

Теория расчета оболочек сосудов и аппаратов

Ефанов К.В.



НАУКА
самиздат

Аннотация

В книге изложены оригинальные выводы и идеи по проблемам теории в расчетах оболочек (корпусов) сосудов и аппаратов до 21МПа и сосудов до 130МПа высокого давления.

Материал книги предназначен для специалистов по прочностным расчетам, для конструкторов нефтяных и атомных сосудов и аппаратов.

Оглавление

Введение

1 Теоретическое основание норм расчета сосудов и аппаратов

2 Варианты теорий оболочек

3 Построение расчетного аппарата вариантов теорий оболочек

4 Теория тонких оболочек варианта Кирхгофа-Лява. Основание норм сосудов до 21МПа

5 Теория толстых оболочек по задаче Ламе. Основание норм сосудов высокого давления

6 Универсальная теория оболочек

7 Расчет оболочек сосудов методом конечных элементов (МКЭ)

8 Ребристые оболочки

9 Бионический дизайн сосудов и аппаратов

10 Теория расчета отводов

11 Теория расчета фланцев

12 Теория расчета коробчатых оболочек сосудов

13 Сопряжение простых оболочек в оболочки корпусов

14 Литература

Посвящение

Монография посвящается Автору бионического дизайна, самого совершенного способа конструирования

—

БОГУ ТВОРЦУ ТРОИЦЕ

Благодарность

Моей маме Татьяне Викторовне,
работавшей инженером в нефтяном
машиностроении

Введение

Материал изложен относительно вопросов прочности при конструировании сосудов и аппаратов (нефтяных).

В первой части монографии рассмотрены некоторые аспекты теории тонких оболочек, теории толстых оболочек на основании решения задачи Ламе.

Подробно рассмотрена расчетная модель задачи Ламе и приведен ее критический анализ.

Универсальная теория оболочек приводится в форме логического следствия рассмотрения теории тонких оболочек и задачи Ламе.

Отдельно рассмотрены некоторые аспекты прочностного расчета элементов корпусов сосудов.

Рассмотрено применение элементов бионического дизайна.

1 Теоретическое основание норм расчета сосудов и аппаратов

Сосуды и аппараты стальные сварные в настоящее время нормами подразделяются на: сосуды до 21МПа и сосуды до 130МПа (сосуды высокого давления).

Сосуды этих двух групп имеют отличающееся конструктивное оформление. В качестве примера это могут быть форма днищ, узлов врезок штуцеров, рулонированное исполнение оболочки сосуда высокого давления.

По сложности нефтяные сосуды до 21МПа и высокого давления приблизительно одинаковые. Конечно, «не думающему» конструктору, специализирующегося на расчете и проектировании сосудов до 21МПа, сосуды высокого давления представляются повышенной сложности.

В соответствии с делением сосудов на 2 группы, для каждой группы применяются своя нормативная методика расчета на прочность.

В теоретическом основании методики расчета оболочек корпусов сосудов до 21МПа находится безмоментная теория тонких оболочек. Методика расчета сосудов высокого давления основана на теории толстых оболочек, построенной на решении задачи Ламе.

Сосуды (и оболочки в теории оболочек) делятся на тонкие и толстые по условному отношению толщины

стенки к внутреннему диаметра (или радиусу). Отношение 0,1 означает погрешность расчета 10%. Для расчета в некоторых случаях можно допустить и большую погрешность расчета. В этом случае можно выполнять расчет сосудов высокого давления.

Сосуды до 21МПа относятся к тонкостенным сосудам, сосуды высокого давления относятся к толстостенным. Расчет толщины, соответствующей границе перехода по формулам из теории тонких оболочек и теории толстых оболочек может не совпадать.

Расчет корпуса сосуда высокого давления по теории тонких оболочек возможен до тех пор, пока толщина стенки удовлетворяет погрешности применения этой теории.

Погрешностью теории тонких оболочек является отношение толщины стенки к внутреннему диаметру (или радиусу) и назначается в долях или процентах.

Существуют сосуды со сравнительно толстой стенкой, но по критерию $\frac{h}{r}$ относящиеся к тонкостенным сосудам, а по давлению к сосудам до 21МПа. Например, это может быть аппарат колонного типа для таких процессов, как гидрокрекинг. Такие оболочки возможно стоит проверять расчетом по уточненным методикам, например, по технической теории толстых оболочек не на основе задачи Ламе.

2 Варианты теорий оболочек

Теории оболочек, как написано выше, условно делят на теорию тонких оболочек и теорию толстых оболочек. Для каждого из типов теорий существует несколько способов построения в зависимости от гипотез. Теория тонких оболочек делится на техническую теорию с введенными гипотезами для решения определенных задач и математическую теорию, занимающуюся обоснованием теории.

Теория толстых оболочек на основе задачи Ламе подробно приведена в работах академиков Ильюшина А.А. [7], Работнова Ю.Н. [9]. В работе член-корреспондента А.И. Лурье [13] приведено решение задачи Ламе на основе пространственной теории упругости. В работе Ильюшина [8] приведена пластическая деформация толстой оболочки.

Теория толстых оболочек (т.е. на основе задачи Ламе) не имеет моментного решения и применяется решение из теории тонких оболочек. Расчетный аппарат теории толстых оболочек, построенной по задаче Ламе, но основании его возможностей не является лучшим средством для расчета сосудов высокого давления.

Следует в перспективе перейти на расчет сосудов по технической теории толстых оболочек, имеющей общий подход с теорией тонких оболочек. Техническую теорию толстых оболочек как более точную по сравнению с теорией тонких оболочек, можно распространить к применению на расчет тонкостенных сосудов. То есть выполнить переход на использование

одной теории для расчета всех типов сосудов, что упростит работу расчетчиков и проектировщиков.

Теория тонких оболочек существует как техническая теория, направленная на расчеты конструкций, и как математическая теория, занимающаяся теоретическим обоснованием.

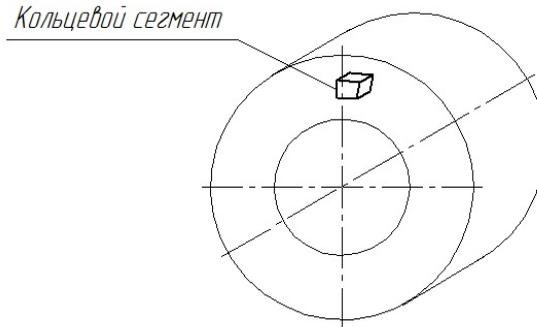
Из технических теорий можно отметить теорию академика Власова В.З. [1], наиболее маститого российского (советского) специалиста по расчету оболочек. Ему также принадлежит вариант теории ребристых оболочек, под которую можно отнести по конфигурации обечайку с укрепляющими кольцами.

По математической теории тонких оболочек из российских (советских) специалистов можно отметить работы академика Новожилова В.В. [3, 4]. В работе [3] Новожилов писал, что теорию тонких оболочек необходимо рассматривать без отрыва от теории упругости. Из работ иностранных специалистов можно отметить книги иностранного члена академии наук Тимошенко [15] и Лява А. [18].

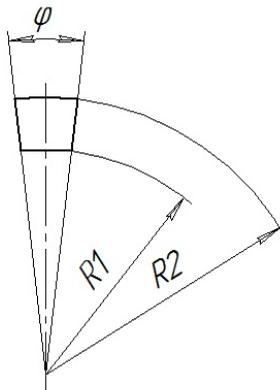
3 Построения расчётного аппарата вариантов теорий

В теории тонких оболочек из стенки оболочки выделяется кольцевой сегмент. В теории толстых оболочек на основе задачи Ламе, также в начале построения теории из стенки выделяется кольцевой сегмент. Затем построения теории идут по полностью отличающимся путям.

Сегмент выделяется секущими плоскостями, проходящими через ось оболочки. На примере цилиндрической обечайки:



Сегмент в плане представляет собой геометрическую фигуру трапеции с криволинейными основаниями (но не кубический или прямоугольный элемент):



Кольцевой сегмент является твердого тела (элементом твердого тела).

В теории тонких оболочек кольцевой сегмент заменяется плоским элементом его срединной поверхности. Напряжения по граням кольцевого сегмента рассматриваются как напряжения на элементарных площадках, расположенных на площади грани. Аналогично теории балок, напряжения по площади суммируются по интегралу, для которого пределами являются половина толщины стенки от срединной поверхности. В итоге вместо напряжения на гранях трехмерного твердого тела кольцевого сегмента заменяются усилиями и моментами на сторонах плоского элемента срединной поверхности.

Здесь важным является отметить, что на плоской элемент действуют и усилия и моменты. И в результате расчетный аппарат теории тонких оболочек позволяет

рассчитывать и усилия и моменты, то есть имеет моментную теорию.

В теории толстых оболочек по задаче Ламе твердое тело кольцевого сегмента сразу заменяется твердым телом кубического элемента, который рассматривается в теории упругости в разделе о главных напряжениях. Тензор напряжений, конечно, является математическим термином. Здесь имеется в виду кубический элемент сплошной среды, по граням которого действуют главные напряжения.

Обращаю внимание, в связи с последующим изложением, для кубического элемента имеется направление расположения, при котором по его граням будут действовать только главные напряжения. Направление главных напряжений и ориентация этого кубического элемента как правило отличается от направления напряжений от нагрузки и соответствующего им кубического элемента.

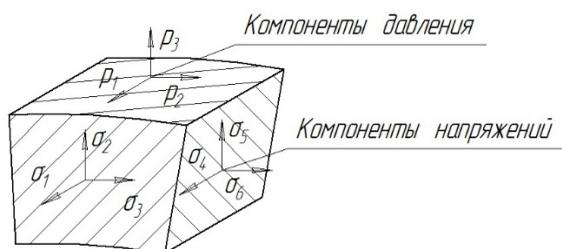
Как уже отмечалось выше, теория толстых оболочек не имеет моментного решения. Объяснить это можно отсутствием моментов в расчетной модели.

Сравнительная таблица построения теорий тонких и толстых оболочек:

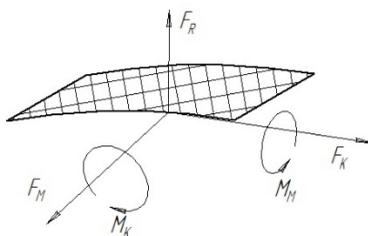
Теория	Начало построения теории	Замена кольцевого сегмента	Построение расчетного аппарата теории	Оценка напряженного состояния
тонких оболочек	выделение кольцевого сегмента	на плоский элемент срединной поверхности	комментарий отсутствует	замена на трехмерный кубический элемент (твердое тело) - при подстановки напряжений в формулу третьей теории прочности
толстых оболочек (задача Ламе)		на трехмерный кубический элемент (твердое тело)	комментарий отсутствует	комментарий отсутствует

4 Теория тонких оболочек варианта Кирхгофа-Лява. Основание норм сосудов до 21МПа

Напряжения на сторонах выделенного сегмента раскладываются на составляющие:



Затем вместо кольцевого сегмента вводится расчетная модель плоского элемента сегмента срединной поверхности:



На ребра плоского сегмента действуют 3 усилия и 2 момента: F_M , F_K , F_R – усилия меридиональное,

кольцевое, радиальное; M_M , M_K – меридиональный и кольцевой моменты.

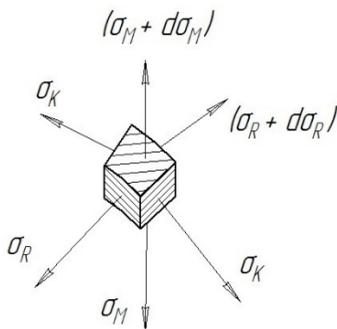
В некоторых книгах по расчету нефтяных и химических аппаратов указывается, что касательные напряжения присутствуют по кольцевым сечениям, но отсутствуют по меридиональным сечениям так как по условиям деформации их быть не может. Это ошибка. В этих работах выделяют кольцевой сегмент и к четырем его сторонам прикладывают 3 усилия и 2 момента.

В теории тонких оболочек, 5 нагрузок действуют не на весь сегмент (не на 4 стороны), а только на одну его сторону (на контур) [3].

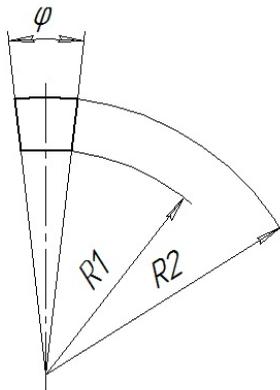
По трем уравнениям безмоментной теории можно найти все напряжения в оболочке. Но в литературе по расчету аппаратов указывают о выводе расчетных формул только на основании уравнения Лапласа – одного из трех уравнений безмоментной теории. Система уравнений безмоментной теории статически определима и позволяет путем подстановки геометрии получить все выражения. А уравнение Лапласа содержит 2 неизвестных и не решается. Для решения подставляют геометрию с целью исключить одну из неизвестных и получить одно уравнение с одной неизвестной. Такой подход в сравнении с решением системы из всех трех уравнений выглядит менее красиво.

5 Теория толстых оболочек по задаче Ламе. Основание норм сосудов высокого давления

В задаче Ламе из стенки толстого цилиндра выделяется кольцевой сегмент, к сторонам которого прикладываются напряжения:



Геометрия сегмента в плане (трапеция с криволинейными основаниями):



Затем по факту происходит замена модели сегмента стенки на кубический элемент.

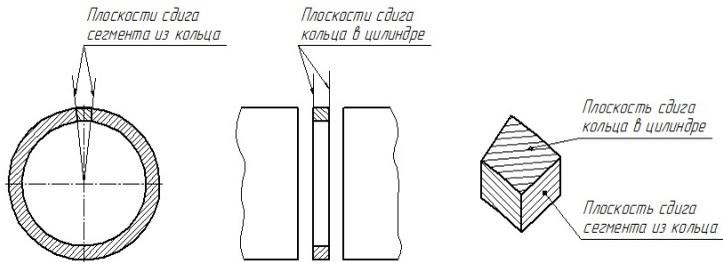
Цитата из работы известных авторов Даркова и Шапиро [11.с.596]: «...**в связи с полярной симметрией цилиндра и нагрузки, нормальные напряжения являются главными напряжениями...**». И дальше, что по площадкам главных напряжений отсутствуют касательные напряжения.

Задача Ламе приведена Г.Ламе во второй части его монографии по теории упругости в качестве примера применения выведенных им уравнений. Обоснованность полученных результатов решения применения формул Г.Ламе к расчету цилиндра определяется фактом отсутствия моментов в расчетной модели и в части замены кольцевого сегмента на кубический элемент. На основании рассмотрения расчетной модели можно сделать вывод о том, что расчетная модель в виде исходных данных к математическим выкладкам является

неполной и, следовательно, результат решения задачи Ламе не является вполне корректным. Необходимо использовать подход с расчетной моделью, аналогичные используемым в теории тонких оболочек.

В части касательных напряжений

Для кубического элемента твердого тела (описываемого тензором) верно, для кольцевого сегмента полностью неверно так как касательные напряжения по одной из площадок препятствуют смещению колец обечайки цилиндра, а по второй площадке препятствуют отделению сегмента из состава кольца:



На основании симметрии кольцевого сегмента, его нельзя считать в качестве кубического элемента. А, следовательно, нельзя считать кольцевые напряжения по сторонам кольцевого сегмента в качестве главных напряжений.

Касаемо сравнения геометрий приведем следующее:

1) в теории упругости [5, 12] указывается об условии равновесия кубического элемента, заключающегося в том, что должны быть равны площади перпендикулярных граней для равенства моментов от касательных напряжений (касательные напряжения по смыслу определяются как сумма касательных

напряжений от элементарных площадок, расположенных по стороне элемента);

2) в теории упругости, как показано в работе академика Новожилова В.В. [б.с.88] приводится принцип (на рисунке) на примере параллелепипеда, состоящий в том, что со сменой системы координат, меняется геометрия фигуры.

Сегмент не может быть кубическим элементом на основании:

по пункту 1 - сегмент не будет в состоянии равновесия, т.к. приняв высоту сегмента и кубического элемента одинаковой, в «плане» площадь поверхности сегмента окажется больше площади поверхности кубического элемента. И тем самым интегральная сумма от напряжений на элементарных площадок по площадям, будут не равны.

по пункту 2 – из фигуры в «плане» в форме трапеции с криволинейными основаниями нельзя получить квадрат. Автору настоящей работы такой способ неизвестен.

В части нормальных напряжений.

Цилиндр рассматривается в цилиндрической системе координат. Но в построении теории закон Гука используется в его записи для прямоугольной системы координат.

Академик Ильюшин [7.с.177] об этом указывает, что закон применяется для точки и поэтому для точки будет в форме прямоугольных координат выглядеть одинаково и в криволинейной ортогональной системе координат.

Геометрия кубического элемента связана с формулировкой закона Гука. И поэтому полностью некорректно элемент кольцевого сегмента рассмотрен в том же качестве, что и кубический элемент. Т.к. закон Гука для кольцевого сегмента, превышающего размерами точку, не выполняется. И, следовательно, грани кольцевого сегмента не являются сторонами кубического элемента. А следовательно и напряжения по сторонам сегмента не являются главными напряжениями.

Покажем ниже ориентацию тензора главных напряжений при совмещении его с кольцевым сегментом. И тем самым различие в направлениях главных напряжений с кольцевыми напряжениями (выбраны для примера).

Применим подход теории балок, по которому внутри сегмента «в плане» выделим квадратный контур. На стороны контура спроецируем напряжения со сторон трапецеидального сегмента. Затем внутри квадратного

сегмента найдем направление элемента главных напряжений. В результате получим совмещение в одной точке из кольцевого сегмента и кубического элемента главных напряжений, на котором (совмещении) будет видно отличие в направлениях между кольцевыми напряжениями и главными напряжениями.

В основании задачи Ламе заложена безмоментная расчетная модель, к построению расчетного аппарата возникает вопрос замены кольцевого сегмента кубическим элементом.

С учетом отсутствия моментного варианта теории (следует из расчетной модели), теорию толстых оболочек по задаче Ламе следует заменить на теорию толстых оболочек, построенную аналогично теории тонких оболочек. В такой теории толстых оболочек снимается ограничение теории тонких оболочек по погрешности, не позволяющее выполнять расчеты толстостенных оболочек сосудов.

6 Универсальная теория оболочек

Сосуды и аппараты, как известно, российскими нормами делятся на сосуды до 21МПа и сосуды высокого давления до 130МПа. Условной границей деления сосудов является отношение толщины стенки к диаметру, равное 0,1. Эта цифра означает, что для теории тонких оболочек, заложенной в нормах расчета сосудов до 21МПа, принята погрешность 10%. В случае сосудов высокого давления, для которых точность теории тонких оболочек неудовлетворительная, в нормах заложена теория толстых оболочек, построенную на основе решения задачи Ламе (задача расчета полого цилиндра от давления).

При выводе теории тонких оболочек из теории упругости применены упрощения, в результате которых трехмерная задача теории упругости сводится к двумерной задаче [3]. В отличие от этого, решение задачи Ламе для толстых оболочек представляет собой непосредственное применение формул теории упругости к случаю цилиндрической оболочки под давлением. В результате имеется обстоятельство, когда сосуды до 21МПа и сосуды высокого давления рассчитываются по существенно отличающимся теориям.

За счет учета в расчетной модели моментов, теория тонких оболочек является моментной и позволяет решать задачи с краевыми нагрузками (такие как сопряжение оболочек корпуса с перепадом геометрии, узлы врезок штуцеров). Отметим, что в нормах сосудов до 21МПа используется упрощенный безмоментный вариант теории.

В расчетной модели задачи Ламе моменты не введены, поэтому теория толстых оболочек на основе задачи Ламе является только безмоментной.

Академик Новожилов В. В. Указывает о разделении теории расчета оболочек в зависимости от принятого деления оболочек по толщине (по критерию 0,1) на теорию оболочек произвольной толщины и теорию тонких оболочек. Здесь под теорией оболочек произвольной толщины фактически имеется в виду теория толстых оболочек, расчетный аппарат которой построен аналогично подходу теории тонких оболочек типа Кирхгофа-Лява (повторимся, нормы применяют теорию толстых оболочек по решению задачи Ламе).

Теория оболочек произвольной толщины (по факту теория толстых оболочек по типу теории тонких оболочек, но с устранением погрешности последней) является универсальной теорией оболочек. Очевидно, что универсальность заключается в возможности расчета как тонких оболочек сосудов до 21МПа, так и толстых оболочек сосудов высокого давления. Причем точность расчета сосудов до 21Мпа может повыситься так как точность универсальной теория оболочек выше, чем теории тонких оболочек.

Теория тонких оболочек выводится из теории упругости введением ряда допущений по сведению трехмерной задачи к двумерной задачи. Теория оболочек по сути является технической теорией. Мысль академика Новожилова В. В. О том, что теория тонких оболочек воспринимается как надстройка к теории упругости верна, а вот что должен быть поход к

рассмотрению теории тонких оболочек совместно с теорией упругости, неверно. Из строгой теории упругости вывели техническую теорию и затем две этих теории рассматриваются совместно. Теории должны иметь одинаковую физическую обоснованность для совместного применения и одинаковую точность. Так как теория оболочек выведена из теории упругости при введении упрощений, теория оболочек меньше физически обоснована. А, следовательно, и совместное рассмотрение теорий просто некорректно.

Корректным является теорию тонких оболочек использовать как техническую теорию для расчетов, это же касается и универсальной теории оболочек. Применение технической теории ограничивается областью возможного применения и точностью теории (и точностью результатов расчёта).

Универсальная теория оболочек, имеющая моментное решение и позволяющая рассчитывать оболочки произвольной толщины является лучшим решением для расчета по подходу и по расчетному аппарату теорий оболочек. По-видимому универсальная теория является завершающим этапом в построении теорий оболочек.

Внедрение универсальной теории оболочек в нормы позволит разработать один общий нормативный документ на расчет сосудов до 21Мпа и сосудов высокого давления.

В результате этого, сократиться число нормативной документации, упроститься процесс проектирования в том числе за счет того, что сосуды

высокого давления перестанут восприниматься в отдельности от сосудов до 21Мпа. Затем, можно рассмотреть возможность включения сосудов до 21Мпа а сосуды высокого давления до 130Мпа.

7 Расчет оболочек сосудов методом конечных элементов (МКЭ)

В практике расчета оболочек сосудов и аппаратов, конструкция сосуда рассчитывается полностью в специализированном программном пакете или рассчитываются отдельные элементы конструкции, например, узлы врезок штуцеров, в программе МКЭ.

При расчете оболочек корпуса сосуда, сетка МКЭ строится с использованием плоских конечных элементов. Для расчета конечных элементов, могут использоваться теории оболочек, например, Кирхгофа-Лява или Тимошенко. Выбор типа конечного элемента влияет на корректность выполненного расчета. Для решения краевой задачи могут быть применены трехмерные конечные элементы. Например, для узлов врезок штуцеров, сварных швов. Для трехмерных конечных элементов используется теория упругости.

Расчет отдельных элементов выполняется в программе МКЭ, предназначенной специально для расчета этих элементов. Такие программы являются самостоятельными или входят в состав специализированной программы для автоматизации расчетов по нормативной методике. В этом случае документ расчета по результатам вычислений включают главы расчета по формулам нормативной методики главы расчета методом конечных элементов.

Необходимость применения программ МКЭ для расчета отдельных узлов, например, врезок штуцеров,

связана как правило с краевой задачей, которую нельзя решить по нормативной методике (основана на безмоментной теории оболочек).

Интерпретация результатов расчета сосуда по МКЭ

В теории упругости, как известно, прочность оценивается по эквивалентному напряжению. Результатом расчета по теории оболочек нормативной методики являются мембранные и изгибные напряжения, по которым определяют эквивалентное напряжение. На примере кольцевого сегмента для теории толстых оболочек выше приводились теоретические положения о некорректности смешивания понятий главных напряжений с мембранными напряжениями. Оценка прочности тонкостенных сосудов производится по третьей теории прочности. В формулу расчета эквивалентных напряжений подставляют мембранные напряжения. Такое действие некорректно. Тем не менее, напряжение оценивается по эквивалентному.

По методу конечных элементов, результатом расчета является эквивалентное напряжение. Заключение о прочности делается также как и по эквивалентным напряжениям по нормативной методике.

Можно встретить мнение о необходимости оценки мембранных напряжений по эквивалентному напряжению. Такое мнение является некорректным так как напряженное состояние оценивается по теории прочности (эквивалентное напряжение является конечным результатом, а мембранное промежуточным).

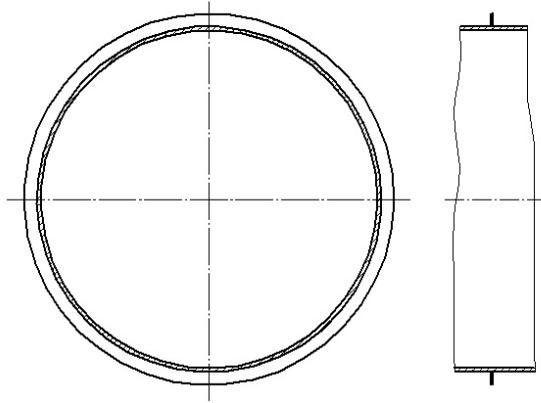
8 Ребристые оболочки

Ребра повышают прочность и жесткость оболочки (обечайки) до эквивалентной обечайки с более толстой стенкой.

Ребристая оболочка является более сложной по сравнению с корпусами сосудов из гладких оболочек – при рассмотрении пространственной модели сосуда так как из-за наличия ребер механические взаимодействия в оболочках сложнее. Особенно это видно на примере оболочек конструкций, от которых требуется максимальная легкость. Ребра могут устанавливаться в продольном и поперечном направлениях, и своим пересечением образуют пространственное решетчатое ребрение.

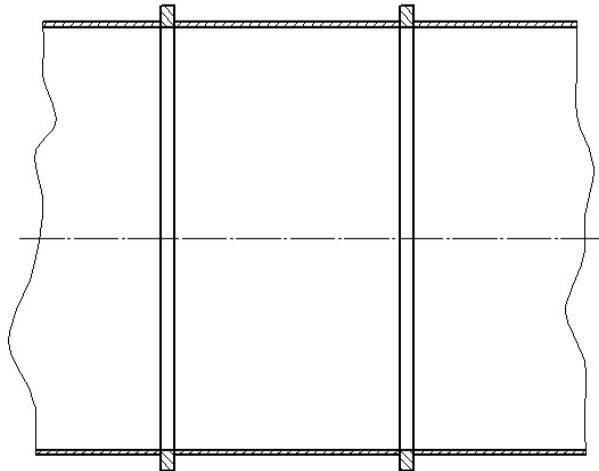
На примере такого сосуда как вертикальный колонный аппарата, укрепляющие кольца, расставленные не близко друг к другу, больших усложнений в конструкцию не вносят. Для таких в качестве ребер применяют пластины или пластины с развитым сечением, например, по типу таврового.

Схема ребристой оболочки сосуда:



Принципиальным является то, что ребро должно устанавливаться на гладкую обечайку. Оболочку по схеме ниже больше соответствует составной оболочке, образованной сопряжением по торцам длинной оболочки (основной) с короткой утолщенной оболочкой.

Схема составной оболочки, не являющейся ребристой:



Как видно из их схем, в составной оболочке сопряжение осуществляется на торцах оболочек. Тогда как в ребристой оболочке сопряжение происходит между цилиндрической наружной или внутренней поверхностью гладкой оболочки и укрепляющим ребром.

Оболочки, в которых укрепляющие ребра сопрягаются с гладкой обечайкой по посадке с натягом, необходимо рассматривать отдельно от ребристых оболочек.

Теория ребристых оболочек строится на рассмотрении условий взаимодействия (сопряжения) на поверхности гладкой оболочки и укрепляющего ребра. Укрепляющее ребро может быть круговой пластиной или стержнем (балкой) с изогнутой осью.

Применение ребристых оболочек в сосудах под давлением

В случаях, когда прочность от внутреннего давления обеспечивается стенкой минимальной толщины, при неудовлетворении условиям устойчивости от внешнего давления при работе сосуда в режиме вакуума, применяют укрепляющие ребра во избежание утолщения гладкой обечайки.

В тех случаях, когда минимальная толщина стенки гладкой обечайки не обеспечивает прочность от внутреннего давления также могут быть применены укрепляющие ребра (чтобы не увеличивать толщину гладкой обечайки).

Решения выполнения оболочки ребристой обеспечивают конструкцию с минимальной массой. Решение может применяться в оболочках ракетно-космической техники и в оболочках сосудов под давлением, для которых имеются какие-либо ограничения по массе.

9 Бионический дизайн сосудов и аппаратов

Существует два подхода к снижению массы: повышение механических характеристик материала или повышение пространственного силового и моментного взаимодействия элементов конструкции.

По-видимому в оболочках труб подход по использованию свойств материала развит глубже, чем для аппаратов так как трубы имеют максимально тонкую стенку и максимально высокую прочность (решение обосновывается в минимальной материалоемкости при большом расходе материала на протяженные участки трубопроводов).

С оболочками нефтяных аппаратов по габаритам могут сравниться оболочки корпусов ракет-носителей для космоса. В оболочках ракет-носителей оба подхода развиты наиболее глубоко. В качестве материала использован композит для минимальной массы и применены решетчатые ребра оболочек.

На нефтяных аппаратах, как указано выше, применяются только поперечные ребра (укрепляющие кольца). Введение продольных ребер позволит увеличить механическое взаимодействие и снизить массу аппаратов.

Бионический дизайн можно характеризовать как расположение материала в пространстве с

использованием развитого механического силового и моментного взаимодействия в пространстве. По принципу материал только там, где проходят силовые линии.

Природные конструкции имеют минимальную массу при максимальных прочностных показателях. Не удивительно, Бог де творил. Его Ум Прекрасен и чувство красоты.

Бионический дизайн можно характеризовать как расположение материала в пространстве с использованием развитого механического силового и моментного взаимодействия в пространстве. По принципу материал только там, где проходят силовые линии.

Укрепляющие кольца аппаратов колонного типа являются примером применения пространственного силового взаимодействия, характерному для ребристых оболочек.

10 Теория расчета отводов

Отводы находятся в узлах штуцеров, воспринимают внутреннее давление и моменты от трубопровода. Отвод рассчитывается от комбинации нагрузок.

Расчет от внутреннего давления выполняется по теории тонких оболочек по без моментному решению Фёпля для торовой оболочки.

Расчет на изгиб выполняется по Карману в виде расчета изгиба трубы с криволинейной осью. Напряженное состояние в стенках криволинейной трубы отличается от прямых труб за счет вклада от сплющивания стенок. Вследствие чего отводы имеют меньшую жесткость против изгиба.

Может быть использован коэффициент интенсификации, показывающий отношение напряжений в прямой и кривой трубах. В нормах на расчет технологических трубопроводов применен именно этот способ. Однако, более точный расчет можно выполнить рассчитав отвод по-отдельности от внутреннего давления и на изгиб.

В работе [4] указывается, что в рамках теории тонких оболочек внешнюю нагрузку можно учесть в граничных условиях.

В теории оболочек вместе с торовыми оболочками отводов рассматривается расчет торовых оболочек элементов другого назначения, например, компенсаторов деформаций.

Весьма подробно тематика теории расчета отводов под внутренним давлением и под внешней нагрузкой изгибающего момента приведены в работе члена-корреспондента Григолюка [17].

11 Теория расчета фланцев

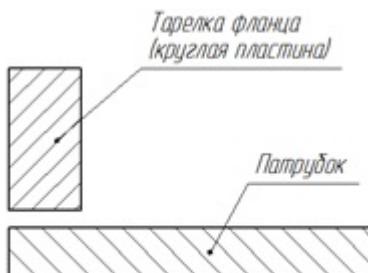
Теория расчета фланца определяется расчетной моделью фланца.

Расчетную модель фланца можно составить двумя способами:

- 1 способ



2 способ



На первом способе основана теория в нормативной методике. К расчету по первому способу можно по мнению автора отнести методы Уотерса и Тимошенко.

Расчетная модель второго способа соответствует обечайке с подкрепленным краем. Способ приводится в работе [4] и применен для расчета фланца байонетного затвора горизонтального автоклава. Способ не имеет широкой известности.

Сравнивая расчетные модели способов можно сделать вывод, что второй способ соответствует прочтению расчетной модели корпуса сосуда. То есть патрубок рассматривается как такая же оболочка что и обечайка, а подкрепление соответствует обечайке с укрепляющими кольцами.

Остается открытым вопрос о возможности применения этого способа к расчету фланцев штуцеров аппаратов и трубопроводов.

12 Теория расчета коробчатых оболочек сосудов

Коробчатая оболочка является сложной оболочкой, составленной из четырех пластин.

Коробчатая оболочка должна рассматриваться двояко: рассчитываются отдельные пластины (стенки коробчатой оболочки) и рассчитываются условия сопряжения стенок, т.е. оболочка здесь рассматривается как целая конструкция из четырех пластин (коробчатая обечайка).

Методом расчета должен быть выбран только тот метод, в котором применяется такая расчетная схема.

Для вертикального коробчатого сосуда, также как и для вертикального цилиндрического сосуда, расчетное давление должно быть постоянно в плоскости поперечного сечения сосуда (на каждой высотной отметке сосуда) и должно изменяться по высоте по линейному закону, в соответствии с увеличением гидростатического давления.

Методы расчета сосудов, в которых стенка рассчитывается как пластина на изгиб, не учитывают распределение давления по высоте сосуда и не должны применяться в расчете сосудов. Также необходимо учитывать условия сопряжения пластин. В методах, где коробчатая оболочка не рассматривается целиком, условия сопряжения не учитываются.

Установка внутренних пластин жесткости, связывающих стенки сосуда, изменяет расчетную модель коробчатой оболочки. Такие оболочки рассчитываются методами строительной механики.

Возвращаясь к расчетной модели, можно отметить следующее. По сложности из криволинейных оболочек в качестве примера можно привести оболочку торосферического днища, образованную сопряжением простых оболочек сферического сегмента и оболочки тора. Для торосферической оболочки в отдельности анализируются сферический сегмент, тор и место их сопряжения. Место сопряжения криволинейных оболочек в теории тонких оболочек рассчитывается на краевую нагрузку. Приведенный ниже метод расчета коробчатой оболочки академика Власова В.З. имеет некоторые отличия.

Расчет коробчатых оболочек по методу Власова В.З.

Расчет коробчатых оболочек от действия гидростатического давления приведен в работе [2.с.380] академика Власова В.З. В этой же работе Власова В.З. приведены расчеты для стенок коробчатых конусной воронки и расчет п-угольной оболочки.

Расчет коробчатой оболочки приведен Власовым в качестве примера разработанного им метода. Метод позволяет рассчитывать пластины по граничным условиям подвижного и неподвижного закрепления

краев пластин. Для коробчатой оболочки принята расчетная схема с неподвижным закреплением.

Метод Власова состоит в сведении задачи к одномерной. Для этого введен обобщенный прогиб. Из оболочки выделяют поперечные прямоугольные сечения, которые рассматриваются как плоская рама с неподвижным соединением балок.

В [2.с.387] Власов приводит данные о совпадении уравнения изгиба пластины коробчатой оболочки с уравнениями для изгиба криволинейной оболочки. В этом случае уравнение изгиба криволинейной оболочки должно быть в рамках теории упругости. Так как уравнения по теории тонких оболочек по гипотезе Кирхгофа-Лява применяться к расчету пластин не могут. Потому что после подстановки в уравнение безмоментной теории радиусов кривизны, равных бесконечности, система трех уравнений перейдет в статически неопределимую систему двух уравнений. Теория криволинейных оболочек учитывает постоянный по сечению кольцевой момент, а на пластины коробчатой оболочки действует изгибающий момент, меняющийся по длине стороны пластины.

Расчет коробчатых корпусов сосудов под давлением по методу Власова может быть рекомендован к включению в нормативную методику.

13 Сопряжение простых оболочек в оболочке корпусов

Сопряжение оболочек для тонкостенных сосудов до 21МПа и толстостенных сосудов высокого давления выполняются по одинаковым условиям, состоящим в равенстве усилий и моментов по границе сопряжения (а также перемещений и поворотов сечений). Такое условие соответствует безмоментному состоянию оболочки.

Безмоментное состояние обеспечивается одинаковой геометрией оболочек в зоне сопряжения. Для эллиптического днища сопряжение с цилиндрической обечайкой корпуса обеспечивается выполнением цилиндрического участка отбортовки.

При наличии краевой нагрузки при отличающейся геометрии сопрягаемых оболочек, краевые усилия и моменты воспринимают края сопрягаемых оболочек и сварной шов. В качестве примера приведем сопряжения оболочек тора и сферического сегмента в торосферическом днище; сопряжение оболочек цилиндрической обечайки и шарового днища в корпусе сосуда.

При наличии краевых нагрузок в зоне сопряжения, стенки оболочек выполняют утолщенными или в отдельных случаях применяют укрепляющие элементы. В качестве примера для укрепляющего элемента можно привести оболочку с подкрепленным краем.

Врезки штуцеров

В местах сопряжения оболочек корпуса и цилиндрических оболочек штуцеров, то есть в местах пересечения оболочек, возникают краевые усилия и моменты.

Оболочка корпуса сосуда в зоне врезки рассчитывается на краевую нагрузку при изменении геометрии. Но не на компенсацию ослабления, вызванное выполнением в оболочке отверстия под врезку штуцера.

Правильная формулировка задачи расчета врезок штуцеров в том, что расчет выполняется для пересечения геометрии, но не укрепления отверстия.

Формулировка расчета укрепления отверстия означает:

- некоторые авторы полагают, что для оболочки необходимо скомпенсировать площадь материала, по которому передавалось силовое взаимодействие,
- некорректное описание напряженного состояния оболочки корпуса,
- некорректное прочтение геометрии и силового взаимодействия в оболочке корпуса, состоящее в том, что оболочку с отверстием нельзя рассматривать одинаково с оболочкой без отверстия.

Расчет врезок штуцеров проводится по моментному варианту теории оболочек. Для наиболее точных результатов применяют расчет методом конечных элементов. Для сварного шва используются конечные элементы пространственной формы.

Сравнение вариантов врезок штуцеров

Для восприятия краевых нагрузок конструктивные решения врезок оформляют двумя способами:

- выполнение отбортовки на цилиндрической оболочке штуцера,
- утолщение стенки оболочки штуцера или стенки оболочки корпуса сосуда.

Наихудшим решением является утолщение стенки сосуда накладными кольцами (укрепляющими кольцами) во избежание утолщения стенки оболочки сосуда. Такое конструктивное решение при возможности следует заменить другими вариантами.

Широко распространенным способом является применение штуцеров с утолщенной стенкой оболочки.

Лучшим решением по механике силового взаимодействия в сосуде является применение штуцеров с отбортовкой на цилиндрической оболочке. Отбортовка на оболочке штуцера снижает резкую смену геометрии оболочек в месте их пересечения и тем самым уменьшает краевые нагрузки. Такое конструктивное решение можно видеть на корпусах ядерных реакторов, корпусах нефтяных аппаратов колонного типа и реакторах. Штуцер с отбортовкой является наилучшим конструктивным решением по получению конструкции сосуда с минимальными краевыми нагрузками.

Стенка оболочки штуцера может быть утолщенной, то есть в этом случае наилучшее решение обеспечивается применением двух способов конструктивного оформления врезок

14 Литература

В список литературы включены только работы авторов, внесших значимый вклад в теорию и расчет оболочек.

Содержание ни одной из работ не является устаревшим на момент написания монографии.

1. Власов В.З. Избранные труды. Т.1. Москва. Изд-во Академии наук.

1962. 528 с.

2 Власов В.З. Избранные труды. Т.3. Москва. Изд-во Академии наук.

1964. 472 с.

3 Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Ленинград. Судпромгиз. 1962.

4 Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. Линейная теория тонких оболочек. Ленинград. Политехника. 1991. 656 с.

5 Новожилов В.В. Теория упругости. Ленинград. Судпромгиз. 1958. 374 с.

6 Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. Ленинград.

Гос. изд. технико-теор. лит. 1948. 211 с.

7 Ильюшин А.А., Ленский В.С. Сопrotивление материалов. Москва.

Изд. физ.-мат. лит. 1959. 373 с.

- 8 Ильюшин А.А. Пластичность. ч.1. Упруго-пластические деформации.
Москва. Изд. Тех.-теор. лит. 1948. 376 с.
- 9 Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. Москва.
Наука. 1988. 712 с.
- 10 Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. Москва. Гос. изд. технико-теор. лит. 1962. 456 с.
- 11 Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопротивление материалов. Москва.
Высшая школа. 1975. 624 с.
- 12 Лурье А.И. Теория упругости. Москва.
Наука. 1970. 940 с.
- 13 Лурье А.И. Пространственные задачи теории упругости. М. Гос. изд. технико-теор. лит. 1955. 491 с.
- 14 Гольденвейзер Теория упругих тонких оболочек. Москва.
Наука. 1976. 512 с.
- 15 Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. Москва.
Наука. 1966. 636 с.
- 16 Палий О.М. Вариант прикладной теории толстых оболочек // Механика твердого тела. №2. 2014.
17. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. Москва.
Наука. 1978. 360 с.

18 Ляв А. Математическая теория упругости.
Москва. ОНТИ. 1935. 674 с.