

С.В. Лапшина

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ

Волжский
2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С.В. Лапшина

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ

Электронное учебное пособие



Волжский
2020

УДК 66.02(07)
ББК 35я73
Л 248

Рецензенты:
инженер-конструктор ООО «КОМЕД»
Харитонов В.Н.,
Начальник монтажно-технологического отдела
ОАО «Гипрорезинотехника»
Афанасьева Е.Е.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Лапшина С.В..

Конструирование и расчет элементов оборудования [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.В. Лапшина ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 683 КБ). – Волжский, 2020. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-3816-7

В учебном пособии рассматриваются основные принципы расчета и конструирования основных элементов оборудования для процессов химической технологии и нефтехимии. Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии». Учебное пособие может использоваться для самостоятельной подготовки.

Ил. 24. табл. 2, библиограф.: 50 назв.

ISBN 978-5-9948-3816-7

© Волгоградский государственный
технический университет, 2020

© Волжский политехнический
институт, 2020

Конспект лекций

Лекция 1. Тема " Введение "

Рассматриваемые вопросы: *Задачи курса, его предмет и содержание. Понятие машины и аппарата. Классификация химического оборудования. Тонкостенные аппараты и аппараты высокого давления. Специфичность работы химического оборудования. Порядок проектирования оборудования. Основные этапы проектирования. Требования к проектируемому оборудованию.*

1.1. Задачи курса, его предмет и содержание

Курс КиРэоб (Конструирование и расчет элементов оборудования) является одной из профилирующих дисциплин по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

Данная дисциплина относится к циклу профессионально ориентированных дисциплин при подготовке инженеров механиков химических и смежных производств.

Целью изучения данной дисциплины является ознакомление с основами расчета и конструирования машин и аппаратов химических производств.

Курс КиРэоб включает в себя теоретические основы расчетов химического оборудования, изучение типовых конструкций элементов машин и аппаратов, а также изучение нормативно-технической документации, регламентирующей конструкции, требования к изготовлению и методы расчета на прочность, жесткость и устойчивость.

Методы расчета и конструирования, изученные в курсе КиРэоб, используются при выполнении курсовой работы по данной дисциплине, курсового проекта по оборудованию химических производств, дипломного проекта и в дальнейшей инженерной практике.

В самом названии дисциплины «Конструирование и расчет элементов оборудования» отражена связь этих процессов при проектировании нового оборудования. Расчет и конструирование всегда идут параллельно и влияют друг на друга. При проектировании нового оборудования сначала выбирается принципиальная конструкция, определяются основные параметры машины или аппарата и его основные размеры. Однако в процессе выбора конструкции необходимо проводить предварительные расчеты, позволяющие

подобрать типовые конструктивные элементы: опоры, фланцы, контрольно-измерительную и запорную арматуру и т.д. После проверочного расчета на прочность могут измениться некоторые размеры, а иногда и конструкция устройств. В процессе проектирования для выбора оптимального варианта конструкции нередко приходится просчитывать несколько вариантов конструктивных решений.

1.2. Классификация химического оборудования и специфичность его работы

Классификацией называется логическая операция, состоящая в разделении всего изучаемого материала на группы по обнаруженным сходствам и различиям. С помощью классификации изучаемые предметы могут быть организованы в систему, позволяющую установить связи между этими предметами и закономерности, определяемые этими связями.

В основу классификации могут быть положены разные признаки, однако они должны быть существенными, определяющими основные свойства классифицируемых предметов.

В основу классификации химического оборудования положены два признака:

- характер технологического процесса;
- общность конструктивных форм, технологии изготовления, применения материалов.

Для определения характера технологического процесса может быть использовано определение машины и аппарата.

Машиной называют механизм или комплекс механизмов, совершающие определенные целесообразные движения с целью преобразования энергии или совершения работы.

Аппарат можно определить как ограниченное пространство, в котором происходят процессы, сопровождаемые изменением химических свойств, температуры и агрегатного состояния перерабатываемого материала.

В соответствии с этими определениями химическое оборудование разделяют на машины химических производств и химическую аппаратуру.

К **машинам химических производств** относится технологическое оборудование, в котором определяющим является механическое воздействие

рабочих органов машины на объект обработки. К машинам химических производств относят:

- машины для измельчения (дробилки и измельчители);
- машины для разделения сыпучих материалов на фракции (ситы, классификаторы);
- машины для получения однородных смесей (смесители, мешалки);
- машины для транспортирования или подачи материала (транспортеры, питатели, дозаторы);
- машины для выделения твердой фазы из жидкостей или газов (фильтры, центрифуги, сепараторы);
- машины с вращающимися барабанами.

К химическим аппаратам относят:

- теплообменные аппараты;
- колонные аппараты;
- реакторы;
- котлы;
- выпарные аппараты;
- емкостные аппараты.

В пределах каждой из названных групп оборудования существует более подробное деление.

Используя второй признак классификации (общность конструктивных форм, технологии изготовления, применения материалов), химическую аппаратуру разделяют на **тонкостенные аппараты и аппараты высокого давления** (толстостенные).

Любой аппарат можно рассматривать как емкость, в которую встроены дополнительные устройства. Корпуса таких аппаратов состоят из типовых элементов: обечаек, днищ, штуцеров, люков, фланцевых соединений, опорных узлов. Конструкции большинства из этих элементов стандартизованы и унифицированы по типоразмерам. Задачей этого курса и

является изучение конструкций типовых элементов аппаратов и методов их расчета.

Специфичность работы химического оборудования заключается в наличии следующих факторов:

- широкого диапазона применяемых рабочих давлений и температур;
- коррозионной агрессивности, взрывоопасности, пожароопасности и вредности многих рабочих сред;
- непрерывного характера большинства производственных процессов;
- разнообразного агрегатного состояния рабочих сред.

Наличие этих факторов требует соблюдения определенных правил при конструировании, расчете, изготовлении и испытании химического оборудования.

1.3. Порядок проектирования и требования к проектируемому оборудованию

Разработка конструкторской документации при проектировании нового оборудования включает следующие стадии:

- техническое задание;
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- рабочий проект.

На стадии **технического задания** исполнитель по исходным данным, полученным от заказчика, разрабатывает техническое задание и согласует его с заказчиком.

На стадии **технического предложения** изучается информационный материал и проводятся эксперименты с целью выявления вариантов возможных решений. Производится конструктивная проработка вариантов и проверка их на патентную чистоту и конкурентоспособность. Производят сравнительную оценку рассматриваемых вариантов и выбор оптимального варианта с обоснованием этого выбора.

Техническое предложение после согласования и утверждения является основанием для разработки эскизного (технического) проекта.

На стадии **эскизного проекта** принимается и разрабатывается конкретное конструкторское решение, определяющее устройство изделия. Производится конструкторская проработка вариантов составных частей изделия. Производится оценка изделия по показателям качества (надежности, технологичности, стандартизации и унификации, экономическим, эстетическим, эргономическим показателям). С целью проверки принципов работы изделия и его составных частей возможно изготовление и испытания макетов.

Эскизный проект после согласования и утверждения служит основанием для разработки технического проекта или рабочей конструкторской документации.

Технический проект должен содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации.

На стадии технического проекта разрабатываются чертежи общего вида изделия, при необходимости некоторых оригинальных или наиболее важных сборочных единиц и деталей, выполняются все необходимые расчеты, подтверждающие работоспособность изделия. При этом уточняют номенклатуру покупных изделий, выполняют согласование применения покупных изделий, а также согласование габаритных, установочных и присоединительных размеров с заказчиком или основным потребителем. Технический проект после согласования и утверждения служит основанием для разработки рабочей конструкторской документации.

На стадии **рабочего проекта** выполняется полный комплект рабочих чертежей всех сборочных единиц и деталей изделия для изготовления и сборки опытного образца, а после корректировки документов – для серийного производства изделия.

Итак, при проектировании любого оборудования на первой стадии проводится анализ существующих конструкций и выбор одной из них как прототипа с последующей модернизацией либо разрабатывается принципиально новая конструкция. После этого выполняются необходимые технологические, прочностные, кинематические и др. расчеты. Особое внимание уделяется безопасности проектируемого оборудования.

Специфичность работы оборудования в химической промышленности (работа при высоких температурах, давлении, в химически агрессивных, взрывоопасных, пожароопасных, токсичных средах) накладывает особую ответственность при выборе конструкторских решений, проведении расчетов и подбору стандартных изделий. Основными требованиями при конструировании являются:

- эффективность и надежность оборудования;
- рациональный выбор конструкционных материалов;
- прочность, жесткость и устойчивость конструкции;
- применение стандартных узлов и деталей;
- технологичность конструкции;
- удобство ремонта, монтажа и демонтажа;
- удобство транспортировки;
- соблюдение норм техники безопасности;
- достаточный срок службы;
- дизайн.

При этом под **эффективностью оборудования** понимается его производительность и экономичность в изготовлении и эксплуатации, повышение полезной отдачи оборудования.

Надежность – свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени.

Под **технологичностью конструкции** понимаются свойства конструкции, определяющие ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте. Свойства, определяющие технологичность конструкции, должны быть заложены при проектировании.

Удельный вес каждого из перечисленных требований зависит от конструкции и назначения оборудования. Однако для всех без исключения конструкций первостепенную роль играет экономический фактор. Именно экономические соображения позволяют найти разумный предел использования каждого показателя.

Контрольные вопросы к лекции 1

1. Какие вопросы изучаются в курсе КиРэоб?
2. Как связаны между собой расчет и конструирование?
3. Что такое классификация и для чего она необходима?
4. По каким признакам классифицируют химическое оборудование?
5. Как классифицируют химическое оборудование?
6. В чем заключается специфичность работы химического оборудования?
7. Стадии проектирования нового оборудования. Содержание стадий.
8. Основные требования при конструировании оборудования.

Лекция 2. Тема "Материалы, применяемые для изготовления химического оборудования"

Рассматриваемые вопросы: *требования к материалам. Факторы, влияющие на выбор материалов. Факторы, зависящие от внешних условий. Факторы, связанные со свойствами материала. Влияние различных факторов на свойства материалов. Краткие сведения об основных физико-механических характеристиках материалов. Влияние свойств рабочей среды на выбор материала. Скорость коррозии. Коррозионная стойкость материалов. Виды коррозии. Влияние температуры и давления на выбор материала. Жаростойкость и жаропрочность. Прочность при статических и динамических нагрузках. Явления ползучести и релаксации. Тепловая хрупкость и хладноломкость. Классификация сталей. Цветные металлы и сплавы. Прокладочные материалы.*

2.1. Требования к материалам

Эффективность и надежность разработанного оборудования определяется не только правильным выбором конструкции и ее прочностью, но и рациональным выбором материалов. Правильный выбор материала влияет на прочность и технологичность конструкции, определяет срок службы изделия.

Современные химические производства характеризуются широким диапазоном рабочих давлений (от вакуума до высоких избыточных давлений), большим интервалом рабочих температур при коррозионноактивных, токсичных, пожаро- и взрывоопасных рабочих средах. Многие узлы и детали машин и аппаратов испытывают одновременно

значительные механические нагрузки и коррозионное воздействие среды при высоких или низких температурах. Поэтому к конструкционным материалам для химического оборудования предъявляется комплекс требований, которые обусловлены конструкцией, технологией изготовления и безопасной

эксплуатацией оборудования:

1) достаточная **коррозионная стойкость** в агрессивной среде при заданной концентрации, температуре и давлении, определяемая скоростью проникновения коррозии, а также жаростойкость и стойкость против возможных видов коррозионного разрушения (коррозионное растрескивание, межкристаллитная, водородная, карбонильная коррозии, азотирование стали, графитизация);

б) достаточная **механическая прочность** при заданных давлении и температуре с учетом специфических требований, предъявляемых при эксплуатации оборудования (жаропрочность, теплоустойчивость, длительная прочность, учет тепловой хрупкости и хладноломкости, устойчивость при знакопеременных или повторных нагрузках и др.);

в) способность материала свариваться с обеспечением высоких механических свойств и коррозионной стойкости сварных соединений, возможность обработки материала резанием, давлением, а также термической обработки (**технологические свойства материала**).

Выбор материалов определяется рядом факторов, которые можно разделить на две группы:

- факторы, связанные со свойствами данного материала (физико-механические свойства, технологические свойства);
- факторы, зависящие от внешних рабочих условий (свойства рабочей среды, температура, давление).

К физико-механическим свойствам относятся:

- предел прочности или временное сопротивление R_m (МПа);
- предел текучести R_e (МПа);
- условный предел текучести $R_p 0,2$ или $R_p 1,0$ (МПа); – модуль упругости при растяжении E (МПа); – ударная вязкость KCU (МДж/м²);

– коэффициент теплопроводности (Вт/м С); – коэффициент линейного расширения ($С^{-1}$). К технологическим свойствам относятся:

– свариваемость;

– обрабатываемость давлением и резанием.

Остановимся подробнее на перечисленных физико-механических характеристиках материалов.

Предел прочности – механическое напряжение, при превышении которого происходит разрушение тела. Предел прочности определяют как отношение максимальной нагрузки, предшествующей разрушению, к исходному сечению образца.

Необходимо также сделать замечание, касающееся термина "временное сопротивление". Прочность является функцией времени нахождения под нагрузкой. При кратковременном воздействии один и тот же образец может выдержать гораздо большие нагрузки, чем при длительном. При низких температурах ($<0,3T_{пл}$) влияние времени менее ощутимо, чем при высоких. Поэтому для низких температур предел прочности можно считать с достаточной точностью характеристикой материала без указания времени испытания. При высоких температурах обязательно указывается время испытания, и термин "временное сопротивление" является более подходящим по смыслу, чем термин "предел прочности".

Предел текучести – механическое напряжение, при превышении которого удлинение образца начинает возрастать без увеличения действующей на него силы. Другими словами, предел текучести – это наименьшее напряжение, при котором происходит необратимая пластическая деформация образца без заметного увеличения растягивающей нагрузки.

Ярко выраженную площадку текучести имеют, как правило, пластичные металлы и сплавы (рис.2.1). Для материалов, на диаграмме растяжения которых площадка текучести отсутствует (штриховая линия), определяют условный предел текучести $R_p 0,2$ или $R_p 1,0$, который соответствует напряжению, вызывающему остаточное удлинение соответственно 0,2 или 1,0%.

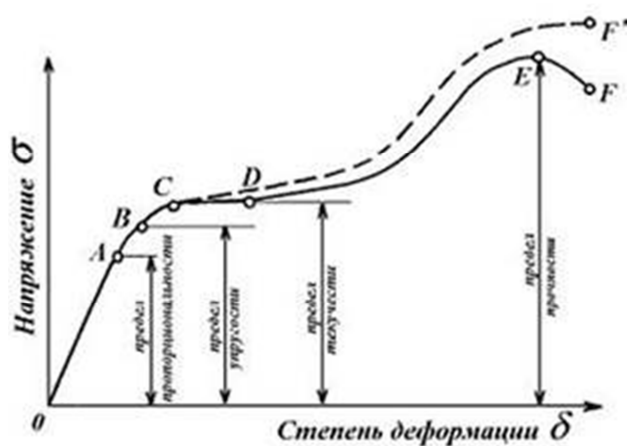


Рис. 2.1. Типичная кривая растяжения с площадкой текучести для конструкционной стали

Упругие свойства металлов характеризуются значениями модуля упругости E и коэффициентом Пуассона μ .

Модуль упругости – отношение нормального напряжения в поперечном сечении цилиндрического образца к относительному удлинению при его растяжении. Модуль упругости – это коэффициент пропорциональности между напряжением σ и относительной деформацией δ вдоль оси нагружения при одноосном нагружении. В литературе можно встретить другое название этой характеристики: модуль растяжения, модуль Юнга – в честь английского ученого Томаса Юнга (1773-1829 гг.), изучавшего упругое поведение стержней.

Линейное соотношение между напряжением и деформацией

$\sigma = E \delta$ называют законом Гука – в память о работах другого английского ученого – Роберта Гука (1635-1703 гг.), впервые установившего линейную зависимость между нагрузкой и удлинением. Предельное напряжение в области упругой деформации (участок 0A на рис.2.1), где выполняется линейная зависимость между приложенным напряжением и вызываемой им деформацией, т.е. закон Гука, называется пределом пропорциональности.

Для материалов, работающих в условиях ударных нагрузок, большое значение имеет такая характеристика прочности, как **ударная вязкость** (сопротивление удару), которая представляет собою отношение величины работы, затрачиваемой на разрушение образца при испытании ударной (динамической) изгибающей нагрузкой, к площади поперечного сечения образца в ослабленном специальным надрезом месте разрушения.

Для испытаний изготавливают стандартные образцы квадратного сечения с надрезом (концентратором напряжения) посередине.

Ударная вязкость, в зависимости от вида концентратора напряжения, обозначается символами KCU, KCV или KCT. Первые две буквы КС обозначают ударную вязкость, а буквы U, V и T – вид концентратора напряжения: U – образец с U-образным надрезом; V – образец с V-образным надрезом; T – образец с нанесенной трещиной усталости. Испытания образцов с концентраторами напряжений V и T проводят в случае использования металлов и сплавов для ответственных конструкций.

При проектировании теплообменной аппаратуры большое значение имеют коэффициенты теплопроводности и теплового расширения материала. **Коэффициент теплопроводности** – коэффициент пропорциональности между плотностью теплового потока и градиентом температуры. Характеризует способность вещества проводить тепло; численно равен количеству энергии, проходящей в единицу времени через единичное сечение образца, на концах которого создана разность температур в один градус.

Коэффициент теплового расширения – величина, характеризующая относительное увеличение размеров тела из определенного материала при увеличении его температуры на один градус. Коэффициенты линейного расширения во всех трех направлениях для большинства тел равны.

2.2. Влияние различных факторов на свойства материалов. Влияние свойств рабочей среды на выбор материала

В большинстве случаев основным фактором для выбора материалов химических аппаратов являются свойства рабочей среды. Коррозионная стойкость материала при заданной концентрации среды, температуре и давлении определяет долговечность химического оборудования.

Коррозионную стойкость оценивают в основном количественными показателями в зависимости от вида коррозии. Для сплошной коррозии основные количественные показатели коррозии и коррозионной стойкости: глубина проникновения коррозии, линейная скорость коррозии и время проникновения коррозии на допустимую глубину.

При невозможности или нецелесообразности определения количественных показателей коррозионной стойкости допускается использовать качественные показатели, например, изменение внешнего вида поверхности.

На основе качественного показателя дают оценку "стойк – не стойк" или "годен – не годен".

В общем случае для изготовления химической аппаратуры должны использоваться конструкционные материалы, скорость коррозии которых не превышает 0,1 мм/год.

Эрозионное воздействие среды (разрушение поверхностного слоя металла под действием ударяющихся в него твердых частиц, капель или потока жидкости или газа) учитывают при значительных скоростях движения среды: жидкостей – более 20 м/с, газов – более 100 м/с или при наличии в среде абразивных частиц.

При конструировании химической аппаратуры необходимо учитывать также и другие виды коррозионного разрушения материалов: коррозионное растрескивание, межкристаллитную, водородную и карбонильную коррозию, азотирование и графитизацию стали.

Коррозионное растрескивание металла наблюдается в ряде случаев в аппаратах, выполненных из легированных сталей и работающих при повышенных давлении и температуре, при совместном действии коррозионной среды и растягивающих напряжений. Разрушение металла при коррозионном растрескивании происходит с образованием трещин внутри кристаллов и по их границам. При наличии в металле напряжений сжатия коррозионное растрескивание не происходит.

Ускоренное растрескивание аппаратов из хромоникелевых сталей с содержанием хрома около 18 % и никеля около 8 % , находящихся под постоянно действующей нагрузкой, имеет место в растворах NaCl, MgCl₂ , ZnCl₂ , LiCl, H₂ S, морской воде.

Латуни обнаруживают склонность к коррозионному растрескиванию в среде аммиака. Хромомолибденовые стали подвержены коррозионному растрескиванию при повышенном содержании кислорода и щелочей в питательной воде. Питательная вода обычного состава (содержание кислорода не более 0,15 мг/л; хлоридов – не более 0,03 мг/л; концентрация щелочей – не более 5 %) не вызывает коррозионного растрескивания. Основные меры защиты металла от коррозионного растрескивания: сведение к минимуму уровня напряжений, снижение местной концентрации напряжений, подбор соответствующих материалов, систематический анализ

и контроль содержания кислорода, хлоридов, щелочей в составе рабочей среды.

• **Межкристаллитная коррозия** свойственна аустенитным хромоникелевым сталям. При работе их при температурах выше 400 С по границам зерен образуются карбиды хрома. В результате границы зерен обедняются хромом, что приводит к снижению коррозионной стойкости и ударной вязкости. Склонность стали к межкристаллитной коррозии можно предотвратить ограничением в стали содержания углерода до величины менее 0,04 % и добавлением легирующих элементов, предотвращающих образование карбида хрома (титана, ниобия).

Явление **водородной коррозии** наблюдается в аппаратах высокого давления при контакте со средой, содержащей газообразный водород. Водородная коррозия стали происходит в результате гидрогенизации ее карбидной фазы водородом, поглощенным металлом при контакте с водородсодержащей технологической средой.

В результате водородной коррозии изменяется структура стали, происходит межкристаллитное растрескивание; прочностные и пластические характеристики стали необратимо ухудшаются, приводя к преждевременным поломкам и разрушениям. Интенсивность химического взаимодействия водорода с карбидной составляющей стали зависит от температуры и давления водорода, а также от степени легирования стали карбидообразующими элементами. Основной способ защиты стали от водородной коррозии – введение сильных карбидообразующих элементов, повышающих устойчивость карбидной составляющей (хрома, молибдена, титана, ванадия). Однако следует учитывать, что применение сталей, легированных дорогостоящими компонентами, может существенно повысить стоимость оборудования и не всегда может быть приемлемо по техническим причинам, например, из-за отсутствия поковок необходимых размеров из легированной стали. Для защиты стали от водородной коррозии можно футеровать или плакировать сталь материалом, обладающим низкой водородопроницаемостью.

Карбонильная коррозия наблюдается в средах, содержащих значительное количество оксида углерода. Оксид углерода, взаимодействуя с металлической поверхностью деталей, образует карбонильное соединение с железом – пентакарбонил железа $FeCO_5$. Продукты коррозии постепенно переходят с поверхности металла в газовую фазу. Карбонильная коррозия

представляет собой разновидность поверхностной коррозии материала в газовой технологической среде и сопровождается уменьшением толщины стенки. Основными факторами, определяющими стойкость стали в среде окиси углерода, являются парциальное давление окиси углерода, температура и химический состав стали. Наиболее стойки к карбонильной коррозии стали, содержащие не менее 18% хрома. Высокую стойкость имеют цветные металлы и сплавы. Алюминий практически не подвергается карбонильной коррозии.

Азотирование стали наблюдается в установках синтеза аммиака, где атомарный азот диффундирует в поверхностный слой металла и взаимодействует с железом и легирующими элементами, образуя нитриды, придающие хрупкость азотированному слою. Азотирование стали сопровождается значительным увеличением объема металла насыщенного азотом слоя, что приводит к появлению значительных напряжений растяжения в материале под азотированным слоем. Исследования показали, что заметное азотирование углеродистых и низколегированных сталей наблюдается при температурах выше 300 С, среднелегированных – при температурах выше 380 С, высоколегированных аустенитных – при температурах выше 400 С.

Графитизация – явление, связанное с разрушением карбида железа и образованием цепочек свободного графита в основном в зоне сварных швов. Это явление характерно для углеродо-молибденовых сталей в области температур 475 – 600С и приводит к снижению ударной вязкости. Для предотвращения графитизации в сталь вводят добавки хрома (не менее 0,6 – 0,8 %).

2.3. Влияние температуры и давления на выбор материала

При выборе материалов для аппаратов, работающих под давлением при низких и высоких температурах, необходимо учитывать, что механические свойства материалов существенно изменяются в зависимости от температуры. Как правило, прочностные свойства металлов и сплавов повышаются при низких температурах и понижаются при высоких. Понижение прочностных свойств при высоких температурах обусловлено происходящими в металле структурными и фазовыми превращениями. В большинстве случаев для химической аппаратуры, предназначенной для работы при высоких температурах, применяют специальные марки **жаропрочных** сталей, характеризующихся достаточной механической прочностью и стабильностью структуры при высоких температурах. Наряду

с жаропрочностью эти металлы должны обладать также и **жаростойкостью**, т. е. способностью противостоять коррозионному воздействию среды в условиях длительной работы при высоких температурах.

При статическом приложении нагрузки важными характеристиками для оценки прочности материала являются предел прочности или временное сопротивление R_m и предел текучести R_e (или условный предел текучести $R_{p0,2}$).

При динамическом приложении нагрузки кроме указанных выше характеристик необходимо учитывать также и величину **ударной вязкости**. Для многих углеродистых и легированных сталей ударная вязкость при низких температурах (обычно ниже минус 40 °С) резко понижается, что исключает применение этих материалов в таких условиях. Ударная вязкость для большинства цветных металлов и сплавов (меди и ее сплавов, алюминия и его сплавов, никеля и его сплавов), а также хромоникелевых сталей аустенитного класса при низких температурах, как правило, уменьшается незначительно, и пластические свойства этих материалов сохраняются на достаточно высоком уровне, что и позволяет применять их при рабочих температурах до минус 254 С.

Кроме указанных механических характеристик, при выборе материала для сосудов и аппаратов, работающих под давлением при высоких температурах, учитывают такие свойства, как ползучесть, длительная прочность материала, релаксация, стабильность структуры, тепловая хрупкость, а для сосудов и аппаратов, работающих при пониженных температурах – склонность к хладноломкости.

Явления ползучести и релаксации наблюдаются в сталях при длительной работе при высоких температурах в условиях напряженного состояния. **Ползучестью** называют способность стали медленно и непрерывно деформироваться под действием постоянной нагрузки при высоких температурах. Сопротивление стали ползучести – основной критерий, по которому судят о теплоустойчивости стали. **Теплоустойчивость** – это способность стали противостоять ползучести.

Релаксацией называют процесс самопроизвольного уменьшения механических напряжений в деформированных телах, не сопровождающийся изменением деформации (англ. relaxe – расслабляться, смягчаться). При релаксации деформация детали не увеличивается, а напряжение в ней снижается.

Важным фактором для оценки свойств сталей при выборе их для работы в области высоких температур является **стабильность структуры**. Нарушение стабильности структуры заключается в склонности некоторых сталей к графитизации, межкристаллитной коррозии и тепловой хрупкости.

Тепловой хрупкостью стали называют снижение ударной вязкости при длительной работе в области температур 450 – 600С. При этом остальные показатели механических свойств практически не изменяются. Тепловая хрупкость характерна для низколегированных хромоникелевых сталей. Для предотвращения тепловой хрупкости хромоникелевые стали стабилизируют добавками молибдена, вольфрама, ванадия.

Снижение ударной вязкости наблюдается и при работе сталей в области отрицательных температур. Резкое снижение ударной вязкости при отрицательных температурах получило название **хладноломкости**. При этом предел прочности, предел текучести и модуль упругости сталей возрастают. Однако увеличение значения предела прочности и предела текучести при понижении температуры не учитывается при определении допускаемых напряжений. За расчетную температуру при температурах ниже 20С принимают температуру 20С. Однако при выборе материала для работы в области отрицательных температур необходимо учитывать критическую температуру хладноломкости, при которой величина ударной вязкости составляет 60 % начального значения при нормальной температуре.

2.4. Классификация сталей

Сплавы системы железо – цементит классифицируют следующим образом:

- сплавы, содержащие не более 0,02% углерода, называют техническим железом;
- сплавы, содержащие от 0,02 до 2,14% углерода, относят к сталям;
- сплавы, содержащие от 2,14 до 6,67% углерода, называют чугуном.

Существует несколько методов классификации сталей: по содержанию легирующих элементов, по числу компонентов (элементов, определяющих свойства стали), по микроструктуре и по назначению.

В зависимости от содержания легирующих элементов стали можно разделить на три группы: низколегированные – содержащие менее 2,5% легирующих добавок; среднелегированные – от 2,5 до 10%; высоколегированные – более 10%.

Классификация сталей по микроструктуре несколько условна. Характерные для какого-либо класса структуры получаются в результате различных режимов термической обработки. Подразделение сталей на классы приведено в таблице 2.1. Более подробно характеристики сталей различных классов рассматриваются в методических указаниях к практическим занятиям.

Таблица 2.1 Подразделение сталей на классы

Класс стали	Марка стали
Углеродистый	Ст3сп, Ст3пс, Ст3кп2, 10, 20, 15К, 16К, 18К, 20К, 20ЮЧ
Низколегированный марганцовистый, кремнемарганцовистый	16ГС, 17ГС, 17ГС1, 09Г2С, 10Г2СФ, 10Г2С1, 10Г2, 10Г2С1Д, 09Г2, 09Г2СЮЧ, 09Г2СФБ, 16ГМЮЧ
Низколегированный хромомолибденовый, хромомолибденованадиевый	12МХ, 12ХМ, 12Х1МФ, 15ХМ, 10Х2ГНМ, 1Х2М1, 20Х2МА
Мартенситный	15Х5, 15Х5М, 15Х5ВФ, 12Х8ВФ, 20Х13, Х9М, 12Х13
Ферритный	08Х13, 08Х17Т, 15Х25Т
Аустенитно – ферритный	08Х22Н6Т, 12Х21Н5Т, 08Х18Г8Н2Т, 15Х18Н12С4ТЮ
Аустенитный	10Х14Г14Н4Т, 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 10Х17Н13М2Т, 02Х18Н11, 08Х17Н15М3Т, 03Х17Н14М3, 12Х18Н12Т, 02Х8Н22С6, 03Х19АГ3Н10Т, 07Х13АГ20, 12Х18Н10Т, 12Х18Н9Т, 03Х21Н21М4ГБ

Сплавы на железоникелевой и никелевой основе	16Х28МДТ, 03Х28МДТ, ХН32Т
--	---------------------------

Стали ферритного класса содержат мало углерода, свыше 13% хрома или более 2,5% кремния.

Стали перлитного класса содержат мало легирующих примесей.

Стали мартенситного класса закаливаются на мартенсит при охлаждении на воздухе. В основном, это среднелегированные стали.

Стали аустенитного класса после закалки имеют аустенитную структуру. Это высоколегированные, коррозионностойкие, жаропрочные и жаростойкие стали с высоким содержанием хрома, марганца или титана.

По назначению стали делят на стали обыкновенного качества, качественные конструкционные и стали с особыми свойствами (теплоустойчивые, жаростойкие, жаропрочные, коррозионностойкие и т.д).

Стали имеют следующее обозначение:

- 1) углеродистые обыкновенного качества – стали этой группы обозначаются буквами Ст и цифрами 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, буква Г указывает на повышенное содержание марганца в стали. В обозначении стали последовательно указываются марка стали (Ст0 – Ст6), степень раскисления (кп, пс, сп) и категория требований (2-5), например Ст3сп3. Чем больше число в обозначении марки, тем больше содержание углерода и, следовательно, выше прочность и ниже пластичность стали;
- 2) качественные, углеродистые конструкционные – обозначают двумя цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента, например 20 (для обозначения котельных марок в конце ставится буква К, например 20К);
- 3) легированные – обозначают комплексом цифр и букв, причем первые две цифры указывают содержание углерода в сотых долях процента, затем последовательно идут буквы, означающие наличие в стали того или иного легирующего элемента, за каждой из букв одной или двумя цифрами указывается примерное содержание данного элемента в процентах (отсутствие цифр означает, что содержание данного элемента не превышает 1,5 %, за исключением молибдена и ванадия, содержание которых в большинстве сталей составляет 0,1 - 0,3%).

Буквенные обозначения в марках стали: Г – марганец, С – кремний, Х – хром, Н – никель, М – молибден, В – вольфрам, Ф – ванадий, Т – титан, Д – медь, Ю – алюминий. Б – ниобий, Р – бор, Ч – редкоземельные металлы (скандий, иттрий, лантан и лантаноиды), Е – селен, К – кобальт, П – фосфор, Ц – цирконий, А – азот (в конце обозначения не ставится). Наличие в конце обозначения буквы А означает высококачественную сталь.

Особо высококачественные стали имеют в конце букву Ш.

Углеродистые стали в зависимости от степени раскисления и характера затвердевания металла разделяют на спокойные, полуспокойные и кипящие стали. При маркировке кипящую, полуспокойную и спокойную стали обозначают символами "кп", "пс" и "сп".

Раскисление – процесс удаления из жидкого металла кислорода, находящегося в виде оксида FeO (традиционное название – закись железа) и способствующего хрупкому разрушению при горячей деформации.

Кипящие стали раскисляют только марганцем (неполное раскисление). Поэтому в этих сталях содержится повышенное количество закиси железа, которая при затвердевании металла частично взаимодействует с углеродом, образуя пузырьки СО. Всплывая в верхнюю часть слитка и удаляясь из жидкого металла с увеличением объема, пузыри СО создают впечатление кипения стали, что и обусловило ее название. Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием и алюминием (полное раскисление). Эти стали содержат минимальное количество закиси железа и затвердевают "спокойно" без газовыделения. Полуспокойные стали представляют стали промежуточного типа.

В верхней части слитка спокойной стали образуется усадочная раковина и околоусадочная рыхлость, удаляемые при прокатке обрезкой или обрубкой. В слитке кипящей стали за счет большого количества газовых пузырей, компенсирующих уменьшение объема металла при его застывании, усадочная раковина отсутствует.

В зависимости от нормируемых механических свойств сталь изготавливают по категориям 2-22, указанным в таблице 2.2. Чем выше категория стали, тем больше число нормируемых характеристик либо выше показатели, которым они должны соответствовать, и, следовательно, выше качество стали.

2.5. Цветные металлы и сплавы

Цветные металлы и сплавы нашли широкое применение при изготовлении химического оборудования благодаря таким свойствам, как высокая коррозионная стойкость в различных средах, хорошая теплопроводность, высокие литейные свойства, пластичность, незначительное снижение ударной вязкости при отрицательных температурах.

Медь обладает наивысшей после серебра электропроводностью и теплопроводностью, устойчива к атмосферной коррозии.

В химическом машиностроении **медь** используют как хороший теплопроводный материал, а также как материал для прокладок. Используют и сплавы меди с другими металлами: **латуни** – сплавы меди с цинком; **бронзы** – сплавы меди с оловом, кремнием, марганцем, алюминием, бериллием. Латуни представляют собой двойные или многокомпонентные медные сплавы, где цинк является основным легирующим элементом. По сравнению с медью, они обладают более высокой прочностью, коррозионной стойкостью, упругостью, технологичностью. В многокомпонентных (специальных) латунях, кроме цинка, содержатся другие легирующие элементы, такие как алюминий, железо, марганец, олово, свинец, кремний, мышьяк. Бронзами называют сплавы меди, в которых цинк не является основным легирующим элементом. Бронзы делят на оловянные, в которых основным легирующим элементом является олово, и безоловянные, не содержащие олово в качестве легирующего элемента.

Таблица 2.2 – Нормируемые характеристики в зависимости от категории стали

Нормируемая характеристика	Категория																				
	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	
									0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2
Химический состав	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Механические свойства при растяжении и изгибе в холодном состоянии	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ударная вязкость КСУ при температуре +20°С	+	+																			

изготовления деталей сложной формы, прокладок, облицовки внутренней поверхности аппаратов. Сплавы алюминия с кремнием (9 – 13%) называются силуминами. Такие сплавы обладают очень высокой стойкостью в азотной кислоте.

Титан и его сплавы отличаются высокой прочностью и коррозионной стойкостью, имеют малый удельный вес (почти вдвое легче стали), хорошо обрабатываются давлением, свариваются. Титан и его сплавы имеют низкий коэффициент линейного расширения, высокую жаропрочность и не склонны к хладноломкости.

Цирконий обладает высокой коррозионной стойкостью в растворах щелочей, в кислотах различных концентраций. Имеет малый удельный вес и достаточно высокую прочность. Цирконий – серебристо-белый металл, твердый, тугоплавкий; плотностью 6,50 г/см³, температура плавления 1855°C. Химически очень стоек (на воздухе покрывается защитной пленкой окиси циркония ZrO₂). Сплавы на основе циркония используют в ядерной энергетике. Цирконий входит также в состав сплавов для изготовления химической аппаратуры, хирургических инструментов и пр. Сверхтугоплавкие карбид (температура плавления 3800°C), борид и нитрид циркония – материалы для жаростойкой керамики.

Тантал по коррозионной стойкости не уступает платине. Выдерживает высокие температуры (температура плавления 2850°C).

2.6. Прокладочные материалы

Прокладочные материалы, служащие для уплотнения фланцевых соединений, должны обладать достаточной упругостью и прочностью для восприятия внутреннего избыточного или наружного давления и температурных деформаций, химической стойкостью в агрессивных средах, теплостойкостью.

Во фланцевых соединениях аппаратов и трубопроводов применяют уплотнительные прокладки из различных неметаллических материалов (паронита, фторопласта, асбеста, резины), металлов и комбинированные прокладки. Тип и материал прокладок выбирают в зависимости от конкретных условий работы: давления, температуры и степени агрессивности среды.

Асбест является минералом, способным расщепляться на тонкие волокна. Из асбеста изготавливают картон асбестовый толщиной 2 – 10 мм для

изготовления прокладок, шнуры и набивки асбестовые для уплотнения сальниковых соединений. Асбест используют для изготовления комбинированных асбометаллических прокладок. Асбест используют при температурах не более 300С.

Паронит состоит из асбестового волокна, синтетических каучуков, наполнителей и вулканизаторов. Выпускается в виде листов толщиной от 0,4 до 6 мм. Стоек во многих средах при температурах от минус 182 до плюс 450С.

Фторопласт относится к фторсодержащим полимерам. Наиболее широко применяется фторопласт-4. Детали из фторопласта-4 получают прессованием в холодном состоянии с последующим спеканием. Фторопласт-4 хладотекуч, т.е. способен деформироваться при нагружении, поэтому прокладки из фторопласта помещают в замкнутый объем (соединения типа "шип – паз"). По химической стойкости фторопласт-4 превосходит все известные пластмассы: не растворяется в растворителях, устойчив к щелочам и кислотам, не набухает в воде и не горит. Применяют до температур, не превышающих 250С.

Резиновые прокладки изготавливают из технической листовой резины. Кроме того, выпускают фасонные изделия: шнур круглого и квадратного сечения, манжеты, кольца. Резина техническая листовая выпускается пяти типов: кислото-щелочестойкая, теплостойкая, морозостойкая, масло-бензостойкая и пищевая. Техническая резина применяется в диапазоне температур от минус 30 до плюс 50 С, теплостойкая резина имеет верхний предел температур до 90 - 140 С, а морозостойкая – нижний предел до минус 45 С.

В последнее время для изготовления высоконадежных прокладок используют уплотнительный материал на основе терморасширенного графита (ТРГ). Уплотнительный материал нового поколения ГРАФЛЕКС на основе ТРГ имеет высокую термостойкость и негорючесть, минимальную газопроницаемость, высокую химическую стойкость, экологическую чистоту.

Прокладки ГРАФЛЕКС используют на условное давление до 100 МПа и расчетную температуру от минус 200 до плюс 1000 °С.

Контрольные вопросы к лекции 2

1. Общие требования к материалам.
2. Факторы, влияющие на выбор материалов.
3. Факторы, зависящие от внешних условий.
4. Факторы, связанные со свойствами материала.
5. Влияние свойств рабочей среды на выбор материала.
6. Скорость коррозии.
7. Коррозионная стойкость материалов.
8. Виды коррозии.
9. Изменение свойств сталей при повышенных температурах.
10. Изменение свойств сталей при пониженных температурах.
11. Классификация и обозначение сталей.
12. Основные цветные металлы и сплавы, применяющиеся для изготовления химического оборудования.
13. Выбор прокладочных материалов.
14. Основные прокладочные материалы.

Лекция 3 Тема «Теории прочности, применяемые при расчетах М и АХП»

Рассматриваемые вопросы: теории прочности, применяемые при расчетах элементов машин.

Машины и аппараты с тонкой стенкой рассчитываются по третьей теории прочности.

Это теория максимальных касательных напряжений, согласно которой разрушение элементов конструкции наступает тогда, когда касательные напряжения в ней достигнут опасного значения.

$$\tau_{\max} = [\tau]; \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

$$[\tau] = \frac{1}{2} \cdot [\sigma]; \quad \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (1)$$

Т. к. элементы конструкции тонкостенных аппаратов находятся в плоском напряженном состоянии, а нормальные напряжения вычисляются

$$\sigma_{13} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} \quad (2)$$

Подставим (1) в (2):

$$\begin{aligned} \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} - \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} &\leq [\sigma] \\ 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} + \tau^2} &\leq [\sigma] \\ \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} &= \sigma_1 - \sigma_3 \end{aligned} \quad (3)$$

σ – нормальные напряжения, возникающие в каждой точке поперечного сечения элементов конструкции, вызванные действием изгибающей нагрузки.

$$\sigma = \frac{M_{из}}{W_z} \quad [\text{МПа}] ,$$

где W_z – осевой момент сопротивления.

$$\text{Для вала} \quad W_z = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad [\text{м}^3]$$

τ – касательные напряжения, возникающие в каждой точке поперечного сечения от действия крутящего момента.

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p}; \quad W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} ,$$

где W_p – полярный момент сопротивления.

$$W_p = 2 \cdot W_z$$

$$\underbrace{\sigma_1 - \sigma_3}_{\sigma_{\text{экв}}} = \sqrt{\left(\frac{M_{\text{и}}}{W_z}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{M_{\text{кр}}}{W_p}\right)^2} = \frac{\sqrt{M_{\text{и}}^2 + M_{\text{кр}}^2}}{W_z}$$

$\sigma_1 - \sigma_3$ – эквивалентные напряжения, вычисленные по третьей теории прочности;

$\sqrt{M_{\text{и}}^2 + M_{\text{кр}}^2}$ – эквивалентные моменты, вычисленные по третьей теории прочности.

$$M_{\text{экв III}} = \sqrt{M_{\text{и}}^2 + M_{\text{кр}}^2}$$

$$\sigma_{\text{экв III}} = \frac{M_{\text{экв III}}}{W_z} \leq [\sigma] \quad - \text{условие прочности по}$$

3 – ей теории прочности



Контрольные вопросы:

1. Какая теория прочности применяется при расчете элементов оборудования?
2. Что такое эквивалентные напряжения?
3. Причина возникновения касательных напряжений?
4. Причина возникновения нормальных напряжений?

Лекция №4. Тема «Тонкостенные оболочки»

Рассматриваемые вопросы: *оболочка, тонкостенные и толстостенные оболочки, уравнение Лапласа, Осесимметричные оболочки вращения. Их основные нагрузки и напряжения, безмоментная теория прочности.*

4.1. Оболочки вращения. Основные понятия и определения

Машины и аппараты называются **тонкостенными** если отношение исполнительной толщины стенки к внутреннему диаметру не превышает 0,1

$$\frac{\delta}{D} \leq 0.1$$

Оболочкой называется тело ограниченное двумя криволинейными поверхностями, расположенными на близком расстоянии друг от друга.

В зависимости от формы срединной поверхности (это геометрическое место точек, равно удаленное от двух криволинейных поверхностей) оболочки подразделяются на: цилиндрические, сферические, конические.

Если срединная поверхность плоская кривая – это пластина.

Большинство форм элементов машин и аппаратов являются оболочками вращения, срединную поверхность, которой можно получить при вращении любой плоской кривой вокруг некоторой оси.

Опр. 1: При вращении любой точки, принадлежащей плоской кривой вокруг оси, эта точка описывает окружность радиусом r , называемая параллельным кругом.

Опр. 2: Кривая пересечения срединной поверхности плоскостью, проходящей через ось, называется меридианом.

Опр. 3: Радиус кривизны срединной поверхности в направлении меридиана называется первым главным радиусом кривизны (ρ_m).

Опр. 4: Радиус кривизны срединной поверхности в направлении перпендикулярном меридиану называется вторым главным радиусом кривизны (ρ_k).

Для цилиндра $\rho_m = \infty; \quad \rho_k = R$

Для шара $\rho_m = \rho_k = R$



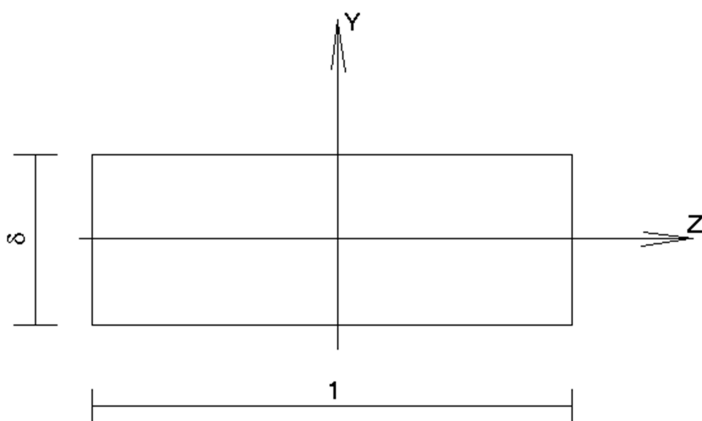
4.2. Осесимметричные оболочки вращения. Их основные нагрузки и напряжения. Уравнения Лапласа

Оболочка вращения называется **осесимметричной** если она нагружена: силами, распределенными симметрично вокруг оси; краевыми силами, распределенными равномерно по параллельному кругу; краевыми моментами, равномерно распределенными по параллельному кругу.

Самым общим случаем нагружения каждой точки поперечного сечения осесимметричных оболочек вращения действуют следующие удельные нагрузки, распределенные равномерно по толщине стенки оболочки:

1. S – меридиональная сила – это сила, приходящаяся на единицу длины параллельного круга и растягивающая элемент в меридиональном направлении.
2. T – кольцевая сила – это сила, приходящаяся на единицу длины меридиана и стремящаяся растянуть элемент в направлении параллельного круга.
3. M – меридиональный момент – это момент, приходящийся на единицу длины параллельного круга и стремящийся изменить кривизну элемента в направлении меридиана.
4. K – кольцевой момент – изгибающий момент, приходящийся на единицу длины меридиана и стремящийся изменить кривизну элемента в направлении параллельном меридиана.
5. Q – поперечная сила – это сила, приходящаяся на единицу длины меридиана.

Напряжения, возникающие от действия удельных нагрузок, определяются, если предположить, что грани элемента, к которому приложена нагрузка, имеют форму прямоугольника с основанием равным 1 и высотой равной толщине стенки аппарата.



$$S \rightarrow \sigma_s = \frac{S}{\delta}; \quad T \rightarrow \sigma_T = \frac{T}{\delta}; \quad Q \rightarrow \tau = \frac{Q}{\delta}$$

$$M \rightarrow \sigma_M = \frac{6 \cdot M}{\delta^2}; \quad K \rightarrow \sigma_K = \frac{6 \cdot K}{\delta^2}$$

Согласно принципу суперпозиции (независимости действия сил) одноименные силы суммируются

$$\sigma_m = \sigma_s + \sigma_M = \frac{S}{\delta} \pm \frac{6 \cdot M}{\delta^2} \quad - \text{суммарное меридиональное напряжение}$$

$$\sigma_k = \sigma_T + \sigma_K = \frac{T}{\delta} \pm \frac{6 \cdot K}{\delta^2} \quad - \text{суммарное кольцевое напряжение}$$

+ – к внутренней поверхности

– – к внешней поверхности

Вывод: таким образом, самым общим случаем нагружения асимметричные оболочки вращения испытывают действия трех напряжений: меридиональное, кольцевое и касательное, которые учитывают действие всех внутренних удельных нагрузок.

Теория расчета оболочек, которая учитывает действие всех внутренних удельных нагрузок, – моментная теория расчета.

На практике при расчете тонкостенных оболочек вращения, находящихся под действием равномерно распределенного давления, поперечную силу и изгибающие моменты не учитывают. Такую теорию расчета называют **безмоментной теорией расчета оболочек**.

Основным уравнением безмоментной теории расчета на прочность асимметричных оболочек вращения нагруженных давлением является уравнение Лапласа.

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_k}{\rho_k} = \frac{P}{\delta},$$

P – внутреннее давление;

δ – толщина стенки оболочки



Контрольные вопросы к лекции 4

1. Какие оболочки называют тонкостенными?
2. Что такое срединная поверхность, параллельный круг, меридиан?
3. Какое сечение называют первым и вторым главным сечением?
4. Какие напряжения действуют в стенках сосуда?
5. Запишите уравнение Лапласа и объясните смысл входящих в него величин.
6. Чем характеризуется безмоментная теория?

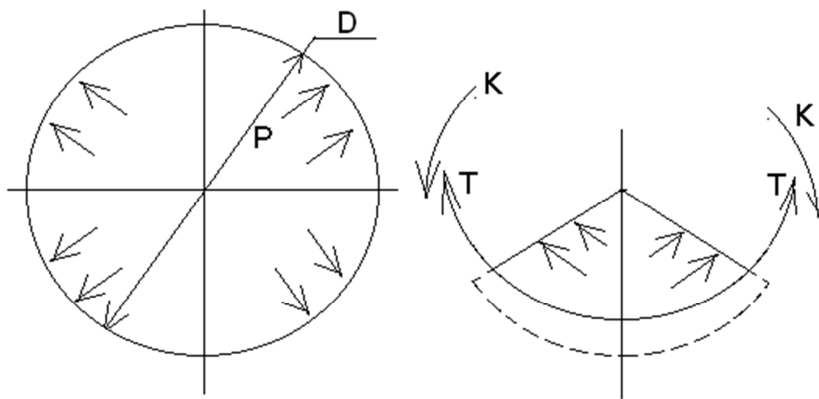
Лекция 5 Тема «Расчет цилиндрических тонкостенных оболочек, работающих под внутренним давлением»

Рассматриваемые вопросы: методика расчета тонкостенных оболочек, проектировочный и проверочный расчет.

Тонкостенная оболочка – это оболочка, у которой толщина стенки не превышает 10% от внутреннего диаметра.

5.1. Проектировочный расчет

Цель расчета: определить размер поперечного сечения: толщину стенки.



Наиболее опасные напряжения: кольцевое, меридиональное, радиальное
(σ_k ; σ_m ; σ_r).

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]$$

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

кольцевое напряжение в направлении кольцевой растягивающей силы T определяем из уравнения Лапласа.

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_k}{\rho_k} = \frac{P}{\delta_p}$$

$$\rho_m = \infty; \quad \rho_k = R$$

$$\frac{\sigma_k}{R} = \frac{P}{\delta_p} \Rightarrow \sigma_k = \frac{P \cdot R}{\delta_p} \approx \sigma_T \quad (1)$$

Возникающее кольцевое напряжение искажает цилиндр и относительную его деформацию можно рассчитать исходя из закона Гука.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

С учетом (1) и (2):

$$\varepsilon = \frac{\sigma_k}{E} = \frac{P \cdot R}{\delta_p \cdot E} \quad (3)$$

Изменение самой кривизны:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R + \varepsilon \cdot R} = \frac{\varepsilon}{R + \varepsilon \cdot R} = \frac{R \cdot P}{\delta_p \cdot E \cdot R} = \frac{P}{\delta_p \cdot E}$$

Слагаемым $\varepsilon \cdot R$ пренебрегаем, т.к. $\varepsilon \cdot R \ll R$.

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R + \varepsilon \cdot R} = \frac{P}{\delta_p \cdot E} \quad (4)$$

Величина изгибающего момента в поперечном сечении определяется произведением жесткости сечения ($E \cdot I_z$) на кривизну радиуса:

$$K = \frac{P}{\delta_p \cdot E} \cdot E \cdot I_z = \frac{P \cdot I_z}{\delta_p}$$

$$\sigma_k = \frac{K}{W_z}; \quad W_z = \frac{2 \cdot I_z}{\delta_p}; \quad \sigma_k = \sigma_T = \frac{P \cdot R}{\delta_p}$$

$$\sigma_k = \sigma_{\text{и}} = \frac{P}{2} \quad (5)$$

Т.к. значения изгибающих напряжений в выражении (5) от действия кольцевого момента K много меньше, чем значения растягивающего напряжения от растягивающей силы в выражении (1), то в суммарном значении кольцевого напряжения величиной изгибающих напряжений пренебрегают. Поэтому для проведения проектировочного расчета в качестве исходного кольцевого напряжения достаточно выражения (1).

$$\sigma_k = \frac{P \cdot R}{\delta_p}$$

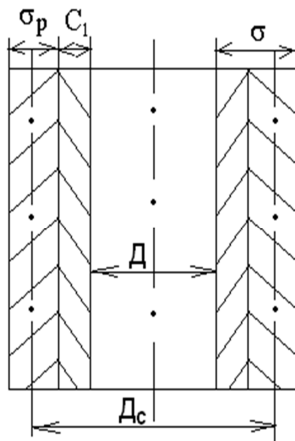
Меридиональное напряжение стенки цилиндра σ_m можно определить из условия равенства нагрузки на днище аппарата от внутреннего давления и усилия в кольцевом сечении стенки аппарата.

$$\pi \cdot R^2 \cdot P = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta_p \cdot \sigma_m \Rightarrow \sigma_m = \frac{R \cdot P}{2 \cdot \delta_p}$$

Радиальное напряжение (σ_r) очень мало и приблизительно считают равным внутреннему давлению с обратным знаком:

$$\sigma_r = -P$$

Окончательно условием прочности будет:



$$\frac{P \cdot R}{\delta_p} + P \leq [\sigma]$$

$$\sigma_r = -P \ll \sigma_k; \quad \frac{P \cdot R}{\delta_p} \leq [\sigma] \Rightarrow \delta_p \geq \frac{P \cdot R_c}{[\sigma]}$$

Т.к. большинство аппаратов химического производства сварные, то для повышения надежности аппарата в вычислении расчетной толщины вводят коэффициент прочности сварного шва φ .

Окончательно расчетная толщина стенки:

$$\delta_p \geq \frac{D \cdot P}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P}$$

Полученная толщина стенки должна обеспечивать прочность аппарата, как при рабочих условиях, так и при испытаниях. Поэтому, для вычисления исполнительной толщины стенки расчетная толщина выбирается как максимальная, вычисленная при рабочих условиях и при испытаниях.

$$\delta = \delta_p + c$$

Для цилиндра:

$$\delta_p = \max \left\{ \frac{D \cdot P_p}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_p}, \frac{D \cdot P_{и}}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{и} - P_{и}} \right\}$$

Для сферы:

$$\delta_p = \max \left\{ \frac{D \cdot P_p}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_p}, \frac{D \cdot P_{и}}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{и} - P_{и}} \right\}$$

Для конических:

$$\delta_p = \max \left\{ \frac{D \cdot P_p}{[2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_p] \cdot \cos(\alpha)}, \frac{D \cdot P_{и}}{[2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{и} - P_{и}] \cdot \cos(\alpha)} \right\}$$

Для эллиптических:

$$\delta_p = \max \left\{ \frac{D \cdot P_p}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0.5 \cdot P_p}, \frac{D \cdot P_{и}}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{и} - 0.5 \cdot P_{и}} \right\}$$



5.2. Проверочный расчет

Цель расчета: проверить выполняемость условий прочности от внутреннего давления с полученной величиной стенки.

$$P_p \leq [P]$$

Независимо от вида оболочки: $P_{и} \leq [P]_{и}$.

Для цилиндрических оболочек допускаемое давление рассчитывается:

$$[P] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_1)}{D + \delta - c_1}$$

$$[P]_{\text{и}} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{\text{и}} \cdot (\delta - c_1)}{D + \delta - c_1}$$

$$[P] = \frac{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_1)}{D + \delta - c_1}$$

$$[P]_{\text{и}} = \frac{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{\text{и}} \cdot (\delta - c_1)}{D + \delta - c_1}$$

Для сферы:

$$[P] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_1) \cdot \cos(\alpha)}{D + (\delta - c_1) \cdot \cos(\alpha)}$$

$$[P]_{\text{и}} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{\text{и}} \cdot (\delta - c_1) \cdot \cos(\alpha)}{D + (\delta - c_1) \cdot \cos(\alpha)}$$

Для конуса:

$$[P] = \frac{0.5 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_1)}{D + \delta - c_1}$$

$$[P]_{\text{и}} = \frac{0.5 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{\text{и}} \cdot (\delta - c_1)}{D + \delta - c_1}$$

Для эллиптических:



Контрольные вопросы к лекции 5

1. Оцените величину напряжений изгиба в тонкостенных оболочках.
2. Какие главные напряжения действуют в тонкостенных оболочках? Какие напряжения являются наибольшими?
3. На основе какой теории прочности оценивают прочность тонкостенных оболочек?
4. Как определяют толщину цилиндрической, сферической и конической оболочек?

Лекция 6. Тема "Элементы моментной теории тонкостенных оболочек"

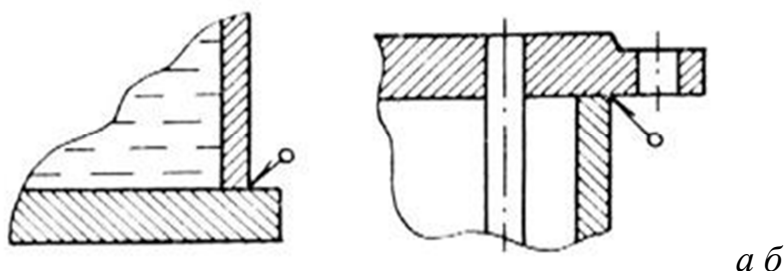
Рассматриваемые вопросы: причины возникновения краевых нагрузок. Краевая сила и краевой момент. Краевая задача. Распорная краевая сила. Уравнения совместимости деформаций. Определение краевых сил и моментов. Краевые напряжения. Длинные и короткие обечайки.

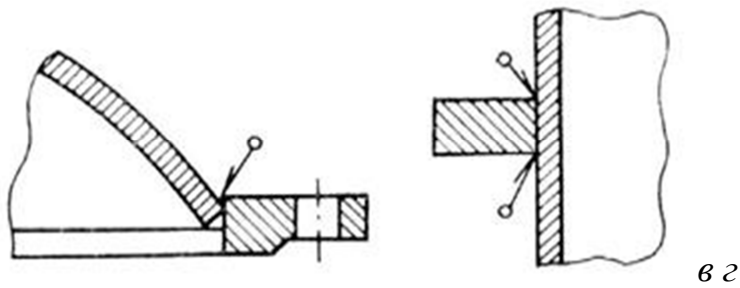
6.1. Причины возникновения краевых нагрузок

При расчете оболочек по безмоментной теории их края рассматривались свободными. В реальных конструкциях машин и аппаратов края оболочек соединяются с другими оболочками или другими деталями (днищами, фланцами и т.п.). В таких узлах сопряжения возникают дополнительные, так называемые краевые нагрузки, вызывающие местные напряжения изгиба в материале сопрягаемых элементов. Вследствие закрепления края оболочки и ограничения свободной деформации возникают реакции заделки края оболочки: краевая сила Q_0 и краевой момент M_0 . Считают, что край оболочки нагружен равномерно распределенными по краю оболочки краевой силой Q_0 и радиальным краевым моментом M_0 .

Причинами возникновения краевых нагрузок являются:

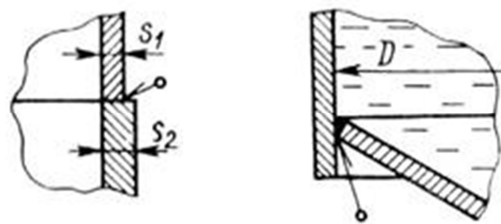
- заделка края оболочки (рисунок 6.1);
- изменение геометрических размеров (рисунок 6.2а) или формы оболочки при переходе от одного сечения к другому (рисунок 6.2б,в,г);
- изменение нагрузки или технологических параметров (рисунок 6.3);
- изменение физико-механических свойств материала (модуля упругости, коэффициента линейного расширения, коэффициента Пуассона и др.) (рисунок 6.4).



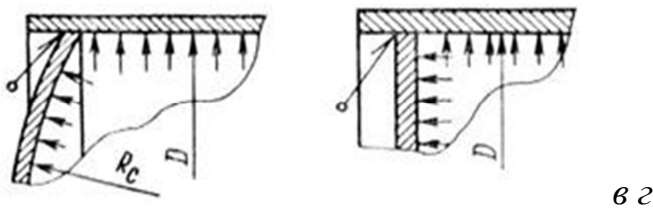


a – соединение с толстым плоским днищем; *б* – соединение с трубной решеткой; *в* – соединение с фланцем; *г* – соединение с кольцом жесткости

Рис. 6.1. Примеры заделки края оболочек



a б



в г

Рис. 6.2. Примеры изменения геометрических размеров (формы) оболочек

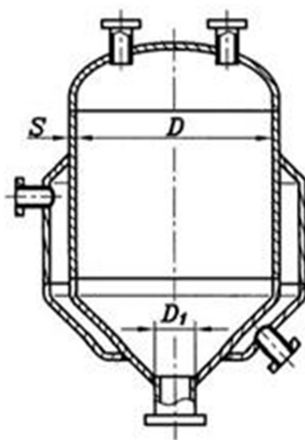
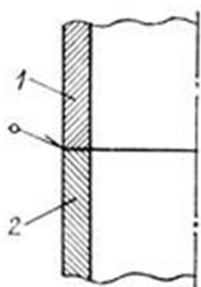


Рис. 6.3. Изменение нагрузки или технологических параметров



1 – обечайка из коррозионнстойкой стали; 2 – обечайка из углеродистой стали

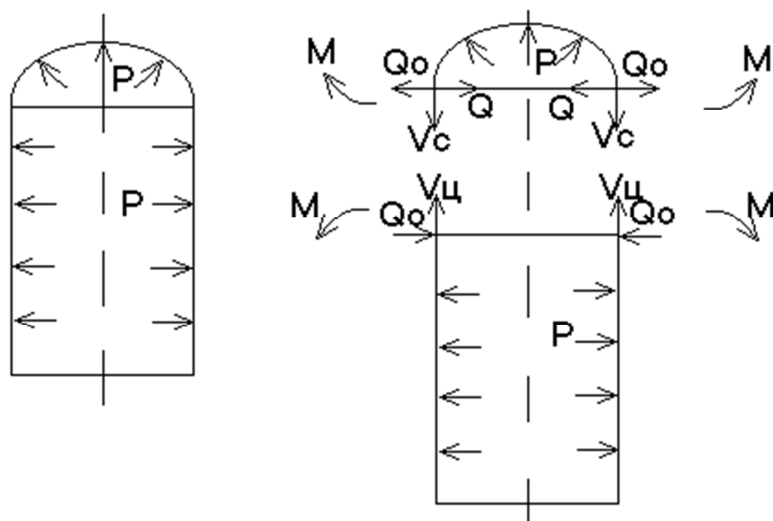
Рис. 6.4. Изменение физико-механических свойств материала

6.2. Краевая задача. Определение краевых сил и моментов

Определение усилий, моментов и напряжений, вызванных действием краевых сил и моментов, составляет цель краевой задачи.

Рассмотрим цилиндрический сосуд с коническим днищем, нагруженный внутренним избыточным давлением P (рисунок 6.5а). Если представить, что коническая и цилиндрическая части сосуда под действием давления могут деформироваться свободно, то очевидно из рисунка 6.5б, что радиальные и угловые перемещения сопрягаемых частей сосуда будут различны.

В действительности же край оболочки нагружен равномерно распределенными краевыми силами и краевыми моментами.



$V_c, V_{\text{ц}}$ – меридиональные усилия сферической крышки и цилиндра;

Q – распорное усилие крышки;

Q_0, M – неизвестные краевая сила и краевой момент.

Целью решения краевой задачи является вычисление неизвестных краевых нагрузок M и Q_0 , напряжений, как следствие от этих нагрузок и проверка прочности по краю сопряжения.

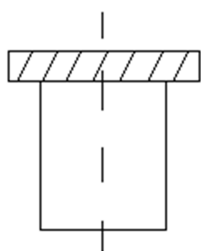
Для вычисления краевых нагрузок составляется уравнение совместимости деформаций, идея которого следующая: в узле сопряжения не должно быть ни каких отличительных перемещений сопрягаемых деталей.

Правило знаков деформации:

Для линейных (или радиальных) Δ .

Δ – "+" – если от рассматриваемой нагрузки сечение стремиться сместиться от оси.

А угловые Q – "-" – если от рассматриваемой нагрузки сечение стремиться повернуться по часовой стрелки.



$$\Delta_p^{\text{ц}} - \Delta_{Q_0}^{\text{ц}} + \Delta_M^{\text{ц}} = \Delta_p^c + \Delta_M^c + \Delta_{(Q_0-Q)}^c$$

$$\theta_p^{\text{ц}} - \theta_{Q_0}^{\text{ц}} + \theta_M^{\text{ц}} = \theta_p^c + \theta_M^c + \theta_{(Q_0-Q)}^c$$

В том случае, если цилиндрический корпус жестко защемленный в недеформируемой детали, уравнения совместимости деформаций примут вид:

$$\Delta_p^{\text{ц}} - \Delta_{Q_0}^{\text{ц}} + \Delta_M^{\text{ц}} = 0$$

$$\theta_p^{\text{ц}} - \theta_{Q_0}^{\text{ц}} + \theta_M^{\text{ц}} = 0$$

Если корпус цилиндрического соединения с недеформируемой деталью (например, прокладочное соединение), в этом случае краевой момент и угловые перемещения $\theta = 0$.

$$\Delta_p^u - \Delta_{Q_0}^u = 0$$

После составления уравнений совместности деформаций формулы для вычисления перемещений, как линейных максимальных и угловых (Δ , θ), выбираются по справочнику в зависимости от вида аппарата и сопряжения.

После вычисления деформаций для проведения проектировочного расчета необходимо вычислить напряжения в поперечном сечении от действия краевой силы и момента. Возникают кольцевое и меридиональное напряжения.

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \sigma_m^p + \sigma_m^{M_0} + \sigma_m^{(Q_0 - Q)} \\ \sigma_k &= \sigma_k^p + \sigma_k^{M_0} + \sigma_k^{(Q_0 - Q)},\end{aligned}$$

где σ_m , σ_k – меридиональное и кольцевое напряжение;

p – от внутреннего давления;

M_0 – краевой момент;

$Q_0 - Q$ – краевое распорное усилие.

$$\sigma_{\max} = \max\{\sigma_m, \sigma_k\}$$

Выбирается максимальное значение, для которого и составляется условие прочности.

$$\sigma_{\max} \leq \varphi \cdot [\sigma]_{\text{кр}},$$

где φ – коэффициент прочности сварного соединения;

$[\sigma]_{\text{кр}}$ – допускаемое напряжение по краю оболочки.

Допускаемое напряжение по краю оболочки для хрупких материалов приравнивается к допускаемому напряжению расчетной оболочки при данной температуре (чугуны).

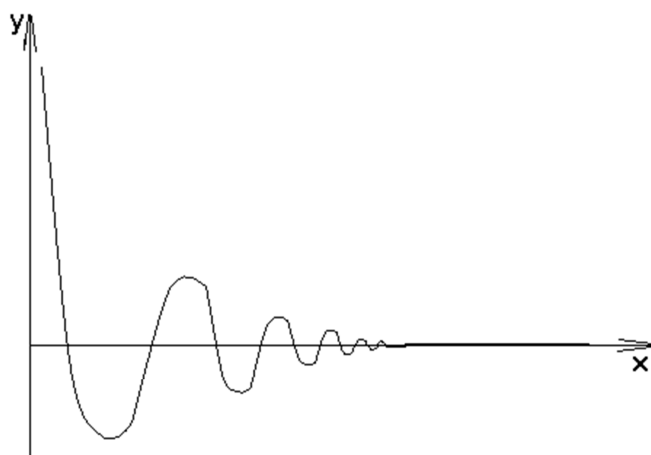
$$[\sigma]_{\text{кр}} = [\sigma]$$

для пластичных материалов можно увеличить в 1,3 (стали).

$$[\sigma]_{\text{кр}} = 1.3 \cdot [\sigma]$$

Напряжения, возникающие по краю, действуют в небольшой зоне и быстро затухают по мере удаления от края.

Кривая затухания напряжения носит волнообразный знакопеременный характер и определяется уравнением:



$$y = A \cdot e^{-k \cdot x} \cdot [\sin(k \cdot x) + \cos(k \cdot x)]$$

где A – учитывает нагрузку;

k – характер скорости затухания;

x – определяется расстоянием от края до

рассматриваемого сечения.

Для цилиндров краевые силы и краевые моменты оказываются существенными только в пределах зоны протяженностью:

$$2.5 \cdot \sqrt{R \cdot \delta},$$

где R – внутренний радиус оболочки;

δ – исполнительная толщина стенки.

Если длина цилиндра меньше указанной зоны $L < 2.5 \cdot \sqrt{R \cdot \delta}$, то краевые нагрузки, возникающие на одном крае цилиндра, оказывают влияние на деформацию на другом крае. Поэтому для проведения точного расчета учитывать напряжение по краю необходимо.

Для длинных цилиндров, у которых $L \geq 2.5 \cdot \sqrt{R \cdot \delta}$ учет краевого эффекта необязателен.

Замечание:

1. Величина краевых нагрузок зависит от узла сопряжения и свойств материала.
2. В жестких соединениях возникают большие краевые напряжения.
3. Пластичные материалы более податливы к деформациям, поэтому краевой эффект проявляется в меньшей степени.
4. При расчете стальных оболочек с плавным переходом можно пользоваться безмоментной теорией расчета.
5. Увеличение толщины стенки должно иметь характер усиления зоны действия краевых напряжений.

Контрольные вопросы к лекции 6

1. Какие нагрузки называют краевыми? Каковы причины их возникновения?
2. Распорная сила и причины ее появления.
3. Цель краевой задачи.
4. Уравнения совместности деформаций.
5. Как определяют напряжения в краевой зоне?

6. Характер краевых напряжений.

7. Длинные и короткие обечайки.

Лекция 7. Тема "Общие требования к сосудам, работающим под давлением"

Рассматриваемые вопросы: *основные термины. Емкостные аппараты. Общие требования к конструкции. Общие требования к изготовлению. Требования к конструкции и изготовлению цилиндрических обечаек и корпусов из них.*

Общие требования к конструкции и изготовлению сосудов, работающих под давлением, регламентируются отраслевым стандартом ГСТУ 3-17-191-2000 "Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия" 7 и правилами Госнадзорхрантруда ДНАОП 0.00-1.07 "Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением"

7.1. Основные термины

В дальнейшем будем использовать терминологию, установленную отраслевым стандартом 7 .

Сосуд – герметично закрытая емкость, предназначенная для проведения химических, тепловых и других технологических процессов, а также для хранения и перевозки газообразных, жидких и других веществ. Границей сосуда являются входные и выходные штуцера.

Аппарат – сосуд, оборудованный внутренними устройствами и предназначенный для проведения химико-технологических процессов. Аппараты в зависимости от их конструкции и осуществляемого в них технологического процесса имеют различные названия: колонные аппараты, реакторы, автоклавы и др.

Сосуды и аппараты состоят из следующих основных элементов: цилиндрического корпуса, днищ (или днища и крышки), штуцеров (для присоединения трубопроводов, арматуры, контрольноизмерительных приборов), люков, лючков, опор, строповых устройств, фланцевых соединений, внутренних устройств.

Элемент сосуда – сборочная единица или деталь сосуда, предназначенная для выполнения одной из основных функций сосуда. Элементы сосудов и аппаратов соединяются между собой, как правило, сваркой.

Сборочная единица – изделие, составные части которого подлежат соединению между собой сваркой, свинчиванием, развальцовкой и другими сборочными операциями.

7.2. Емкостные аппараты

В химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности любой физико-химический процесс требует, прежде всего, наличия емкости, ограниченной корпусом. Эти корпуса по условиям протекающих в них процессов должны быть достаточно прочными и в подавляющем большинстве случаев герметичными.

Емкостной аппарат – это сосуд, главной технической характеристикой которого является объем внутреннего пространства.

Емкостные аппараты или емкости могут быть оснащены нагревателями, мешалками и другими устройствами, предназначенными для осуществления различных технологических процессов.

Корпус – основная сборочная единица, состоящая из обечайки и днищ и составляющая основу сосуда.

Главным составным элементом корпуса является обечайка.

Обечайка – цилиндрический или конический элемент замкнутого профиля, открытый с обоих торцов.

В основном емкостные аппараты имеют цилиндрические обечайки. Конические обечайки применяются, как правило, в качестве днищ и переходов.

В зависимости от технологического назначения аппараты могут быть в горизонтальном, вертикальном и наклонном исполнении. С точки зрения возможности уменьшения толщины стенки, а следовательно, и массы аппарата, предпочтение следует отдавать вертикальному исполнению, особенно для аппаратов, работающих при небольшом избыточном давлении. В этих случаях исключаются дополнительные изгибающие напряжения в обечайке от силы тяжести аппарата и среды, имеющие место в горизонтальных аппаратах, лежащих на седловых опорах. Однако с точки зрения технологии процесса и удобства обслуживания горизонтальный аппарат часто оказывается более подходящим.

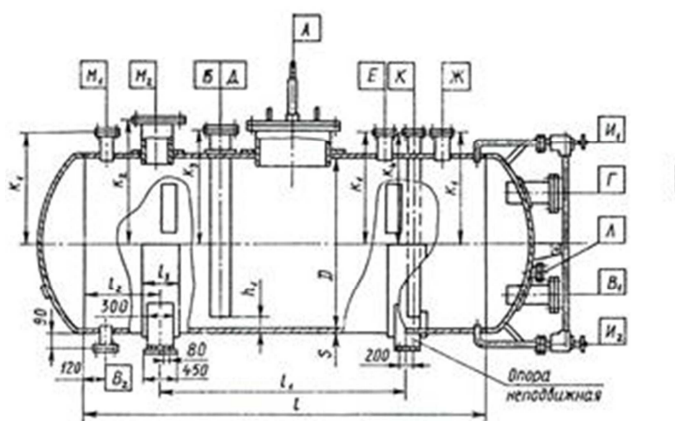


Рис.7.1. Горизонтальный емкостной аппарат

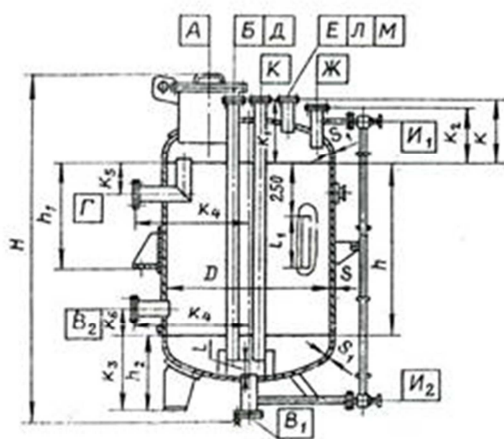


Рис.7.2. Вертикальный емкостной аппарат с эллиптическими днищами

Днищем называется элемент емкостного аппарата, который ограничивает корпус снизу или сверху (вертикальные аппараты) и с боков (горизонтальные аппараты), составляя с ним одно целое.

Днище – неотъемная часть корпуса сосуда, ограничивающая внутреннее пространство с торца.

Днища могут быть эллиптические, сферические, конические и плоские. Наибольшее распространение получили эллиптические днища. Эллиптические днища стандартизованы и применяются в горизонтальных и вертикальных аппаратах с внутренним диаметром от 0,4 до 4 м при давлении от 0,07 МПа до 10 МПа. При диаметре корпуса больше 4 м применяются сферические днища.

Конические днища применяются в основном в нижней части вертикальных цилиндрических аппаратов, если это требуется по условиям технологического процесса (для жидких и сыпучих сред при необходимости их непрерывного или периодического удаления через нижний спуск). Днища с углом при вершине 60° применяются для вязких жидкостей и суспензий, с углом 90° – для невязких жидкостей.

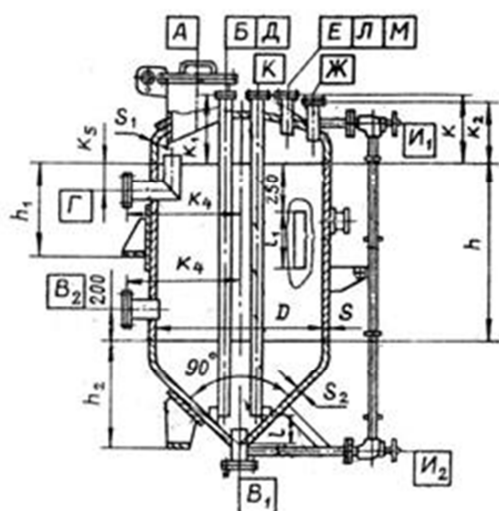


Рис.7.3. Вертикальный емкостной аппарат с нижним коническим днищем

В горизонтальных аппаратах с диаметром больше 1,5 м, работающих под наливом и небольшим избыточным давлением (до 0,07 МПа) также целесообразно применять конические днища с большим углом при вершине (140°).

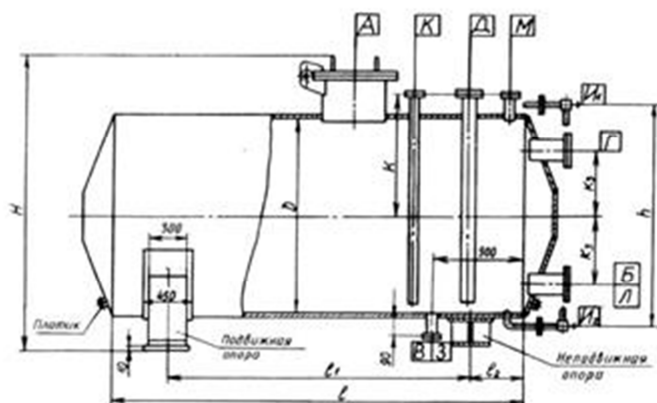


Рис.7.4. Горизонтальный емкостной аппарат с коническими днищами с углом при вершине в 140°

Элементы корпусов цельносварных аппаратов соединяются между собой сваркой и для доступа к внутренней части аппарата, его осмотра, обслуживания и ремонта должны иметь люки.

Люк – устройство, обеспечивающее доступ к внутреннему пространству аппарата.

В разъемных корпусах со съемной крышкой люки не устанавливают.

Крышка – отъемная часть корпуса сосуда, закрывающая внутреннее пространство.

В процессе эксплуатации емкостного аппарата в него периодически или непрерывно входит исходный поток среды на обработку и выводится обработанная среда. Этот технологический процесс может включать нагрев или охлаждение среды в аппарате и ее перемешивание, при этом осуществляется непрерывный контроль за уровнем жидкости в аппарате, измеряются температура и давление среды. Указанные процессы и действия осуществляются путем присоединения к аппарату труб, запорной арматуры (краны, вентили, задвижки), уровнемеров, манометров, термометров, термопар, предохранительного клапана, а также путем введения в рабочий объем аппарата трубного пучка, мешалки или погружного насоса.

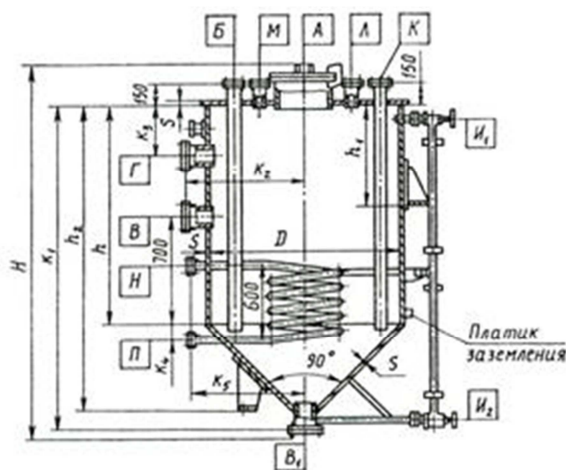


Рис.7.5. Емкостной аппарат со змеевиком

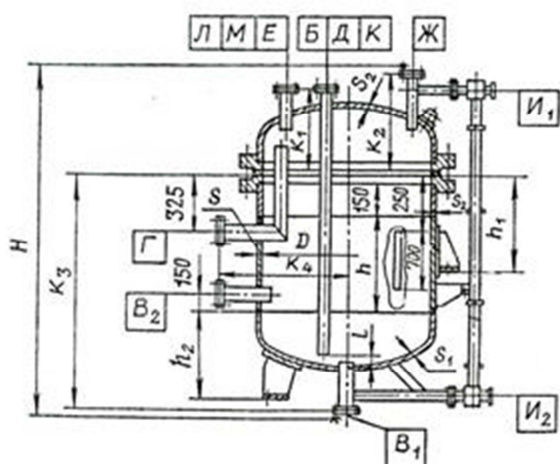


Рис.7.6. Емкостной аппарат с крышкой

В подавляющем большинстве случаев трубы, арматура, измерительные приборы и технологическое оборудование имеют разъемное присоединение к аппарату, что обусловлено удобством их осмотра, ремонта и замены. Разъемное присоединение к аппарату осуществляется при помощи фланцевых штуцеров или резьбовых бобышек.

Штуцер – устройство для присоединения к сосуду трубопроводов, арматуры и КИП.

Патрубок – отрезок трубы или фасонная деталь в виде отрезка трубы.

Корпуса аппаратов могут иметь рубашки. Рубашки в емкостной аппаратуре предназначены для нагревания или охлаждения обрабатываемой среды через стенку корпуса аппарата. По конструкции рубашки бывают несъемные (приварные) и съемные. Последние крепятся к корпусу аппарата при помощи фланцев и применяются в тех случаях, когда требуется периодическая чистка корпуса под рубашкой от накипи (для улучшения теплообмена) или требуется периодический осмотр зоны внутри рубашки.

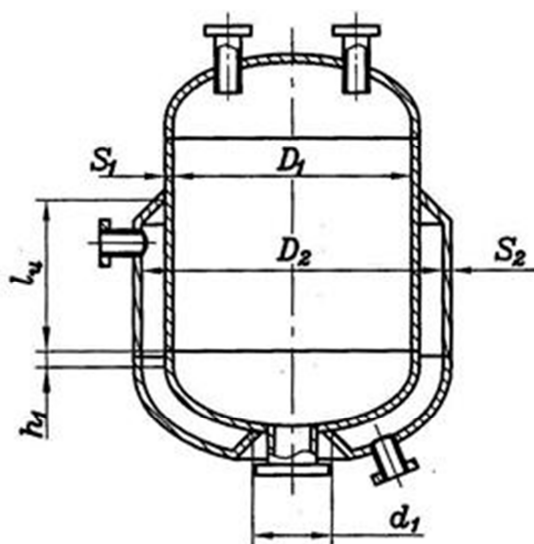


Рис.7.7. Аппарат с рубашкой

7.3. Общие требования к конструкции

1. Конструкция сосудов должна обеспечивать работоспособность, надежность, долговечность и безопасность в течение расчетного срока службы и предусматривать возможность проведения технического освидетельствования, полного опорожнения, очистки, промывки, продувки, ремонта, эксплуатационного контроля металла и сварных соединений.
2. Устройства, препятствующие наружному и внутреннему осмотрам сосуда (мешалки, змеевики, рубашки, тарелки, перегородки и другие устройства), должны быть, как правило, съемными.
3. Конструкция внутренних устройств должна обеспечивать удаление воздуха из сосуда при гидравлическом испытании и воды — после гидравлического испытания.
4. На каждом сосуде должен быть предусмотрен вентиль, кран или другое устройство, позволяющее осуществлять контроль за отсутствием давления в сосуде перед его открыванием.

5. При проектировании сосудов должны учитываться требования "Правил перевозки грузов железнодорожным, водным или автомобильным транспортом".
6. Расчет на прочность сосудов и их элементов должен проводиться согласно действующей нормативной документации.
7. Сосуды должны иметь строповые устройства (захватные приспособления) для проведения погрузочно-разгрузочных работ и установки сосуда в проектное положение.
8. Базовые диаметры сосудов должны приниматься по ГОСТ 9617.
9. Сосуды должны быть снабжены необходимым количеством люков и смотровых лючков, обеспечивающих осмотр, очистку и ремонт сосудов, а также монтаж и демонтаж разборных внутренних устройств.

Сосуды с внутренним диаметром более 800 мм должны иметь люки, а с внутренним диаметром 800 мм и менее – лючки. Внутренний диаметр круглых люков должен быть не менее 400 мм, размеры овальных люков по осям в свету должны быть не менее 325 400. Внутренний диаметр лючков или размер наименьшей оси овальных лючков должен быть не менее 80 мм.

Крышки люков должны быть съемными. Крышки массой более 20 кг должны быть снабжены подъемно-поворотными или другими устройствами для их открывания и закрывания.

Для проверки качества приварки колец, укрепляющих отверстия для люков и штуцеров, должно быть предусмотрено резьбовое контрольное отверстие в кольце, если оно приварено снаружи, или в стенке, если кольцо приварено с внутренней стороны сосуда.

10. В зависимости от расчетных параметров и характера рабочей среды сосуды разделяются на группы, в соответствии с которыми определяются

требования к конструкции, расчету, изготовлению и безопасной эксплуатации сосуда. Группа аппарата указывается в паспорте сосуда и в технической характеристике на чертеже общего вида сосуда.

7.4. Общие требования к изготовлению

1. Предприятие-изготовитель должно иметь разрешение органа Госнадзорохрантруда Украины на изготовление подведомственных ему сосудов.

2. Качество и свойства материалов должны соответствовать требованиям стандартов и подтверждаться сертификатами предприятия-поставщика. При отсутствии или неполноте сертификата необходимо произвести необходимые испытания, подтверждающие соответствие материалов требованиям с оформлением результатов испытания протоколом. Данные сертификатов или заменяющих их документов заносятся в паспорт сосуда.

Материалы должны иметь полную маркировку (марку стали, номер партии плавки, номер листа) и храниться в условиях, исключающих повреждение и гарантирующих сохранность маркировки.

7.5. Требования к конструкции и изготовлению цилиндрических обечаек и корпусов из них

... Требования регламентируются отраслевым стандартом ГСТУ 317-191-2000 7 и Правилами ДНАОП 0.00-1.07 8.

1. При сварке обечаек и труб, приварке днищ к обечайкам должны применяться стыковые швы с полным проплавлением.

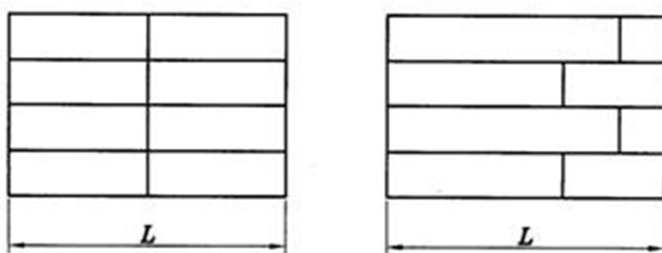
2. Обечайки диаметром $D \leq 1000$ мм должны изготавливаться не более чем с двумя продольными швами. Обечайки диаметром $D > 1000$ мм должны изготавливаться из листов максимальной возможной длины, причем вставки

допускаются шириной не менее 400 мм для сосудов 1 – 4 групп и не менее 200 мм для сосудов 5 группы.

3. Ширина листов между кольцевыми швами должна быть не менее 800 мм, ширина замыкающей вставки – не менее 400 мм, за исключением случаев, когда к обечайке приваривается фланец, трубная решетка или конический переход. В этих случаях длина обечайки указывается на чертеже.

4. Продольные швы смежных обечаек для аппаратов 1 – 4 групп должны быть смещены относительно друг друга на величину трехкратной толщины наиболее толстого элемента, но не менее чем на 100 мм между осями швов. Это требование относится и к смещению швов при вальцевании обечаек способом карт.

5. Допускается изготовление обечаек способом вальцевания карт, сваренных в плоском положении из нескольких листов. В смежных листах допускается наличие поперечных швов, выполненных со смещением (рисунок 7.8б). Обечайки, вальцованные из карт, допускается изготавливать с перекрестными швами (рисунок 7.8а).



a

б

Рис.7.8. Обечайки из карт

a – обечайки из карт с перекрестными швами; *б* – обечайки из карт со смещенными швами

6. Сварные швы не должны перекрываться опорами или иными элементами. Расстояние между краем сварного шва сосуда и краем шва приварки элемента должно быть не менее толщины стенки сосуда, но не менее 20 мм.

7. В стыковых сварных соединениях элементов разной толщины должен быть предусмотрен плавный переход от одного элемента к другому путем постепенного утонения более толстого элемента. Угол наклона поверхностей перехода не должен превышать 20. Допускается сварка без скоса, если разница в толщине не превышает 30% толщины более тонкого элемента и не превышает 5 мм.

8. Смещение кромок листов B , измеренное по срединной поверхности, в стыковых соединениях, обеспечивающих прочность сосуда, не должно превышать $B = 0,1S$, но не более 3 мм.

... При этом $B_1 \leq 0,5 \cdot (S_1 + S_2) \cdot B$; $B_2 \leq 0,5 \cdot (S_1 + S_2) \cdot B$.

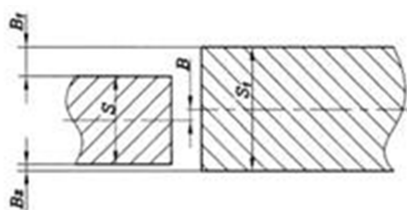


Рис.7.9. Смещение кромок листов

9. Отверстия для люков, лючков и штуцеров для аппаратов 1 – 4 групп должны располагаться вне сварных швов, особенно продольных. Допускается расположение отверстий на кольцевых сварных швах без ограничения диаметра отверстия, а на продольных – при диаметре отверстия не более 150 мм.

Контрольные вопросы к лекции 7

1. Что понимают под терминами "сосуд" и "аппарат"?
2. Дайте определения основных составных частей корпуса аппарата.

3. Сформулируйте основные требования к конструкции аппаратов.
4. Сформулируйте основные требования к изготовлению аппаратов.
5. Требования к сварным швам обечаек и корпусов из них.
6. Как сваривают стыковые сварные соединения элементов разной толщины?
7. Как следует располагать отверстия в обечайках?

Лекция 8. Тема "Конструкции обечаек и днищ"

Рассматриваемые вопросы: *типовые конструкции цилиндрических обечаек корпусов аппаратов. Днища выпуклые, конические, сферические неотбортованные, плоские. Требования к изготовлению днищ.*

8.1. Типовые конструкции цилиндрических обечаек корпусов аппаратов

Обечайка – цилиндрический или конический элемент замкнутого профиля, открытый с торцов.

Цилиндрические обечайки являются одним из основных элементов химических аппаратов. Из них образуется корпус аппарата, они входят составной частью в различные внутренние и наружные устройства аппаратов. Обечайки в основном изготавливают вальцовкой из листового проката, реже из труб.

Обечайки из листового проката имеют внутренний базовый диаметр по стандарту ГОСТ 9617-76 "Сосуды и аппараты. Ряды диаметров". Внутренний диаметр обечайки выбирается из стандартного ряда: 400, (450), 500, (550), 600, (650), 700, 800, 900, 1000, (1100), 1200, 1300, 1400, (1500), 1600, (1700), 1800, (1900),

2000, 2200, 2400, 2500, 2600, 2800, 3000, 3200, 3400, 3600, 3800,

4000, 4500 мм. Обечайки с внутренними диаметрами, которые приведены в скобках, допускается использовать для изготовления рубашек сосудов и т аппаратов.

Обечайки из труб имеют наружный базовый диаметр. Наружный диаметр обечаек из труб рекомендуется принимать из следующего ряда: 133, 159, 168, 219, 273, 325, 377, 426, 480, 530,

630, 720, 820, 920, 1020, 1120, 1220, 1320, 1420 мм.

Корпуса химических аппаратов состоят из одной или нескольких цилиндрических обечаек, соединенных между собой и с концевыми элементами кольцевыми сварными швами. В качестве концевых элементов применяются фланцы и днища различной конструкции.

При сварке корпуса сосуда или аппарата должны применяться, как правило, стыковые двухсторонние швы с полным проплавлением. Односторонние швы применяются в тех случаях, когда невозможно применить двустороннюю сварку. При этом сварка осуществляется на съемной или остающейся подкладке.

Вальцованные обечайки должны иметь как можно меньше сварных швов, особенно продольных, поэтому листы для их изготовления следует выбирать возможно больших размеров.

Объем сосудов и аппаратов должен соответствовать стандарту ГОСТ 13372-67 "Сосуды и аппараты. Ряд номинальных объемов". Стандарт устанавливает следующий ряд номинальных объемов сосудов и аппаратов: 0,01; 0,016; 0,025; 0,04; 0,063; 0,1; 0,125; 0,16; 0,2; 0,25; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125;

1690; 200; 250; 320; 400; 500 м³.

Корпуса аппаратов имеют следующие основные конструкции:

- с фланцем и днищем (рисунок 8.1); фланец может быть плоский приварной или приварной встык, днища могут быть плоские, выпуклые или конические;
- с фланцами с обеих сторон (царга);
- с днищами с обеих сторон (рисунок 8.2); днища могут быть выпуклыми или коническими, отбортованными или без отбортовки;
- с рубашками различной конструкции (рисунок 8.3);
- с кольцами жесткости или внутренними перегородками (рисунки 8.4, 8.5).

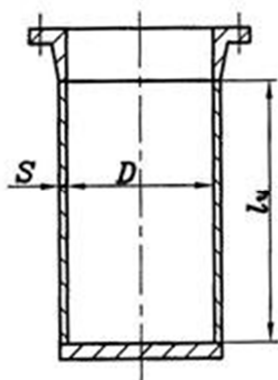
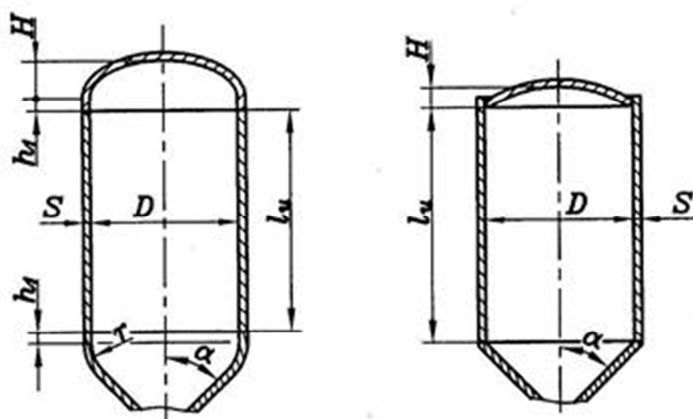


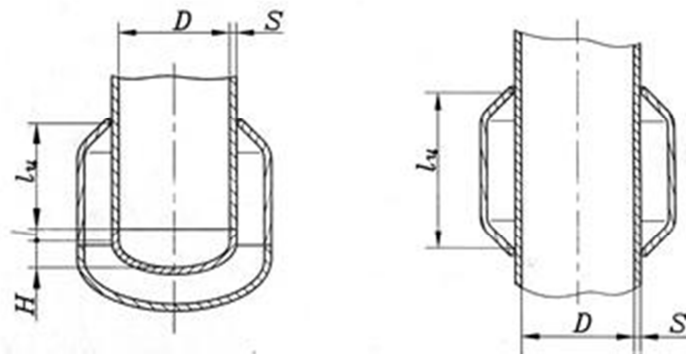
Рис. 8.1. Обечайка с фланцем и плоским днищем



а б

Рис. 8.2. Обечайки с выпуклыми или коническими днищами

a – обечайка с отбортованными днищами; *б* – обечайка с неотбортованными днищами



а б

Рис. 8.3. Обечайки с рубашками

a – обечайка с U – образной рубашкой; *б* – обечайка с цилиндрической рубашкой

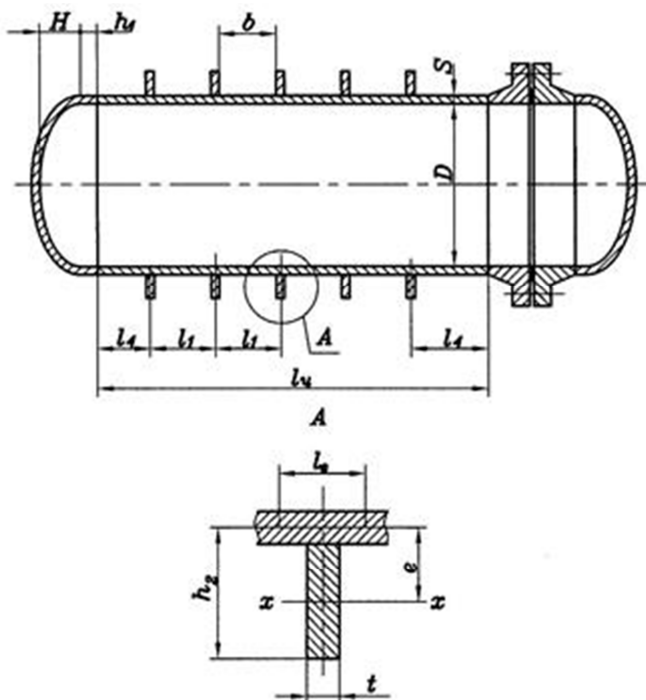


Рис. 8.4. Обечайки с кольцами жесткости

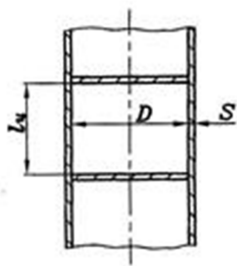


Рис. 8.5. Обечайки с внутренними перегородками

Кроме этого, корпус аппарата может состоять из цилиндрических обечаек разного диаметра, соединенных между собой коническими переходами (рисунок 8.6). Корпуса аппаратов могут быть вертикальными или горизонтальными.

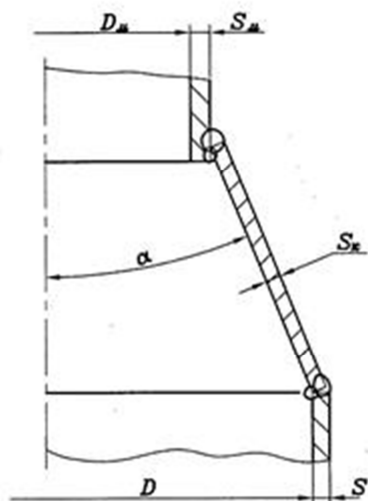


Рис. 8.6. Обечайки, соединенные коническим переходом

8.2. Конструкции днищ

Днища, так же как и обечайки, являются одним из основных элементов химических аппаратов. Цилиндрические корпуса как горизонтальных, так и вертикальных аппаратов с обеих сторон ограничиваются днищами. Днище может быть приварено к обечайке, т. е. являться неотъемной частью корпуса сосуда. Днище может являться составной частью отъемной крышки.

Наиболее распространенными формами днищ являются: эллиптические, полусферические, сферические неотбортованные, конические отбортованные и неотбортованные.

Эллиптические отбортованные днища

Конструкция и размеры эллиптических отбортованных днищ регламентируются ГОСТ 6533-78 "Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов". Днища изготавливают из углеродистых, легированных и двухслойных сталей с толщиной стенки от 4 до 120 мм. Диаметры цилиндрической отбортованной части от 133 до 1420 мм при базовом наружном диаметре и от 250 до 4500 мм при базовом внутреннем диаметре. Высота эллиптической части $H 0,25D$, радиус днища $R D$.

Сферические неотбортованные днища применяют в аппаратах, работающих под наливом или при давлении $P 0,07\text{МПа}$, за исключением сосудов, работающих под вакуумом. Допускается применять в качестве элемента фланцевых крышек при давлениях $P 1,6\text{МПа}$ в сосудах 1...4-й групп и сосудах, работающих под вакуумом. $0,8D$.

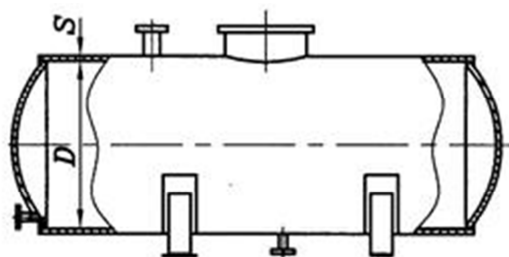


Рис. 8.7. Сосуд со сферическими неотбортованными днищами

Конические днища

1) Конические отбортованные днища с углами при вершине 60 и 90° (ГОСТ 12619-78)

Применяют в аппаратах, работающих под давлением, при диаметрах аппарата от 400 до 4000 мм.

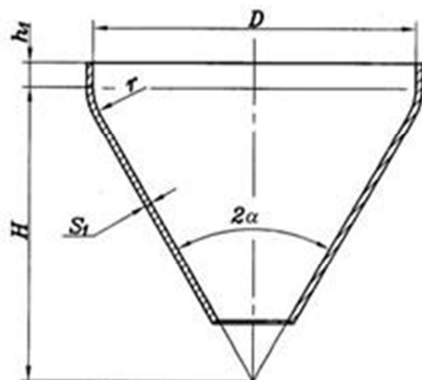


Рис. 8.8. Коническое отбортованное днище

2) Конические неотбортованные днища с углами при вершине 60,90 и 120 (ГОСТ 12620-78)

...Применяют в аппаратах, работающих под наливом или при давлении $P \leq 0,07$ МПа.

3) Конические неотбортованные днища с углом при вершине 140° (ГОСТ 12621-78)

...Применяют в горизонтальных аппаратах, работающих под наливом или при давлении $P \leq 0,07$ МПа.

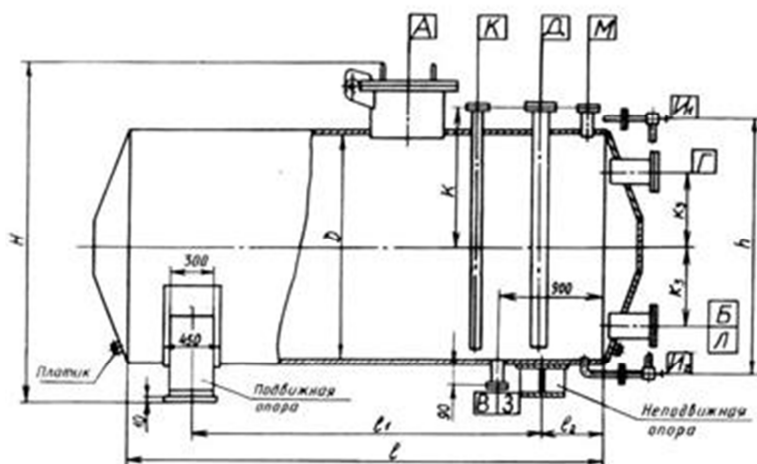


Рис. 8.9. Аппарат с коническими днищами с углом 140°

Наряду с коническими днищами в аппаратах применяют конические переходы, соединяющие обечайки разных диаметров (рисунок 8.6).

Плоские днища

1) Плоские отбортованные днища (ГОСТ 12622-78)

Изготавливают из листовой стали и применяют в аппаратах, работающих под наливом или при давлении P

2) Плоские неотбортованные днища (ГОСТ 12623-78)

Днища применяют в аппаратах, работающих под наливом или 0,07МПа.

3) Днища из поковок

Для аппаратов, работающих под давлением, применяются плоские днища, изготовленные из поковок.

8.3. Требования к изготовлению днищ

1. Выпуклые днища изготавливают штамповкой из плоских круглых заготовок, цельных или сваренных из нескольких частей. Способы раскроя заготовок регламентируются ГСТУ 3-17-1912000 (рисунок 8.10).

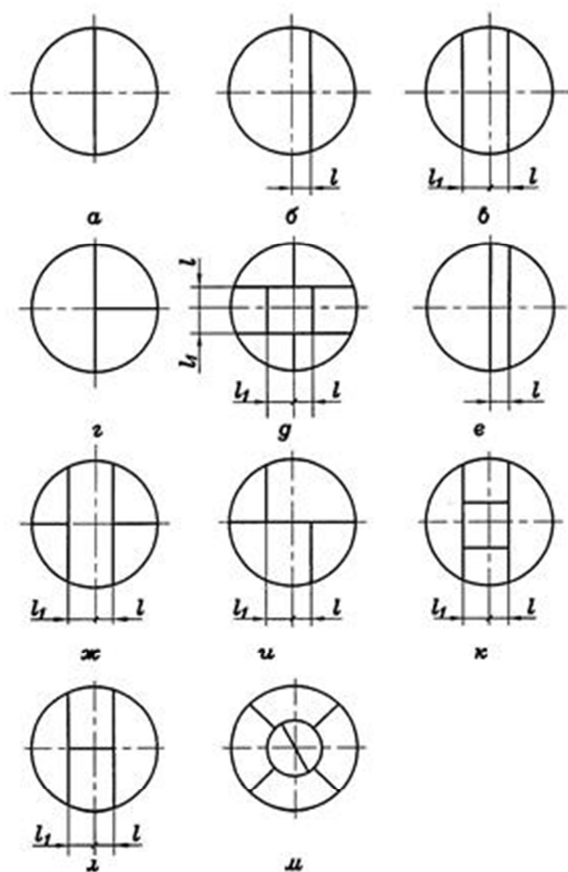


Рис. 8.10. Способы раскроя днищ

2. Допускается изготавливать выпуклые днища из штампованных лепестков и кругового сегмента. Количество лепестков не регламентируется. Если по центру днища расположен штуцер, то круговой сегмент допускается не изготавливать.
3. Сварные швы заготовок должны быть смещены относительно друг друга и относительно швов смежных обечаек на величину не менее 3-х толщин, но не менее 100 мм.
4. Отклонение внутреннего диаметра цилиндрической части отбортованных днищ не должно быть более $\pm 1\%$ от номинального диаметра. Относительная овальность должна быть не более 1%.
5. Для выпуклых днищ контроль формы осуществляют шаблоном. У плоских днищ контролируется их плоскостность после приварки.

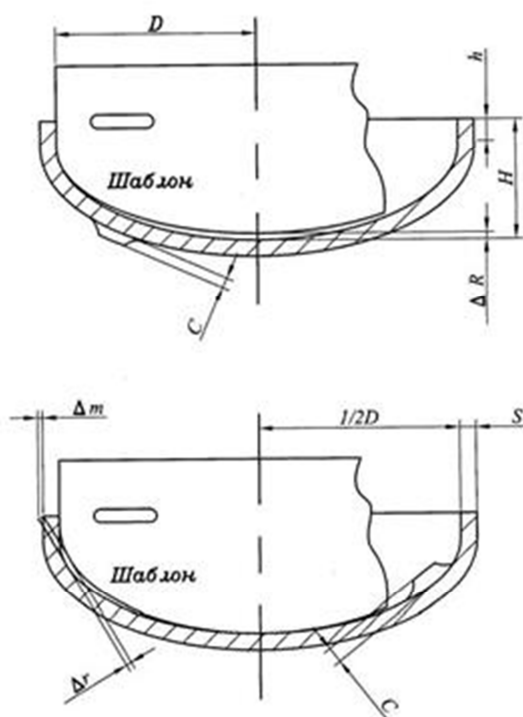


Рис. 8.11. Контроль формы эллиптических днищ шаблоном

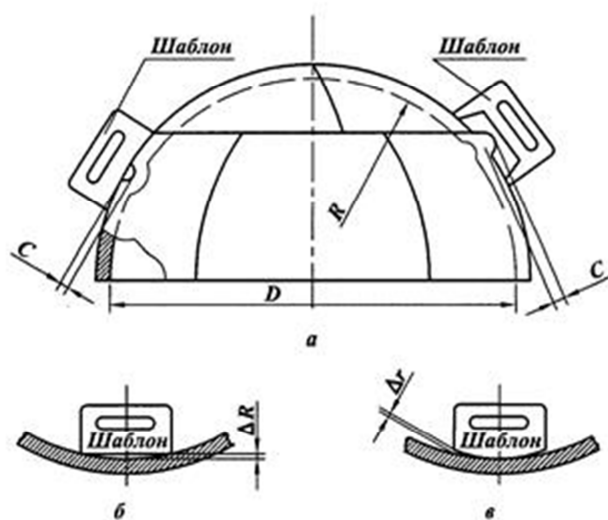


Рис. 8.12. Контроль формы полусферических днищ шаблоном

Контрольные вопросы к лекции 8

1. Конструкции днищ, применяющихся в аппаратах, работающих под давлением.
2. Какие днища называют выпуклыми?

3. Что такое отбортовка днищ? Какие днища изготавливают с отбортовкой? Назначение отбортовки.

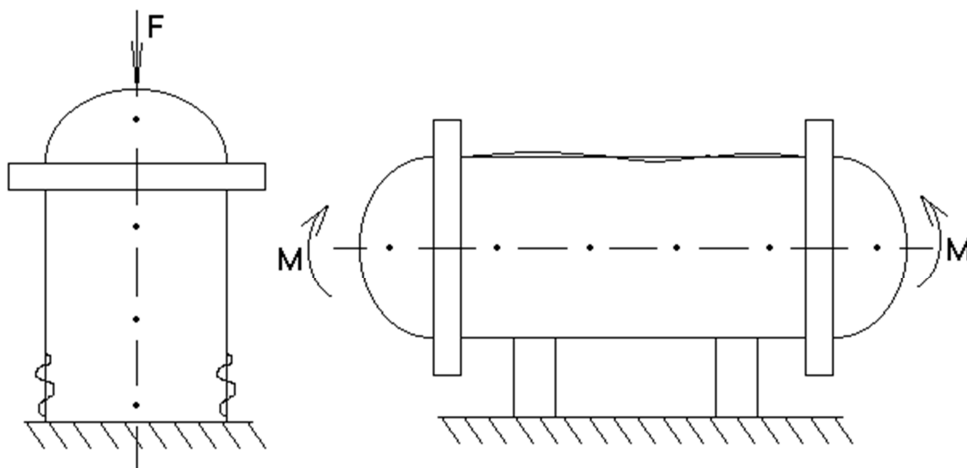
Лекция №9. Тема «Расчет тонкостенных аппаратов от действия наружного давления»

Рассматриваемые вопросы: *расчет тонкостенных оболочек от действия наружного давления, расчет на устойчивость, Выбор основных расчетных параметров для аппаратов, работающих под наружным давлением, проверочный и проектировочный расчет.*

9.1. Расчет тонкостенных аппаратов от действия наружного давления

От действия сжимающих нагрузок (продольной силы, осевой сжимающей силы (F), давления (P) и изгибающих моментов (M)) тонкостенные оболочки необходимо рассчитывать на прочность и устойчивость.

Под действием сжимающих нагрузок оболочки сплющиваются и выпучиваются продольными и поперечными волнами.



Если давление внутри аппарата больше 5 МПа, то толщина стенки, полученная из расчета на прочность от внутреннего давления, достаточна, дальнейшая проверка на устойчивость не требуется.

Потеря устойчивости происходит тогда, когда расчетные напряжения материала стенки аппарата меньше нормативно допускаемого их предела

текучести. В этом случае внутреннее давление достигает критического значения, величина которого зависит от формы, габаритных размеров и физико-механических свойств конструкционного материала из которого изготовлен аппарат.

Исследование устойчивости заключается в проверке выполняемости условия устойчивости:

$$\frac{P_p}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1 \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_p \leq [P] \\ P_{и} \leq [P]_{и} \end{array} \right\} \quad (2)$$

В числителе условия (1) и в левой части условия (2) расчетное давление и действующие силы. В знаменателе условия (1) и в правой части условия (2) – их допускаемые значения.

Значения допускаемых нагрузок:

$$[P] = \frac{[P]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P]_{\sigma}}{[P]_E} \right)^2}}; \quad [F] = \frac{[F]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\sigma}}{[F]_E} \right)^2}}; \quad [M] = \frac{[M]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\sigma}}{[M]_E} \right)^2}},$$

где $[P]_{\sigma}$, $[F]_{\sigma}$, $[M]_{\sigma}$ – допускаемая нагрузка из условия прочности;

$[P]_E$, $[F]_E$, $[M]_E$ – допускаемая нагрузка из условия устойчивости.



9.2. Выбор основных расчетных параметров для аппаратов, работающих под наружным давлением.

1. Расчетная температура (t_p).

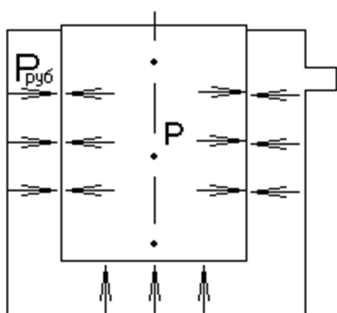
За расчетную принимают максимальную температуру среды, соприкасающейся со стенкой аппарата.

Если температура внутри аппарата ≤ 0 , то за расчетную принимают температуру равную 20°C .

2. Давление.

2.1. Расчетное давление (P_p).

2.1.1. Если аппарат с рубашкой:

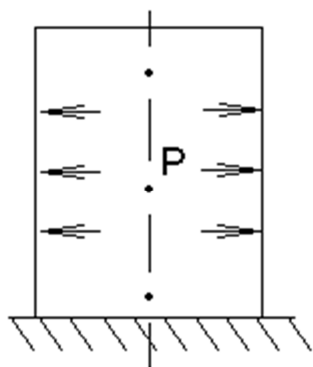


$$P_p = P_{руб.}$$

Если в аппарате есть рабочая среда, то

$$P_p = P_{руб} + P_{г.руб} \text{ если } \frac{P_{г.руб}}{P_{руб}} \cdot 100\% \geq 5\%$$

2.1.2. Если аппарат работает под атмосферным давлением.



$$P_p = P_{атм} - P_{ост},$$

где $P_{ост}$ – остаточное давление в аппарате.

$$P_{атм} = 0.1 \text{ МПа}$$

2.2. Пробное давление ($P_{и}$).

а) если $P_p \geq 0.5 \text{ МПа}$

$$P_{и} = 1.25 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$$

б) если $P_p < 0.5 \text{ МПа}$

$$P_{и} = 1.5 \cdot P_p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$$

3. Расчетная длина оболочки.

Оболочки от действия сжимающих нагрузок теряют устойчивость по-разному.

Длинные оболочки сплющиваются и выпучиваются с образованием двух полуволн. У коротких – число полуволн больше двух.

Критическая длина, делящая оболочки на длинные и короткие рассчитывается.

$$L_0 = 8.15 \cdot D \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (\delta - c_1)}}$$

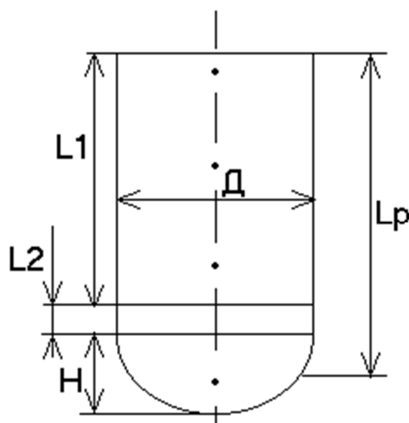
Если расчетная длина оболочки

$l_p \leq L_0$ – такая оболочка называется **короткой**,

если $l_p > L_0$ – то оболочка называется **длинной**.

При этом за l_p принято считать:

а) для аппаратов с цилиндрическим, эллиптическим и сферическим днищем:



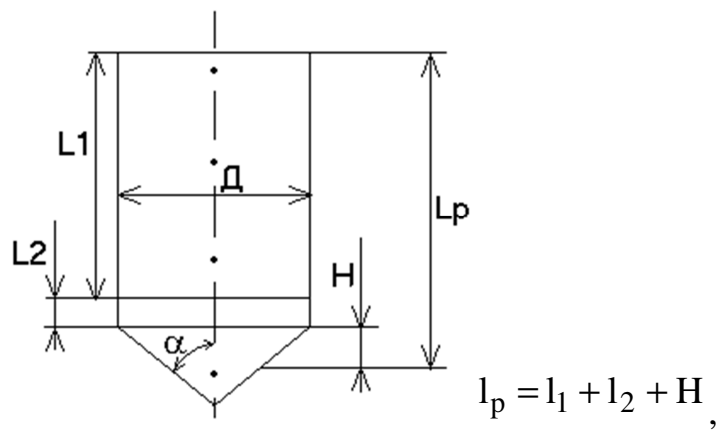
$$l_p = l_1 + l_2 + \frac{H}{3},$$

где $H = 0.25 \cdot D$ – внутренняя высота выпуклой части дна;

l_1 – высота цилиндрической части;

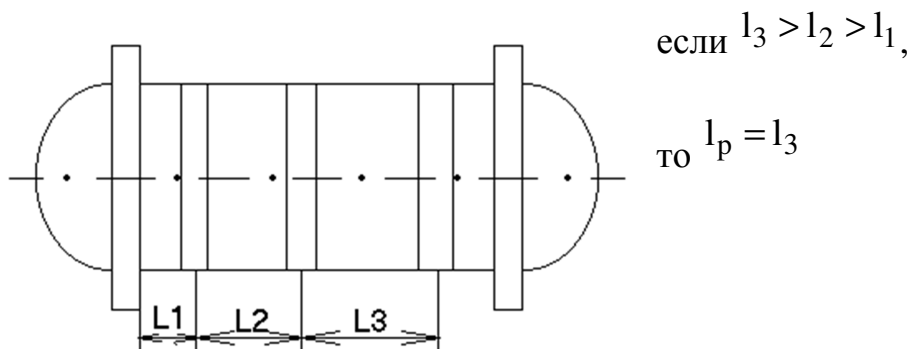
l_2 – высота отбортовки.

б) для аппаратов с коническим дном:



где
$$H = \frac{D}{3 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}$$

в) если оболочка подкреплена ребрами жесткости, то за расчетную длину принимают максимальное расстояние между кольцами:



4. Конструктивная прибавка, коэффициент прочности сварного соединения, модули, характеризующие упругость материала выбираются по той же схеме, что и аппараты, работающие под внутренним давлением (см. лекцию №1).

9.3. Расчет тонкостенных аппаратов, работающих под наружным давлением

9.3.1. Проектировочный расчет

Цель: рассчитать толщину стенки аппарата.

Производится по инженерной методике с использованием номограмм.

$$\delta = \delta_p + c$$

$$\delta_p = \max \left\{ K_2 \cdot D \cdot 10^{-2} \right. \\ \left. \frac{1.1 \cdot P_p \cdot D}{2 \cdot [\sigma]} \right\},$$

$$\text{где } K_1 = \frac{n_y \cdot P_p}{2.4 \cdot E \cdot 10^{-6}}; \quad K_3 = \frac{l_p}{D}.$$

K_2 является функцией от K_1 и K_3 и определяется по номограмме.

$$K_2 = f(K_1, K_3)$$

$n_y = 2,4$ – коэффициент запаса на устойчивость. 

9.3.2. Проверочный расчет

Для аппаратов с цилиндрическим днищем.

Цель: проверить выполняемость условий устойчивости (1) или (2) с полученной толщиной стенки.

$$\frac{P_p}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1$$

1. Допускаемое давление.

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

$$[P]_{\sigma} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_1)}{D + (\delta - c_1)} \quad \text{– допускаемое давление из условия прочности.}$$

Если $l_p \leq L_0$

$$[P]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot \frac{D}{l_p} \cdot \left[\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D}}.$$

По второму условию $P_{и} \leq [P]_{и}$:

$$[P]_{и} = \frac{[P_{и}]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P_{и}]_{\sigma}}{[P_{и}]_E}\right)^2}}$$

$$[P_{и}]_{\sigma} = \frac{2 \cdot [\sigma]_{и} \cdot (\delta - c_1)}{D + (\delta - c_1)}$$

$$[P_{и}]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E_{20}}{n_y} \cdot \frac{D}{l_p} \cdot \left[\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D}}, \quad \text{где } n_y = 1.8.$$

Если $l_p > L_0$:

$$[P]_E = \frac{2,21 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D} \right]^3$$

$$[P_{и}]_E = \frac{2,21 \cdot 10^{-6} \cdot E_{20}}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D} \right]^3, \quad \text{где } n_y = 1.8.$$

2. Допускаемая сила.

$$[F] = \frac{[F]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\sigma}}{[F]_E} \right)^2}}.$$

Осевая нагрузка: $[F]_{\sigma} = \pi \cdot [D + (\delta - c_1)] \cdot (\delta - c_1) \cdot [\sigma]$.

Если отношение $\frac{l_p}{D} \geq 10$, то допускаемая нагрузка из условия устойчивости выбирается как минимальная из рассчитываемых при двух условиях:

$$[F]_E = \min \left\{ \begin{matrix} [F]_{E1} \\ [F]_{E2} \end{matrix} \right\},$$

где $[F]_{E1}$ – допускаемая нагрузка из условия местной устойчивости;

$[F]_{E2}$ – допускаемая нагрузка из условия общей устойчивости.

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D}}$$

$$[F]_{E2} = \frac{\pi \cdot D + (\delta - c_1) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda_{\Gamma}} \right)^2,$$

где λ_{Γ} – приведенная гибкость.

$$\lambda_{\Gamma} = \frac{2.83 \cdot l_p}{D + (\delta - c_1)}$$

Если отношение $\frac{l_p}{D} < 10$, то допускаемая нагрузка из условия устойчивости рассчитывается только по местной устойчивости $[F]_{E1}$.

3. Допускаемый момент.

$$[M] = \frac{[M]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\sigma}}{[M]_E} \right)^2}}.$$

$$[M]_{\sigma} = 0.25 \cdot D \cdot [F]_{\sigma};$$

$$[M]_E = \frac{D}{3.5} \cdot [F]_{E1}.$$



9.4. Расчет на устойчивость аппаратов с коническим днищем (проверочный)

Расчет для конических аппаратов проводят по тем же формулам что и для цилиндрических, только во всех расчетных формулах, где встречается l_p , она заменяется эффективной длиной, а диаметр – эффективным внутренним диаметром.

$$l_p \rightarrow l_{\vartheta}$$

$$D_p \rightarrow D_{\vartheta}$$

$$l_{\vartheta} = \frac{D - D_0}{2 \cdot \sin(\alpha)}$$

$$D_{\vartheta} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{D + D_0}{2 \cdot \sin(\alpha)} \\ \frac{D}{\sin(\alpha)} - 0.3 \cdot (D - D_0) \cdot \sqrt{\frac{D + D_0}{100 \cdot (\delta - c_1)} \cdot \operatorname{tg}(\alpha)} \end{array} \right\}.$$

Расчетные формулы, которые отличаются от цилиндрических аппаратов:

$$[P]_{\sigma} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_1)}{\frac{D}{\cos(\alpha)} + (\delta - c_1)};$$

Допускаемое давление из условия прочности:

Допускаемая нагрузка из условия прочности:

$$[F]_{\sigma} = \pi \cdot D_F \cdot (\delta - c_1) \cdot \cos(\alpha) \cdot [\sigma],$$

где $D_F = \frac{0.9 \cdot D + 0.1 \cdot D_0}{\cos(\alpha)}$ – эффективный диаметр при осевом сжатии.

Допускаемая осевая нагрузка из условия местной устойчивости:

$$[F]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_F^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D_F} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (\delta - c_1)}{D_F}};$$

Допускаемый момент из условия прочности:

$$[M]_{\sigma} = 0.25 \cdot D_F \cdot [F]_{\sigma};$$

$$[M]_E = 0.285 \cdot D_9 \cdot [F]_{E1}.$$



9.5. Расчет на устойчивость выпуклых днищ и крышек (эллиптических и сферических)

9.5.1. Проектировочный расчет

$$\delta = \delta_p + c.$$

$$\delta_p = \max \left\{ \frac{K_9 \cdot D}{510} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot P_p}{10^{-6} \cdot E}}, \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot [\sigma]} \right\},$$

где K_9 – коэффициент выпуклости.

Для сферических $K_9 = 1$.

Для эллиптических $K_9 = 0.9$.



9.5.2. Проверочный расчет

Проверяют крышки и днища только по внутреннему давлению. Осевая нагрузка и изгибающий момент не учитываются.

$$\begin{cases} P_p \leq [P] \\ P_{и} \leq [P]_{и} \end{cases}.$$

$$[P] = \frac{[P]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P]_{\sigma}}{[P]_E} \right)^2}}; \quad [P]_{и} = \frac{[P]_{и\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P]_{и\sigma}}{[P]_{иE}} \right)^2}}.$$

Допускаемое давление из условия прочности:

$$[P]_{\sigma} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_1)}{2 + 0.5 \cdot (\delta - c_1)}; \quad [P]_{и\sigma} = \frac{2 \cdot [\sigma]_{и} \cdot (\delta - c_1)}{2 + 0.5 \cdot (\delta - c_1)};$$

Допускаемое давление из условия устойчивости:

$$[P]_E = \frac{1 + (2.4 + 8 \cdot x) \cdot x}{1 + (3 + 10 \cdot x) \cdot x},$$

где $x = 15 \cdot \frac{8 - c_1}{D}$ – расстояние от оси до опасного сечения.

Контрольные вопросы к лекции 9

1. В чем проявляются отличия при нагружении сосуда внутренним и наружным давлением?
2. Какое давление называется критическим?
3. Как проявляется потеря устойчивости формы?
4. Понятие длинных и коротких обечаек.
5. Как определяется расчетная длина гладкой цилиндрической обечайки?

6. По каким критериям определяется толщина цилиндрической обечайки?
7. Особенности расчета обечаек их двухслойных сталей.
8. Чем отличается расчет эллиптических днищ от полусферических днищ?
9. В каких зонах рассчитывается толщина сферических неотбортованных днищ?
10. Чем отличается расчет конических обечаек от цилиндрических?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

4. Смирнов Г.Г., Толчинский А.Р., Кондратьева Т.Ф. Конструирование безопасных аппаратов для химических и нефтехимических производств. – Л.: Машиностроение, 1988. – 303 с.
5. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи. Под ред. Михалева М.Ф. – Л.: Машиностроение, 1988. – 303 с.
9. ГОСТ 6533–78. Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры. – М.: Издательство стандартов, 1985.
10. ГОСТ 8731–74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1978. – 7 с.
11. ГОСТ 8732–74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент. М.: Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
12. ГОСТ 9617-76. Сосуды и аппараты. Ряды диаметров. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 3 с.
13. ГОСТ 10885–85. Сталь листовая горячекатанная двухслойная коррозионностойкая. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1985.
14. ГОСТ 12816 - 80. Фланцы арматуры, соединительных частей трубопроводов на P_y от 0,1 до 20,0 МПа. Общие технические требования.
15. ГОСТ 12820 - 80. Фланцы стальные плоские приварные на P_y от 0,1 до 2,5 МПа. Конструкция и размеры.
16. ГОСТ 12619–78. Днища конические отбортованные с углами при вершине 60 и 90°. Основные размеры. М.: Изд-во стандартов, 1978. – 22 с.

17. ГОСТ 12620–78. Днища конические неотбортованные с углами при вершине 60, 90 и 120°. Основные размеры. М.: Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
18. ГОСТ 12621–78. Днища конические неотбортованные с углом при вершине 140°. Основные размеры. М.: Изд-во стандартов, 1978. – 3 с.
19. ГОСТ 12622–78. Днища плоские отбортованные. Основные размеры. М.: Изд-во стандартов, 1978. – 4 с.
20. ГОСТ 12623–78. Днища плоские неотбортованные. Основные размеры. М.: Изд-во стандартов, 1978. – 4 с.
21. ГОСТ 13372-78. Сосуды и аппараты. Ряд номинальных объемов. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 2 с.
22. ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. – М.: Издательство стандартов, 1989.
23. ГОСТ 19903–74. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. – М.: Издательство стандартов, 1974.
24. ГОСТ 24755–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность укрепления отверстий. М.: Изд-во стандартов. 1989. – 31 с.
25. ГОСТ 25221–82. Сосуды и аппараты. Днища и крышки сферические неотбортованные. Нормы и методы расчета на прочность. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 6 с.
26. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках. М.: Изд-во стандартов, 1983. – 30 с

27. ГОСТ 25867–89. Сосуды и аппараты. Сосуды с рубашками. Нормы и методы расчета на прочность. М.: Изд-во стандартов, 1989. – 79 с.
28. ГОСТ 26202-84. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность обечаек и днищ от опорных нагрузок.
29. ГОСТ 26296 - 84. Лапы опорные подвесных сосудов и аппаратов. Основные размеры.
30. ГОСТ 28759.1-90. Фланцы сосудов и аппаратов. Типы и параметры. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 8 с.
31. ГОСТ 28759.2-90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 26 с.
32. ГОСТ 28759.3-90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные приварные встык. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 22 с.
33. ГОСТ 28759.4-90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные приварные встык под прокладку восьмиугольного сечения. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 11 с.
34. ГОСТ 28759.5-90. Фланцы сосудов и аппаратов. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 7 с.
35. ГОСТ 28759.6-90. Прокладки из неметаллических материалов. Конструкция и размеры. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 10 с.
36. ГОСТ 28759.7-90. Прокладки асбометаллические. Конструкция и размеры. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 7 с.
37. ГОСТ 28759.8-90. Прокладки металлические восьмиугольного сечения. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 5 с.

38. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. –

М.: Издательство стандартов, 1988. – 4 с.

39. ОСТ 26–2002–83. Люки с плоскими крышками стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция. Издание официальное, 1991. – 13 с.

40. ОСТ 26–2003–83. Люки со сферическими крышками стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция. Издание официальное, 1991. – 7 с.

41. ОСТ 26–2008–83. Крышки плоские люков стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция. Издание официальное, 1991. – 15 с.

42. ОСТ 26–2009–83. Крышки сферические люков стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция. Издание официальное, 1991. – 10 с.

43. ОСТ 26 - 2091 - 81. Опоры горизонтальных сосудов и аппаратов. Конструкция, размеры и технические требования.

44. АТК 24. 200.02 - 90 Заглушки фланцевые стальные. Конструкция, размеры и технические требования.

45. АТК 24.200.04-90. Альбом типовых конструкций. Опоры цилиндрические и конические вертикальных аппаратов. Типы и основные размеры. – 23 с.

46. РД 26–11–05–85. Сосуды и аппараты из двухслойной стали. Нормы и методы расчета на прочность.

47. РД 26-15-88. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность и герметичность фланцевых соединений. М.: НИИхиммаш, 1988. – 63 с.

48. Методические указания к выбору конструкционных материалов для стальных сварных сосудов и аппаратов для студентов специальности 7.090220/ Сост. А.И. Барвин, И.М. Генкина, В.В. Иванченко, Д.А. Куликов, В.Г. Табунщиков, Ю.Н. Штонда. – Северодонецк, СТИ, 2003. – 41 с.

49. Методические указания к расчету цилиндрических обечаек стальных сварных сосудов и аппаратов для студентов специальности 7.090220 / Сост. А.И. Барвин, И.М. Генкина, В.В. Иванченко, В.Г. Табунщиков, Г.В. Тараненко, Ю.Н. Штонда. – Северодонецк, СТИ, 2002. – 83 с.

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

51. Методические указания к расчету на прочность укрепления отверстий в обечайках, переходах и выпуклых днищах стальных сварных сосудов и аппаратов для студентов специальности 7.090220 / Сост. А.И. Барвин, И.М. Генкина, В.В. Иванченко, Д.А. Куликов, В.Г. Табунщиков, Г.В. Тараненко, Ю.Н. Штонда. – Северодонецк: СТИ, 2003. – 56 с.

Содержание

1.	Лекция 1. Тема " Введение "	3
1.1.	Задачи курса, его предмет и содержание	3
1.2.	Классификация химического оборудования и специфичность его работы	4
1.3.	Порядок проектирования и требования к проектируемому оборудованию	6
2.	Лекция 2. Тема "Материалы, применяемые для изготовления химического оборудования"	9
2.1.	Требования к материалам	9
2.2.	Влияние различных факторов на свойства материалов. Влияние свойств рабочей среды на выбор материала	13
2.3.	Влияние температуры и давления на выбор материала	16
2.4.	Классификация сталей	18
2.5.	Цветные металлы и сплавы	22
2.6.	Прокладочные материалы	24
3.	Лекция 3 Тема «Теории прочности, применяемые при расчетах М и АХП».	26
4.	Лекция №4. Тема «Тонкостенные оболочки».	28
4.1.	Оболочки вращения. Основные понятия и определения.	28
4.2.	Осесимметричные оболочки вращения. Их основные нагрузки и напряжения. Уравнения Лапласа.	29
5.	Лекция 5 Тема «Расчет цилиндрических тонкостенных оболочек, работающих под внутренним давлением».	32
5.1.	Проектировочный расчет	32
5.2.	Проверочный расчет	35
6.	Лекция 6. Тема "Элементы моментной теории тонкостенных оболочек "	36
6.1.	Причины возникновения краевых нагрузок	37
6.2.	Краевая задача. Определение краевых сил и моментов	39
7.	Лекция 7. Тема "Общие требования к сосудам, работающим под давлением"	44
7.1.	Основные термины	44
7.2.	Емкостные аппараты	45

7.3.	Общие требования к конструкции	51
7.4.	Общие требования к изготовлению	53
7.5.	Требования к конструкции и изготовлению цилиндрических обечаек и корпусов из них	53
8.	Лекция 8. Тема "Конструкции обечаек и днищ"	56
8.1.	Типовые конструкции цилиндрических обечаек корпусов аппаратов	56
8.2.	Конструкции днищ	60
8.3.	Требования к изготовлению днищ	63
9.	Лекция №9. Тема «Расчет тонкостенных аппаратов от действия наружного давления».	66
9.1.	Расчет тонкостенных аппаратов от действия наружного давления.	66
9.2.	Выбор основных расчетных параметров для аппаратов, работающих под наружным давлением.	67
9.3.	Расчет тонкостенных аппаратов, работающих под наружным давлением	71
9.3.1.	Проектировочный расчет	71
9.3.2.	Проверочный расчет	71
9.4.	Расчет на устойчивость аппаратов с коническим днищем (проверочный).	74
9.5.	Расчет на устойчивость выпуклых днищ и крышек (эллиптических и сферических).	75
9.5.1.	Проектировочный расчет	75
9.5.2.	Проверочный расчет	76
10.	Список литературы	78

Электронное учебное издание

Светлана Владимировна **Лапшина**

Конструирование и расчет элементов оборудования

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2020 г. Поз. № 36.

Подписано к использованию 01.12.2020. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 5,31.

Волгоградский государственный технический университет.

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.