изменения в связи с переименованием НМУ	382-04-1859ц от 21.11.2022	21.11.2022
3	Часть IV	Введена новая часть с учетом НИР	382-04-1859ц от 21.11.2022	21.11.2022
4	Часть V	Введена новая часть с учетом НИР	382-04-1859ц от 21.11.2022	21.11.2022

¹ Символом «(*)» помечаются изменения существенного характера, требующие учета в Дайджесте основных изменений к Правилам РС.

**НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ, ИЗГОТОВЛЕНИЮ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТУ
СОСУДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕВОЗКИ ОПАСНЫХ
ГРУЗОВ, 2021,**

НД № 2-090104-004

1 **Название** заменяется текстом следующего содержания:

«НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ, ИЗГОТОВЛЕНИЮ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТУ СОСУДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕВОЗКИ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОФШОРНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ».

2 **Аннотация.** Термин «Нормативно-методические указания по проектированию, изготовлению, эксплуатации и ремонту сосудов под давлением для хранения и перевозки опасных грузов» заменяется на «Нормативно-методические указания по проектированию, изготовлению, эксплуатации и ремонту сосудов под давлением для хранения и перевозки опасных грузов. Расчет прочности конструкций офшорных контейнеров».

3 Вводятся новые **части IV и V** следующего содержания:

**«ЧАСТЬ IV. РАСЧЕТЫ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СЪЕМНЫХ ЦИСТЕРН
(КОНТЕЙНЕРОВ-ЦИСТЕРН) МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

1 ПРИМЕНЕНИЕ И ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Положения настоящей части следует применять в дополнение к части IV «Контейнеры-цистерны» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ПОЯСНЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

2.1 Определения, пояснения и аббревиатуры, относящиеся к общей терминологии, приведены в 2.4 части I «Общие положения».

2.2 Определения, пояснения и аббревиатуры, приведенные в настоящем разделе, применимы только для целей настоящих НМУ.

2.3 Определения и пояснения, применимые к съемным цистернам (контейнерам-цистернам) с сосудами из металлических материалов, изложены в 1.2 части IV «Контейнеры-цистерны» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам.

Дополнительно для целей настоящей части применимы следующие определения:

Конечно-элементная модель — совокупность элементов достаточно простой геометрической формы и конечных размеров, на которые сплошно разбита конструкция, для которой численно моделируется напряженно-деформированное состояние.

Конечно-элементный решатель — программный модуль, реализующий тем или иным численным методом решение математических уравнений, соответствующих моделей поведения изделия.

Геометрическая модель КЦ — электронная модель КЦ, описывающая геометрическую форму, размеры и иные свойства конструкции.

Напряженно-деформированное состояние — множество действующих в каждой точке конструкции напряжений и деформаций в фиксируемый момент времени, возникающих из-за приложения к конструкции внешних воздействий (в том числе неравномерного поля температур).

Метод конечных элементов — сеточный метод численного решения задач математической физики, в котором дискретизация исходных краевых задач производится на основе вариационных или проекционных методов при использовании специальных конечномерных подпространств функций, определяемых выбранной сеткой.

Поверхностная модель — трехмерная геометрическая модель изделия, представленная множеством ограниченных поверхностей, определяющих в пространстве форму изделия.

Твердотельная модель — трехмерная электронная геометрическая модель, представляющая форму изделия как результат композиции заданного множества геометрических элементов с применением операций булевой алгебры к этим геометрическим элементам.

2.4 Перечень сокращений и аббревиатур:

КЦ — контейнер-цистерна (съёмная цистерна).

ЭГМ — электронная геометрическая модель.

МКЭ — метод конечных элементов.

КЭМ — конечно-элементная модель.

КЭ — конечный элемент(ы).

ПМ — поверхностная модель.

ТМ — твердотельная модель.

НДС — напряженно-деформированное состояние.

3 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

3.1 Для построения расчетной МКЭ модели должны быть приведены общие технические характеристики КЦ, характеристики материалов конструкции и перечень ее основных элементов с характеристиками, необходимыми для построения КЭМ, и геометрическая модель КЦ.

3.2 Список характеристик КЦ, необходимых для проведения расчетов, представлен в табл. 3.2. Характеристики должны быть представлены в системе единиц СИ.

Таблица 3.2

Общие технические характеристики КЦ

№ п/п	Характеристики
1	Тип КЦ по классификации ООН в соответствии с 4.2.5.2.6 МКМПОГ
2	Испытательное давление в соответствии с 4.2.5.2.6 МКМПОГ и 1.2 части I «Общие положения» настоящих НМУ, МПа
3	Объем сосуда КЦ V , м ³
4	Максимально допустимая масса брутто КЦ R , кг
5	Масса тары КЦ T , кг

3.3 Перечень характеристик материалов конструкции КЦ, требуемых для проведения расчетов приведен в табл. 3.3. Характеристики материалов указываются при температуре 20°C. Характеристики материалов должны быть приведены для каждого элемента конструкции КЦ, указанного в табл. 3.4.

Таблица 3.3

Характеристики материалов конструкции КЦ

№ п/п	Характеристики
1	Наименование материала и стандарт (ГОСТ, ИСО или иной стандарт)
2	Минимальный гарантированный предел текучести для металлов с явно выраженной площадкой текучести R_e , МПа

№ п/п	Характеристики
3	Гарантированный условный предел текучести для металлов с неявно выраженной площадкой текучести $R_{p0,2}$, МПа
4	Гарантированный условный предел текучести для металлов с неявно выраженной площадкой текучести (для сталей аустенитного класса) R_{p1} , МПа
5	Минимальное гарантированное временное сопротивление используемого металла при испытании на растяжение R_m , МПа
6	Модуль упругости E , МПа
7	Минимальное гарантированное относительное удлинение используемого металла при испытании на растяжение, в соответствии с национальными или международными стандартами A_5 , %
8	Коэффициент запаса прочности сварного шва (по согласованию с РС)

3.4 Для построения расчетных КЭМ должны быть приведены следующие характеристики основных элементов конструкции КЦ.

Таблица 3.4

Характеристики основных элементов конструкции КЦ

№ п/п	Наименование элемента	Характеристики
1	Обечайка	1. Толщина 2. Внутренний диаметр 3. Длина 4. Конструкционный материал(ы) с указанием характеристик
2	Торцевые днища	1. Тип в соответствии с национальными и/или международными стандартами 2. Толщина 3. Конструкционный материал(ы) с указанием характеристик
3	Соединительные обвязки	1. Толщина 2. Конструкционный материал(ы) с указанием характеристик
4	Каркас	1. Габаритные размеры в соответствии с национальными и/или международными стандартами 2. Конструкционный материал(ы) с указанием характеристик
5	Болтовые соединения	1. Тип и размеры 2. Классы прочности в соответствии с национальными и/или международными стандартами
6	Фланцы установки сервисного оборудования	1. Размеры и толщины 2. Конструкционный материал(ы) с указанием характеристик

3.5 Построение расчетной КЭМ выполняется на основании электронной геометрической модели (ЭГМ) КЦ. ЭГМ представляет собой совокупность геометрических элементов и атрибутов, которые совместно определяют геометрию изделия и его свойства, зависящие от формы и размеров. В ЭГМ допускается выполнять упрощенное представление частей изделия типа отверстий, резьбы, проточек, пружин и др., используя частичное определение геометрии модели, атрибуты модели или их комбинацию.

ЭГМ используется для построения конечно-элементной сетки средствами препроцессора ПО, в котором выполняется расчет.

Возможны две формы представления ЭГМ:

- .1 твердотельная модель (ТМ);
- .2 поверхностная модель (ПМ).

ТМ представляет форму КЦ как результат композиции множества геометрических элементов с применением операций булевой алгебры к этим геометрическим элементам.

ПМ представляет форму КЦ множеством ограниченных поверхностей, определяющих в пространстве форму изделия.

В общем случае ТМ обеспечивает всю необходимую полноту данных о геометрии КЦ. ПМ могут оказаться удобными в случае использования оболочечных элементов для моделирования элементов конструкции КЦ.

Вне зависимости от формы представления, геометрическая модель КЦ должна включать детали и компоненты конструкции, существенные с точки зрения ее физико-механического поведения при действии расчетных и испытательных нагрузок. Атрибуты модели (неграфическая информация) могут содержать существенные с точки зрения моделирования данные, например, координаты центров болтов, толщины оболочек и т.д. Следует учитывать разнообразие форматов представления геометрических моделей и версий ПО для их разработки. Для проведения расчетов должна быть согласована возможность импортирования ЭГМ в расчетный конечно-элементный комплекс для последующего построения расчетной модели.

На рис. 3.5-1, 3.5-2 и 3.5-3 показаны возможные варианты ЭГМ.

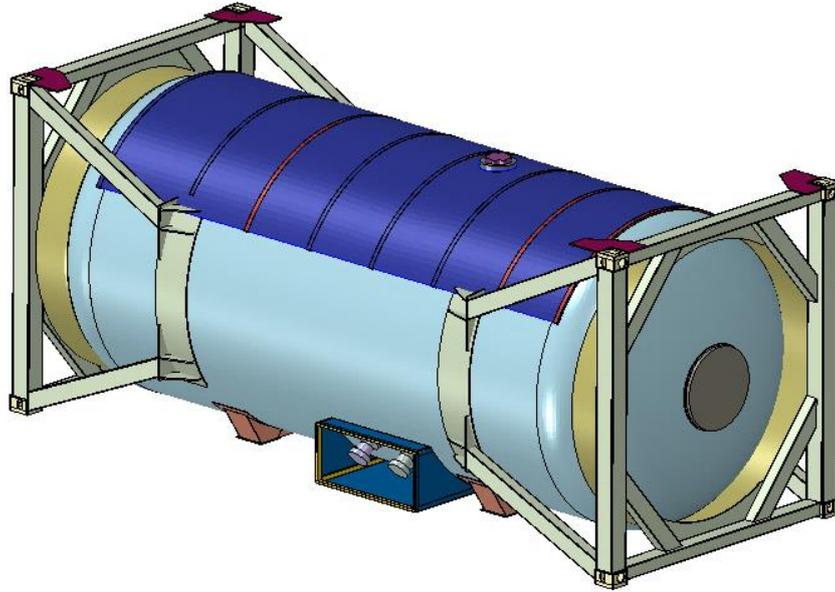


Рис. 3.5-1. Общий вид ЭГМ

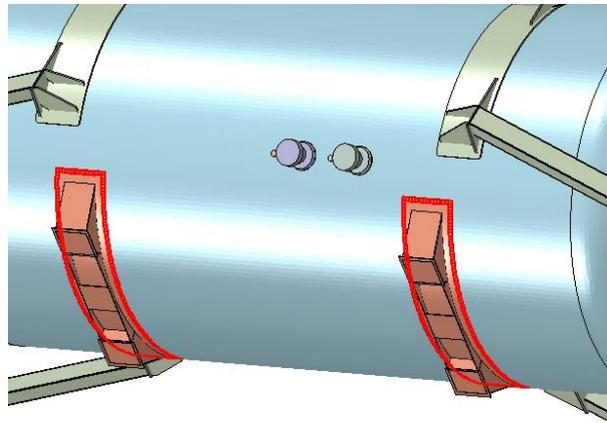


Рис. 3.5-2. Элементы конструкции КЦ, представленные твердыми геометрическими элементами (зоны соединения емкости с каркасом, сервисное оборудование)



Рис. 3.5-2. Элементы конструкции КЦ, представленные поверхностными геометрическими элементами (сосуд)

4 РАСЧЕТНЫЕ СЛУЧАИ, НАГРУЗКИ И ДОПУСТИМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

4.1 Анализ прочности конструкции КЦ должен проводиться при действии нагрузок расчетных случаев 1 — 6 (см. табл. 4.6 настоящей части НМУ) в соответствии с требованиями 2.2.3. и 3.7.4 части IV «Контейнеры-цистерны» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам, 6.7.2.2.12, 6.7.3.2.9 и 6.7.4.2.12 МКМПОГ. Расчетные случаи 7 — 11 (см. табл. 4.6 настоящей части НМУ) являются рекомендательными.

4.2 Нагрузки расчетных случаев 1 — 5 (см. табл. 4.6 настоящей части НМУ) прикладываются к расчетной МКЭ модели в соответствии с требованиями 5.1.5 стандарта ИСО 1496-3, 2.2.3 и 3.7.4 части IV «Контейнеры-цистерны» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам, 6.7.2.2.12, 6.7.3.2.9 и 6.7.4.2.12 МКМПОГ. Нижние угловые фитинги должны быть закреплены по всем поступательным степеням свободы.

4.3 Испытательное давление в расчетном случае 6 (см. табл. 4.6 настоящей части НМУ) прикладывается к внутренним поверхностям цистерны, включая внутренние поверхности фланцев и крышек сервисного оборудования. Величина испытательного давления определяется в соответствии с типом контейнера, согласно 4.2.5.2.6 МКМПОГ. Помимо испытательного давления к расчетной МКЭ модели прикладывается нагрузка от действия допустимой массы брутто R в соответствии с требованиями 5.1.6 стандарта ИСО 1496-3. Нижние угловые фитинги должны быть закреплены по всем поступательным степеням свободы.

4.4 Нагрузки расчетных случаев 7 — 11 (см. табл. 4.6 настоящей части НМУ) и граничные условия (закрепления) прикладываются к расчетной МКЭ модели в соответствии с требованиями Приложения А стандарта ИСО 1496-3.

4.5 Величины допускаемых напряжений для расчетных случаев 1 — 5 (см. табл. 4.6 настоящей части НМУ) определяются в соответствии с требованиями 2.2.4 части IV «Контейнеры-цистерны» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам, 6.7.2.2.13, 6.7.3.2.10 и 6.7.4.2.13 МКМПОГ. Для расчетного случая 6 (см. табл. 4.6 настоящей части НМУ) допускаемые напряжения определяются в соответствии с требованиями 3.7.7 части IV «Контейнеры-цистерны» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам.

4.6 Для определения допускаемых напряжений при действии нагрузок расчетных случаев 7 — 11 (см. табл. 4.6) величина коэффициента безопасности должна быть согласована с РС.

Расчетные случаи нагружения конструкции КЦ и допустимые напряжения

№ п/п	Наименование расчетного случая	Допустимые напряжения $[\sigma]$
1	Действие инерционной нагрузки $2Rg$ (при проектировании контейнеров-цистерн для неопасных грузов) в направлении движения	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1,5$
2	Действие инерционной нагрузки $4Rg$ в направлении движения (при проектировании контейнеров-цистерн для опасных грузов)	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1$
3	Действие инерционной нагрузки Rg горизонтально под прямыми углами к направлению движения ($2Rg$, если направление движения точно не установлено)	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1,5$
4	Действие инерционной нагрузки Rg вертикально снизу вверх	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1,5$
5	Действие инерционной нагрузки $2Rg$ вертикально сверху вниз	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1,5$
6	Действие испытательного давления	$0,75R_e(0,75R_{p0,2}; 0,75R_{p1})$ или $0,5R_m$, в зависимости от того, что меньше. $0,375R_m$ — для металлов, характеризующихся только минимальным гарантированным временным сопротивлением
7	Подъем за верхние угловые фитинги	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1$
8	Подъем за нижние угловые фитинги	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1$
9	Штабелирование	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1$
10	Поперечный перекося	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1$
11	Продольный перекося	$R_e(R_{p0,2}; R_{p1})/1$

5 КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

5.1 При построении расчетной КЭМ, проведения расчетов и последующего представления их результатов должны быть выделены расчетные зоны конструкции: регулярные зоны, зоны сварных и болтовых соединений. Примеры указанных зон приведены на рис. 5.1-1 — 5.1-6.

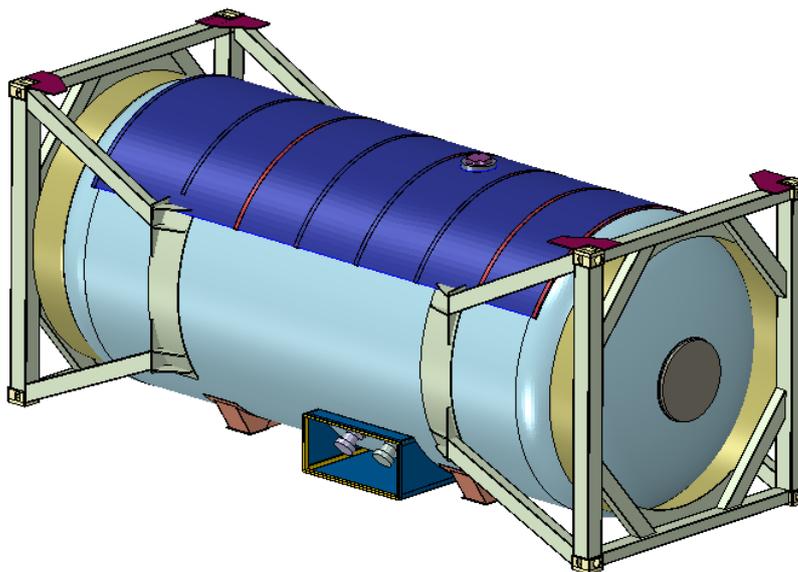


Рис. 5.1-1. Общий вид конструкции КЦ



Рис. 5.1-2. Сосуд КЦ

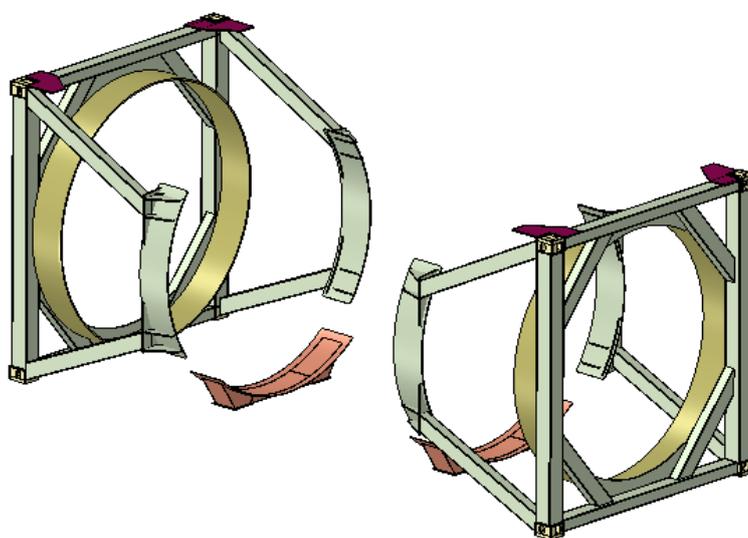


Рис. 5.1-3. Каркас КЦ

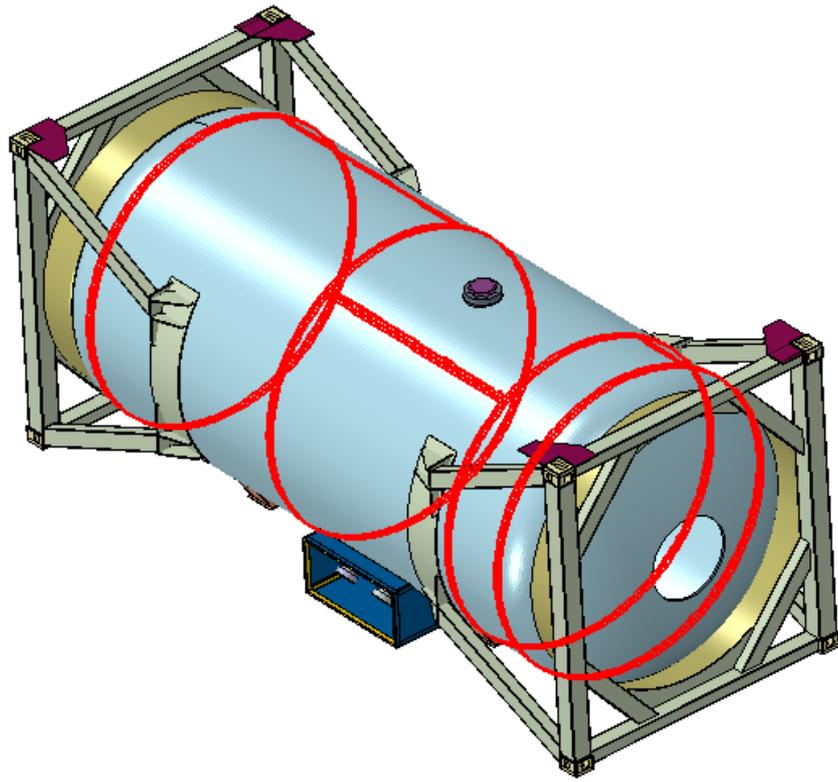


Рисунок 5.1-4. Зоны сварных швов цистерны

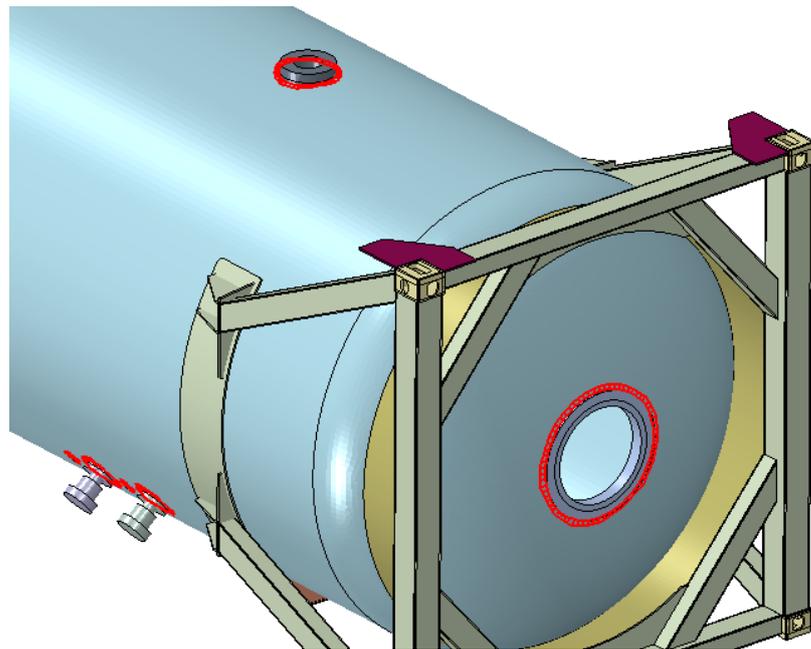


Рисунок 5.1-5. Зоны вваривания фланцев в цистерну

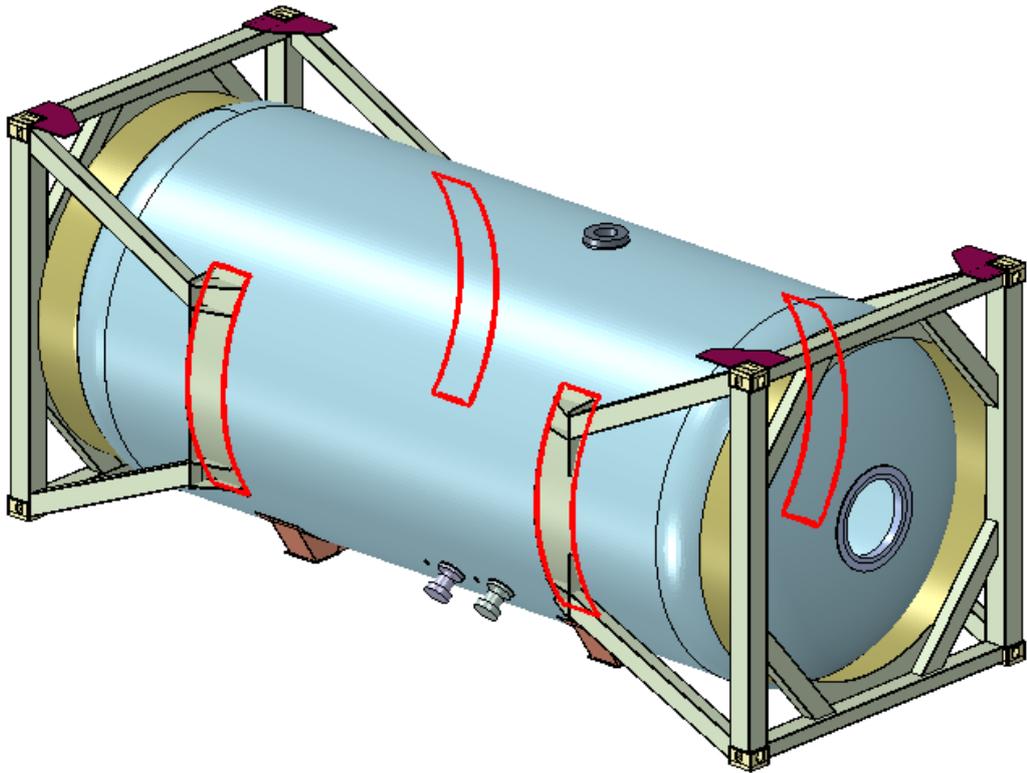


Рис. 5.1-6. Зоны сварного соединения цистерны и каркаса

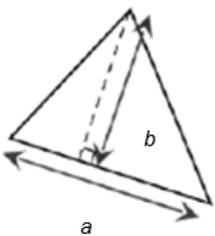
5.2 Идеализация конструкции КЦ в расчетной модели, качество конечно-элементной сетки и выбор типов конечных элементов должны обеспечивать достоверный расчет действующих напряжений. Для обеспечения качества сетки и точности расчетов должны быть выполнены критерии приведенные в табл. 5.2-1 и 5.2-2 для наиболее распространенных вариантов треугольных и четырехугольных двумерных (оболочечных) элементов, и шестигранных трехмерных (твердотельных) элементов. В дополнение к критериям, указанным в табл. 5.2-1 и 5.2-2, конечно-элементные сетки должны удовлетворять следующим требованиям:

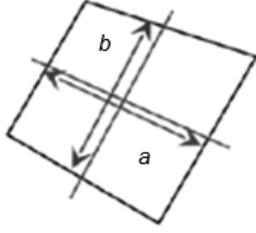
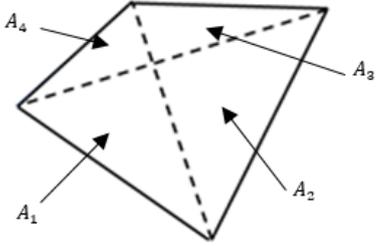
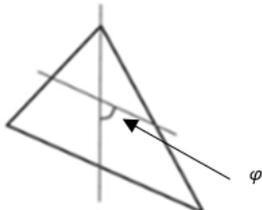
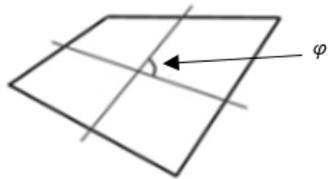
.1 число треугольных элементов в оболочечных моделях не должно превышать 5 %;

.2 не рекомендуется использование тетраэдральных элементов в твердотельных моделях.

Таблица 5.2-1

Критерии формы оболочечных конечных элементов

Критерий	Определение критерия	Допустимое значение критерия
Соотношение длин сторон (<i>Aspect Ratio</i>)	Треугольные элементы: Отношение высоты треугольника к его стороне (максимальное значение)	$\leq 5,0$
	 $Aspect\ ratio = \sqrt{3}a/2b$	

Критерий	Определение критерия	Допустимое значение критерия
Соотношение длин сторон (<i>Aspect Ratio</i>)	<p>Четырехугольные элементы: Отношение длин отрезков, соединяющих середины противоположных сторон элемента</p>  <p style="text-align: center;">$Aspect\ ratio = \max(a, b) / \min(a, b)$</p>	≤ 5,0
Конусность (<i>Taper</i>)	<p>Определяет минимальное соотношение размеров треугольников, полученных точкой пересечения диагоналей элемента, к общему размеру элемента</p>  <p style="text-align: center;">$Taper = 4 \frac{\min(A_1, A_2, A_3, A_4)}{(A_1 + A_2 + A_3 + A_4)}$</p>	≤ 0,5
Перекос (<i>Skew</i>)	<p>Треугольные элементы: Минимальный угол между медианой и средней линией</p> 	≥ 10°
Перекос (<i>Skew</i>)	<p>Четырехугольные элементы: Минимальный угол между линиями, соединяющими середины сторон</p> 	≥ 10°

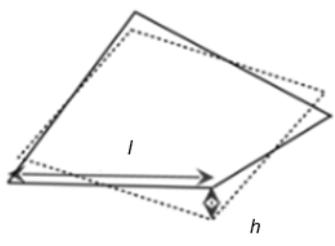
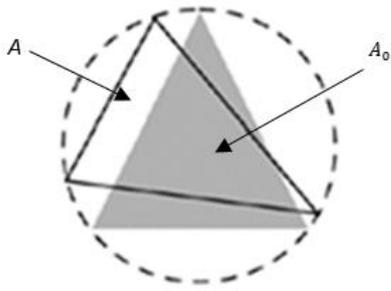
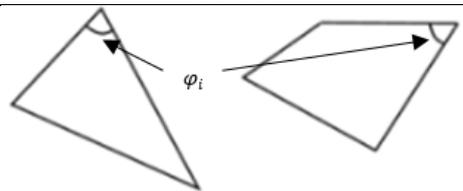
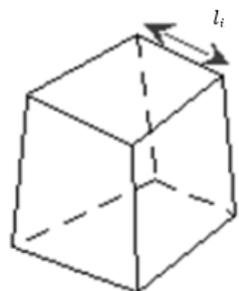
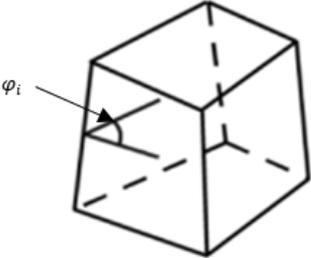
Критерий	Определение критерия	Допустимое значение критерия
Искривление (<i>Warping</i>)	Отношение расстояния между вершинами рассматриваемого элемента и вершиной соответствующего «плоского элемента» к длине стороны элемента  $Warping = \max(h/l) < 5\%$	$\leq 0,05$
Фактор формы (<i>Shape factor</i>)	Отношение площади треугольного элемента к площади равностороннего треугольника, имеющего ту же описанную окружность 	0,01
Наименьший и наибольший внутренний угол (<i>Smaller and larger face corner angle</i>)	 	$\varphi_{\min} = 10^\circ$ $\varphi_{\max} = 160^\circ$
Якобиан (<i>Jacobian</i>)	Определяется оператором преобразования геометрии элемента к «идеальной» форме (например, равносторонний треугольник или квадрат) и характеризует степень отклонения от этой формы	$\leq 0,6$

Таблица 5.2-2

Критерии формы твердотельных конечных элементов

Критерий	Определение критерия	Допустимое значение критерия
Соотношение длин сторон (<i>Aspect Ratio</i>)	 	≤ 10

Критерий	Определение критерия	Допустимое значение критерия
Наименьший и наибольший внутренний угол		$\leq 160^\circ$
Якобиан (<i>Jacobian</i>)	Определяется оператором преобразования геометрии элемента к «идеальной» форме и характеризует степень отклонения от этой формы	$\leq 0,6$

5.3 Для расчета НДС вокруг отверстий рекомендуется построение не менее 6-ти элементов по длине дуги разворотом 90° и не менее 3-х элементов в радиальном направлении (см. рис. 5.3).

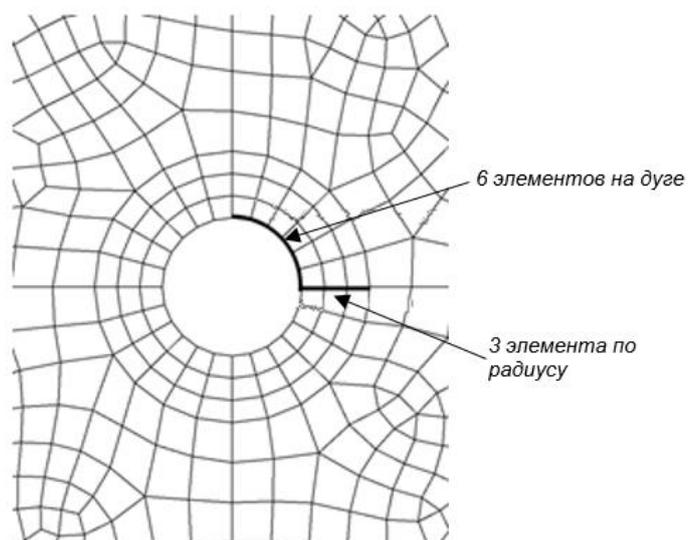


Рис. 5.3. Сетка в области отверстия

5.4 В местах скруглений поверхностей модели рекомендуется использовать не менее 4-х элементов (см. рис. 5.4).

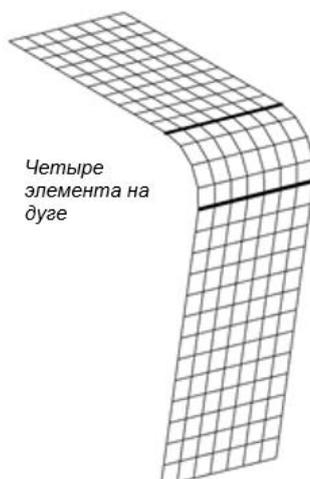


Рис. 5.4. Сетка в области скруглений поверхностей модели

5.5 Для обоснования выбора размеров и типов конечных элементов при построении сетки должна быть выполнена серия расчетов, показывающая сходимость результатов при изменении размеров и типов КЭ. Такое изменение должно асимптотически приводить к решению, относительно которого последующие изменения сетки не оказывают существенного влияния на результаты расчетов.

5.6 Моделирование сварных соединений выполняется путем задания кинематических связей между узлами соединяемых поверхностей элементов конструкции КЭ. Соединение узлов осуществляется через наложение ограничений в виде равенств поступательных (перемещения) и/или вращательных (повороты) степеней свободы узлов управляющей поверхности (*master*) степеням свободы узлов управляемой поверхности (*slave*) как показано на рис. 5.6-1 и 5.6-2. В виду того, что твердотельные КЭ не имеют вращательных степеней свободы, соединение двумерных и твердотельных поверхностей осуществляется только по поступательным степеням свободы (см. рис. 5.6-1, б).

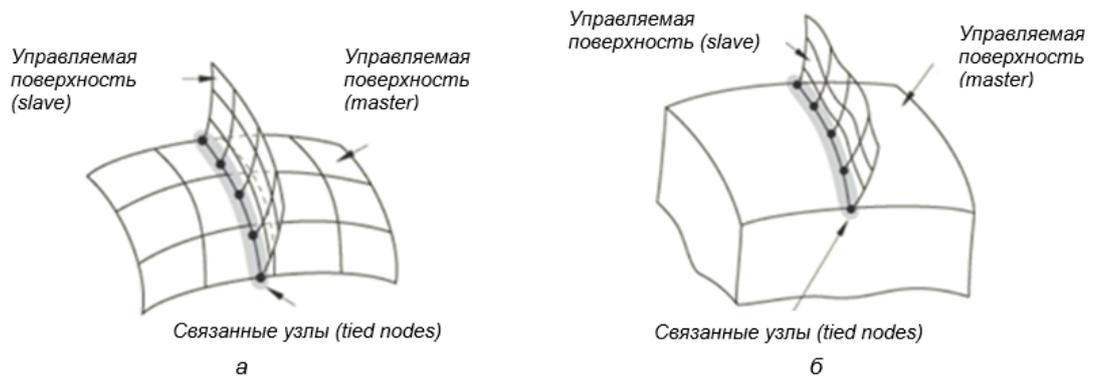


Рис. 5.6-1. Моделирование таврового сварного соединения двумерных (а), двумерной и твердотельной поверхностей (б)

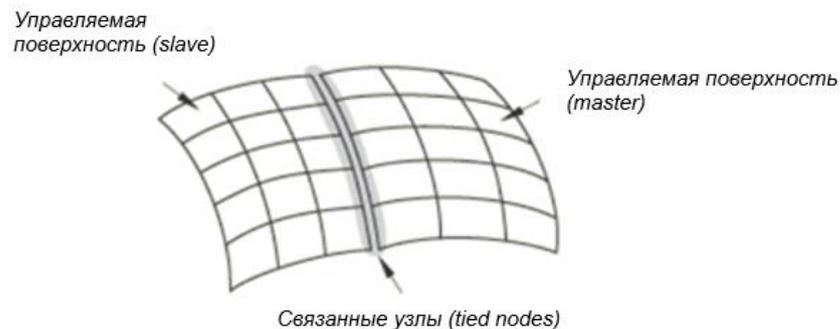


Рис. 5.6-2. Моделирование стыкового сварного соединения двумерных поверхностей

Соединение поверхностей осуществляется в пределах допуска, заданного относительно расположения узлов управляющей поверхности, см. рис. 5.6-3.

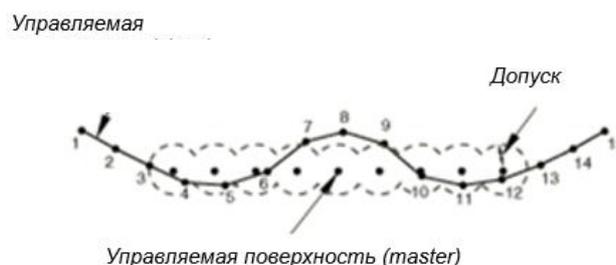


Рис. 5.6-3. Определение допуска для соединения поверхностей

При моделировании сварных соединений элементов конструкции КЭ необходимо принимать во внимание возможные концентрации напряжений в зонах соединений.

5.7 Моделирование болтовых и заклепочных соединений элементов конструкции КЦ выполняется с целью определения величин усилий и моментов, действующих на соединительные элементы (болты, заклепки). Расчет напряжений в соединительных и соединяемых элементах конструкции выполняется с использованием этих величин в соответствии с национальными или международными стандартами.

5.8 Моделирование болтовых соединений выполняется с использованием балочных КЭ или специальных коннекторов. Допускается использование жестких (недеформируемых) элементов. Данные элементы накладывают связи на перемещения узлов конечно-элементной сетки соединяемых деталей конструкции КЦ в окрестности соединения, задаваемой радиусом влияния, см. рис. 5.8. Каждая связь определяется в локальной системе координат болта (заклепки), в которой вычисляются величины усилий и моментов, действующих на соединительные элементы. Расположение соединительных элементов (например, А, В и С на рис. 5.8, б) определяется в соответствии с конструкторской документацией и не зависит от расположения узлов конечно-элементной сетки соединяемых элементов конструкции КЦ.

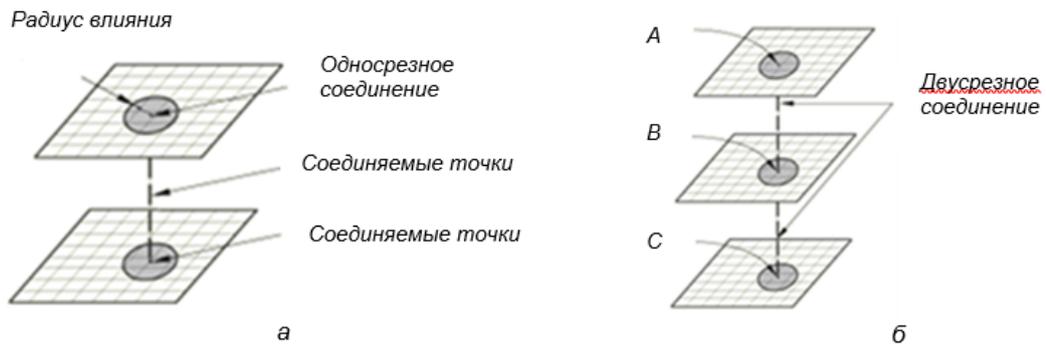


Рис. 5.8. Моделирование односрезного (а) и двусрезного (б) соединений

5.9 Расчет контактных взаимодействий должен выполняться для зон болтовых (заклепочных) соединений элементов конструкции КЦ. Среди двух взаимодействующих поверхностей должны быть выделены управляющая (*master*) и управляемая (*slave*) поверхности.

При построении конечно-элементной сетки на взаимодействующих поверхностях необходимо обеспечить отсутствие проникновения узлов (перехлестов) управляющей поверхности за управляемую поверхность (см. рис. 5.9-1) для исключения локализации контактных напряжений. В случае, когда исключить подобные пересечения не представляется возможным, необходимо привести узлы контактных поверхностей к положению без пересечений (см. рис. 5.9-2) без генерации контактных напряжений средствами конечно-элементного решателя до начала расчета.

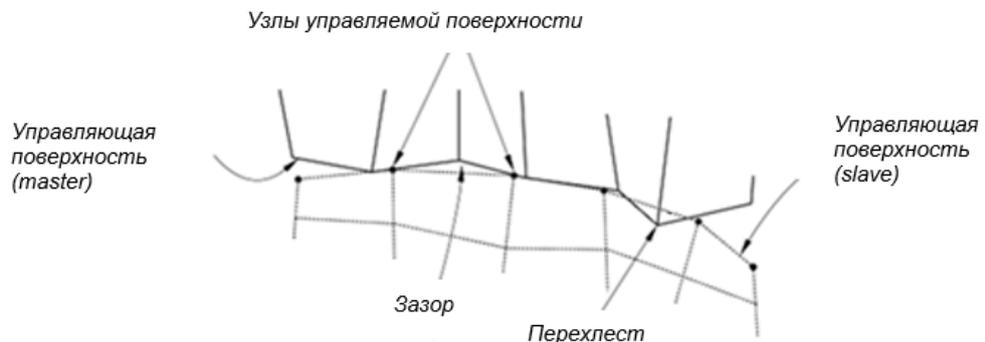


Рис. 5.9-1. Пример исходного взаимного расположения контактных поверхностей

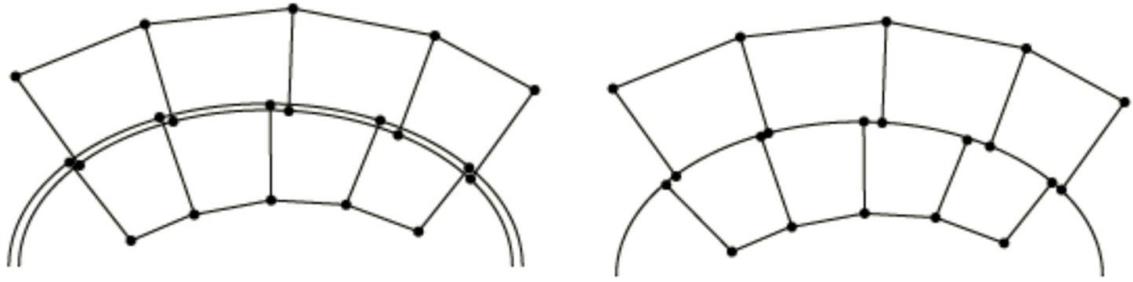


Рис. 5.9-2. Приведение узлов контактных поверхностей к положению без пересечений до начала расчета

5.10 Для детального расчета прочности зон сервисного оборудования рекомендуется использовать метод глобально-локального моделирования. Этот метод позволяет транслировать перемещения узлов глобальной оболочечной модели КЦ как граничные условия для детальной локальной модели. Схема взаимного расположения узлов глобальной и локальной моделей показаны на рис. 5.10. Локальная модель может быть представлена как оболочечными конечными элементами меньшего размера, так и твердотельными элементами.

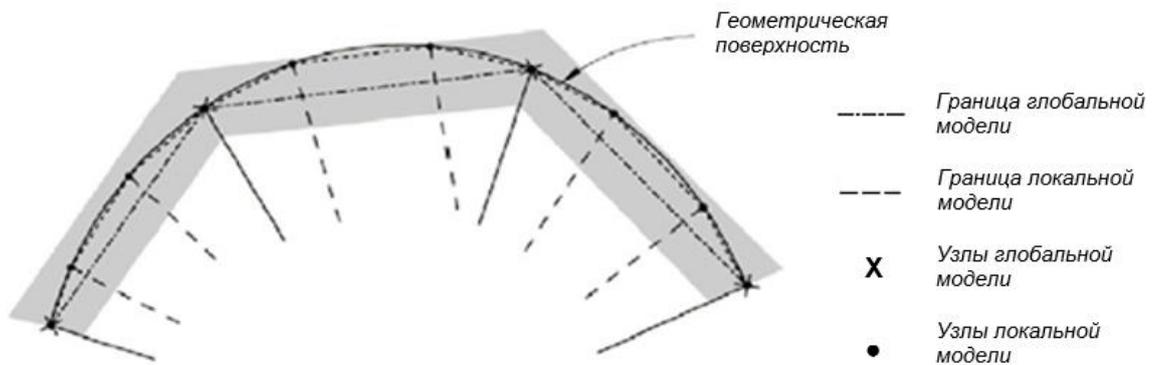


Рис. 5.10. Схематичное представление узлов локальной и глобальной моделей

6 ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

6.1 В виду сложного напряженного состояния конструкции КЦ в качестве эквивалентных действующих напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ при анализе прочности для расчетных случаев 1 — 5 и 7 — 11 (см. табл. 4.6-1) принимаются напряжения по Мизесу.

6.2 Для расчетного случая 6 (см. табл. 4.6-1 настоящих НМУ) в соответствии с требованиями 3.7.7 части IV «Контейнеры-цистерны» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам в качестве эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ принимаются максимальные мембранные (максимальные главные напряжения).

6.3 В техническом отчете о расчетах МКЭ необходимо представить детальные результаты расчетов каждой из расчетных зон, указанных в табл. 3.4 настоящей части НМУ. В результатах расчета графически представляется распределение действующих напряжений.

6.4 Необходимо представить сводку результатов расчетов в форме таблицы минимальных значений коэффициентов запасов прочности. Коэффициент запаса прочности вычисляется как отношение допустимых напряжений и действующих эквивалентных напряжений

$$K = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\text{ЭКВ}}}. \quad (6.4)$$

Выполнению требований прочности соответствует условие $K \geq 1$. Значения коэффициента запаса прочности представляются для всех расчетных зон конструкции КЦ.

7 ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТЧЕТА О РЕЗУЛЬТАТАХ РАСЧЕТОВ МКЭ ПРОЧНОСТИ СЪЕМНЫХ ЦИСТЕРН

7.1 Технический отчет о результатах расчетов МКЭ должен включать следующие разделы:

- .1** нормативные ссылки;
- .2** общие технические характеристики конструкции КЦ;
- .3** характеристики материалов конструкции КЦ;
- .4** характеристики основных элементов конструкции КЦ;
- .5** описание электронной геометрической модели КЦ;
- .6** расчетные случаи и допустимые напряжения;
- .7** расчетные зоны конструкции КЦ;
- .8** описание конечно-элементной модели КЦ;
- .9** результаты расчетов для регламентированных (и рекомендованных) расчетных случаев;
- .10** итоговая сводка расчетных значений коэффициентов запаса прочности с указанием части конструкции КЦ;
- .11** библиография.

ЧАСТЬ V. РАСЧЕТЫ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОФШОРНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1 ПРИМЕНЕНИЕ И ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Положения настоящей части следует применять в дополнение к части VII «Офшорные контейнеры» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ПОЯСНЕНИЯ И АББРЕВИАТУРЫ

2.1 Определения, пояснения и аббревиатуры, относящиеся к общей терминологии, приведены в 2.4 части I «Общие положения» и 2.2 части IV «Контейнеры-цистерны».

2.2 Определения, пояснения и аббревиатуры, приведенные в настоящем разделе, применимы только для целей настоящего документа.

2.3 Определения и пояснения, применимые к офшорным контейнерам, изложены в 1.2 части VII «Офшорные контейнеры» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам и части IV «Расчеты прочности конструкций съемных цистерн (контейнеров-цистерн) методом конечных элементов» настоящих НМУ.

2.4 Перечень сокращений и аббревиатур:

ОК — офшорный контейнер.

3 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

3.1 Для проведения расчетной оценки прочности рамы ОК должны быть заданы общие технические характеристики, характеристики материалов рамы конструкции ОК, геометрическая модель конструкции рамы ОК, геометрические характеристики элементов крепления (рымов, вилочных карманов).

3.2 Список характеристик ОК, необходимых для проведения расчетов, представлен в табл. 3.2. Характеристики должны быть представлены в системе СИ.

Таблица 3.2

Общие технические характеристики ОК

№ п/п	Характеристики
1	Максимальная масса брутто ОК R , кг
2	Масса силового каркаса T , кг
3	Масса подъемного приспособления S , кг

3.3 Перечень характеристик материалов конструкции ОК, требуемых для проведения расчетов приведен в табл. 3.3. Характеристики материалов указываются при температуре 20°C. Характеристики материалов должны быть приведены для каждого элемента конструкции рамы ОК, указанного в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Характеристики материалов конструкции ОК

№ п/п	Характеристики
1	Наименование материала и стандарт (ГОСТ, ИСО или иной стандарт)
2	Минимальный гарантированный предел текучести для металлов с явно выраженной площадкой текучести R_e , МПа
3	Модуль упругости E , МПа
4	Плотность материала ρ , кг/м ³

3.4 Для построения расчетных МКЭ моделей должны быть приведены следующие характеристики элементов конструкции ОК.

Таблица 3.4

Элементы основной и вспомогательной несущей конструкции ОК

№ п/п	Наименование элемента	Характеристики
1	Верхние и нижние продольные балки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Тип сечения балки 2. Геометрические характеристики сечения 3. Ориентация сечения балки в глобальной системе координат 4. Положение балки в пространстве (координаты точки начала и конца балки) 5. Конструкционный материал(ы) с указанием характеристик
2	Верхние и нижние торцевые балки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Тип сечения балки 2. Геометрические характеристики сечения 3. Ориентация сечения балки в глобальной системе координат 4. Положение балки в пространстве (координаты точки начала и конца балки) 5. Конструкционный материал(ы) с указанием характеристик
3	Угловые стойки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Тип сечения стойки 2. Геометрические характеристики сечения 3. Ориентация сечения стойки в глобальной системе координат 4. Положение стойки в пространстве (координаты точки начала и конца балки) 5. Конструкционный материал(ы) с указанием характеристик
4	Подъемные рымы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Координаты расположения рымов в силовом каркасе. 2. Кратчайшее расстояние от центра отверстия в подъемном рыме до края подъемного рыма H, мм 3. Диаметр отверстия в подъемном рыме D_H, мм 4. Толщина подъемного рыма без учета толщины накладок t_1, мм 5. Толщина подъемного рыма с учетом накладок t_2, мм 6. Минимальное значение предела текучести материала рыма R_e, МПа 7. Угол наклона подъемных приспособлений относительно вертикали α, град

№ п/п	Наименование элемента	Характеристики
5	Карманы для вилочного погрузчика	1. Полная площадь сечения балки в месте расположения вилочного кармана A_1 , мм ² 2. Площадь сечения балки над вилочным карманом в месте расположения вилочного кармана A_2 , мм ²
6	Элементы вспомогательной несущей конструкции	1. Геометрические характеристики. 2. Конструкционный материал(ы) с указанием характеристик

3.5 Построение расчетной КЭМ несущей конструкции ОК выполняется на основе электронной геометрической модели (ЭГМ). ЭГМ представляет собой совокупность геометрических элементов и атрибутов, которые совместно определяют несущую конструкцию ОК. При расчете прочности несущей конструкции ОК допускается применять балочную модель, определяемую координатами узлов, задающих положение начала и конца балок и стоек, геометрическими характеристиками и ориентациями их сечений в глобальной системе координат ОК.

4 РАСЧЕТНЫЕ СЛУЧАИ И КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ

4.1 Анализ прочности несущей конструкции ОК проводится при действии нагрузок расчетных случаев, приведенных в табл. 4.1 настоящей части НМУ. Перечень расчетных случаев определяется в соответствии с требованиями стандарта ИСО 10855-1:2018 и 3.1.2 части VII «Офшорные контейнеры» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам.

Таблица 4.1

Расчетные случаи нагружения конструкции ОК и критерии прочности

№ п/п	Наименование расчетного случая	Методы расчета прочности	Критерии прочности
1	Подъем за четыре рыма	1. Расчет МКЭ прочности элементов несущей конструкции ОК 2. Аналитические расчеты прочности подъемных рымов 3. Аналитические расчеты прочности нижних продольных балок при наличии вилочных карманов в конструкции контейнера	1. $\sigma_e \leq 0,85 R_e$ 2. Напряжение на разрыв $R_e \geq \frac{3 \cdot F}{2 \cdot H \cdot t_1 - D_H \cdot t_1}$ Контактное напряжение $R_e \geq 23,7 \cdot \sqrt{\frac{F}{D_H \cdot t_2}}$ 3. $\tau_e \leq 0,58 \cdot 0,85 \cdot R_e$
2	Подъем за два рыма	1. Расчет МКЭ прочности элементов несущей конструкции ОК 2. Аналитические расчеты прочности подъемных рымов 3. Аналитические расчеты прочности нижних продольных балок при наличии вилочных карманов в конструкции контейнера	1. $\sigma_e \leq 0,85 R_e$ 2. Напряжение на разрыв $R_e \geq \frac{3 \cdot F}{2 \cdot H \cdot t_1 - D_H \cdot t_1}$ Контактное напряжение $R_e \geq 23,7 \cdot \sqrt{\frac{F}{D_H \cdot t_2}}$ 3. $\tau_e \leq 0,58 \cdot 0,85 \cdot R_e$

№ п/п	Наименование расчетного случая	Методы расчета прочности	Критерии прочности
3	Подъем за вилочные карманы	Аналитические расчеты прочности нижних продольных балок в местах установки вилочных карманов	$\tau_e \leq 0,58 \cdot 0,85 \cdot R_e$
4	Горизонтальный удар	Расчет МКЭ прочности элементов несущей конструкции ОК	$\sigma_e \leq R_e, d \leq \frac{l_n}{250}$
5	Вертикальный удар	Расчет МКЭ прочности элементов несущей конструкции ОК	$\sigma_e \leq R_e, d \leq \frac{l_n}{250}$

Примечание. В таблице используются следующие обозначения:
 σ_e — эквивалентное напряжение по Мизесу, определенное в элементе несущей конструкции ОК расчетом МКЭ или аналитически, МПа;
 τ_e — касательное напряжение, определенное в элементе несущей конструкции ОК расчетом МКЭ или аналитически, МПа;
 R_e — минимальный гарантированный предел текучести для металлов с явно выраженной площадкой текучести, МПа;
 d — прогиб балки (смещение точки балки в плоскости, перпендикулярной ее центральной линии), мм;
 l_n — для случая подъема КЦ с помощью подъемного приспособления — длина пролета балки; для случаев ударных нагрузок — длина стойки, нижней продольной балки основания, боковой или торцевой балки или длина самого короткого участка, разделенного другим элементом контейнера (для цельного элемента — фактическая длина) для прочих балок (см. 3.1.4 части VII «Офшорные контейнеры» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам, а также согласно 5.2.3.2 стандарта ИСО 10855-1:2018), мм;
 H — кратчайшее расстояние от центра отверстия в подъемном рыме под болт до края подъемного рыма, мм;
 t_1 — толщина подъемного рыма мм. Толщина накладных колец (при наличии) не учитывается;
 t_2 — толщина подъемного рыма с учетом накладных колец (при наличии), мм;
 D_H — диаметр отверстия в подъемном рыме, мм.

Пояснения к геометрическим характеристикам подъемного рыма приводятся на рис. 4.1.

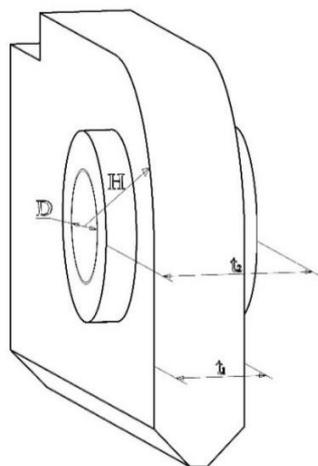


Рис. 4.1 Подъемный рым

5 МКЭ РАСЧЕТЫ ПРОЧНОСТИ

5.1 Подъем с помощью подъемного приспособления.

Исходными данными для расчета являются:

- .1 геометрическая модель силового каркаса контейнера;
- .2 номинальная грузоподъемность контейнера;
- .3 масса силового каркаса;
- .4 положения точек крепления строп к силовому каркасу;
- .5 характеристики материалов балок силового контейнера;
- .6 угол наклона строп α относительно вертикали ($0^\circ < \alpha \leq 45^\circ$).

Все подъемные приспособления закрепляются в одной точке — точке подъема. Расчетная нагрузка F_1 равномерно распределяется по балкам пола ОК (см. рис. 5.1.1 и 5.1.2). Собственная масса ОК T , задается как массовая сила, распределенная по объему конструкции

В результате расчетов определяются эффективные напряжения в силовых элементах каркаса, а также прогибы балок каркаса. Проверка выполнения условий прочности осуществляется согласно критериям, приведенным в табл. 4.1.

5.1.1 Подъем за 4 рыма.

Расчетная нагрузка на конструкцию ОК согласно 5.2.2.2 стандарта ИСО 10855-1:2018 определяется выражением:

$$F_l = (2.5 \cdot R - T) \cdot g, \quad (5.1.1)$$

где R – максимальная масса брутто ОК, кг;
 T – собственная масса ОК, кг;
 g – ускорение свободного падения, 9,80665 м/с².

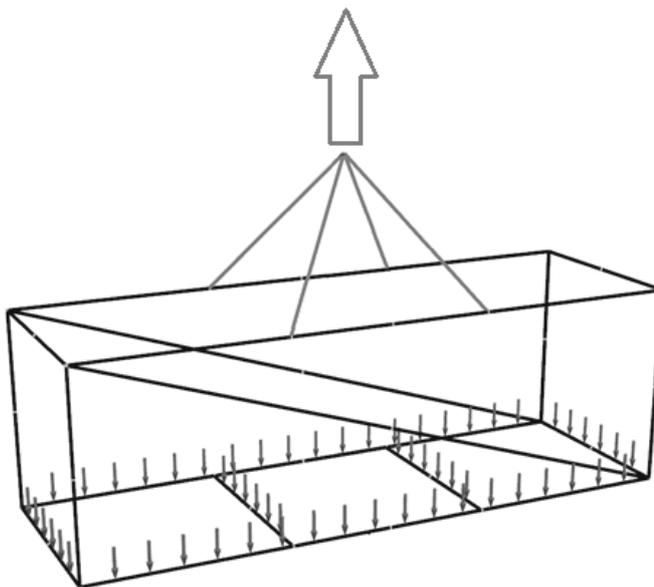


Рис. 5.1.1. Расчетная схема – поднятие за 4 рыма

5.1.2 Подъем за 2 рыма.

Согласно 7.3.3 стандарта ИСО 10855-1:2018 прочность ОК, оснащенных четырьмя подъемными рымами, следует проверять также в случае подъема за два рыма, расположенных по диагонали, напротив друг друга (см. рис. 5.1.2 настоящих НМУ). Расчетная нагрузка F_l , согласно 7.3.3 стандарта ИСО 10855-1:2018 определяется выражением:

$$F_l = (1.5 \cdot R - T) \cdot g. \quad (5.1.2)$$

Если конструкция рамы не является симметричной, расчет следует проводить для каждой пары противоположных подъемных рымов.

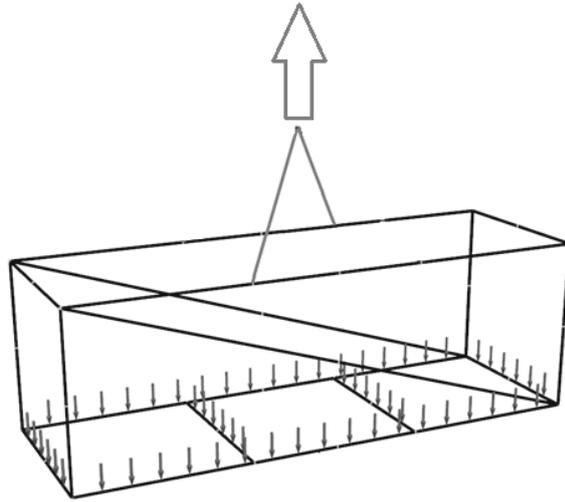


Рис. 5.1.2. Расчетная схема – поднятие за 2 рыма

5.2 Ударные нагрузки.

Согласно 5.2.3.1 стандарта ИСО 10855-1:2018 расчет прочности несущей конструкции ОК при действии ударных нагрузок может выполняться по упрощенной схеме, где расчет каждой балки рамы выполняется независимо. Рекомендуется применять расчетную схему, включающую элементы конструкции, непосредственно связанные с рассматриваемой балкой.

На рис. 5.2 настоящих НМУ синим цветом обозначена анализируемая балка, серым — смежные балки, красные параллелепипеды — точки закрепления. Задача анализа ударной прочности заменяется статически эквивалентной задачей расчета изолированной балки на упругом основании. Все узлы, не принадлежащие анализируемой балке, закрепляются по всем степеням свободы.

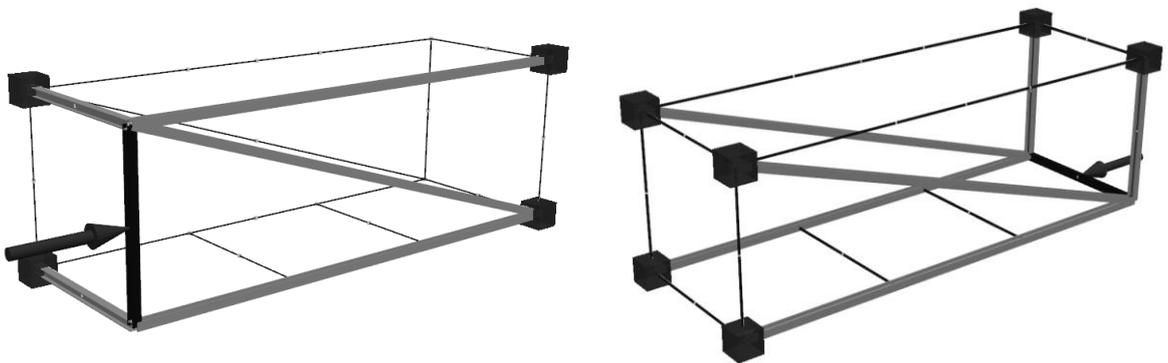


Рис. 5.2. Пример схемы расчетов на ударные нагрузки

Исходными данными для расчета являются:
 геометрическая модель несущей конструкции ОК;
 максимальная масса брутто ОК R ;
 характеристики материалов элементов несущей конструкции ОК.

В результате расчетов определяются эффективные напряжения и прогибы всех балок поочередно. Проверка условий прочности проводится по критериям табл. 4.1 настоящей части НМУ.

5.2.1 Горизонтальный удар.

Согласно 5.2.3.2 стандарта ИСО 10855-1:2018 к балкам рамы ОК прикладываются статически эквивалентные горизонтальные силы:

- .1 $0,25R_g$ — к продольным балкам основания и стойкам;
- .2 $0,15R_g$ — к остальным балкам.

Силы прикладываются перпендикулярно осям элементов. К угловым стойкам силы могут быть приложены в произвольном направлении. Точка приложения силы по длине элемента может быть выбрана произвольно.

5.2.2 Вертикальный удар.

Согласно 5.2.3.3 стандарта ИСО 10855-1:2018 к балкам рамы ОК прикладываются статически эквивалентные вертикальные силы:

.1 $0,25R_g$ — к продольным и торцевым балкам основания.

Силы прикладываются в центрах пролетов балок.

6 АНАЛИТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРОЧНОСТИ

6.1 Расчет прочности подъемных рымов.

Результирующая сила F , действующая на подъемный рым, согласно 5.2.2 стандарта ИСО 10855-1:2018 и 2.2.2 части VII «Офшорные контейнеры» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам, определяется выражением:

$$F = \frac{3 \cdot R \cdot g}{(n-1) \cdot \cos \alpha}, \quad (6.1)$$

где R — максимальная масса брутто ОК,
 g — ускорение свободного падения, 9,80665 м/с²,
 α — угол наклона строп относительно вертикали ($0^\circ < \alpha \leq 45^\circ$),
 n — количество подъемных рымов.

Расчет производится согласно 2.2.3 и 2.2.4 части VII «Офшорные контейнеры» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам. Оценка прочности выполняется согласно критериям, приведенным в табл. 4.1 настоящей части НМУ.

6.2 Расчет прочности нижних продольных балок при наличии вилочных карманов.

Расчет выполняется согласно требованиям 3.1.9 части VII «Офшорные контейнеры» Правил изготовления контейнеров Сборника правил по контейнерам. Нижние продольные балки, при наличии вилочных карманов в конструкции контейнера, должны выдерживать напряжения сдвига, возникающие в вертикальных сечениях над и под вилочным карманом (см. рис. 6.2 настоящей части НМУ).

При подъеме ОК за рымы, напряжение сдвига в вертикальных сечениях балок определяются выражением:

$$\tau_e = \frac{F_p}{A_1}, \quad (6.2)$$

где $F_p = \frac{2,5 \cdot R \cdot g}{2}$ — сила сдвига, возникающая в одной нижней продольной балке при подъеме контейнера за четыре подъемных рыма, H ;
 A_1 — площадь вертикального сечения над и под карманом для вилочного погрузчика (рис. 6.2), мм².

Оценка прочности выполняется согласно критериям, приведенным в табл. 4.1.

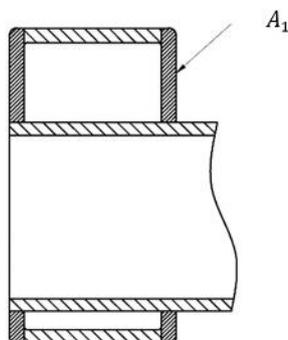


Рис. 6.2. Схема определения площади сечения в опасных вертикальных сечениях нижних продольных балок при наличии вилочных карманов

6.3 Расчет прочности нижних продольных балок при подъеме ОК за вилочные карманы.

Напряжение сдвига в вертикальных сечениях балок определяется выражением:

$$\tau_e = \frac{F_f}{A_2}, \quad (6.3-1)$$

где F_f – сила сдвига, возникающая при подъеме контейнера за вилочные карманы, Н.

$$\text{Для груженого контейнера } F_f = \frac{1,6 \cdot (R+S) \cdot g}{2}, \quad (6.3-2)$$

$$\text{для пустого контейнера } F_f = \frac{0,625 \cdot (R+S) \cdot g}{2}, \quad (6.3-3)$$

где S – масса подъемного приспособления, кг;
 A_2 – площадь вертикального сечения над карманом для вилочного погрузчика (см. рис. 6.3), мм².

Оценка прочности выполняется согласно критериям, приведенным в табл. 4.1.

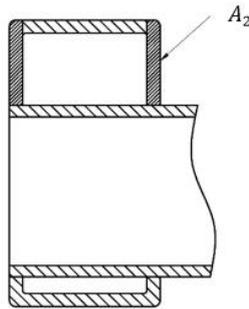


Рис. 6.3. Схема определения площади сечения над вилочным карманом

7 ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ТЕХНИЧЕСКОГО ОТЧЕТА О РЕЗУЛЬТАТАХ РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ

7.1 Технический отчет о результатах расчетов прочности ОК включает следующие разделы:

- .1 нормативные ссылки;
- .2 общие технические характеристики;
- .3 характеристики материалов конструкции;
- .4 характеристики основных элементов конструкции;
- .5 описание электронной геометрической модели;
- .6 расчетные случаи и допустимые напряжения;
- .7 расчетные зоны конструкции;
- .8 описание конечно-элементной модели;
- .9 результаты расчетов для регламентированных расчетных случаев;
- .10 библиография.».