

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический
университет им. Д.И.Менделеева»

Новомосковский институт (филиал)

Сафонов Б.П.

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Часть 1

Учебное пособие по КРЭО

Изд. 3-е, переработанное и дополненное

Новомосковск
2018

УДК 66.02(075.8)
ББК 35.11:35.514
С 217

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор В.К. Сидорчук
(ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И.Менделеева, Новомосковский институт)
кандидат технических наук Трещев С.Г.
(ОАО НИАП, г. Новомосковск)

Сафонов Б.П.

С 217 Расчет элементов химического оборудования. Часть 1. Учебное пособие по КРЭО. Изд. 3-е, переработанное и дополненное / ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И.Менделеева, Новомосковский институт (филиал); Новомосковск, 2018. – 123 с.

ISBN 978-5-7237-0807-5

Учебное пособие посвящено вопросам расчета на прочность элементов тонкостенных аппаратов, работающих под внутренним и внешним давлением, а также аппаратов высокого давления.

Пособие содержит основные определения, расчётные формулы и примеры расчёта по всем рассматриваемым в пособии темам, а также контрольные задачи. В приложении представлена табличная информация, необходимая для решения контрольных задач.

В пособии приводится 42 примера расчёта по разным темам, рассмотренным в пособии. Пособие содержит 39 контрольных задач, каждая из которых имеет 20 вариантов исходных данных. Приложение содержит 17 справочных таблиц, использование которых позволяет решать задачи, не привлекая дополнительную учебную литературу, что делает пособие удобным для использования на занятиях в аудитории. В 3-е издание пособия добавлен раздел, в котором рассмотрены вопросы конструирования, изготовления, монтажа, эксплуатации химического оборудования и конструктивные решения снижения массы элементов оборудования и конструкций.

Учебное пособие предназначено для бакалавров профиля «Машины и аппараты химических производств», а также бакалавров других инженерных профилей, изучающих дисциплины проектно-конструкторского цикла всех форм обучения.

Рис. 26, табл. 72, библиогр. список 17 назв.

УДК 66.02(075.8)
ББК 35.11:35.514

ISBN 978-5-7237-0807-5

© Сафонов Б.П.
© ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И.Менделеева, Новомосковский институт (филиал); Новомосковск, 2018

Предисловие

Учебная дисциплина «Конструирование и расчёт элементов оборудования» является одной из основополагающих дисциплин, при изучении которой у студента формируются знания и умения в области расчёта и конструирования типовых элементов оборудования. При изучении КРЭО студентом привлекаются знания, приобретённые на младших курсах при изучении математики, материаловедения и технологии металлов, сопротивления материалов и деталей машин, процессов и аппаратов химической технологии и др.

Настоящее учебное пособие посвящено рассмотрению вопросов расчёта на прочность элементов тонкостенных и толстостенных аппаратов. Пособие содержит основные определения, расчётные формулы и примеры расчёта по всем рассматриваемым в пособии темам, а также контрольные задачи. В Приложении представлена информация, необходимая для решения контрольных задач.

В пособии рассмотрено 42 примера расчёта элементов оборудования по темам: исходные данные для расчёта на прочность элементов оборудования, элементы теории напряжённого состояния, расчёт несущей способности элементов оборудования, расчёт на прочность тонкостенных корпусов аппаратов, расчёт укрепления отверстий тонкостенных аппаратов, расчёт устойчивости формы тонкостенных аппаратов, расчёт на прочность корпусов аппаратов высокого давления (АВД).

Контрольные задачи представлены многовариантными. Всего в учебном пособии содержится 39 задач, каждая из которых имеет 20 вариантов исходных данных. Задачи учебного пособия могут быть использованы также при разработке контрольных тестов по КРЭО. Приложение содержит 17 таблиц, использование которых позволяет решать задачи, не привлекая дополнительную учебную литературу, что делает пособие удобным для использования на занятиях в аудитории. Во втором издании учебного пособия приведена информация по британской и американской единицам измерения давления и переводным коэффициентам для их пересчёта в МПа, кгс/см² и мм. рт. ст., а также увеличено число рассмотренных примеров, контрольных задач и таблиц Приложения.

Учебное пособие предназначено для бакалавров профиля «Машины и аппараты химических производств», а также бакалавров других инженерных профилей подготовки, изучающих дисциплины проектно-конструкторского цикла всех форм обучения.

Пожелания по улучшению изложенного в учебном пособии материала просим направлять на кафедру «Оборудование химических производств» НИ РХТУ им. Д.И.Менделеева по адресу 301665 г. Новомосковск Тульской области, ул. Дружбы 8 или по электронной почте k_ohp@nirhtu.ru.

Условные обозначения, используемые в тексте

Русские символы

[П] – скорость коррозии, мм/год

Латинские символы

A, B – размеры листа заготовки для конического днища, м; мм

A_δ – наименьшее (допустимое) расстояние между центрами двух смежных отверстий, при укреплении которых не требуется учитывать их взаимное влияние, м; мм

$A_{\text{ср}}$ – ширина обтюраторного кольца по средней линии уплотнительной поверхности, м

c – конструктивная прибавка к расчётной толщине стенки, мм

CE – углеродный эквивалент, %

$D_{\text{в}}$ – внутренний диаметр аппарата, м

$D_{\text{н}}$ – наружный диаметр аппарата, м

D_y (DN) – диаметр условного прохода

$D_{\text{ср}}$ – средний диаметр уплотнительной поверхности двухконусного обтюратора, м

d_δ – допустимый диаметр отверстия, не требующего укрепления, м

d_y – условный диаметр одиночного отверстия при расчёте укрепления взаимовлияющих отверстий, м; мм

$d_{\text{ш}}$ – диаметр гладкой части (шейки) шпилек АВД, м; мм

d_0 – диаметр центрального (осевого) отверстия шпильки АВД, м; мм

$D_{\text{н кр}}$ – наружный диаметр крышки АВД, м; мм

$d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия под шпильку в крышке АВД, м; мм

d_i – диаметр технологического отверстия в днище (крышке) АВД, м; мм

E – модуль нормальной упругости (модуль Юнга) материала, МПа (кгс/см²)

F – площадь поперечного сопротивления элемента конструкции, см²; м²

F_0 – расчётная площадь поперечного сечения металла удалённого вырезом, мм²; м²

F_i – площадь поперечного сечения укрепляющего элемента, мм²; м²

$[F]_\sigma$ – допускаемая осевая сжимающая сила из условия прочности, МН

$[F]_E$ – допускаемая осевая сжимающая сила из условия устойчивости, МН

$[F]$ – допускаемая осевая сжимающая сила из условия прочности и устойчивости, МН;

$F_{\text{ц}}, F_{\text{дн}}, F_{\text{к}}, F_{\Sigma}$ – поверхность обечайки, эллиптического днища, конического днища, общая аппарата, соответственно, м²

H_p – расчётная толщина крышки АВД, м; мм

h – высота борта эллиптического днища, м; мм

$h_{\text{в}}$ – внутренняя высота выпуклой части эллиптического днища, м; мм

$h_{\text{к}}$ – высота конического днища, м; мм

$h_{\text{пр}}$ – высота профиля, м; см

KCU_{min} – гарантированный уровень ударной вязкости материала при рабочей

температуре, Дж/см² (кгс·м/см²)

L – расчётная длина обечайки, высота аппарата, м; мм

$L_{ц}$, L_{Σ} – высота цилиндрической части, общая высота аппарата, соотв., м

l_0 – характеристическая длина обечайки, работающей под внешним давлением, м; мм

l_k – длина образующей конического днища, м; мм

n – нормаль к площадке, на которой определяются напряжения

n_T , n_B , n_d – коэффициент запаса прочности по пределам текучести, прочности и длительной прочности, соответственно

n_y – коэффициент запаса устойчивости

P – продольная сила, Н (кгс)

$P_{\max}$ – максимальная расчётная нагрузка, Н; Н/м; Н/м²; Н/м³; Н·м

$[p]$ – допустимое внутреннее давление оболочки или сосуда, МПа (кгс/см²)

$[p_n]_{\sigma}$ – допустимое наружное давление оболочки из условия прочности, МПа (кгс/см²)

$[p_n]_E$ – допустимое наружное давление оболочки из условия устойчивости, МПа (кгс/см²)

$[p_n]$ – допустимое наружное давление оболочки из условия прочности и устойчивости, МПа (кгс/см²)

$p_{вн}$ – внешнее давление, МПа (кгс/см²)

p_r – гидростатическое давление, МПа (кгс/см²)

$p_{ост}$ – остаточное давление в аппарате, МПа (кгс/см²)

$p_{нр}$ – наружное расчётное давление, МПа (кгс/см²)

$p_{раб}$ – рабочее давление, МПа (кгс/см²)

$p_{раб\ 5PM}$ – рабочее давление для арматуры, МПа (кгс/см²)

p_p – расчётное давление, МПа (кгс/см²)

p_y – условное давление, МПа (кгс/см²)

$p_{y\ арм}$ – условное давление для арматуры, МПа (кгс/см²)

$p_{пр}$ – пробное (гидравлического испытания) давление, МПа (кгс/см²)

$p_{пр\ арм}$ – пробное (гидравлического испытания) давление для арматуры, МПа (кгс/см²)

Q_d – равнодействующая внутреннего давления АД, МН

Q_B – осевая составляющая равнодействующей внутреннего давления АД, МН

q – интенсивность распределённой нагрузки, Н/м

R – радиус оболочки, м

s_p , s – расчетная и исполнительная толщина стенки, соответственно, мм

T – крутящий (вращающий) момент, Н·м

T_p – температура подогрева при сварке, град С

t_p – расчётная температура, град С

$t_{раб}$ – рабочая температура, град С

V – объём полости аппарата, м³

V_k – вместимость конического днища, м³

W_x, W_y – осевой момент сопротивления сечения, см^3 ; м^3

W_p – полярный момент сопротивления сечения, см^3 ; м^3

z – число шпилек крышки АД

Греческие символы

α – угол наклона площадки к оси с напряжением σ_1 , град

α_k – угол конуса конического днища, град

$\alpha_{\text{эк}}$ – коэффициент экономичности профиля при изгибе

β – коэффициент толстостенности АД

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – относительные удлинения, м/м

μ – коэффициент Пуассона материала

ρ_m – первый главный радиус кривизны срединной поверхности оболочки (радиус кривизны в направлении меридиана)

ρ_k – второй главный радиус кривизны срединной поверхности оболочки (радиус кривизны в направлении, перпендикулярном меридиану)

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, МПа (кгс/см^2)

$\sigma_{\varepsilon/\tau}^t$ – предел ползучести при температуре t (град С) деформация ε (%) за время τ (часов), МПа (кгс/см^2)

σ_{τ}^t – предел длительной прочности при температуре t (град С) за время τ (часов), МПа (кгс/см^2)

σ_a – нормальное напряжение на произвольной площадке, МПа (кгс/см^2)

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные напряжения в некоторой точке элемента конструкции, МПа (кгс/см^2)

$\sigma_{\text{расч}}^{\text{II}}, \sigma_{\text{расч}}^{\text{III}}, \sigma_{\text{расч}}^{\text{IV}}$ – расчётные напряжения в некоторой точке по II, III, IV теориям прочности, МПа (кгс/см^2)

σ_b – предел прочности материала, МПа (кгс/см^2)

$\sigma_{\tau}, \sigma_{0,2}$ – предел текучести физический, условный, соответственно, МПа (кгс/см^2)

σ_{max} – максимальное нормальное напряжение, МПа (кгс/см^2)

$[\sigma]_{20}$ – допускаемое напряжение при 20°C , МПа (кгс/см^2)

$[\sigma]_t$ – допускаемое напряжение при температуре t , МПа (кгс/см^2)

$[\sigma]_{\text{и}}$ – допускаемое напряжение при температуре испытания, МПа (кгс/см^2)

σ_m – меридиональное напряжение, МПа (кгс/см^2)

σ_k, σ_t – кольцевое (окружное) напряжение, МПа (кгс/см^2)

τ_a – касательное напряжение на произвольной площадке, МПа (кгс/см^2)

$\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ – касательные напряжения в некоторой точке элемента конструкции, МПа (кгс/см^2)

τ_{max} – максимальное касательное напряжение, МПа (кгс/см^2)

φ – коэффициент прочности сварного шва

φ_k – угол развёртки конического днища, град

ψ – коэффициент ослабления отверстиями днища АД

Введение

Проектирование химических производств предполагает ведение авторского надзора за строительством и монтажом спроектированных производств, составление заказных спецификаций на типовое оборудование, разработку и согласование чертежей нетипового оборудования с машиностроительными заводами, участие в монтаже и пуске химических производств.

При проектировании химического оборудования должно быть обеспечено выполнение следующих основных требований к объектам проектирования:

- *механическая прочность* – способность элемента оборудования выдерживать рабочие нагрузки; обеспечивается соблюдением при проектировании соответствующих расчётных нормативов (см. ГОСТ Р 52857.1–2007...ГОСТ Р 52857.12–2007 и др.); сохранение прочности объектов проектирования является основным условием безопасной эксплуатации сосудов, аппаратов и машин;
- *устойчивость* – способность аппаратов сохранять в рабочем состоянии свою первоначальную форму; достигается учётом силовых факторов, способствующих потери проектируемым объектом устойчивости (опрокидывающий момент от ветровой нагрузки для вертикальных аппаратов; внешнее давление для аппаратов, работающих под разрежением, а также для аппаратов с рубашкой и др.);
- *герметичность* – способность сосуда, аппарата или машины не пропускать находящуюся в них под давлением рабочую среду; утечка рабочей среды в условиях химического производства может привести к аварии и (или) отравлению обслуживающего персонала; герметичность оборудования достигается использованием цельносварных конструкций или установкой уплотнений в разъёмных соединениях (подвижных и неподвижных);
- *долговечность* – способность компонентов проектируемого объекта выполнять свои функции в течении определённого времени (расчётный срок службы); при проектировании срок службы принимают равным 10–15 годам (в часах примерно 100000–150000); долговечность – основное условие безаварийной эксплуатации подвижных соединений (трибосопряжений) деталей машин, а также элементов аппаратов, подверженных старению (элементы, работающие при высокой температуре под нагрузкой)

Кроме названных основных требований проектируемое оборудование должно быть: высокопроизводительным; простым по устройству, обслуживанию и ремонту; надёжным и безопасным при эксплуатации; технологичным (достижение оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте); транспортабельным (возможность транспортирования к месту монтажа по железной дороге); экологичным (дружественным к окружающей среде).

1. Исходные данные для расчёта на прочность элементов оборудования

Основными параметрами работы элементов химического оборудования являются: рабочая температура, рабочее давление и состав рабочей среды. Для химического оборудования характерно изменение рабочих параметров в широких пределах. Так рабочие температуры изменяются от -260°C для элементов установок разделения воздуха до $+1200^{\circ}\text{C}$ – элементы печей; рабочие давления достигают величин порядка 30 МПа (300 кгс/см^2); состав рабочих сред также отличает чрезвычайно большое разнообразие.

1.1. Температура

Температура – один из основных параметров технологического процесса в аппарате. В России, как и в большинстве индустриальных стран, наиболее употребительными являются температурные шкалы: Кельвина (единица – кельвин, К), Цельсия (единица – градус Цельсия, $^{\circ}\text{C}$), Фаренгейта (единица – градус Фаренгейта, $^{\circ}\text{F}$). Формулы взаимного перевода для основных температурных шкал представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Формулы перевода температур разных шкал

	Температура по Кельвину	Температура по Цельсию	Температура по Фаренгейту
Температура по Кельвину	$K = K$	$K = ^{\circ}\text{C} + 273,15$	$K = 0,56 \cdot (^{\circ}\text{F} - 32) + 273,15$
Температура по Цельсию	$^{\circ}\text{C} = K - 273,15$	$^{\circ}\text{C} = ^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C} = 0,56 \cdot (^{\circ}\text{F} - 32)$
Температура по Фаренгейту	$^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot (K - 273,15)$	$^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot ^{\circ}\text{C} + 32$	$^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{F}$
Пример: $20^{\circ}\text{C} = 293 \text{ K} = 68^{\circ}\text{F}$			

Рабочая температура $t_{\text{раб}}$ – температура среды, соприкасающейся со стенками аппарата при нормальном протекании в нём технологического процесса.

Расчётная температура t_p – наибольшая температура стенки сосуда или аппарата, определённая на основании теплотехнических расчётов или результатов испытаний, или опыта эксплуатации аналогичных сосудов.

При $t_{\text{раб}} < 20^{\circ}\text{C}$ за расчётную температура принимают $t_p = 20^{\circ}\text{C}$. При защите аппарата футеровкой t_p принимают равной температуре поверхности футеровки, соприкасающейся со стенкой аппарата.

Давление

Давление – величина, характеризующая интенсивность сил, действующих на какую-нибудь часть поверхности тела по направлениям, перпендикулярным к этой поверхности. Давление равно отношению силы, равномерно распределённой по нормальной к поверхности, к площади этой поверхности.

Следует различать абсолютное и т.н. избыточное или приборное давление (его ещё называют «действующим» или «манометрическим»). Абсолютное давление $p_{абс}$ – это сумма атмосферного p_a и избыточного $p_{изб}$ давлений

$$p_{абс} = p_a + p_{изб} \quad (1.1)$$

В технических расчётах, говоря о давлении, имеют ввиду именно избыточное давление. При этом следует помнить, что:

- избыточное давление измеряется относительно атмосферного;
- ноль избыточного давления равен атмосферному давлению;
- абсолютный вакуум равен «минус одной атмосфере» избыточного давления и, при этом, равен нулю абсолютного давления.

Единица давления СИ – паскаль, $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Внесистемные единицы давления: атмосфера техническая – ат, $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2$; миллиметр ртутного столба, $1 \text{ мм рт.ст.} = 130 \text{ Па}$. Внесистемными британскими и американскими единицами давления является: psi (пси), $1 \text{ psi} = 1 \text{ фунт-сила/кв. дюйм}$ и psf (рсф), $1 \text{ psf} = 1 \text{ фунт-сила/кв. фут}$. Коэффициенты для пересчёта единиц давления представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Коэффициенты пересчёта единиц давления

	МПа	кгс/см ² (ат)	мм рт. ст.	psi	psf
МПа	1	10,2	7500	145	$2,1 \cdot 10^4$
кгс/см ² (ат)	0,098	1	735	14,21	2049
мм рт. ст.	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	1	0,019	2,79
psi	$6,89 \cdot 10^{-3}$	0,07	51,7	1	144
psf	$4,78 \cdot 10^{-5}$	$4,88 \cdot 10^{-4}$	0,36	0,0069	1

Пример пользования таблицей.

Переведём в другие единицы давление $p = 2,3 \text{ МПа}$. Для перевода используем множители из строки МПа. Получаем $p = 2,3 \cdot 1 \text{ МПа} = 2,3 \cdot 10,2 \text{ кгс/см}^2 = 2,3 \cdot 7500 \text{ мм рт. ст.} = 2,3 \cdot 145 \text{ psi} = 2,3 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \text{ psf}$.

В нормативных документах по методикам расчёта аппаратов на прочность содержатся понятия рабочего, расчётного, пробного и условного давления.

Рабочее давление $p_{раб}$ – максимальное внутреннее избыточное или наружное давление, возникающее при нормальном протекании рабочего процесса, без учёта гидростатического давления среды и без учёта допустимого

кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана или других предохранительных устройств.

Расчётное давление p_r – давление для элементов сосудов и аппаратов, на которое проводят их расчёт на прочность. Расчётное давление принимают, как правило, равным рабочему давлению или выше. Расчётное давление должно учитывать: внутреннее (внешнее) давление; гидростатическое давление от среды, содержащейся в сосуде (если гидростатическое давление превышает 5% рабочего давления); нестабильность перерабатываемых сред и технологического процесса; инерционные нагрузки при движении или сейсмических воздействиях.

Гидростатическое давление p_r среды в аппарате высотой L определится

$$p_r = \rho \cdot g \cdot L, \quad (1.2)$$

здесь ρ – плотность среды, кг/м^3 ; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

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

Пробное давление $p_{пр}$ – давление в сосуде или аппарате, при котором проводится испытание сосуда или аппарата.

Таблица 1.3 - Условия проведения гидравлических испытаний

Сосуды	Рабочее давление $p_{\text{раб}}$, МПа	Пробное давление $p_{\text{пр}}$, МПа
Все, кроме литых	$< 0,5$	$\max \{1,5 p_{\text{раб}} \cdot [\sigma]_{20}/[\sigma]_t; 0,2\}$ (1.3)
	$\geq 0,5$	$\max \{1,25 p_{\text{раб}} \cdot [\sigma]_{20}/[\sigma]_t; (p_{\text{раб}} + 0,3)\}$ (1.4)
Литые	Независимо от давления	$\max \{1,5 p_{\text{раб}} \cdot [\sigma]_{20}/[\sigma]_t; 0,3\}$ (1.5)

Примечания:

1. $[\sigma]_{20}$, $[\sigma]_t$ – допускаемое напряжение для материала сосуда или его элементов соответственно при 20°C и рабочей температуре.
2. Для сосудов, работающих при отрицательной температуре, p_n принимается таким же, как при температуре 20°C.
3. Для сосудов, работающих при температуре стенки от +200°C до +400°C, p_n не должно превышать рабочее давление $p_{\text{раб}}$ более, чем в 1,5 раза, а при температуре +400°C – более, чем в 2 раза.

Сосуды	Рабочее давление $p_{\text{раб}}$, МПа	Пробное давление $p_{\text{пр}}$, МПа
4. Для сосудов высотой более 8 м $p_{\text{пр}}$ принимается с учётом гидростатического давления в рабочих условиях.		

Условное (номинальное) давление p_y – наибольшее избыточное рабочее давление при расчётной температуре 20°C, при котором обеспечивается длительная работа сосудов и аппаратов, их сборочных единиц и деталей, имеющих определённые размеры, обеспеченные расчётом на прочность при выбранных материалах и характеристиках прочности их при температуре 20°C. Для стандартизации металлических аппаратов и их узлов ГОСТ 9493–80 устанавливает следующий ряд значений p_y в МПа: 0,1; 0,16; 0,25; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100.

Опираясь на значения рабочего давления $p_{\text{раб}}$ и рабочей температуры $t_{\text{раб}}$ выбирают условное давление p_y для стандартного аппарата. В таблицах П1 и П2 указаны эти данные для теплообменных аппаратов и аппаратных фланцев.

Давление пробное для арматуры $p_{\text{пр.арм}}$ (ГОСТ 356–80) – избыточное давление, при котором должно проводиться гидравлическое испытание арматуры и деталей трубопровода на прочность и плотность водой при температуре не менее 278 К (5°C) и не более 343 К (70°C), если в нормативно-технической документации не указано конкретное значение этой температуры. Пример обозначение пробного давления для арматуры 6 МПа (60 кгс/см²) – $p_{\text{пр.арм}}$ 60.

Пробное давление для арматуры определяется по таблицам ГОСТ 356–80 для сталей 15ХМ и др. в зависимости от рабочего давления $p_{\text{раб}}$ и температуры. Допускается изготавливать арматуру и детали трубопровода на конкретное $p_{\text{раб}}$ и температуру, не предусмотренные ГОСТ 356–80. В этих случаях $p_{\text{пр.арм}}$ следует определять по формуле

$$p_{\text{пр.арм}} = \kappa \cdot p_{\text{раб}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}, \quad (1.6)$$

где $[\sigma]_{20}$, $[\sigma]$ – допускаемые напряжения материала при температуре 290 К (20°C) и наибольшей температуре среды соответственно, МПа (кгс/см²); κ – поправочный коэффициент, принимаемый по таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Значения поправочного коэффициента κ при определении пробного давления для арматуры

$p_{\text{раб}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$, МПа (кгс/см ²)	κ
до 20 (200) включ.	1,50
Св. 20 (200) до 56 (560) включ.	1,40
Св. 56 (560) до 65 (650) включ.	1,30
Св. 65 (650)	1,25

Значения $p_{\text{пр.арм}}$ для арматуры и деталей трубопровода, предназначенных на $p_{\text{пр.арм}}$ менее 0,1 МПа (1 кгс/см²) или для работы при вакууме должно устанавливаться стандартами или нормативно-технической документацией (НТД) на конкретные изделия. При отсутствии таких стандартов и НТД значения $p_{\text{пр}}$ принимаются равным: при рабочем давлении менее 0,1 МПа (1 кгс/см²) $p_{\text{пр.арм}} = p_{\text{раб.арм}} + 0,1$ МПа (1 кгс/см²); при вакууме $p_{\text{пр.арм}} = 0,15$ МПа (1,5 кгс/см²)

Давление рабочее для арматуры $p_{\text{раб.арм}}$ (ГОСТ 356–80) – наибольшее избыточное давление, при котором обеспечивается заданный режим эксплуатации арматуры и деталей трубопроводов.

Пример обозначение рабочего давления для арматуры 25 МПа (250 кгс/см²) при температуре 803 К (530 °С) – $p_{\text{раб.арм}} 250/803$ (530).

Давление условное для арматуры $p_{\text{у.арм}}$ (ГОСТ 356–80) – наибольшее избыточное давление при температуре среды 293 К (20 °С), при котором допустима длительная работа арматуры и деталей трубопровода, имеющих заданные размеры, обусловленные расчётом на прочность, при выбранных материалах и характеристиках их прочности, соответствующих температуре 293 К (20 °С).

Пример обозначение условного давления для арматуры 4 МПа (40 кгс/см²) — $p_{\text{у.арм}} 40$.

По ГОСТ 356–80 значения $p_{\text{у.арм}}$ арматуры и деталей трубопровода должны соответствовать следующему ряду: 0,1 (1,0); 0,16 (1,6); 0,25 (2,5); 0,4 (4,0); 0,63 (6,3); 1,00 (10); 1,60 (16); 2,50 (25); 4,00 (40); 6,30 (63); 10,00 (100); 12,50 (125); 16,00 (160); 20,00 (200); 25,00 (250); 40,00 (400); 50,00 (500); 63,00 (630); 80,00 (800); 100,00 (1000); 160,00 (1600); 250,00 (2500) МПа (кгс/см²).

ГОСТ 356–80 содержит значения избыточных давлений $p_{\text{у.арм}}$, $p_{\text{пр.арм}}$ для $p_{\text{раб.арм}}$ при различных рабочих температурах для ряда марок конструкционных сталей.

Примеры обозначений давлений для арматуры по ГОСТ 356–80:

- условное давление 4 МПа (40 кгс/см²) – $p_{\text{у.арм}} 40$;
- пробное давление 6 МПа (60 кгс/см²) – $p_{\text{пр.арм}} 60$;
- рабочее давление 25 МПа (250 кгс/см²) при температуре 803К (530°С) - $p_{\text{раб.арм}} 25t803$ (530).

Базовый диаметр – диаметр аппарата, используемый в прочностных расчётах. Для аппаратов (их элементов), изготавливаемых из листо-

вых материалов, базовым является внутренний диаметр $D_{в}$, а для изготавливаемых из труб – наружный диаметр $D_{н}$. Значения базового диаметра аппаратов регламентирует ГОСТ 9617–76.

Для стальных аппаратов из листов и поковок установлен ряд внутренних диаметров: 400, (450), 500 (550), 600 (650), 700, 800, 900, 1000, (1100), 1200, 1300, 1400, (1500), 1600, (1700), 1800, (1900), 2000, ... , 20000 мм. Значения, указанные в скобках, следует применять только для рубашек сосудов и аппаратов. Кожухи и крышки кожухотрубных теплообменных аппаратов допускается изготавливать диаметрами 1100, 1300, 1500, 1700, 1900 мм.

Эмалированные сосуды и аппараты с перемешивающими устройствами, а также сосуды и аппараты из никельсодержащих сталей допускается изготавливать диаметром 250, 300, 350 мм. Рубашки эмалированных сосудов и аппаратов допускается изготавливать диаметром 1550, 1750 и 1950 мм.

Внутренний диаметр сосуда или аппарата, изготавливаемого из цветных металлов и сплавов, должен быть выбран из следующего ряда: 133, 159, 168, 219, 273, 325, 377, 426, 480, 530, 630, 720, 820, 920, 1020, 1120, 1220, 1320, 1420 мм.

Диаметр условного прохода D_y (DN) – номинальный диаметр отверстия в трубе, фланце или арматуре, служащего для прохода среды. ГОСТ 355–67 установлен ряд величин D_y : 3; 6; 10; 15; 20; 25; 32; 40; 50; 65; 80; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 500; 600; 800; 1000; 1200; ... 4000. D_y может совпадать или не совпадать с фактическим внутренним диаметром изделия D . Например, для чугунных труб значения этих диаметров одинаковые, а для стальных – различные, т.к. последние изготавливают по наружному диаметру, и поэтому их внутренний диаметр зависит от толщины стенки.

1.3. Конструкционные материалы и металлические полуфабрикаты

Для конструкционных материалов, используемых при изготовлении химической аппаратуры, помимо прочности основным эксплуатационным свойством является коррозионная стойкость при рабочей температуре.

Коррозионная стойкость материалов характеризуется десятибалльной шкалой, основанной на значениях скорости коррозии $[П] = [мм/год]$.

Таблица 1.5 - Десятибалльная шкала коррозионной стойкости металлов

Группа	П	Балл
Совершенно стойкие	до 0,001	1
Весьма стойкие	0,001...0,01	2; 3
Стойкие	0,01...0,1	4; 5
Пониженно стойкие	0,1...1,0	6; 7
Малостойкие	1,0...10,0	8; 9
Нестойкие	более 10	10

Для изготовления химической аппаратуры рекомендуется применять материалы, скорость коррозии которых не превышает 0,1 мм/год (баллы 1... 5). В приложении, таблица П2, приведён краткий перечень конструкционных материалов, стойких в некоторых агрессивных средах.

При выборе материалов для аппаратов, работающих под давлением при низких и высоких температурах, необходимо учитывать, что механические свойства материалов существенно изменяются в зависимости от рабочей температуры в аппарате. Повышении рабочей температуры приводит к снижению прочности конструкционных материалов. При отрицательных температурах может наблюдаться охрупчивание материалов. Рабочая температура материала должна быть выше порога хладноломкости.

При статическом приложении нагрузки *прочность* материала характеризуется следующими показателями: предел текучести (физический σ_T или условный $\sigma_{0,2}$) и предел прочности σ_B . Деформационные и упругие свойства материалов характеризуются значениями модуля упругости E и коэффициентом Пуассона μ . Характеристики механических свойств σ_T , σ_B , E , μ являются основными при расчётах на прочность деталей химической аппаратуры, работающей под давлением при низких (от -254 до -40°C), средних (от -40° до $+200^\circ\text{C}$) и высоких (выше $+200^\circ\text{C}$) температурах. При температурах $t_{\text{раб}} > 0,3 \cdot t_{\text{пл}}$ в нагруженных деталях развивается явление ползучести.

Ползучесть – медленное нарастание пластической деформации детали под действием напряжений, меньших предела текучести. В этом случае следует учитывать жаропрочность конструкционного материала, которая характеризуется пределом ползучести и пределом длительной прочности.

Предел ползучести $\sigma_{\varepsilon/\tau}^t$ – напряжение, под действием которого материал деформируется на определённую величину за определённое время при заданной температуре. Пример, напряжении 100 МПа, которое при температуре $t = 550^\circ\text{C}$ за время $\tau = 100000$ часов вызывает деформацию материала $\varepsilon = 1\%$. В этом случае предел текучести записывается $\sigma_{1/100000}^{550} = 100$ МПа.

Предел длительной прочности σ_{τ}^t – напряжение, которое вызывает разрушение материала при заданной температуре за определённое время. Пример, напряжение 130 МПа, которое при температуре 600°C вызывает раз-

рушение материала за 10000 часов. В этом случае предел длительной прочности записывается $\sigma_{10000}^{600} = 130$ МПа.

Рабочие температуры, при которых следует учитывать явление ползучести, у разных материалов различны. Для углеродистых сталей обыкновенного качества (Ст3сп, Ст4сп и др.) ползучесть наблюдается уже при температурах выше 375°C, для низколегированных сталей (09Г2С, 17ГС и др.) – выше 525°C, для жаропрочных сталей (12Х18Н10т, 20Х18Н18 и др.) – при ещё более высокой температуре. Для химической аппаратуры допустимая скорость ползучести принимается $\leq 10^{-7}$ мм/мм·ч (10^{-5} % в год), для крепёжных деталей – $\leq 10^{-9}$ мм/мм·ч (10^{-7} % в год).

При выборе металла для работы при низких температурах следует исходить не только из величины ударной вязкости, но также учитывать

- величину и характер приложенной нагрузки (статическая, динамическая, пульсирующая);
- наличие и характер концентраторов напряжений;
- чувствительность металла к надрезам;
- начальные напряжения в конструкции;
- способ охлаждения металла (за счёт содержащегося в аппарате хладоносителя или за счёт окружающей среды).

При статическом приложении нагрузки в ряде случаев допускается изготовление аппаратов из металлов, приобретающих хрупкость при пониженных рабочих температурах, но не имеющих дефектов, нарушающих однородность структуры и способствующих концентрации напряжений. Технологичность изготовления аппаратов из таких материалов должна исключать возможность возникновения высоких начальных напряжений в конструкции. К таким аппаратам можно отнести свободно опирающиеся ёмкости для жидких и газообразных продуктов, содержащихся в них под небольшим избыточным давлением, металлоконструкции неотчетливого назначения.

При динамическом приложении нагрузки кроме указанных выше характеристик механических свойств необходимо учитывать также и величину ударной вязкости КСУ конструкционного материала. Для многих углеродистых и легированных сталей ударная вязкость при низких температурах (ниже –40°C) резко понижается, что исключает применение этих материалов в таких условиях. КСУ для большинства цветных металлов и сплавов (медь и её сплавы, алюминий и его сплавы, титан и его сплавы), а также хромоникелевых сталей аустенитного класса при низких температурах, как правило, уменьшается незначительно, что и позволяет применять их при рабочих температурах вплоть до –254°C.

Для оборудования, подверженного ударным или пульсирующим нагрузкам и предназначенного для работы при низких температурах, следует применять металлы и сплавы с ударной вязкостью не ниже 20 Дж/см² (2 кгс·м/см²) при рабочих температурах. Для деталей, имеющих концентраторы

напряжений (болты, шпильки и др.), рекомендуются материалы, у которых при рабочей температуре величина ударной вязкости не менее 40 Дж/см^2 ($4 \text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$).

Согласно нормам Ростехнадзора, для работы при низких температурах следует выбирать металлы, у которых порог хладноломкости лежит ниже заданной рабочей температуры. Однако в химической промышленности на протяжении многих лет безаварийно эксплуатируются при температуре до -40°C большое количество аппаратов, трубопроводов, арматуры, насосов и другого оборудования, изготовленных из углеродистой стали, из серого и ковкого чугуна, т.е. из материалов имеющих ударную вязкость КСЧ при указанной температуре менее 20 Дж/см^2 ($2 \text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$).

Аппараты в химической промышленности в большинстве своём являются сварными. Поэтому свариваемость является основным технологическим свойством для конструкционного материала для сварных аппаратов.

Свариваемостью стали называется способность металла образовывать сварные соединения. Свариваемость качественно оценивается степенью соответствия свойств сварного соединения аналогичным свойствам основного металла, а также наличием сварочных дефектов в виде трещин, пор, неметаллических включений и т.п. По свариваемости стали подразделяются на группы:

- хорошо сваривающиеся (обычная технология сварки – без подогрева до сварки и в процессе сварки и без последующей термообработки);
- удовлетворительно сваривающиеся (в нормальных производственных условиях трещин не образуется или для предупреждения образования трещин необходим предварительный нагрев, а также предварительная и последующая термообработка);
- ограниченно сваривающиеся (в обычных условиях сварки склонны к образованию трещин – обязательный подогрев и термическая обработка до и после сварки);
- плохо сваривающиеся (для сварных конструкций не применяются, обязательен подогрев и термообработка до и после сварки).

Повышение содержания углерода и легирующих элементов увеличивает опасность появления в околосварной зоне сварного соединения закалочных структур, хрупких холодных трещин и трещин задержанного хрупкого разрушения. Обобщенно влияние содержания углерода, легирующих элементов и примесей на качество сварного соединения характеризуется так называемым *углеродным эквивалентом* СЕ. Согласно ГОСТ 27772–88 углеродный эквивалент предложено определять по формуле

$$\text{CE} = \text{C} + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/4 + \text{Ni}/40 + \text{Cu}/13 + \text{V}/14 + \text{P}/2, \% \quad (1.7)$$

здесь символы элементов выражают массовые доли этих элементов в стали; множители при символах представляют собой коэффициенты активности данных элементов.

Углеродный эквивалент следующим образом характеризует свариваемость сталей:

- $CE < 0,35$ – сварка не вызывает затруднений;
- $CE = 0,35 \dots 0,6$ – сварка проводится с соблюдением мер предосторожности;
- $CE > 0,6$ – вероятность образования трещин возрастает и необходимы специальные меры предосторожности.

Предварительный подогрев при сварке является важным элементом технологического процесса получения сварного соединения, поскольку подогрев позволяет уменьшить скорость охлаждения металла шва и тем самым избежать образования закалочных структур и, следовательно, холодных трещин.

Д.Сефериан предложил методику расчетного определения температуры T_{II} подогрева при сварке, учитывающую химический состав стали и толщину свариваемых листов. Методика Сефериана основана на использовании эквивалента углерода как меры закаливаемости стали с поправкой на толщину листов s и введении ряда поправочных коэффициентов

$$T_{II} = 350 \cdot \sqrt{CE \cdot (1 + 0,005 \cdot s)} - 0,25, \text{ град } C \quad (1.8)$$

здесь 0,005 – коэффициент толщины; s – мм; 0,25 – верхний предел содержания углерода в обычных свариваемых сталях.

В таблице 1.6 приведены значения углеродного эквивалента и температуры подогрева при сварке для некоторых сталей, используемых для сварной химической аппаратуры.

Таблица 1.6 - Значения углеродного эквивалента и температуры подогрева при сварке для некоторых сталей

Марка стали	ГОСТ	CE, %	T _{II} (°C) для толщины стенки		
			s = 5 мм	s = 10 мм	s = 50 мм
Ст3сп	380–2005	0,38	124	137	168
20	1050–88	0,39	125	139	169
20К	5520–79	0,40	132	146	176
15ХМ	4543–71	0,61	205	218	250
09Г2С	5520–79	0,51	172	185	216
10ХСНД	19282–73	0,49	167	180	211
16ГС	5520–79	0,47	158	171	202

Рабочие условия применения листовой стали по ОСТ 26–291–94 приведены в Приложении таблица П 4, рабочие условия применения стальных труб – в таблице П 5.

В химическом аппаратостроении находят применение горячекатаные двухслойные коррозионностойкие листы с основным слоем из углеродистой или низколегированной стали и плакирующим слоем из коррозионностойких сталей и сплавов и монель-металла по ГОСТ 10885–85 (таблица П 6).

При изготовлении химической аппаратуры часто возникает необходимость сварки разнородных сталей (лапы из углеродистой стали и корпус аппарата из высоколегированной стали). В этом случае возможно изменение структуры наплавленного металла и снижение коррозионной стойкости металла шва. Для устранения такого явления между соединяемыми элементами устанавливают промежуточную деталь из высоколегированной стали. При таком конструктивном решении сварка разнородных сталей происходит между промежуточной деталью и деталью из углеродистой стали и сварной шов с пониженной коррозионной стойкостью отодвигается от зоны влияния коррозионной среды.

Помимо сталей, широкое распространение в химическом машиностроении получил чугун. Чугун – сплав железа с углеродом (более 2,14%), обладает высокими литейными свойствами, как правило, хорошо обрабатывается резанием, образуя поверхность с рельефом, благоприятным для деталей трибосопряжений с граничным режимом трения. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом обладает прочностью, сопоставимой с прочностью стального литья и даже ковальной стали.

Серый чугун (марки СЧ15...СЧ45) применяется для литых деталей машин (станины, фланцы, поршни, цилиндры и др.) при давлении до 1 МПа и температуре от –15 до +250°C. Недостатком серого чугуна является хрупкость, препятствующая его применению для изготовления деталей машин, подвергающихся ударным нагрузкам. Отливки из высокопрочного чугуна (марки ВЧ35...ВЧ100) используются для изготовления корпусных и других элементов машин, подверженных значительным нагрузкам. Ковкий чугун (марки КЧ 36–6...КЧ 63–2) используют для изготовления арматуры и фланцев.

Легированный чугун используют для изготовления литых деталей, работающих в коррозионных средах и при повышенных температурах в коррозионных средах. Химическая стойкость чугунов резко увеличивается при содержании кремния Si около 15%. Сплавы ЧС15 и ЧС17, называемые ферросилиды, стойки в азотной HNO_3 , фосфорной H_3PO_4 , уксусной $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$, серной H_2SO_4 кислотах при любых концентрациях и температуре, а также в смеси азотной и серной кислот. Ферросилиды стойки также в растворах солей, но легко корродируют под воздействием соляной HCl кислоты, крепких щелочей и фтористых соединений. Для повышения стойкости в HCl ферросилиды легируют до 4% Мо. Образующие при этом сплавы (ЧС15М4, ЧС17М3) получили название антихлоры. Они устойчивы в большинстве агрессивных сред любых концентраций при всех температурах. Недостатком антихлоров и ферросилидов является хрупкость и низкая технологичность (плохая обрабатыва-

емость резанием), поэтому их применяют для деталей не подверженных ударным нагрузкам.

Цветные металлы и сплавы в химическом машино- и аппаратостроении применяют для изготовления элементов оборудования, контактирующих с агрессивными средами и работающих при низких температурах.

Алюминий Al (марки АД00, АД0, АД1, А8, А85) и его сплавы (марки АМцС, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6) используют преимущественно в виде листов, фасонного проката, труб, проволоки, а также в виде фасонных отливок для изготовления резервуаров, колонн и элементов аппаратов, работающих при давлении до 0,6 МПа в интервале температур от -196 до $+150^{\circ}\text{C}$ в производстве разбавленной серной H_2SO_4 , азотной HNO_3 , фосфорной H_3PO_4 , уксусной $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ и др. органических кислот.

Медь Cu химически устойчива во многих средах (холодная 10...40% H_2SO_4 , 10...20% соляная кислота HCl, бензол C_6H_6 , метиловый CH_3OH и этиловый $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ спирт и др.), плохо сопротивляется воздействию аммиака NH_3 и щелочных растворов, а также хлоридов. В окислительных средах (HNO_3 , горячая концентрированная H_2SO_4 , растворы KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) медь неустойчива. Наибольшее распространение получила технически чистая медь марок М2 и М3. Её используют для изготовления ёмкостей варочной аппаратуры (пищевая промышленность), различных испарительных и трубчатых теплообменников, работающих под давлением до 0,6 МПа в интервале температур от -254 до $+250^{\circ}\text{C}$.

Из сплавов меди чаще всего используют *латуни* (сплавы на основе Cu+Zn) (марки Л63, ЛС 59-1, ЛО 62-1, ЛЖМц 59-1-1 и др.), а также бронзы безоловянные (БрБ2, БрАЖ9-4, БрХ1, БрС30 и др.) и оловянные (марки БрОФ6,5-0,15, БрОЦ4-3, БрОЦС4-4-2,5 и др.). Их применяют для изготовления мембран, сильфонов, пружинной проволоки, деталей контрольно-измерительных приборов, антифрикционных элементов и других элементов и других деталей машин, а также в криогенной технике.

Для латуней характерны два вида коррозионного повреждения – обесцинкование и коррозийное растрескивание. Склонность к обоим видам повреждений увеличивается с повышением содержания цинка в сплаве. Явление обесцинкования заключается в избирательной коррозии в связи со значительно более высокой электрохимической активности атомов Zn по сравнению с атомами Cu. Для снижения склонности к обесцинкованию применяют легирование латуни небольшими количествами фосфора P, сурьмы Sb, мышьяка As, причём наличие P и Sb в маркировке не отражается. Пример мышьяковистой латуни ЛОМш 70-1-0,04. Наиболее широкое распространение в морских условиях получили так называемая адмиралтейская латунь ЛО 70-1 и алюминиевая латунь ЛА 75-2. Коррозионное растрескивание проявляется при наличии в полуфабрикате внутренних или внешних растягивающих напряжений. Скорость развития коррозионного растрескивания усиливается при наличии в атмосфере аммиака NH_3 и сернистого ангидрида SO_2 . Корро-

зионное растрескивание, обусловленное наличием внутренних напряжений, предупреждается отжигом изделий при 250...300°C.

Свинец используют преимущественно для внутреннего покрытия (футеровки) стальных аппаратов с целью защиты от воздействия сильно агрессивных сред (нагретая 80% H_2SO_4 , HCl). Свинец не стоек в органических кислотах, в частности в муравьиной $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2$ и уксусной $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$.

Титан (марки ВТ1-0, ВТ1-00) и титановые сплавы (марки АТЗ, ОТ4-0 и др.) широко применяют для изготовления деталей фильтров, центрифуг, сушилок, ёмкостей в производствах HNO_3 , HCl , мочевины (карбамида) $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, хлора и его соединений, синтетических волокон. Для титана и его сплавов характерна малая склонность к контактной, питтинговой и щелевой коррозии. Титан применяется в виде листового проката, труб, а также фасонных отливок.

В химическом машино- и аппаратостроении всё более широкое применение находят неметаллические конструкционные и футеровочные материалы – керамика, пластмассы, стекло, резины и др. Их применение позволяет экономить дефицитные и дорогостоящие высоколегированные стали и цветные сплавы.

Минералы и материалы на их основе. Естественные природные минералы (асбест, графит и пр.) и продукты их переработки (керамика, каменной литые, огнеупоры и др.) характеризуются высокой сопротивляемостью внешним воздействиям – атмосферной коррозии, абразивному изнашиванию, действию технологических сред (кислот, щелочей и др. химически активных соединений).

Асбест и асбестовые изделия в виде картона, сальниковой набивки, тканей, лент используют для теплоизоляции (при температуре $-40...+500^\circ\text{C}$) и уплотнения соединений элементов машин, аппаратов и коммуникаций.

Паронит – композиционный прокладочный материал из асбеста, каучука и наполнителей можно использовать при давлении до 10 МПа и температуре от -50 до $+100^\circ\text{C}$.

Вязующие минеральные материалы (гипс, жидкое стекло, известь, цемент) представляют собой порошкообразные вещества, образующие с водой пластичные пасты, способные затвердевать и схватываться с другими телами с образованием монолитного камневидного изделия. Из различных типов цемента наиболее распространены портландцемент и шлакопортландцемент общестроительного назначения; цемент гипсоглиноземистый расширяющийся, предназначенный для получения расширяющихся, безусадочных, водонепроницаемых растворов, используемых для замоноличивания стыков конструкций и фундаментных болтов, уплотнения соединений труб и т.д.

Углеродистые материалы изготавливают из графита (углерода технического или сажи), пропитанного синтетической смолой, или графитопласта АТМ-1, АТМ-2. Они обладают высокой коррозионной стойкостью, тепло- и электропроводностью, имеют низкий коэффициент трения скольжения, хоро-

шо обрабатываются резанием. Используют для изготовления теплообменников, колонных аппаратов, деталей ц/б насосов, труб, трубопроводной арматуры, облицовочных плит, работающих в агрессивных средах при температурах от -18 до 150°C .

Камнелитые изделия (бруски, плиты, трубы, желоба и др.) получают литьём расплава шихты горных пород и соответствующих добавок к ним. Изделия из каменного литья находят применение для футеровки бункеров, течек, корпуса флотационных машин и т.д. Плитки из каменного литья заменяют металл, их используют для полов в цехах с агрессивными средами.

Огнеупоры (формованные изделия и неформованные материалы) – стойкие к высоким температурам материалы, используемые для изготовления элементов высокотемпературного оборудования (печи и др.). Огнеупоры служат для защиты основных материалов тепловых агрегатов и окружающей среды от температурного воздействия. Доломитовый кирпич ($32...36\% \text{MgO}$, $50...56\% \text{CaO}$), шамотный кирпич ($50...60\% \text{SiO}_2$ и $30...42\% \text{Al}_2\text{O}_3$) огнеупорность до 1700°C .

Керамика – изделия и материалы, получаемые спеканием глин и их смесей с минеральными добавками, а также оксидов и др. неорганических соединений. Отличаются термо- и кислотостойкостью. Керамика практически не пропускает жидкости и не поддается истиранию, что важно при получении чистых продуктов. Из грубой керамики изготавливают строительный и шамотный кирпич, черепицу, из тонкой – фарфоровые и фаянсовые изделия.

Пластмассы представляют собой материалы на основе полимеров, т.е. высокомолекулярных соединений, состоящих из большого числа звеньев (мономеров). Наиболее применимыми видами пластмасс являются: полиэтилен, полипропилен, полистирол, фторопласт, винипласт, а также фаолит, текстолит и др.

Полиэтилен – твердый продукт полимеризации этилена. Хорошо обрабатывается различными способами (прессованием, литьём под давлением), легко сваривается и склеивается. При нормальной температуре он стоек к действию большей части минеральных кислот, щелочей и растворов солей. Его применяют также в качестве футеровочного материала химической аппаратуры, работающей в интервале температур от -60 до $+60^{\circ}\text{C}$ и давлении до 1 МПа со средами средней и повышенной агрессивности.

Полипропилен – твердый продукт полимеризации пропилена. Обладает хорошими механическими свойствами, которые сохраняются вплоть до температуры размягчения. Он хорошо сваривается, обладает высокой стойкостью к воздействию минеральных кислот и щелочей. Применяется для футеровки сварной химической аппаратуры в интервале температур -10 до $+100^{\circ}\text{C}$ и давлении до 0,07 МПа со средами средней и повышенной агрессивности.

Полистирол – твердый продукт полимеризации стирола. Он поддается различным методам переработки (прессованию, литью под давлением),

удовлетворительно сваривается, хорошо склеивается специальным клеем. Стойкий во многих агрессивных средах. Используется как футеровочный материал для стальных аппаратов, работающих в интервале температур 0 до +75°C и давлении до 0,07 МПа со средами средней и повышенной агрессивности.

Фторопласт – наиболее ценный конструкционный неметаллический материал. Обладает коррозионной стойкостью почти во всех кислотах, теплоустоек до 400°C. В настоящее время выпускают несколько марок: фторопласт-3, фторопласт-4 и т.д.

Фторопласт-3 (политрифторхлорэтилен) – твёрдый продукт полимеризации трифторхлорэтилена. При комнатной температуре не растворяется и очень мало набухает в органических растворителях. Применяется главным образом для получения антикоррозионных покрытий труб, насосов и др.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) – твёрдый продукт полимеризации тетрафторэтилена. Не поглощает воду; негорюч; не растворяется и не набухает в растворителях; абсолютно стоек к кислотам, окислителям и растворам щелочей. Применяется для производства тонкостенных труб, деталей трибосопряжений, для получения пропиток и покрытий.

Винипласт (поливинилхлорид) – твёрдый продукт полимеризации винилхлорида. Обладает высокой устойчивостью почти во всех кислотах, щелочах и растворах солей любых концентраций за исключением сильных окислителей (HNO_3 , олеум). Винипласт легко обрабатывается резанием и давлением, хорошо сваривается и склеивается. Поставляется в виде листов, труб, профильных изделий. Из винипласта изготовляют обечайки, днища, штуцера и другие детали сварной или клееной химической аппаратуры, работающей при температуре от –0 до +40°C и давлении до 0,6 МПа.

Органическое стекло (полиметилметакрилат) – твердый продукт полимеризации метилметакрилата. Используется для получения бесосколочного стекла (триплекс), которое служит для изготовления смотровых окон в аппаратах, работающих при умеренных температурах и повышенных давлениях.

Фаолит – кислотостойкая пластмасса, которую получают на основе термореактивной фенолформальдегидной смолы и кислотостойкого наполнителя. Он стоек в соляной HCl , серной H_2SO_4 , фосфорной H_3PO_4 , уксусной $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ и других кислотах, хлорированных углеводородах и минеральных маслах. Особую ценность представляет стойкость фаолита к воздействию HCl любой концентрации. В щелочных средах фаолит не стоек. Фаолит хорошо обрабатывается резанием, прессуется, склеивается фаолитовой замазкой и арзамитом. Применяют фаолит для изготовления колонной, ёмкостной, и теплообменной аппаратуры, труб и трубной арматуры, работающих при температуре от 0 до +140°C и давлении до 0,06 МПа.

Материалы на основе каучука. Резину и эбонит используют для гумирования химической аппаратуры из углеродистых сталей, чугуна, работающей со средами средней и высокой агрессивности.

Искусственные силикатные материалы. Стекло, эмаль являются перспективными материалами для химической аппаратуры. Из кварцевого стекла изготовляют ёмкостную колонную, теплообменную и реакционную аппаратуру для получения органических кислот, трубопроводы и различную аппаратуру для получения особо чистых продуктов в пищевой и фармацевтической промышленности.

Эмаль – прочное стеклообразное покрытие, наносимое на поверхность изделия электрохимическим способом. Эмалевое покрытие обладает хорошей адгезией к металлам. Применение эмалирования позволяет использовать углеродистую сталь и чугун для изготовления химической аппаратуры. Эмалированные аппараты используют для работы при давлении до 0,6 МПа и температуре от -15 до $+200^{\circ}\text{C}$ (чугунные аппараты) и от -30 до $+250^{\circ}\text{C}$ (стальные аппараты).

1.4. Допускаемое напряжение, допускаемая нагрузка

Допускаемое напряжение $[\sigma]$ – напряжение, при котором обеспечивается прочность элементов аппарата с расчётным запасом и минимальным расходом конструкционного материала.

Выбор допускаемого напряжения зависит от методов расчёта (по предельным нагрузкам или допускаемым напряжениям), степени их точности, свойств материала и серьёзности последствий, которые могут быть в случае аварии.

Допускаемые напряжения используются при расчёте элементов конструкций по допускаемым напряжениям нормальным $[\sigma]$ и касательным $[\tau]$

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (1.9)$$

$$\tau_{\max} \leq [\tau] \quad (1.10)$$

здесь $\sigma_{\max}$, $\tau_{\max}$ – максимальные расчётные нормальные и касательные напряжения, возникающие в рассматриваемом элементе конструкции, соответственно.

Выражения (1.9, 1.10) представляют собой условие прочности по нормальным и касательным напряжениям, соответственно.

Допускаемое напряжение определяется делением минимального значения характеристики прочности материала элемента конструкции при расчётной температуре (σ_{τ} – предел текучести, $\sigma_{0.2}$ – условный предел текучести, $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление (предел прочности), σ_{τ}^t – предел длительной прочности, $\sigma_{\varepsilon/\tau}^t$ – предел ползучести) на значение коэффициента запаса

прочности по пределу текучести (сталь $n_T = 1,5$; алюминиевые и медные сплавы $n_T = 1,1$), временному сопротивлению (пределу прочности) (сталь $n_B = 2,4$; титановые сплавы $n_B = 3,0$), пределу длительной прочности (сталь, титановые сплавы $n_d = 1,5$), пределу ползучести (сталь $n_{п} = 1$).

В Приложении таблица П 7 приведены значения допускаемых напряжений при различных температурах для сталей, алюминиевых, медных и титановых сплавов. Если значение рабочей температуры в аппарате t_x не совпадает с температурами, приведёнными в таблице П4, то для нахождения искомого значения $[\sigma]_x$ используется линейная интерполяция. В этом случае $[\sigma]_x$ отыскивается в интервале температур $t_1 < t_x < t_2$ по известной формуле линейной интерполяции для убывающей функции

$$[\sigma]_x = [\sigma]_{t_1} - \frac{[\sigma]_{t_1} - [\sigma]_{t_2}}{t_2 - t_1} \cdot (t_x - t_1) \quad (1.11)$$

Допускаемое напряжение при испытании аппарата $[\sigma]_и$ определяется по формуле

$$[\sigma]_и = \frac{\sigma_{T20}}{n_u}, \quad (1.12)$$

здесь σ_{T20} – минимальное значение предела текучести материала аппарата при 20°C (таблица П 8); n_u – запас прочности материала при испытании (гидравлическое испытание $n_u = 1,1$; пневматическое – $n_u = 1,2$).

Допускаемая нагрузка $[P]$ – нагрузка, равная некоторой доле (в зависимости от коэффициента запаса) разрушающей нагрузке.

Допускаемая нагрузка используется при расчёте элементов конструкций по допускаемой нагрузке.

$$P_{\max} \leq [P] \quad (1.13)$$

здесь $P_{\max}$ – максимальная нагрузка, действующая на рассматриваемый элемент конструкции.

Нагрузка $P_{\max}$ в выражении (1.13) может представлять собой: сосредоточенную силу – Н; распределённую нагрузку – Н/м, Н/м², Н/м³; пару сил – Н·м. Вид нагрузки зависит от схемы нагружения рассматриваемого элемента конструкции.

Значение допускаемой нагрузки $[P]$ получается расчётом из условия прочности конструкции, когда известны: схема нагружения конструкции, размеры сечения и свойства материала конструкции (см. примеры 2.4, 2.5).

1.5. Примеры расчёта

Пример 1.1.

Для стального аппарата из стали 09Г2С определить пробное давление. Условия работы аппарата: $p_p = 0,4$ МПа; $t_p = 300^\circ\text{C}$.

Решение

Для стали 09Г2С имеем (таблица П 7): $[\sigma]_{20}=170$ МПа; $[\sigma]_{300}=134$ МПа.

При расчётном давлении в интервале 0,07...0,5 МПа в качестве пробного давления принимается большее из двух значений (таблица 1.3):

$$p_{np} = 1,5 \cdot p_p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_{300}} = 1,5 \cdot 0,4 \cdot \frac{170}{134} = 0,76 \text{ МПа}; p_{np} = 0,2 \text{ МПа}$$

Ответ: $p_{np} = 0,76$ МПа.

Пример 1.2.

Для стального аппарата из стали 09Г2С определить пробное давление.

Условия работы аппарата: $p_p=1,5$ МПа; $t_p=200^\circ\text{C}$.

Решение

Для стали 09Г2С имеем (таблица П 7): $[\sigma]_{20}=170$ МПа; $[\sigma]_{200}=148$ МПа.

По таблице 1.3 при расчётном давлении $\geq 0,5$ МПа в качестве пробного давления принимается большее из двух значений:

$$p_{np} = 1,25 \cdot p_p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_{200}} = 1,25 \cdot 1,5 \cdot \frac{170}{148} = 2,15 \text{ МПа}; p_{np} = p_p + 0,3 =$$

$1,5 + 0,3 = 1,8$ МПа.

Ответ: $p_{np} = 2,15$ МПа.

Пример 1.3.

Для стального аппарата из стали 09Г2С определить пробное давление.

Условия работы аппарата: $p_p=0,09$ МПа; $t_p=300^\circ\text{C}$.

Решение

Для стали 09Г2С имеем (таблица П 7): $[\sigma]_{20}=170$ МПа; $[\sigma]_{200}=148$ МПа.

При расчётном давлении в интервале 0,07...0,5 МПа в качестве пробного давления принимается большее из двух значений (таблица 1.3):

$$p_{np} = 1,5 \cdot p_p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_{300}} = 1,5 \cdot 0,09 \cdot \frac{170}{134} = 0,17 \text{ МПа}; p_{np} = 0,2 \text{ МПа}$$

Ответ: $p_{np} = 0,2$ МПа.

Пример 1.4.

Для стального аппарата из стали 09Г2С определить пробное давление.

Условия работы аппарата: $p_p=0,15$ МПа; $t_p=-10^\circ\text{C}$.

Решение

Для стали 09Г2С имеем (таблица П6): $[\sigma]_{20}=170$ МПа. Если аппарат работает при отрицательной температуре, то $[\sigma]_t = [\sigma]_{20} = 170$ МПа.

При расчётном давлении в интервале 0,07...0,5 МПа в качестве пробного давления принимается большее из двух значений (таблица 1.3):

$$p_{np} = 1,5 \cdot p_p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_{20}} = 1,5 \cdot 0,15 \cdot \frac{170}{170} = 0,22 \text{ МПа}; p_{np} = 0,2 \text{ МПа}$$

Ответ: $p_{np} = 0,22 \text{ МПа}$.

Пример 1.5.

Определить допускаемое напряжение стали для рабочих условий. Марка стали 12ХМ, рабочая температура в аппарате $t_p = 490 \text{ МПа}$.

Решение

Для стали 12ХМ имеем (таблица П4): $[\sigma]_{470} = 117 \text{ МПа}$; $[\sigma]_{500} = 96 \text{ МПа}$. Для решения задачи используем формулу линейной интерполяции для убывающей функции $[\sigma](t)$

$$[\sigma]_{490} = [\sigma]_{470} - \frac{[\sigma]_{470} - [\sigma]_{500}}{500 - 470} \cdot (490 - 470) =$$

$$= 117 - \frac{117 - 96}{30} \cdot 20 = 103 \text{ МПа}$$

Ответ: $[\sigma]_{490} = 103 \text{ МПа}$.

Пример 1.6.

Определить допускаемое напряжение стали для условий гидравлических испытаний. Марка стали 12ХМ, $t_{исп} = 20^\circ\text{C}$.

Решение

Для стали 12ХМ имеем (таблица П8) $\sigma_{T20} = 220 \text{ МПа}$

$$[\sigma]_u = \frac{\sigma_{T20}}{1,1} = \frac{220}{1,1} = 200 \text{ МПа}$$

Ответ: $[\sigma]_u = 200 \text{ МПа}$.

Пример 1.7.

Определить условное давление для аппаратного фланца из стали 16ГС при заданных условиях работы аппарата: расчётное давление $p_p = 1,2 \text{ МПа}$, рабочая температура $t_p = 300^\circ\text{C}$.

Решение

При определении условного давления p_y для аппаратного фланца используем таблицу П2.

По таблице П2 для фланца из стали 16ГС при температуре 300°C находим ближайшее большее заданного значение расчётного давления: $p_p = 1,2 \text{ МПа}$. Для фланца из стали 16ГС при $t_p = 300^\circ\text{C}$ оно будет составлять $p_p = 1,34 \text{ МПа}$; при этом условное давление для фланца составляет $p_y = 1,6 \text{ МПа}$.

Ответ: для фланца из стали 16ГС при температуре $t_p = 300^\circ\text{C}$ и давлении $p_p = 1,2 \text{ МПа}$ условное давление составляет $p_y = 1,6 \text{ МПа}$

Пример 1.8.

Определить расчётное давление среды в аппарате. Исходные данные: рабочее давление в аппарате $p_{\text{раб}} = 0,3$ МПа; плотность среды $\rho = 1000$ кг/м³; высота аппарата $L = 1,8$ м

Решение

Расчётное давление в аппарате определяется как сумма рабочего $p_{\text{раб}}$ и гидростатического p_r , если оно составляет более 5 % рабочего, в противном случае p_r не учитывается.

Гидростатическое давление среды определяется по формуле (1.2)

$$p_r = \rho \cdot g \cdot L = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,8 = 17658 \text{ Па} = 0,018 \text{ МПа}$$

Гидростатическое давление составляет от рабочего

$$p_r : p_{\text{раб}} = 0,018 : 0,3 = 0,06 = 6\%$$

В данном случае при определении расчётного давления в аппарате гидростатическое давление среды следует учитывать

$$p_p = p_{\text{раб}} + p_r = 0,3 + 0,018 = 0,318 \text{ МПа} \approx 0,32 \text{ МПа}$$

Ответ: $p_p = 0,32$ МПа

Пример 1.9.

Определить при какой высоте L аппарата в расчёте его на прочность следует учитывать гидростатическое давление среды в нём. Исходные данные: рабочее давление в аппарате $p_{\text{раб}} = 1$ МПа; плотность среды $\rho = 1000$ кг/м³.

Решение

Гидростатическое давление суммируется с рабочим, если составляет не менее 5 % рабочего давления

$$p_r = 0,05 \cdot p_{\text{раб}} = 0,05 \cdot 1 = 0,05 \text{ МПа.}$$

Высота аппарата в этом случае составит

$$L = p_r / (\rho \cdot g) = 0,05 \cdot 10^6 / (1000 \cdot 9,81) = 5,1 \text{ м}$$

Ответ: $L = 5,1$ м.

2. Элементы теории напряжённого состояния, расчёт несущей способности элементов оборудования

2.1. Основные определения и расчётные формулы

Напряжённое состояние – совокупность напряжений, действующих в некоторой точке элемента конструкции (рис.2.1).

Нормальные напряжения (σ_x , σ_y , σ_z) действуют по нормали к площадке, имеют индекс, соответствующий обозначению нормали к площадке. Нормальное напряжение имеет знак (+), если оно направлено по внешней нормали.

Касательные напряжения (τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} , τ_{zy}) действуют в плоскости площадки, имеют двойной индекс, содержащий обозначение нормали и направления на площадке. Например, τ_{xy} – нормаль «X» направление «Y». Касательное напряжение имеет знак (+), если при повороте вектора $\vec{\tau}$ против часовой стрелки на 90° его направление совпадает с направлением внешней нормали. На рис. 2.1 $\tau_{xz} > 0$, $\tau_{xy} < 0$ и т.д. По закону парности касательных напряжений $\tau_{xy} = \tau_{yx}$; $\tau_{xz} = \tau_{zx}$; $\tau_{yz} = \tau_{zy}$.

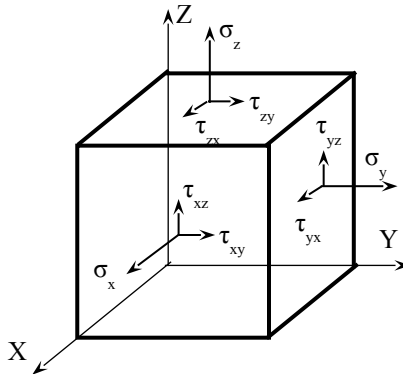


Рис. 2.1 - Напряжённое состояние в произвольной точке элемента конструкции

Закон Гука описывает взаимосвязь напряжений и деформаций, вызванных этими напряжениями, в пределах упругости материала.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_x - \mu \cdot (\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_y - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_z)] \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)] , \quad (2.3)$$

здесь $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – относительное удлинение, м/м; E – модуль продольной упругости (модуль Юнга), МПа (см. таблицу П7); μ – коэффициент Пуассона ($\mu = 0,28 \dots 0,35$).

Главные напряжения ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) – нормальные напряжения, действующие на площадках, где нет касательных напряжений. Принято следующее соотношение главных напряжений: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. В зависимости от величины главных напряжений различают следующие виды напряженного состояния материала элемента конструкций:

- объёмное, когда отличны от нуля три главных напряжения ($\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 \neq 0, \sigma_3 \neq 0$);
- плоское, когда отлично от нуля два главных напряжения ($\sigma_1 > 0, \sigma_2 > 0, \sigma_3 = 0$ – двухосное растяжение; и др.);
- линейное, когда отлично от нуля одно главное напряжение ($\sigma_1 > 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0$ – растяжение; $\sigma_1 = 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$ – сжатие).

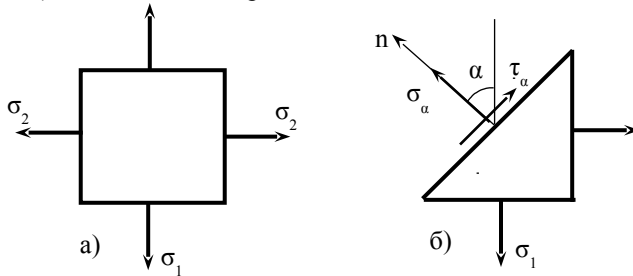


Рис. 2.2 - Схема двухосного растяжения (а) и схема для определения напряжений на произвольной площадке (б).

На произвольной площадке с нормалью n действуют нормальные σ_α и касательные τ_α напряжения (рис. 2.2 б). Значения $\sigma_\alpha, \tau_\alpha$, а также максимальное касательное напряжение $\tau_{\max}$, действующее на площадке $\alpha = 45^\circ$, определяют по формулам

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \sin^2 \alpha \quad (2.4)$$

$$\tau_\alpha = 0,5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \sin 2\alpha \quad (2.5)$$

$$\tau_{\max} = 0,5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.6)$$

Расчёт на прочность при сложном (нелинейном) напряжённом состоянии проводится с использованием расчётных $\sigma_{\text{расч}}$ напряжений, которые определяются по одной из принятых теорий (гипотез) прочности:

- теория наибольших удлинений (II теория)

$$\sigma_{\text{расч}}^{(II)} = \sigma_1 - \mu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.7)$$

- теория наибольших касательных напряжений (III теория)

$$\sigma_{расч}^{(III)} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.8)$$

- энергетическая теория (IV теория)

$$\sigma_{расч}^{(IV)} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 \cdot \sigma_3 - \sigma_2 \cdot \sigma_3} \quad (2.9)$$

При сложном напряжённом состоянии условие прочности имеет вид

$$\sigma_{расч} \leq [\sigma], \quad (2.10)$$

здесь $\sigma_{расч}$ – расчётное напряжение при напряжённом состоянии, в котором работает рассматриваемый элемент конструкции; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала элемента конструкции (величина табличная см. таблицу П6).

Выражение условий прочности для простейших случаев нагружения элементов оборудования представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Выражения условий прочности для простейших видов нагружения элементов конструкций

Нагружение	Силовой фактор	Характеристика сечения	Условие прочности
Растяжение	Продольная сила Р [Н; кгс]	F [м ² ; см ²]	$\sigma = \frac{P_{расч}}{F} \leq [\sigma]$
Изгиб	Изгибающий момент М [Н·м; кгс·м]	W _x [м ³ ; см ³]	$\sigma = \frac{M_{расч}}{W_x} \leq [\sigma]$
Кручение	Крутящий момент Т [Н·м; кгс·м]	W _ρ [м ³ ; см ³]	$\tau = \frac{T_{расч}}{W_\rho} \leq [\tau]$

Пояснения: $P_{расч}$, $M_{расч}$, $T_{расч}$ – расчётные значения силовых факторов (значения силовых факторов в опасном сечении элемента конструкции); $[\sigma]$, $[\tau]$ – допускаемое напряжение материала элемента конструкции

Формулы для определения геометрических характеристик для некоторых видов сечения элементов конструкций при растяжении, изгибе, кручении представлены в таблице П8.

Несущая способность конструкции характеризуется максимальной величиной внешней нагрузки (P_{max} , q_{max} и др.) под действием которой находится элемент конструкции. Для определения несущей способности надо из условия прочности найти допустимое значение силового фактора ($[P]$, $[M]$, $[T]$) внешней нагрузки, воспринимаемой элементом конструкции:

- растяжение $[P] = [\sigma] \cdot F \quad (2.11)$

- изгиб $[M] = [\sigma] \cdot W_x \quad (2.12)$

- кручение $[T] = [\sigma] \cdot W_\rho \quad (2.13).$

По значению [P], [M], [T] искомая несущая способность элемента конструкции определяется исходя из схемы нагружения элемента конструкции (см. примеры 2.4, 2.5).

Коэффициент экономичности профилей при изгибе $\alpha_{\text{эк}}$ представляет собой безразмерную величину, равную отношению осевого момента сопротивления (W_x или W_y) к произведению площади сечения F и высоты сечения h ($F \cdot h_{\text{пр}}$) профиля

$$\alpha_{\text{эк}} = \frac{W_x}{F \cdot h_{\text{пр}}} \quad (2.14)$$

Для круглого и кольцевого сечений $h_{\text{пр}} = D$, для прямоугольного сечения $h_{\text{пр}} = a$ при изгибе в горизонтальной плоскости и $h_{\text{пр}} = b$ при изгибе в вертикальной плоскости.

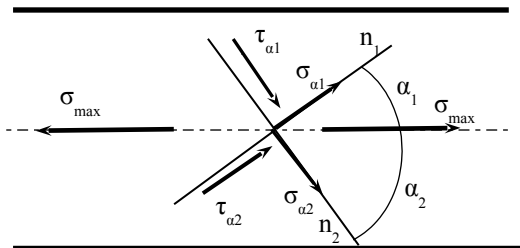
2.2. Примеры расчёта

Пример 2.1.

В поперечном сечении растянутого элемента конструкции действует нормальное напряжение $\sigma_{\text{max}} = 50$ МПа, в сечении, наклонённом к оси элемента на угол α , действует касательное напряжение $\tau_{\alpha} = 16$ МПа. Определить: значение угла α и величину нормального напряжения σ_{α} , действующего на этой площадке.

Решение

Составим расчётную схему элемента конструкции.



В некоторой точке элемента конструкции выделим две взаимно перпендикулярные площадки с нормальными n_1 и n_2 , расположенные под углом α_1 и α_2 , к оси элемента. По закону парности касательных напряжений $\tau_{\alpha 1} = 16$ МПа, $\tau_{\alpha 2} = -16$ МПа. $\sigma_{\text{max}} = \sigma_1 = 50$ МПа. Напряжения на площадке с нормалью n_1 определяются (см. формулы 2.4, 2.5).

$$\sigma_{\alpha 1} = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 \quad (2.1.1); \quad \tau_{\alpha 1} = 0,5 \cdot \sigma_1 \cdot \sin 2\alpha_1 \quad (2.1.2)$$

$$\sin 2\alpha_1 = \frac{2 \cdot \tau_{\alpha 1}}{\sigma_1} = \frac{2 \cdot 16}{50} = 0,64; \alpha_1 = 0,5 \cdot \arcsin 0,64 = 19,89^\circ$$

$$\sigma_{\alpha 1} = 50 \cdot \cos^2 19,89 = 44,2 \text{ МПа}$$

Для площадки с нормалью n_2 $\alpha_2 = 90 - \alpha_1 = 90 - 19,89 = 70,11^\circ$ нормальное напряжение равно $\sigma_{\alpha 2} = 50 \cdot \cos^2 70,11 = 5,8 \text{ МПа}$.

Ответ: $\alpha_1 = 19,89^\circ$; $\sigma_{\alpha 1} = 44 \text{ МПа}$; $\alpha_2 = 70,11^\circ$; $\sigma_{\alpha 2} = 5,8 \text{ МПа}$

Пример 2.2

В некоторой точке элемента конструкции известны значения главных напряжений $\sigma_1 = 120 \text{ МПа}$, $\sigma_2 = 100 \text{ МПа}$, $\sigma_3 = 80 \text{ МПа}$. Определите значения расчётных напряжений в этой точке элемента конструкции по II, III и IV гипотезам прочности. Дополнительные данные: $\mu = 0,3$.

Решение

$$\sigma_{\text{расч}}^{\text{II}} = \sigma_1 - \mu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3) = 120 - 0,3 \cdot (100 + 80) = 66 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{расч}}^{\text{III}} = \sigma_1 - \sigma_3 = 120 - 80 = 40 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{расч}}^{\text{IV}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} =$$

$$= 0,71 \cdot \sqrt{(120 - 100)^2 + (100 - 80)^2 + (120 - 80)^2} = 34,6 \text{ МПа}$$

Ответ: $\sigma_{\text{расч}}^{\text{II}} = 66 \text{ МПа}$; $\sigma_{\text{расч}}^{\text{III}} = 40 \text{ МПа}$; $\sigma_{\text{расч}}^{\text{IV}} = 34,6 \text{ МПа}$

Пример 2.3

Для тонкостенной цилиндрической обечайки сварного аппарата, находящегося под внутренним давлением, проводилось измерение напряжений по двум взаимно перпендикулярным направлениям с нормальными α , β . Отсчёт углов α и β проводится от кольцевого направления (ось t): $\alpha = 50^\circ$, $\beta = 140^\circ$. Величина измеренного напряжения $\sigma_\alpha = 21,2 \text{ МПа}$, $\sigma_\beta = 23,8 \text{ МПа}$. Определить главные напряжения в стенке обечайки.

Решение

Для цилиндрической обечайки имеем:

$$\sigma_t = \sigma_1; \sigma_z = \sigma_2.$$

Нормальные напряжения на площадках с нормальными α , β определяются (см. формулу 2.4):

$$\sigma_\alpha = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \sin^2 \alpha \quad (2.3.1)$$

$$\sigma_\beta = \sigma_1 \cdot \cos^2 \beta + \sigma_2 \cdot \sin^2 \beta \quad (2.3.2).$$

Решаем систему уравнений

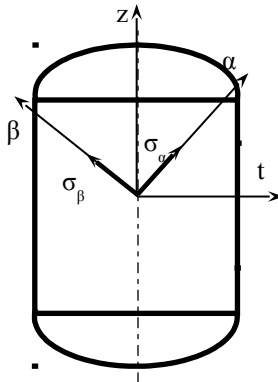
$$21,2 = \sigma_1 \cdot \cos^2 50 + \sigma_2 \cdot \sin^2 50 \quad (1^*)$$

$$23,8 = \sigma_1 \cdot \cos^2 140 + \sigma_2 \cdot \sin^2 140 \quad (2^*).$$

$$21,2 = \sigma_1 \cdot 0,4132 + \sigma_2 \cdot 0,5868 \quad (1^{**})$$

$$23,8 = \sigma_1 \cdot 0,5868 + \sigma_2 \cdot 0,4132 \quad (2^{**}).$$

Введём множитель $0,5868/0,4132=1,4201$



Уравнение (2**) почленно умножаем на 1,4201, получаем

$$33,7984 = \sigma_1 \cdot 0,8333 + \sigma_2 \cdot 0,5868 \quad (2^{***})$$

Из (1*) вычитаем (2***): $-12,5984 = -\sigma_1 \cdot 0,4201$

Откуда получаем $\sigma_1 = 12,5984 / 0,4201 = 30 \text{ МПа}$

Из (1**) получаем

$$\sigma_2 = \frac{21,2 - \sigma_1 \cdot 0,4132}{0,5868} = \frac{21,2 - 30 \cdot 0,4132}{0,5868} = 15 \text{ МПа}$$

Проверка: Известно, что для тонкостенной цилиндрической обечайки, находящейся под внешним давлением, имеет место соотношение $\sigma_t / \sigma_z = 2$. Получено $\sigma_1 / \sigma_2 = 30 / 15 = 2$.

Ответ: $\sigma_1 = \sigma_t = 30 \text{ МПа}$; $\sigma_z = \sigma_2 = 15 \text{ МПа}$.

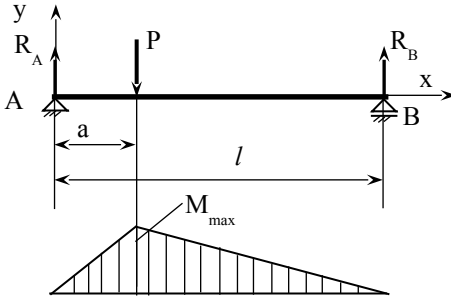
Пример 2.4.

Определить величину допустимой силы [P], приложенной в заданной точке ($a=1/3$) от левой опоры элемента колосниковой решётки. Колосниковая решётка выполнена из стального двутавра №10 ($W_x = 39,7 \text{ см}^3$ см. таблицу П16) длиной $l = 3 \text{ м}$. Допускаемое напряжение $[\sigma] = 140 \text{ МПа}$.

Решение

Расчётную схему элемента колосниковой решётки представляем в виде двух-опорной балки, нагруженной сосредоточенной силой. При заданном сечении балки $[M] = W_x \cdot [\sigma] = 39,7 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^6 = 5558 \text{ Н} \cdot \text{м}$. При $P = [P]$, $M_{\max} = [M]$

Изгибающий момент вдоль балки изменяется линейно от нуля в опорах до $M_{\max}$ в точке приложения силы P. Дальнейшее решение состоим в нахождении взаимосвязи [M] и [P].



Для представленной расчётной схемы имеем: $M_{\max} = R_A \cdot a = R_B \cdot (l - a)$.

Опорные реакции R_A и R_B в общем виде определим из уравнений равновесия балки в виде суммы относительно опор A или B моментов сил, приложенных к балке.

$$\sum M_A(P) = 0; R_B \cdot l - P \cdot a = 0 \rightarrow R_B = P \cdot a / l$$

$$\sum M_B(P) = 0; R_A \cdot l - P \cdot (l - a) = 0 \rightarrow R_A = P \cdot (l - a) / l$$

$$\text{Проверка: } \sum P_y = 0; R_A + R_B - P = 0 \rightarrow$$

$$P \cdot (l - a) / l + P \cdot a / l - P = 0 \rightarrow 0 \equiv 0.$$

$$M_{\max} = R_A \cdot a = [P \cdot (l - a) / l] \cdot a \rightarrow [M] = R_A \cdot a = [P \cdot (l - a) / l] \cdot a,$$

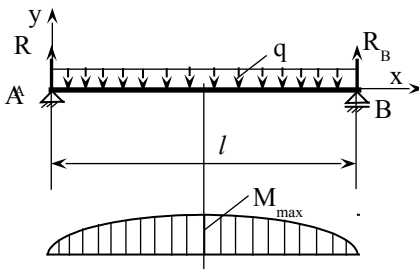
$$\text{откуда } [P] = \{[M] \cdot l\} / [(l - a) \cdot a] = \{5558 \cdot 3\} / [(3 - 1) \cdot 1] = 8337 \text{ Н}$$

Ответ: $[P] = 8337 \text{ Н}$.

Пример 2.5.

Определить величину допустимой интенсивности равномерно распределённой нагрузки $[q]$, приложенной к элементу колосниковой решётки. Колосниковая решётка выполнена из стального двутавра №10 ($W_x = 39,7 \text{ см}^3$ см. таблицу П16) длиной $l = 3 \text{ м}$. Допускаемое напряжение $[\sigma] = 140 \text{ МПа}$.

Решение



Расчётную схему элемента колосниковой решётки представляем в виде двухопорной балки, нагруженной равномерно распределённой нагрузкой. При заданном сечении балки $[M] = W_x \cdot [\sigma] = 39,7 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^6 = 5558 \text{ Н} \cdot \text{м}$

$$\text{При } q = [q], M_{\max} = [M]$$

Изгибающий момент вдоль балки изменяется по параболе от нуля в опорах до $M_{\max}$ в середине балки.

Из сопротивления материалов известно, что для такого нагружения балки имеем $M_{\max} = ql^2/8$. Дальнейшее решение состоит в нахождении $[q]$ по величине $[M]$.

$$[M] = [q]l^2/8, \text{ откуда } [q] = 8 \cdot [M]/l^2 = 8 \cdot 5558/3^2 = 4940 \text{ Н/м.}$$

Ответ: $[q] = 4940 \text{ Н/м.}$

Пример 2.6.

Определить экономичность при изгибе балок из двутавра №10 и кольцевого сечения $c = d/D = 0,75$. Балки имеют равновеликие сечения.

Решение

Дополнительные данные. По ГОСТ 8239–89 для двутавра №10 имеем осевой момент сопротивления $W_x = 39,7 \text{ см}^3$; площадь поперечного сечения $F = 12 \text{ см}^2$; высота профиля $h_{\text{пр}} = 10 \text{ см}$ (см. таблицу П9).

Экономичность профиля при изгибе характеризуется коэффициентом $\alpha = W_x/(F \cdot h)$. Для двутавра $\alpha_{\text{дв}} = W_{x\text{дв}}/(F_{\text{дв}} \cdot h_{\text{дв}}) = 39,7/(12 \cdot 10) = 0,33$.

Для нахождения $\alpha_{\text{кольца}}$ необходимо определить $W_{\text{хк}}$, $F_{\text{к}}$. Для кольца высота профиля $h_{\text{к}} = D$. Задачу решаем из условия равновеликости сечений двутавра и кольца $F_{\text{к}} = F_{\text{дв}} = F = 12 \text{ см}^2$.

$F = 0,785 \cdot D^2 \cdot (1 - c^2) = 12 \text{ см}^2$, откуда $D = [F/0,785 \cdot (1 - c^2)]^{0,5} = [12/0,785 \cdot (1 - 0,75^2)]^{0,5} = 5,91 \text{ см}$.

Находим осевой момент сопротивления $W_{\text{хк}}$ кольцевого сечения, равновеликого сечению двутавра

$$W_{\text{к}} = 0,1 \cdot D^3 \cdot (1 - c^4) = 0,1 \cdot 5,91^3 \cdot (1 - 0,75^4) = 14,12 \text{ см}^3$$

Определяем экономичность при изгибе балки кольцевого сечения, равновеликого двутавру № 10.

$$\alpha_{\text{к}} = W_{\text{хк}}/(F \cdot D) = 14,12/(12 \cdot 5,91) = 0,2.$$

Ответ: $\alpha_{\text{дв}} = 0,33$; $\alpha_{\text{к}} = 0,2$.

3. Расчёт на прочность тонкостенных корпусов аппаратов

3.1. Основные определения и расчётные формулы

Химические аппараты в большинстве своём представляют собой оболочки в виде цилиндров, шаров, конусов или их комбинации (колонные аппараты, цилиндрические и сферические резервуары, паровые котлы и др.).

Оболочка – пространственная конструкция, ограниченная двумя криволинейными поверхностями, расстояние между которыми (толщина стенки s) мало по сравнению с остальными её размерами (рис. 3.1).

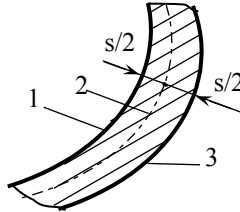


Рис. 3.1 - Схема образования оболочки: 1 – внутренняя стенка; 2 – срединная поверхность; 3 – наружная стенка.

Срединная поверхность – поверхность, точки которой одинаково отстоят от внутренней и внешней стенки оболочки.

Оболочка вращения – оболочка, срединная поверхность которой, образована вращением какой-либо плоской кривой вокруг оси, лежащей в её плоскости и не пересекающей кривую.

Образующая – кривая, вращением которой образована срединная поверхность оболочки (L на рисунке 3.2). *Полус* – точка пересечения срединной с осью вращения (t , s на рисунке 3.2).

Меридиан – кривая пересечения срединной поверхности плоскостью, проходящей через ось, называется меридианом или первым главным сечением. Радиус кривизны ρ_m срединной поверхности в направлении меридиана называется *первым главным радиусом кривизны*. Радиус кривизны ρ_k срединной поверхности в направлении, перпендикулярном меридиану, называют *вторым главным радиусом кривизны*.

Сфера образована вращением полуокружности вокруг диаметра (рис. 3.2 а): $\rho_m = \rho_k = R$. Цилиндр образован вращением отрезка прямой вокруг оси, параллельной образующей и отстоящей от оси на расстоянии, равном радиусу цилиндра (рис. 3.2 б): $\rho_m = \infty$; $\rho_k = R$. Конус образован вращением гипотенузы треугольника вокруг одного из катетов (рис. 3.2 в): $\rho_m = \infty$; $\rho_k = r/\cos\alpha$.

Расчёт на прочность тонкостенных оболочек основан на безмоментной теории, согласно которой при расчёте учитывают только растягивающие или сжимающие усилия в стенке оболочки, возникающих при действии рабочих нагрузок. Основное уравнение безмоментной теории – уравнение Лапласа

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_k}{\rho_k} = \frac{p}{s_p} \quad (3.1)$$

здесь σ_m – меридиональное напряжение; σ_k (σ_t) – кольцевое (окружное) напряжение; ρ_m – радиус кривизны срединной поверхности оболочки в направлении меридиональной кривой; ρ_k – радиус кривизны срединной поверхности оболочки в направлении, перпендикулярном меридиональной кривой; p – внутреннее избыточное давление; s_p – расчётная толщина стенки оболочки.

Уравнение Лапласа справедливо для тонкостенных оболочек. Условие тонкостенности оболочек имеет вид:

для обечаек и труб $D_B \geq 200$ мм

$$\frac{s_p + c}{D_B} \leq 0,1 \quad (3.2 \text{ а})$$

для труб $D_B < 200$ мм

$$\frac{s_p + c}{D_B} \leq 0,3 \quad (3.2 \text{ б})$$

здесь $(s_p + c)$ – исполнительная толщина стенки оболочки; D_B – внутренний диаметр оболочки.

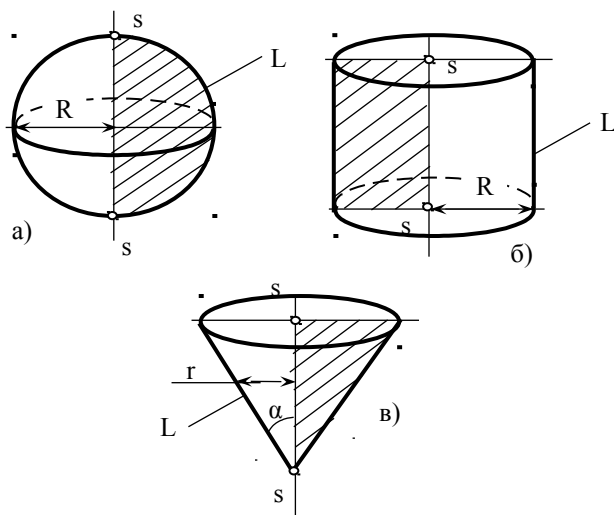
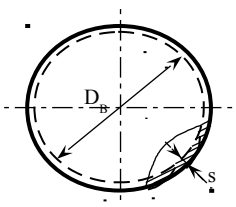
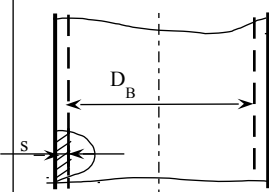
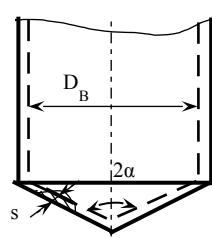
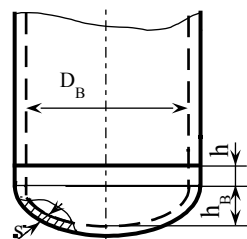


Рис. 3.2 - Схемы образования срединной поверхности сферы (а), цилиндра (б), конуса (в): s – полюс срединной поверхности; L – образующая срединной поверхности

В таблице 3.1. приведены формулы для определения расчётной толщины стенки и допустимого давления тонкостенных оболочек и днищ аппаратов, нагруженных внутренним давлением.

Таблица 3.1 - Формулы для определения расчётной толщины стенки и допустимого давления тонкостенных оболочек

Вид	Расчётная схема	Формулы
Сферическая оболочка		$s_p = \frac{p \cdot D_B}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p} \quad (3.3)$ $[p] = \frac{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + (s - c)} \quad (3.4)$
Цилиндрическая обечайка		$s_p = \frac{p \cdot D_B}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p} \quad (3.5)$ $[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + (s - c)} \quad (3.6)$
Коническое днище $2\alpha \leq 120^\circ$		$s_p = \frac{p \cdot D_B}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p) \cdot \cos \alpha} \quad (3.7)$ $[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c) \cdot \cos \alpha}{D_B + (s - c)} \quad (3.8)$
Стандартное эллиптическое отбортованное днище		$s_p = \frac{p \cdot D_B}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot p} \quad (3.9)$ $[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + 0,5 \cdot (s - c)} \quad (3.10)$

Для цельносварного цилиндрического аппарата с неотбортованными днищами (рис. 3.3) с заданными объёмом V и базовым диаметром $D = D_B$ площадь поверхности элементов находим по формулам

$$F_u = \frac{4 \cdot V}{D} - 1,05 \cdot D^2 \quad (3.13)$$

$$F_{\partial n} = 1,24 \cdot D^2 \quad (3.14)$$

$$F_{\Sigma} = F_u + 2 \cdot F_{\partial n} \quad , \quad (3.15)$$

здесь F_u , $F_{\partial n}$, F_{Σ} – площадь поверхности цилиндрической обечайки, эллиптического днища, всего аппарата, соответственно

Высота элементов аппарата находится по формулам (см. рис. 3.3)

$$L_u = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} - \frac{D}{3} \quad (3.16)$$

$$h_B = 0,25 \cdot D \quad (3.17)$$

$$L_{\Sigma} = L_u + 2 \cdot h_B = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} + 0,17 \cdot D \quad , \quad (3.18)$$

здесь L_u – высота цилиндрической обечайки, h_B – внутренняя высота выпуклой части эллиптического днища; L_{Σ} – общая высота, соответственно.

Коническое днище изготавливают вальцовкой из листового проката. Размеры днища, необходимые при конструировании аппарата с коническим днищем, определяются, опираясь на значения внутреннего диаметра аппарата D_B и угла конуса днища (рис. 3.4 а).

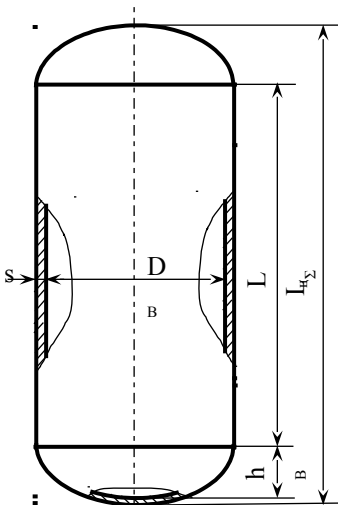


Рис. 3.3 - Схема цельносварного цилиндрического аппарата с неотбортованными эллиптическими днищами. Обозначения: D_B –внутренний диаметр обечайки; s – толщина стенки; h_B – внутренняя высота выпуклой части днища; L_u – высота обечайки; L_{Σ} – общая высота аппарата

Высота h_k днища

$$h_k = \frac{D_B}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_k} \quad (3.19)$$

Длина образующей l_k днища

$$l_k = \frac{D_B}{2 \cdot \sin \alpha_k} \quad (3.20)$$

Угол развёртки φ_k днища

$$\varphi_k = 360 \cdot \sin \alpha_k \quad (3.21)$$

Размеры $A \times B$ листовой заготовки для конического днища (рис. 3.4 б) определяются в зависимости от величины угла конуса α_k днища по формулам, приведенным в таблице 3.3.

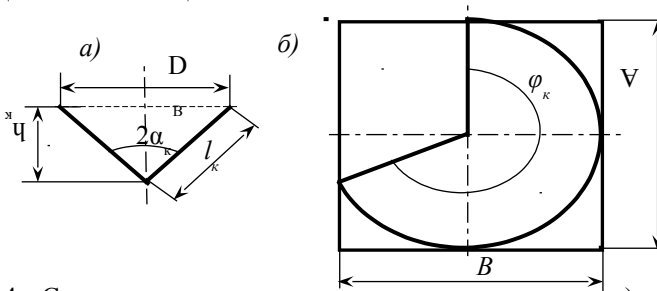


Рис. 3.4 - Схемы к определению размеров конического днища: а) эскиз конического днища аппарата; б) развёртка конического неотбортованного днища. Обозначения: D_B – внутренний диаметр аппарата; l_k – длина образующей днища; $2\alpha_k$ – угол конуса днища; A, B – размеры листа заготовки; φ_k – угол развёртки

Поверхность F_k конического днища

$$F_k = 0,785 \cdot \frac{D_B^2}{\sin \alpha_k} \quad (3.22)$$

Вместимость V_k конического днища

$$V_k = 0,131 \cdot \frac{D_B^3}{\operatorname{tg} \alpha_k} \quad (3.23)$$

Таблица 3.3 - Размеры A, B листа заготовки для конического неотбортованного днища

α_k	φ_k	A	B
до 30°	менее 180°	$l_k \cdot [1 - \sin (180 - \varphi_k)]$	l_k
30°	180°	$2 \cdot l_k$	l_k
$30 \dots 48,6^\circ$	$180 \dots 270^\circ$	$2 \cdot l_k$	$l_k \cdot [1 + \sin (\varphi_k - 180)]$
более $48,6^\circ$	более 270°	$2 \cdot l_k$	$2 \cdot l_k$

Пояснения: $\alpha_k, \varphi_k, l_k, A, B$ см. на рис. 3.4

3.2. Примеры расчёта

Пример 3.1.

Для стальных аппаратов, работающих под внутренним давлением.

1. Определить расчётную толщину стенки тонкостенных аппаратов различного конструктивного исполнения: а) сферическая обечайка; б) цилиндрическая обечайка; в) стандартное эллиптическое днище; г) коническое днище $2\alpha = 90^\circ$.

2. Проверить выполнение условия тонкостенности для аппарата с наибольшей толщиной стенки.

Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 1000$ мм; допускаемое напряжение $[\sigma] = 147$ МПа; давление в аппарате $p = 1$ МПа; коэффициент прочности сварного шва $\varphi = 1$ (сварка автоматическая); конструктивная прибавка $c = 1$ мм.

Решение

1. Определение расчётной толщины стенки. Формулы для определения расчётной толщины стенки тонкостенных аппаратов, работающих под внутренним давлением см. в таблице 3.1.

$$1, \text{ а) } s_{p.c\phi} = \frac{p \cdot D_B}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p} = \frac{1 \cdot 1000}{4 \cdot 1 \cdot 147 - 1} = 1,7 \text{ мм}$$

$$1, \text{ б) } s_{p.ц} = \frac{p \cdot D_B}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p} = \frac{1 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 147 - 1} = 3,41 \text{ мм}$$

$$1, \text{ в) } s_{p.эл.д} = \frac{p \cdot D_B}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot p} = \frac{1 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 147 - 0,5 \cdot 1} = 3,4 \text{ мм}$$

$$1, \text{ г) } s_{p.кон.д} = \frac{p \cdot D_B}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p) \cdot \cos \alpha} = \frac{1 \cdot 1000}{(2 \cdot 1 \cdot 147 - 1) \cdot \cos 45} = 4,83$$

мм

Анализ результатов: при прочих равных условиях наибольшую толщину стенки имеет коническое днище.

2. Проверка условия тонкостенности. Проверку условия тонкостенности проводим для конического днища, как имеющего наибольшую расчётную толщину стенки.

$$\frac{s_{p.кон.д} + c}{D_B} = \frac{4,83 + 1}{1000} = 0,00583 < 0,1. \text{ Условие тонкостенности}$$

выполняется.

Ответ: $s_{p.c\phi} = 1,7$ мм; $s_{p.ц} = 3,41$ мм; $s_{p.эл.д} = 3,4$ мм; $s_{p.кон.д} = 4,83$ мм.

Пример 3.2.

Тонкостенные аппараты работают под внутренним давлением. Определить допустимое давление для аппаратов разного конструктивного исполнения: а) сферическая обечайка; б) цилиндрическая обечайка; в) стандартное эллиптическое днище; г) коническое днище $2\alpha = 90^\circ$.

Исходные данные: исполнительная толщина стенки $s = 5$ мм; внутренний диаметр аппарата $D_B = 1000$ мм; допускаемое напряжение $[\sigma] = 147$ МПа; коэффициент прочности сварного шва $\varphi = 1$ (сварка автоматическая); конструктивная прибавка $c = 1$ мм.

Решение

Формулы для определения допустимого давления для тонкостенных аппаратов, работающих под внутренним давлением см. в таблице 3.1.

$$\text{а) } [p]_{сф} = \frac{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + (s - c)} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 147 \cdot (5 - 1)}{1000 + (5 - 1)} = 2,34 \text{ МПа}$$

$$\text{б) } [p]_{ц} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + (s - c)} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 147 \cdot (5 - 1)}{1000 + (5 - 1)} = 1,17 \text{ МПа}$$

$$\text{в) } [p]_{эл.д} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + 0,5 \cdot (s - c)} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 147 \cdot (5 - 1)}{1000 + 0,5 \cdot (5 - 1)} = 1,174 \text{ МПа}$$

$$\text{г) } [p]_{кон.д} = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c) \cdot \cos \alpha}{D_B + (s - c)} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 147 \cdot (5 - 1) \cdot \cos 45}{1000 + (5 - 1)} =$$

0,83 МПа

Анализ результатов: при прочих равных условиях наибольшее допускаемое давление стенки имеет сферический аппарат.

Ответ: $[p]_{сф} = 2,24$ МПа; $[p]_{ц} = 1,17$ МПа; $[p]_{эл.д} = 1,174$ МПа; $[p]_{кон.д} = 0,83$ МПа.

Пример 3.3.

Определить расчётную толщину плоского неотбортованного стального днища (тип 1) аппарата, нагруженного внутренним давлением. Днище имеет центральное отверстие диаметром $d = 100$ мм.

Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 600$ мм; допускаемое напряжение стали $[\sigma] = 140$ МПа; давление в аппарате $p = 0,1$ МПа.

Решение

Формулу для определения расчётной толщины плоского неотбортованного днища см. в таблице 3.1.

Предварительные расчёты: для плоского днища типа 1 имеем $k = 0,55$; при $d/D_B = 100/600 = 0,17 < 0,35$, принимаем $k_0 = 1 - 0,43 \cdot 100/600 = 0,93$

$$s_{1p} = \frac{k}{k_0} \cdot D_B \cdot \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} = \frac{0,55}{0,93} \cdot 600 \cdot \sqrt{\frac{0,1}{140}} = 9,5 \text{ мм}$$

Ответ: $s_{ip} = 9,5 \text{ мм}$

Пример 3.4.

Определить допускаемое рабочее давление в стальном аппарате с плоским неотбортованным днищем (тип 1). Днище не имеет технологических отверстий.

Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 600 \text{ мм}$; допускаемое напряжение стали $[\sigma] = 140 \text{ МПа}$; исполнительная толщина стенки аппарата $s_1 = 9 \text{ мм}$; конструктивная прибавка к толщине стенки $c = 1 \text{ мм}$.

Решение

Формулу для определения допускаемого давления в аппарате с плоским неотбортованным днищем см. в таблице 3.1.

Предварительно принимаем значения коэффициентов в формуле (3.12): $k_0 = 1$; $k = 0,55$

$$[p] = \left[\frac{k_0}{k} \cdot \frac{(s_1 - c)}{D_B} \right]^2 \cdot [\sigma] = \left[\frac{1}{0,55} \cdot \frac{(9 - 1)}{600} \right]^2 \cdot 140 = 0,08 \text{ МПа}$$

Ответ: $[p] = 0,08 \text{ МПа}$

Пример 3.5.

Определить исполнительную толщину стенки и массу плоского неотбортованного (тип 1) и стандартного эллиптического отбортованного днищ стального аппарата, работающего под внутренним давлением. Днища не имеют технологических отверстий.

Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 600 \text{ мм}$; допускаемое напряжение стали $[\sigma] = 140 \text{ МПа}$; давление в аппарате $p = 0,5 \text{ МПа}$; коэффициент прочности сварного шва $\varphi = 1$; конструктивная прибавка к толщине стенки $c = 1 \text{ мм}$.

Решение

По формулам таблицы 3.1 определяем исполнительную толщину днищ

$$s_{эл} = \frac{p \cdot D_B}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot p} + c = \frac{0,5 \cdot 600}{2 \cdot 1 \cdot 140 - 0,5 \cdot 0,5} + 1 = 2,07 \text{ мм}$$

Плоское днище типа 1, не имеющее технологических отверстий. Расчётные коэффициенты: $k = 0,55$; $k_0 = 1$

$$s_1 = \frac{k}{k_0} \cdot D_B \cdot \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} + c = \frac{0,55}{1} \cdot 600 \cdot \sqrt{\frac{0,5}{140}} + 1 = 20,7 \text{ мм}$$

Определяем массу днищ. Принимаем плотность стали $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$

Массу плоского днища определяем расчётом

$$m_{пл} = 0,785 \cdot D_B^2 \cdot s_1 \cdot \rho = 0,785 \cdot 0,6^2 \cdot 0,0207 \cdot 7850 = 45,9 \text{ кг}$$

Массу эллиптического днища определяем по таблицам ГОСТ 67533–68. Принимаем толщину стенки $s_{эл} = 4$ мм, тогда масса днища при $D_B = 600$ мм составит $m_{эл} = 13,9$ кг (см. таблицу П 14).

Ответ: $m_{пл} = 45,9$ кг; $m_{эл} = 13,9$ кг

Пример 3.6.

Цельносварной цилиндрический аппарат с неотбортованными эллиптическими днищами (см. рис. 3.3) подлежит гуммированию. Определить площадь поверхности аппарата, опираясь в качестве базового на внутренний диаметр аппарата. Исходные данные: объем полости аппарата $V = 1$ м³, базовый диаметр $D_B = 0,6$ м.

Решение

Расчётные формулы см. в 3.1

Поверхность цилиндрической части аппарата

$$F_u = \frac{4 \cdot V}{D} - 1,05 \cdot D^2 = \frac{4 \cdot 1}{0,6} - 1,05 \cdot 0,6^2 = 6,299 \text{ м}^2$$

Поверхность неотбортованного эллиптического днища

$$F_{он} = 1,24 \cdot D^2 = 1,24 \cdot 0,6^2 = 0,4464 \text{ м}^2$$

Общая площадь поверхности аппарата

$$F_{\Sigma} = F_u + 2 \cdot F_{он} = 6,299 + 2 \cdot 0,4464 = 6,6754 \text{ м}^2$$

Ответ: $F_{\Sigma} = 6,6754 \text{ м}^2$

Пример 3.7.

Определить высоту цельносварного цилиндрического аппарата с неотбортованными эллиптическими днищами (см. рис. 3.3), опираясь в качестве базового на внутренний диаметр аппарата. Исходные данные: объем полости аппарата $V = 1$ м³, базовый диаметр $D_B = 0,6$ м.

Решение

Расчётные формулы см. в 3.1

$$L_u = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} - \frac{D}{3} = \frac{4 \cdot 1}{\pi \cdot 0,6^2} - \frac{0,6}{3} = 3,34 \text{ м}$$

$$h_B = 0,25 \cdot D = 0,25 \cdot 0,6 = 0,15 \text{ м}$$

$$L_{\Sigma} = L_u + 2 \cdot h_B = 3,34 + 2 \cdot 0,15 = 3,64 \text{ м}$$

Ответ: $L_{\Sigma} = 3,64 \text{ м}$

Пример 3.8.

Определить площадь поверхности и вместимость конического неотбортованного днища (рис. 3.4 а). Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 0,6$ м, угол конуса днища $\alpha_k = 45^\circ$.

Решение

Расчётные формулы см. 3.1.

Площадь поверхности днища

$$F_k = 0,785 \cdot \frac{D_B^2}{\sin \alpha_k} = 0,785 \cdot \frac{0,6^2}{\sin 45} = 0,4 \text{ м}^2$$

Вместимость днища

$$V_k = 0,131 \cdot \frac{D_B^3}{\operatorname{tg} \alpha_k} = 0,131 \cdot \frac{0,6^3}{\operatorname{tg} 45} = 0,028 \text{ м}^3$$

Ответ: $F_k = 0,4 \text{ м}^2$; $V_k = 0,028 \text{ м}^3$

Пример 3.9.

Определить размеры заготовки из листа для конического неотбортованного днища (рис. 3.4 б). Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 0,6 \text{ м}$, угол конуса днища $\alpha_k = 45^\circ$.

Решение

Расчётные формулы см. 3.1.

Определим дополнительные данные днища

$$l_k = \frac{D_B}{2 \cdot \sin \alpha_k} = \frac{0,6}{2 \cdot \sin 45} = 0,424 \text{ м}$$

$$\varphi_k = 360 \cdot \sin \alpha_k = 360 \cdot \sin 45 = 254,6^\circ$$

По таблице 3.3 выбираем формулы для определения А и В. Для $30 < \alpha_k < 48,6^\circ$ имеем

$$A = 2 \cdot l_k = 2 \cdot 0,424 = 0,848 \text{ м}$$

$$B = l_k \cdot [1 + \sin (\varphi_k - 180)] = 0,424 \cdot [1 + \sin (254,6 - 180)] = 0,833 \text{ м}$$

Ответ: $A = 0,848 \text{ м}$; $B = 0,833 \text{ м}$

4. Расчёт укрепления отверстий тонкостенных аппаратов

4.1. Расчётные формулы

В обечайках и днищах тонкостенных аппаратов вырезают технологические отверстия для установки штуцеров, люков и др. (рис. 4.1).

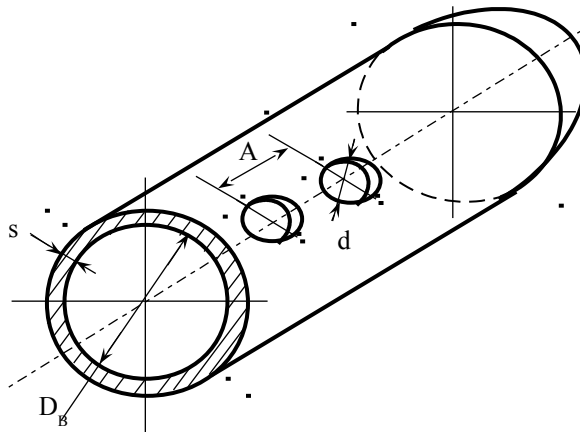


Рис. 4.1 - Тонкостенный аппарат с технологическими отверстиями (схема)

Отверстия ослабляют сечение, воспринимающее нагрузку, и являются концентраторами напряжений.

Укрепление отверстия представляет собой конструктивные изменения для компенсации металла, удалённого при изготовлении отверстия.

Условие прочности укрепления выреза

$$F_0 \leq \Sigma F_i, \quad (4.1)$$

здесь F_0 – расчётная площадь поперечного сечения металла стенки, удалённого вырезом; ΣF_i – сумма площадей поперечного сечения укрепляющих конструктивных элементов.

$$F_0 = (d - d_\partial) \cdot s_p, \quad (4.2)$$

здесь d – диаметр ослабляющего отверстия (рис. 4.1); d_∂ – допустимый диаметр отверстия, не требующего укрепления; $s_p = (s - c)$ – расчётная толщина стенки (рис. 4.1).

Значение *допустимого диаметра отверстия* d_ϕ , не требующего укрепления, определяется в зависимости от формы аппарата (цилиндр, эллипс, конус и др.). Для цилиндрической обечайки величина d_ϕ определяется

$$d_\phi = 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_B \cdot (s - c)} - c \right] \quad (4.3)$$

Формула (4.3) применима при наличии избыточной толщины стенки обечайки.

Конструктивные способы укрепления отверстий см. [2 с.499]:

- утолщение стенки обечайки;
- приварным патрубком с внешней и внешней и внутренней стороны;
- приварным кольцом (снаружи; снаружи и изнутри);
- отбортовкой стенки;
- бобышками (врезной и накладной).

Если в обечайке несколько отверстий (рис. 4.2.), то при расчёте укрепления определяется *наименьшее (допустимое) расстояние* A_ϕ между центрами двух смежных отверстий, при укреплении которых не требуется учитывать их взаимное влияние

$$A_\phi = 0,7 \cdot (d_{n1} + d_{n2}) + 2 \cdot s_{n1} + 2 \cdot s_{n2}, \quad (4.4)$$

здесь d_{n1} , d_{n2} – внутренний диаметр патрубков штуцеров; s_{n1} , s_{n2} – толщина стенки патрубков (см. рис 4.2)

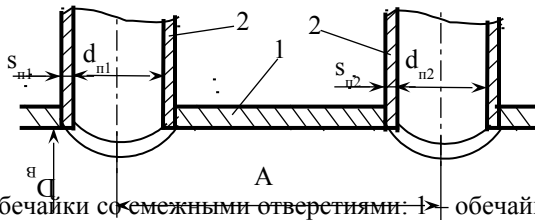


Рис. 4.2. Схема обечайки с смежными отверстиями: 1 – обечайка; 2 – патрубок штуцера

Если конструктивное расстояние между отверстиями A (см. рис. 4.2) больше расчётного значения A_ϕ , то взаимное влияние отверстий не учитывается и расчёт укрепления отверстий проводится как для одиночных. В противном случае, когда $A < A_\phi$, требуется учитывать взаимное влияние отверстий. В этом случае расчёт укрепления проводят для одиночного отверстия с некоторым *условным диаметром* d_y

$$d_y = A + 0,5 \cdot (d_{n1} + d_{n2}) + 2 \cdot c \quad (4.5)$$

4.2. Примеры расчёта

Пример 4.1.

Проверить необходимость укрепления одиночного отверстия для трубы с наружным диаметром $d_H = 162$ мм в цилиндрической обечайке с внутренним диаметром $D_B = 1000$ мм. Исходные данные: расчётная толщина стенки обечайки $s_p = 3,4$ мм, исполнительная толщина стенки обечайки $s = 5$ мм, конструктивная прибавка к толщине стенки обечайки $c = 1$ мм.

Решение

Для выяснения необходимости укрепления отверстия следует его диаметр d_H сравнить со значением расчётного диаметра d_o отверстия, не требующего укрепления. Расчётные формулы см. в разделе 4.1.

$$\begin{aligned} d_o &= 2 \cdot \left[\left(\frac{s-c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_B \cdot (s-c)} - c \right] = \\ &= 2 \cdot \left[\left(\frac{5-1}{3,4} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{1000 \cdot (5-1)} - 1 \right] = 46 \text{ мм} \end{aligned}$$

Поскольку $d_H = 162$ мм $>$ $d_o = 46$ мм, поэтому отверстие в обечайке требует укрепления.

Ответ: Отверстие в обечайке под трубу $d_H = 162$ мм требует укрепления.

Пример 4.2.

В обечайке размещены два патрубка из трубы с внутренним диаметром $d_{П1} = d_{П2} = 180$ мм. Расстояние между осями патрубков $A = 250$ мм. Толщина стенки патрубков $s_{П1} = s_{П2} = 5$ мм. Определить необходимость учёта взаимного влияния отверстий для патрубков при их укреплении.

Решение

Для выяснения необходимости учёта взаимного влияния отверстий при их укреплении следует расстояние между осями патрубков A сравнить со значением расчётного допустимого расстояния A_o , при котором отверстия можно рассматривать как одиночные. Расчётные формулы см. в разделе 4.1.

$$A_o = 0,7 \cdot (d_{П1} + d_{П2}) + 2 \cdot s_{П1} + 2 \cdot s_{П2} = 0,7 \cdot (180 + 180) + 2 \cdot 5 + 2 \cdot 5 = 272 \text{ мм}$$

Анализ: поскольку $A = 250$ мм $<$ $A_o = 272$ мм, то при укреплении отверстий в обечайке требуется учитывать их взаимное влияние.

Ответ: при укреплении отверстий в обечайке требуется учитывать их взаимное влияние.

Пример 4.3.

В обечайке размещены два патрубка из трубы с внутренним диаметром $d_{П1} = d_{П2} = 180$ мм. Расстояние между осями патрубков $A = 250$ мм. Из предварительных расчётов получено, что при укреплении отверстий требуется учитывать их взаимное влияние. Определить значение условного диаметра от-

верстия при расчёте укрепления двух смежных отверстий. Дополнительные данные: конструктивная прибавка к толщине стенки патрубка $c = 1$ мм.

Решение

Расчётную формулу для определения условного диаметра отверстия d_y см. в разделе 4.1.

$$d_y = A + 0,5 \cdot (d_{п1} + d_{п2}) + 2 \cdot c = 250 + 0,5 \cdot (180 + 180) + 2 \cdot 1 = 432 \text{ мм}$$

Ответ: $d_y = 432$ мм.

5. Расчёт устойчивости формы тонкостенных аппаратов

5.1. Расчётные формулы

Тонкостенный цилиндр под внешним давлением находится в менее благоприятных условиях по сравнению с цилиндром, нагруженным внутренним давлением. Внешнее давление приводит к нарушению цилиндричности формы аппарата. Сохранение первоначальных размеров и формы аппаратов является обязательным условием нормальной эксплуатации аппаратов. Поэтому расчёт аппаратов, работающих под внешним давлением, предусматривает определение толщины стенки, обеспечивающей прочность и неизменность формы (устойчивость) корпуса аппарата.

В этом случае внешнее расчётное давление $p_{нр}$ определяется как разность между внешним давлением $p_{вн}$ и остаточным давлением в аппарате $p_{ост}$.

$$p_{нр} = p_{вн} - p_{ост}$$

Для аппаратов, работающих под вакуумом, внешнее давление принимается равным атмосферному $p_{вн} = p_a = 0,1 \text{ МПа} = 1 \text{ кгс/см}^2$. Для аппаратов с рубашкой внешнее давление принимается равным давлению в рубашке $p_{вн} = p_{руб}$.

Критическое давление – внешнее давление, при котором поперечное сечение первоначально круглой обечайки, теряет первоначальную форму, называется критическим. На её поверхности образуются вмятины и она теряет свою первоначальную цилиндрическую форму. При расчёте тонкостенных цилиндров на устойчивость к действию внешнего давления обечайки подразделяются на гладкие обечайки (рис. 5.1) и обечайки, укреплённые кольцами жёсткости.

В зависимости от соотношения длины и диаметра обечайки, находящиеся под внешним давлением, подразделяются на две категории: короткие и длинные. Категория обечайки определяется по соотношению расчётной L и характеристической l_0 длины

$$L = L_1 + h + h_B \quad (5.1)$$

$$l_0 = 8,15 \cdot D_B \cdot \sqrt{\frac{D_B}{100 \cdot (s - c)}}, \quad (5.2)$$

здесь величины, входящие в формулы (5.1, 5.2) см. на рис. 5.1

Для коротких обечаек имеем соотношение длины к диаметру

$$1,5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (s - c)}{D_B}} \leq \frac{L}{D_B} \leq \sqrt{\frac{D_B}{2 \cdot (s - c)}} \quad (5.3)$$

Устойчивость коротких обечаек зависит от заделки их краёв. Для длинных обечаек отношение длины к диаметру определяется

$$\frac{L}{D_B} > \sqrt{\frac{D_B}{2 \cdot (s - c)}} \quad (5.4)$$

Условие работы в пределах упругости короткой гладкой обечайки

$$0,052 \cdot \sqrt[6]{\frac{p_p}{10^{-6} E}} \leq \frac{L}{D_B} \leq 7,68 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^{-6} E}{p_p}} \quad (5.5)$$

Устойчивость коротких обечаек зависит от заделки их краёв. Для длинных обечаек отношение длины к диаметру определяется

$$\frac{L}{D_B} > \sqrt{\frac{D_B}{2 \cdot (s - c)}} \quad (5.4)$$

Условие работы в пределах упругости короткой гладкой обечайки

$$0,052 \cdot \sqrt[6]{\frac{p_p}{10^{-6} E}} \leq \frac{L}{D_B} \leq 7,68 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^{-6} E}{p_p}} \quad (5.5)$$

Расчётная толщина стенки короткой обечайки, работающей в пределах упругости, определяется по формуле

$$s_p = 0,47 \cdot \frac{D_B}{100} \cdot \left(\frac{p_{np}}{10^{-6} E} \cdot \frac{L}{D_B} \right)^{0,4}, \quad (5.6)$$

где p_{np} – расчётное давление в аппарате; E – модуль упругости материала при расчётной температуре, МПа (таблица П 9).

Допускаемое давление для гладкой короткой обечайки, работающей в пределах упругости, из условия устойчивости определяют по формуле

$$[p_n]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot \frac{D_B}{l_p} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D_B} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (s - c)}{D_B}}, \quad (5.7)$$

здесь E – модуль упругости материала обечайки при рабочей температуре; $n_y = 2,4$ – коэффициент запаса устойчивости в рабочих условиях. Формулы (5.4) и (5.5) применимы при условии

$$\frac{s-c}{D_B} \leq 1,1 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L}{D_B}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_T}{10^{-3} E}\right)^2} \quad (5.8)$$

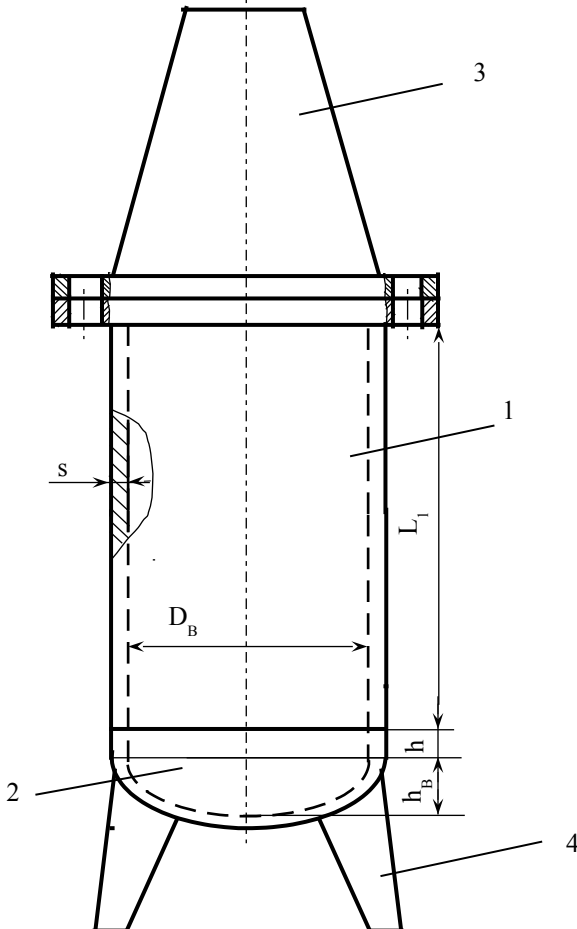


Рис. 5.1 - Аппарат с перемешивающим устройством, работающий под внешним давлением (схема): 1 – гладкая обечайка; 2 – эллиптическое отбортованное днище; 3 – перемешивающее устройство; 4 – опора

Если условие (5.8) не выполняется, то $[p_H]_E$ при заданной толщине стенки находят по формуле

$$[p_H]_E = \frac{2 \cdot E \cdot (s - c)}{D_B \cdot \xi_1}, \quad (5.9)$$

$$\text{где } \xi_1 = \frac{1,5 \cdot E}{\sigma_T} + 1,53 \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{D_B}{s - c} \cdot \left(\frac{L}{s - c} \right)^2.$$

Толщину стенки длинных гладких обечаек, работающих под наружным давлением в пределах упругости и удовлетворяющих условию

$$\frac{L}{D_B} > 7,68 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^{-6} E}{P_p}}, \text{ определяют по формуле}$$

$$s_p = 1,06 \cdot \frac{D_B}{100} \sqrt[3]{\frac{P_p}{10^{-6} E}} \quad (5.10)$$

Допустимое давление для длинных гладких обечаек при условии

$$\frac{L}{D_B} = \sqrt{\frac{D_B}{2 \cdot (s - c)}} \text{ находят по формуле}$$

$$[p_H]_E = 0,85 \cdot 10^{-6} E \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D_B} \right]^3 \quad (5.11)$$

Допускаемое давление для гладкой короткой обечайки, работающей в пределах упругости, из условия прочности определяют по формуле

$$[p_H]_\sigma = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + s - c} \quad (5.12)$$

Допускаемое давление для гладкой короткой обечайки, работающей в пределах упругости, из условия прочности и устойчивости определяют по формуле

$$[p_H] = \frac{[p_H]_\sigma}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p_H]_\sigma}{[p_H]_E} \right)^2}} \quad (5.13)$$

Если на обечайку помимо наружного давления действует осевое сжимающее усилие, то необходимо учитывать влияние на устойчивость совместного влияния наружного давления и осевого сжимающего усилия.

Допустимое осевое сжимающее усилие из условия прочности определяют по формуле

$$[F]_{\sigma} = \pi \cdot (D_B + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] , \quad (5.14)$$

здесь $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала обечайки при рабочей температуре

Допустимое осевое сжимающее усилие из условия устойчивости в пределах упругости определяют по формуле

$$[F]_E = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_B^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D_B} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (s - c)}{D_B}} \quad (5.15)$$

здесь E – модуль упругости материала обечайки при рабочей температуре; $n_y = 2,4$ – коэффициент запаса устойчивости в рабочих условиях.

Допустимое осевое сжимающее усилие с учётом выполнения обоих условий определяют по формуле

$$[F] = \frac{[F]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\sigma}}{[F]_E} \right)^2}} \quad (5.16)$$

Проверка выполнения условия устойчивости обечайки, находящейся под действием наружного давления и осевого сжимающего усилия выполняется по формуле

$$\frac{P_{нр}}{[P_n]} + \frac{F}{[F]} < 1 , \quad (5.17)$$

здесь F – расчётная осевая сжимающая сила

Для аппарата, изображённого на рис. 5.1, осевое расчётная сжимающая сила будет складываться из силы тяжести перемешивающего устройства и силы внешнего давления

$$F = m \cdot g + 0,785 \cdot D_B^2 \cdot p_{нр} \quad (5.18)$$

5.2. Примеры расчёта

Пример 5.1.

Определить категорию (длинная, короткая) цилиндрической обечайки, работающей под внешним давлением. Исходные данные: внутренний диаметр $D_B = 1000$ мм; исполнительная толщина стенки $s = 5$ мм; конструктивная прибавка к толщине стенки $c = 1$ мм; расчётная длина обечайки $L = 5$ м.

Решение

Для определения категории обечайки необходимо вычислить характеристическую длину обечайки l_0 и сравнить с расчётной длиной l_p . Расчётные формулы см. в разделе 5.1.

$$l_0 = 8,15 \cdot D_B \cdot \sqrt{\frac{D_B}{100 \cdot (s - c)}} = 8,15 \cdot 1000 \cdot \sqrt{\frac{1000}{100 \cdot (5 - 1)}} = 12888 \text{ мм} \approx 13$$

м.

Анализ: Так как $L = 5 < l_0 = 13$ м, обечайка является короткой.

Ответ: в расчётах на устойчивость обечайка рассматривается короткой.

Пример 5.2.

Гладкая короткая цилиндрическая обечайка работает под внешним давлением. Проверить для обечайки выполнение условия работы в пределах упругости

$$0,052 \cdot \sqrt[6]{\frac{p}{10^{-6} \cdot E}} \leq \frac{L}{D_B} \leq 7,68 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^{-6} \cdot E}{p}}.$$

Исходные данные: модуль упругости материала $E = 1,99 \cdot 10^5$ МПа; длина и внутренний диаметр обечайки, соответственно, $L = 4000$ мм, $D_B = 1000$ мм; внешнее давление $p = 0,65$ МПа.

Решение

Подставляем в условие работы исходные данные

$$0,052 \cdot \sqrt[6]{\frac{p}{10^{-6} \cdot E}} = 0,052 \cdot \sqrt[6]{\frac{0,65}{10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5}} = 0,064$$

$$7,68 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^{-6} \cdot E}{p}} = 7,68 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5}{0,65}} = 6,28$$

$$\frac{L}{D_B} = \frac{4000}{1000} = 4$$

Анализ: Обечайка работает в пределах упругости, поскольку

$$0,064 < \frac{L}{D_B} = 4 < 6,28.$$

Ответ: Обечайка работает в пределах упругости.

Пример 5.3.

Гладкая короткая цилиндрическая обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости. Определить расчётную толщину стенки обечайки.

Исходные данные: модуль упругости материала $E = 1,99 \cdot 10^5$ МПа; длина и внутренний диаметр обечайки, соответственно, $L = 4000$ мм, $D_B = 1000$ мм; внешнее давление $p = 0,15$ МПа.

Решение

Расчётные формулы см. в разделе 5.1.

$$s_p = 0,47 \cdot \frac{D_B}{100} \cdot \left(\frac{p}{10^{-6} \cdot E} \cdot \frac{L}{D_B} \right)^{0,4} =$$

$$s_p = 0,47 \cdot \frac{1000}{100} \cdot \left(\frac{0,15}{10^{-6} \cdot 1,99 \cdot 10^5} \cdot \frac{4000}{1000} \right)^{0,4} = 7,3 \text{ мм}$$

Ответ: $s_p = 7,3$ мм.

Пример 5.4.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости. Определить допускаемое давление для обечайки из условия устойчивости.

Исходные данные: модуль упругости материала $E = 1,84 \cdot 10^5$ МПа; расчётная длина и внутренний диаметр обечайки, соответственно, $L = 3000$ мм, $D_B = 1500$ мм; исполнительная толщина стенки обечайки $s = 8$ мм, конструктивная прибавка к толщине стенки $c = 1$ мм.

Решение

Расчётные формулы см. в разделе 5.1.

$$[p_H]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot \frac{D}{l_p} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (s - c)}{D}}$$

$$= \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot 1,84 \cdot 10^5}{2,4} \cdot \frac{1500}{3000} \cdot \left[\frac{100 \cdot (8 - 1)}{1500} \right]^2 \times \sqrt{\frac{100 \cdot (8 - 1)}{1500}} =$$

0,103 МПа

Ответ: $[p_H]_E = 0,103$ МПа

Пример 5.5.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости. Определить допускаемое давление для обечайки из условия прочности.

Исходные данные: внутренний диаметр обечайки $D_B = 1500$ [σ] = 128 МПа исполнительная толщина стенки обечайки $s = 8$ мм, конструктивная прибавка к толщине стенки $c = 1$ мм.

Решение

$$[p_H]_\sigma = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + s - c} = \frac{2 \cdot 128 \cdot (8 - 1)}{1500 + 8 - 1} = 1,19 \text{ МПа}$$

Ответ: $[p_H]_\sigma = 1,19 \text{ МПа}$

Пример 5.6.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости. Определить допускаемое давление для обечайки из условия прочности и устойчивости.

Исходные данные: допускаемое давление из условия прочности $[p_H]_\sigma = 1,19 \text{ МПа}$; допускаемое давление из условия устойчивости $[p_H]_E = 0,103 \text{ МПа}$.

Решение

$$[p_H] = \frac{[p_H]_\sigma}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p_H]_\sigma}{[p_H]_E} \right)^2}} = \frac{[p_H]_\sigma}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p_H]_\sigma}{[p_H]_E} \right)^2}} = 0,102 \text{ МПа}$$

Ответ: $[p_H] = 0,102 \text{ МПа}$

Пример 5.7.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости, дополнительно на обечайку действует осевая сжимающая сила. Определить допускаемое значение осевой сжимающей силы из условия устойчивости.

Исходные данные: модуль упругости материала $E = 1,84 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; внутренний диаметр обечайки $D_B = 1500 \text{ мм} = 1,5 \text{ м}$; исполнительная толщина стенки обечайки $s = 8 \text{ мм}$, конструктивная прибавка к толщине стенки $c = 1 \text{ мм}$; коэффициент запаса устойчивости $n_y = 2,4$.

Решение

$$\begin{aligned} [F]_E &= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D_B^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D_B} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (s - c)}{D_B}} = \\ &= \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot 1,84 \cdot 10^5}{2,4} \cdot 1,5^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (8 - 1)}{1500} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (8 - 1)}{1500}} = 7,96 \text{ МН} \end{aligned}$$

Ответ: $[F]_E = 7,96 \text{ МН}$

Пример 5.8.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости, дополнительно на обечайку действует осевая сжимающая сила. Определить допускаемое значение осевой сжимающей силы из условия прочности.

Исходные данные: допускаемое напряжение материала $[\sigma] = 128 \text{ МПа}$; внутренний диаметр обечайки $D_B = 1500 \text{ мм} = 1,5 \text{ м}$; исполнительная толщина стенки обечайки $s = 8 \text{ мм} = 0,008 \text{ м}$; конструктивная прибавка к толщине стенки $c = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$.

Решение

$$[F]_{\sigma} = \pi \cdot (D_B + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma] = \\ = 3,1416 \cdot (1,5 + 0,008 - 0,001) \cdot (0,008 - 0,001) \cdot 128 = 4,24 \text{ МН}$$

Ответ: $[F]_{\sigma} = 4,24 \text{ МН}$

Пример 5.9.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости, дополнительно на обечайку действует осевая сжимающая сила. Определить допустимую осевую сжимающую силу из условия прочности и устойчивости.

Исходные данные: допустимая осевая сжимающая сила из условия прочности $[F]_{\sigma} = 4,24 \text{ МН}$; допустимая осевая сжимающая сила из условия устойчивости $[F]_E = 7,96 \text{ МН}$.

Решение

$$[F] = \frac{[F]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\sigma}}{[F]_E} \right)^2}} = \frac{4,24}{\sqrt{1 + \left(\frac{4,24}{7,96} \right)^2}} = 3,74 \text{ МН}$$

Ответ: $[F] = 3,74 \text{ МН}$

Пример 5.10.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости, дополнительно на обечайку действует сила тяжести перемешивающего устройства, размещённого сверху аппарата (см. рис. 5.1). Определить величину осевой сжимающей силы, действующей на обечайку и проверить выполнение условия устойчивости обечайки.

Исходные данные: масса перемешивающего устройства $m = 1000 \text{ кг}$; внутренний диаметр аппарата $D_B = 1500 \text{ мм} = 1,5 \text{ м}$; расчётное наружное давление $p_{np} = 0,09 \text{ МПа}$; допустимое наружное давление $[p_n] = 0,102 \text{ МПа}$; допустимая осевая сжимающая сила $[F] = 3,74 \text{ МН}$.

Решение

Расчётная сжимающая сила

$$F = m \cdot g + 0,785 \cdot D_B^2 \cdot p_{np} = 1000 \cdot 9,81 + 0,785 \cdot 1,5^2 \cdot 0,09 = 0,169 \text{ МН}$$

Проверка выполнения условия устойчивости обечайки

$$\frac{p_{np}}{[p_n]} + \frac{F}{[F]} = \frac{0,09}{0,102} + \frac{0,169}{3,74} = 0,92 < 1$$

Ответ: условие устойчивости обечайки выполняется

6. Расчёт на прочность корпусов аппаратов высокого давления (АВД)

6.1. Основные определения и расчётные формулы

Аппараты высокого давления (АВД) – аппараты, работающие при внутреннем давлении более 10 МПа (100 кгс/см²). Конструктивно АВД являются толстостенными сосудами. Принадлежность сосуда к категории толстостенных определяется по значению соответствующего коэффициента толстостенности, который представляет собой

$$\beta = \frac{D_H}{D_B} > 1,2 \quad (6.1)$$

$$D_H = D_B + 2 \cdot s, \quad s > 0,1 \cdot D_B, \quad (6.2)$$

здесь D_H , D_B – наружный и внутренний диаметр сосуда, соответственно; s – толщина стенки сосуда (рис. 6.1).

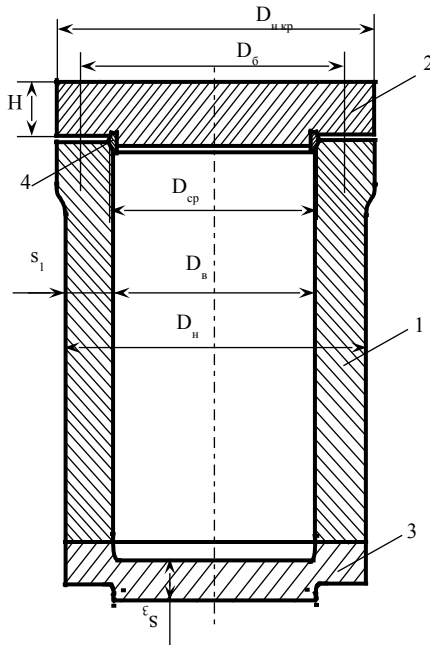


Рис. 6.1 - Схема АД с плоскими днищем и крышкой: 1 – обечайка; 2 – крышка; 3 – днище; 4 – двухконусный обтюратор (на рисунке обозначено: $D_в$ – внутренний диаметр обечайки; $D_н$ – наружный диаметр обечайки; $D_{ср}$ – средний диаметр уплотнительной поверхности; $D_б$ – диаметр установки шпилек; $D_{н\text{кр}}$ – диаметр крышки наружный; s_1 – толщина обечайки; s_3 – толщина днища; H – толщина крышки)

Расчётная толщина стенки обечайки АД (рис. 6.1)

$$s_{p1} = 0,5D_B \cdot (\beta - 1) \quad (6.3)$$

Наружный диаметр стенки обечайки АД

$$D_H = \beta \cdot D_B + 2 \cdot c \quad (6.4)$$

При проектном расчёте коэффициент толстостенности АД определяется по формуле

$$\beta = e^{\frac{p}{[\sigma] \cdot \varphi}} \quad (6.5)$$

здесь p – давление в аппарате, МПа; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала обечайки, МПа; φ – коэффициент прочности сварных швов (для многослойных аппаратов и кольцевых швов любых аппаратов $\varphi = 1$; для продольных швов аппаратов (кроме многослойных) для среднелегированных сталей $\varphi = 0,85$; для малоуглеродистых низколегированных сталей $\varphi = 0,95$); c – конструктивная прибавка к толщине стенки.

Расчётная толщина стенки плоского днища АД (рис. 6.1)

$$s_{p3} = 0,45 \cdot D_B \cdot \sqrt{\frac{p}{[\sigma] \cdot \psi}} \quad (6.6)$$

здесь $\psi = 1 - \frac{\sum d_i}{D_B}$ – коэффициент ослабления днища отверстиями d_i .

Расчётную толщину крышки АД (рис. 6.1) определяют из условия прочности на изгиб в диаметральной сечении, наиболее ослабленном отверстиями

$$H_p = 0,45 \cdot \sqrt{\frac{3,8 \cdot Q \cdot (D_б - D_{ср}) + D_{ср}^3 \cdot p}{(D_{нкр} - 2 \cdot d_{отв} - \sum d_i) \cdot [\sigma]}} \quad (6.7)$$

где Q – расчётное усилие крышки, МН; $D_б$ – диаметр установки шпилек (см. рис. 6.1), м; $D_{ср}$ – средний диаметр уплотнительной поверхности, м; p – давление в аппарате, МПа; $D_{н\text{кр}}$ – наружный диаметр крышки, м; $d_о$ – диаметр отверстия под шпильку, м; d_i – диаметр технологического отверстия, ослабляющего крышку, м; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала крышки, МПа.

Для затворов с двухконусным obtюратором расчётное усилие крышки определяется по формуле

$$Q = Q_d + Q_v \quad (6.8)$$

Равнодействующая внутреннего давления

$$Q_d = 0,785 \cdot D_{cp}^2 \cdot p \quad (6.9)$$

Осевая составляющая внутреннего давления

$$Q_v = 1,571 \cdot D_{cp} \cdot A_{cp} \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \rho) \cdot p, \quad (6.10)$$

здесь A_{cp} – ширина obtюраторного кольца по средней линии уплотнительной поверхности (принимается конструктивно по таблице 6.1); $\alpha = 30^\circ$ – угол наклона уплотнительных поверхностей obtюратора; ρ – угол трения стального кольца obtюратора по мягкой металлической прокладке (алюминий по стали $\rho = 15^\circ$); p – давление в аппарате, МПа.

Таблица 6.1 - Конструктивные размеры (м) крышек АД и двухконусного obtюратора

D_B	$D_{нкр}$	D_6	z	D_{cp}	A_{cp}
0,8	1,04	0,976	20	0,82	0,070
1,0	1,30	1,22	24	1,022	0,084
1,2	1,56	1,464	24	1,223	0,095
1,4	1,82	1,708	24	1,424	0,105
1,6	2,08	1,952	28	1,624	0,112
1,8	2,34	2,196	28	1,826	0,119
2,0	2,60	2,44	32	2,031	0,126

Пояснения: D_B – внутренний диаметр сосуда или горловины; $D_{нкр}$ – наружный диаметр крышки; D_6 – диаметр установки шпилек крепления; z – количество шпилек; D_{cp} – средний диаметр уплотнительной поверхности; A_{cp} – ширина obtюраторного кольца по средней линии уплотнительных поверхностей

Шпильки для крепления крышек АД принимают по ГОСТ 9066–75 (таблица П 17). Шпильки имеют центральное отверстие для смазки резьбы. Для размещения шпилек в крышке делаются сквозные отверстия, диаметр которых на 3 мм больше диаметра резьбы шпильки, т.е. $d_{отв} = d_p + 3$.

Диаметр гладкой части (шейки) шпильки определяется расчётом на прочность по формуле

$$d_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot Q}{\pi \cdot z \cdot [\sigma]} + d_o^2}, \quad (6.11)$$

где k – коэффициент, учитывающий крутящий момент при затяжке шпилек ($k = 1,0$ для затвора с двухконусным obtюратором); z – число шпилек (принимается конструктивно см. таблицу П10); $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала шпильки при рабочей температуре (для

стали 35Х [σ] = 282 МПа); d_0 – диаметр центрального отверстия (для шпилек М64...М72 d_0 = 10 мм; для шпилек М80...М110 d_0 = 20 мм)

6.2. Примеры расчёта

Пример 6.1.

Определить расчётную толщину стенки цилиндрической обечайки АВД (см. рис. 6.1). Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 1000$ мм, давление в аппарате $p = 30$ МПа, материал – сталь 20К, рабочая температура $t_{\text{раб}} = 300^\circ\text{C}$, коэффициент прочности сварного шва $\phi = 0,95$.

Решение

Дополнительные данные: по таблице П 7 для стали 20К при температуре $t_{\text{раб}} = 300^\circ\text{C}$ имеем [σ] = 119 МПа. Расчётные формулы см. в 6.1.

Коэффициент толстостенности

$$\beta = e^{\frac{p}{[\sigma] \cdot \phi}} = e^{\frac{30}{119 \cdot 0,95}} = 1,304$$

Расчётная толщина стенки обечайки

$$s_{1p} = 0,5 \cdot D_B \cdot (\beta - 1) = 0,5 \cdot 1000 \cdot (1,304 - 1) = 152 \text{ мм}$$

Ответ: $s_{1p} = 152$ мм

Пример 6.2.

Определить расчётную толщину плоского днища АВД (см. рис. 6.1). Днище не имеет технологических отверстий. Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 1000$ мм, давление в аппарате $p = 30$ МПа, материал – сталь 20К, рабочая температура $t_{\text{раб}} = 300^\circ\text{C}$, коэффициент ослабления сечения $\psi = 1$.

Решение

Дополнительные данные: по таблице П 7 для стали 20К при температуре $t_{\text{раб}} = 300^\circ\text{C}$ имеем [σ] = 119 МПа. Расчётные формулы см. в 6.1.

$$s_{3p} = 0,45 \cdot D_B \cdot \sqrt{\frac{p}{[\sigma] \cdot \psi}} = 0,45 \cdot 1000 \cdot \sqrt{\frac{30}{119 \cdot 1}} = 226 \text{ мм}$$

Ответ: $s_{3p} = 226$ мм.

Пример 6.3.

Определить расчётное усилие Q шпилек крышки АВД с двухконусным обтюратором (см. рис.6.1). Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 1000$ мм, давление в аппарате $p = 30$ МПа, угол конуса стального обтюратора $\alpha = 30^\circ$, угол трения стали по меди $\rho = 15^\circ$.

Решение

Дополнительные данные: конструктивные размеры обтюратора средний диаметр уплотнительной поверхности $D_{\text{ср}} = 1,022$ м, ширина обтюратор-

ного кольца по средней линии уплотнительных поверхностей $A_{cp} = 0,084$ м (см. табл.6.1). Расчётные формулы см. в 6.1.

Равнодействующая внутреннего давления

$$Q_d = 0,785 \cdot D_{cp}^2 \cdot p = 0,785 \cdot 1,022^2 \cdot 30 = 24,6 \text{ МН}$$

Осевая составляющая равнодействующей внутреннего давления

$$Q_B = 1,57 \cdot D_{cp} \cdot A_{cp} \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \rho) \cdot p =$$

$$1,57 \cdot 1,022 \cdot 0,084 \cdot \operatorname{tg}(30 - 15) \cdot 30 = 1,08 \text{ МН}$$

Расчётное усилие шпилек крышки

$$Q = Q_d + Q_B = 24,6 + 1,08 = 25,68 \text{ МН}$$

Ответ: Расчётное усилие шпилек крышки АВД $Q = 25,68$ МН.

Пример 6.4

Определить диаметр гладкой части (шейки) $d_{ш}$ шпилек для крепления крышки АВД. Затвор с двухконусным обтюратором. Шпильки имеют центральное отверстие $d_0 = 10$ мм. Материал шпилек сталь 35Х, $[\sigma] = 282$ МПа. Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 1$ м; расчётное усилие шпилек $Q = 25,68$ МН; число шпилек $z = 24$ (принято конструктивно); коэффициент, учитывающий крутящий момент при затяжке шпилек $k = 1$ (для двухконусного обтюратора).

Решение

$$d_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot Q}{\pi \cdot z \cdot [\sigma]} + d_0^2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1 \cdot 25,68}{\pi \cdot 24 \cdot 282} + 0,01^2} = 0,0702 \text{ м} = 70,2 \text{ мм}$$

По ГОСТ 9066–75 выбираем шпильку типа В с диаметром шейки $d_{ш} = 72$ мм, резьба М80.

Ответ: шпилька $d_{ш} = 72$ мм, резьба М80.

Пример 6.5

Определить расчётную толщину крышки АВД из стали 09Г2С. В крышке отсутствуют технологические отверстия. Исходные данные: внутренний диаметр аппарата $D_B = 1$ м; расчётное усилие шпилек $Q = 25,68$ МН; давление в аппарате $p = 30$ МПа; диаметр резьбы шпилек $d_{рез} = 80$ мм; рабочая температура в аппарате $t_{раб} = 300^\circ\text{C}$.

Решение

Дополнительные данные: конструктивные размеры обтюратора наружный диаметр крышки $D_{н\text{кр}} = 1,323$ м; диаметр установки болтов $D_6 = 1,22$ м; средний диаметр уплотнительной поверхности $D_{cp} = 1,022$ м; диаметр отверстий под шпильки $d_{отв} = d_{рез} + 3 = 80 + 3 = 83$ мм (определяем конструктивно); по таблице П 7 для стали 09Г2С при температуре $t_{раб} = 300^\circ\text{C}$ имеем $[\sigma] = 134$ МПа. Расчётные формулы см. в 6.1.

$$H_p = 0,45 \cdot \sqrt{\frac{3,8 \cdot Q \cdot (D_{\delta} - D_{cp}) + D_{cp}^3 \cdot p}{(D_{нкр} - 2 \cdot d_{отв} - \Sigma d_i) \cdot [\sigma]}} =$$

$$= 0,45 \cdot \sqrt{\frac{3,8 \cdot 23,68 \cdot (1,22 - 1,022) + 1,022^3 \cdot 30}{(1,323 - 2 \cdot 0,083 - 0) \cdot 134}} = 0,259 \text{ м} = 259$$

мм

Ответ: $H_p = 259 \text{ мм}$

7. Правила конструирования, изготовления, монтажа и эксплуатации химического оборудования

При проектировании сосудов и аппаратов (далее - сосуды) следует обеспечивать технологичность, надежность в течение установленного в технической документации срока службы, безопасность при изготовлении, монтаже, ремонте, диагностировании и эксплуатации, возможность осмотра (в том числе внутренней поверхности), очистки, промывки, продувки и ремонта, контроля технического состояния сосуда при диагностировании, а также контроля давления и отбора среды перед вскрытием сосуда.

В зависимости от расчетного давления, температуры стенки и рабочей среды сосуды подразделяются на группы. Группа сосуда определяется по таблице (7.1).

Таблица П 1 – Группа сосуда

Группа	Расчетное давление, МПа (кгс/см ²)	Температура стенки, °С	Рабочая среда
1	Более 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывоопасная или пожароопасная или 1-го, 2-го классов опасности
2	Более 0,07 (0,7) до 2,5 (25)	Выше 400	Любая, за исключением указанной для 1-й группы сосудов
	Более 2,5 (25) до 5,0 (50)	Выше 200	
	Более 5,0 (50)	Независимо	
	Более 4,0 (40) до 5,0 (50)	Ниже минус 40	
3	Более 0,07 (0,7) До 1,6 (16)	Ниже минус 20 От 200 до 400	
	Более 1,6 (16) до 2,5 (25)	До 400	
	Более 2,5 (25) до 4,0 (40)	До 200	

Группа	Расчетное давление, МПа (кгс/см ²)	Температура стенки, °С	Рабочая среда
	Более 4,0 (40) до 5,0 (50)	От минус 40 до 200	
4	Более 0,07 (0,7) до 1,6 (16)	От минус 20 до 200	
5а	До 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывоопасная или пожароопасная или 1, 2, 3-го классов опасности
5б	До 0,07 (0,7)	Независимо	Взрывобезопасная или пожаробезопасная или 4-го класса опасности

7.1. Подведомственность аппаратуры Ростехнадзору

В Российской Федерации экологический, технологический и атомный надзор осуществляет Федеральная служба – *Ростехнадзор*.

Химическая аппаратура, подведомственная Ростехнадзору (ранее Госгортехнадзор) следующая:

- сосуды, работающие под давлением пара воды с температурой выше 115°C или других нетоксичных, невзрывопожароопасных жидкостей при температуре, превышающей температуру кипения при давлении 0,07 МПа (0,7 кгс/см²) [для воды $t_{\text{кип}}=115\text{ °C}$ при $p=0,175\text{ МПа}$];
- сосуды, работающие под давлением пара, газа или токсичных взрывоопасных жидкостей свыше 0,07 МПа (0,7 кгс/см²);
- *баллоны*, предназначенные для транспортирования и хранения сжатых, сжиженных и растворённых газов под давлением свыше 0,07 МПа (0,7 кгс/см²);
- *цистерны и бочки* для транспортирования или хранения сжатых и сжиженных газов, давление паров которых при температуре до 50°C превышает 0,07 МПа (0,7 кгс/см²);
- цистерны и сосуды для транспортирования или хранения сжатых, сжиженных газов, жидкостей и сыпучих тел, в которых давление свыше 0,07 МПа (0,7 кгс/см²) создаётся периодически для их опорожнения;
- *барокамеры*.

Аппаратура, неподведомственная Ростехнадзору:

- сосуды атомных энергетических установок, а также сосуды, работающие с радиоактивной средой;
- сосуды вместимостью не более 25 л (0,025 м³) независимо от давления, используемые для научно-экспериментальных целей (при определении вместимости из общей ёмкости сосуда исключается объём, занимаемый футеровкой и другими внутренними устройствами);

- группа сосудов, состоящая из отдельных корпусов и соединённые между собой трубами с внутренним диаметром более 100 мм, рассматриваются как один сосуд;
- сосуды, баллоны вместимостью не более 25 л ($0,025 \text{ м}^3$), у которых произведение давления в МПа (кгс/см^2) на вместимость в м^3 (литрах) не превышает 0,02 (200);
- сосуды, работающие под давлением, создающимся при взрыве внутри них в соответствии с технологическим процессом или горении в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза;
- сосуды, работающие под вакуумом;
- сосуды, устанавливаемые на морских, речных судах и других плавучих средствах кроме *драг*;
- сосуды, устанавливаемые на самолётах и других летательных аппаратах;
- воздушные *резервуары* тормозного оборудования подвижного состава ж.-д. транспорта, автомобилей и др. средств передвижения;
- сосуды специального назначения военного ведомства;
- приборы парового и водяного отопления.
- *трубчатые печи*.
- сосуды, состоящие из труб с внутренним диаметром не более 150 мм без *коллекторов*, а также с коллекторами, выполненными из труб с внутренним диаметром не более 150 мм.
- части машин, не представляющие собой самостоятельных сосудов (корпуса *насосов* или *турбин*, цилиндры двигателей паровых, гидравлических, воздушных машин и *компрессоров*).

Конструирование, изготовление, монтаж и ремонт, техническая диагностика и эксплуатация аппаратов (сосудов), подведомственных Ростехнадзору, должны осуществляться в соответствии с «Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», утверждёнными Постановлением Ростехнадзора №91 от 11.06.2003 и Минюстом РФ 19.06.2003.

К конструкциям аппаратов, подведомственных «Правилам», предъявляются следующие общие требования:

1) Доступ для периодического внутреннего осмотра. Внутренний осмотр должен осуществляться: а) при наличии съёмных крышек путём их снятия их; б) при отсутствии съёмных крышек (рис. 7.1) – через специальные лазы или люки, располагаемые в местах, доступных для обслуживания. Лазы могут быть круглыми и овальными. Диаметр d в свету круглых лазов должен быть не менее 400 мм.

Размеры овальных лазов должны быть: больший – 400 мм, меньший – 325 мм (но не менее 300 мм).

Аппараты с $D_B \leq 800$ мм должны иметь круглые или овальные люки с размером меньшей оси 80 мм. В случае невозможности устройства таких лю-

ков, допускается установка меньших люков или выполнение отверстий, закрывающихся пробками на резьбе или фланцевыми заглушками.

2) Внутренние устройства в аппарате (мешалки, змеевики, тарелки, перегородки и др.), препятствующие осмотру должны быть, как правило, съёмными. В отдельных обоснованных случаях – по согласованию с Ростехнадзором – допускается внутренние устройства выполнять несъёмными.

Рубашки, применяемые для наружного обогрева или охлаждения аппарата, разрешается выполнять приварными.

3) Шарнирно-откидные или вставные болты, зажимные приспособления люков, лазов, крышек и фланцев должны быть предохранены от сдвига или ослабления. Опрокидывающиеся аппараты или отдельные устройства должны быть снабжены приспособлениями, предохраняющими от самоопрокидывания.

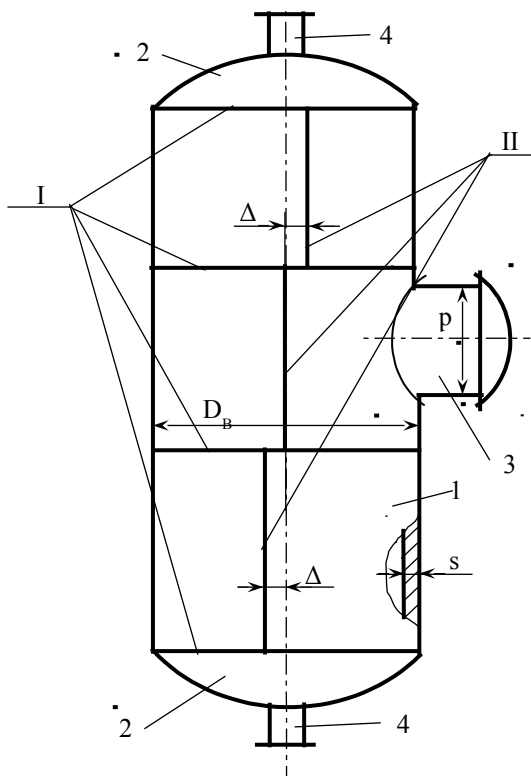


Рис. 7.1 - Схема цельносварного аппарата: 1 – обечайка; 2 – днище; 3 – люк-лаз; 4 – штуцер; I – кольцевые швы; II – продольные швы; Δ – смещение швов

7.2. Некоторые правила по устройству и изготовлению сварных аппаратов

Цельносварной аппарат (см. рис. 7.1) состоит из цилиндрической *обечайки* и эллиптических *днищ*. Аппарат имеет *люк-лаз* 3 и два *штуцера* 4. Обечайка аппарата сварена из трёх частей кольцевыми швами I. Обечайки сварены из листовой заготовки продольными швами II.

7.2.1. Прибавки для компенсации коррозии (эрозии)

Прибавка к расчетной толщине для компенсации коррозии (эрозии) *назначается* с учетом условий эксплуатации, расчетного срока службы, скорости коррозии (эрозии).

Прибавку *c* для компенсации коррозии к толщине внутренних элементов следует принимать:

2·*c* – для несъемных нагруженных элементов, а также для внутренних крышек и трубных решеток теплообменников;

0,5·*c*, но не менее 2 мм – для съемных нагруженных элементов;

c – для несъемных ненагруженных элементов.

Для внутренних съемных ненагруженных элементов прибавка для компенсации коррозии может не учитываться.

При наличии на *трубной решетке* или плоской *крышке* канавок прибавка для компенсации коррозии принимается с учетом глубины этих канавок.

Прибавка для компенсации коррозии не учитывается при выборе металлических прокладок для *фланцевых соединений*, болтов, опор, теплообменных труб и перегородок, теплообменных проставок и стояков.

Если невозможно или нецелесообразно увеличивать толщину стенки за счет прибавки для компенсации коррозии, выполняется коррозионная защита: *плакирование, футеровка или наплавка*.

7.2.2. Люки, лючки, бобышки и штуцера

Сосуды следует снабжать люками или смотровыми лючками, обеспечивающими осмотр, очистку, безопасность работ по защите от коррозии, монтаж и демонтаж разборных внутренних устройств, ремонт и контроль сосудов. Количество люков и лючков обосновывается в проекте. Люки и лючки располагаются в доступных для пользования местах.

Внутренний диаметр люка у сосудов, не имеющих корпусных фланцевых разъемов и подлежащих внутренней антикоррозионной защите неметаллическими материалами, принимается не менее 800 мм.

Допускается проектировать без люков:

сосуды, предназначенные для работы с веществами 1-го и 2-го классов опасности, не вызывающими коррозии и накипи, независимо от их диаметра, при этом следует предусматривать необходимое количество смотровых лючков; сосуды с приварными рубашками, витые и кожухотрубчатые теплообменные аппараты независимо от их диаметра;

сосуды, имеющие съемные днища или крышки, а также обеспечивающие возможность проведения внутреннего осмотра без демонтажа трубопровода горловины или штуцера.

В каждом сосуде следует предусматривать бобышки или штуцера для наполнения водой и слива, удаления воздуха при гидравлическом испытании. Для этой цели могут использоваться технологические бобышки и штуцера.

Штуцера и бобышки на вертикальных сосудах следует располагать с учетом возможности проведения гидравлического испытания, как в вертикальном, так и в горизонтальном положении.

Для крышек люков массой более 20 кг следует предусматривать приспособления для облегчения их открывания и закрывания.

Расположение отверстий.

Расположение отверстий в эллиптических и полусферических днищах не регламентируется.

Отверстия для люков, лючков и штуцеров в сосудах 1, 2, 3, 4-й групп (табл. 7.1) следует располагать вне сварных швов.

Расположение отверстий допускается на:

- продольных швах цилиндрических и конических обечаек сосудов, если диаметр отверстий не более 150 мм;

- кольцевых швах цилиндрических и конических обечаек сосудов без ограничения диаметра отверстий;

- швах выпуклых днищ без ограничения диаметра отверстий при условии 100-процентной проверки сварных швов днищ радиографическим или ультразвуковым методом;

- швах плоских днищ.

Отверстия не допускается располагать в местах пересечения сварных швов сосудов 1, 2, 3, 4-й групп.

Отверстия для люков, лючков, штуцеров в сосудах 5а и 5б групп допускается устанавливать на сварных швах без ограничения по диаметру.

7.2.3. Требования к внутренним и наружным устройствам

Внутренние устройства в сосудах (*змеевики, тарелки, перегородки* и др.), препятствующие осмотру и ремонту, выполняются съемными.

Внутренние приварные устройства конструируются так, чтобы было обеспечено удаление воздуха и полное опорожнение аппарата при гидравлическом испытании в горизонтальном и вертикальном положениях.

Рубашки, применяемые для наружного обогрева или охлаждения сосудов, могут быть съемными и приварными.

Во всех глухих частях сборочных единиц и элементов внутренних устройств следует предусматривать дренажные отверстия, располагая их в самых низких местах этих сборочных единиц и элементов для обеспечения полного слива жидкости.

7.2.4. Строповые устройства

Для сосудов, транспортируемых в собранном виде, а также транспортируемых частей следует предусматривать строповые устройства (захватные приспособления) для проведения погрузочно-разгрузочных работ, подъема и установки сосудов в проектное положение. В обоснованных случаях допускается использовать технологические штуцера и горловины, уступы, бурты и другие конструктивные элементы сосудов.

7.2.5. Требования к материалам

Материалы по химическому составу и механическим свойствам должны удовлетворять требованиям государственных стандартов, технических условий и Правил ПБ 03-584-73.

Качество и характеристики материалов должны подтверждаться соответствующими сертификатами.

При выборе материалов для изготовления сосудов (сборочных единиц, деталей) следует учитывать: расчетное давление, температуру стенки (минимальную и максимальную), химический состав и характер среды, технологические свойства и коррозионную стойкость материалов (таблицы 7.2, 7.3).

Таблица 7.2 – Марки листовой стали для химического оборудования

Марка	ГОСТ	Рабочие условия	
		t, град С	p, МПа
Ст3кп2	380–2005, 14637–89	10...200	1,6
Ст3кп5, Ст3сп		0...425	5
16К, 18К, 20К, 22К	5520–79	–20...475	не огр.
15, 20	1050–88, 1577–93	–20...475	5
09Г2С, 10Г2С1	5520–79	–70...475	не огр.
17ГС, 17Г1С, 16ГС		–40...475	не огр.
12ХМ	5520–79, ТУ14-1-642	–40...540	не огр.
08Х18Н10	5632–72, 5582–75	–270...600	не огр.
12Х18Н10Т	5632–72, 7350–77	–270...610	не огр.
ХН65МВУ	ТУ14-1-4253	–70...500	5

Таблица 7.3 – Марки стали труб для химического оборудования

Марка; ГОСТ, ТУ	Полуфабрикат ГОСТ, ТУ	Рабочие условия	
		t, град С	p, МПа
Ст3сп3; 380–2005	водогазопроводные	0...200	1,6
10, 20; 1050–88	электросварные	–30...400	4
10, 20; 1050–88	550–75 группы А ¹ , Б ² 8733–74 группа В ³ 8731–87 группа В	–30...475	16
09Г2С; 19281–89	ТУ14-3-500	–60...475	не огр.

Марка; ГОСТ, ТУ	Полуфабрикат ГОСТ, ТУ	Рабочие условия	
		t, град С	p, МПа
15ХМ; ТУ14-3-460	ТУ14-3-460	–40...560	не огр.
15Х5М, 15Х5ВФ; 20072–74	550–75 группы А, Б	–40...650	не огр.
12Х18Н10Т; 5632–72	9940–81; 9941–81	–270...610	не огр.
Примечания: 1 – группа А – трубы с нормированием механических свойств; 2 – группа Б– трубы с нормированием химического состава; 3 – группа В – трубы с нормированием механических свойств и химического состава			

Для сосудов, устанавливаемых на открытой площадке или в неотапливаемом помещении, при выборе материалов также следует учитывать:

абсолютную минимальную температуру наружного воздуха данного района, если температура стенки сосуда, находящегося под давлением, может стать отрицательной от воздействия окружающего воздуха;

среднюю температуру воздуха наиболее холодной пятидневки данного района, если температура стенки сосуда, находящегося под давлением, положительная; при этом категория углеродистых и низколегированных сталей принимается не ниже рекомендуемых в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Категории сталей для сосудов в зависимости от средней температуры воздуха наиболее холодной пятидневки

Средняя температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °С	Марка стали
Не ниже минус 30	Ст3пс3, Ст3сп3, Ст3Гпс3
	15К-3, 16К-3, 18К-3, 20К-3
От минус 31 до минус 40	Ст3пс4, Ст3сп4, Ст3Гпс4
	15К-5, 16К-5, 18К-5, 20К-5
	16ГС-3, 09Г2С-3, 10Г2С1-3
От минус 41 до минус 60	09Г2С-8, 10Г2С1-8

Пределы применения двухслойной стали определяются по основному слою.

Допускается применение сталей марок 09Г2С, 10Г2С1 с испытанием на ударный изгиб при средней температуре воздуха наиболее холодной пятидневки для заданного района установки сосуда.

Элементы, привариваемые непосредственно к корпусу сосуда изнутри или снаружи (лапы, цилиндрические опоры, подкладки под фирменные таблички, опорные кольца под тарелки и др.), следует изготавливать из материалов того же класса, что и корпус.

Для приварных и неприварных внутренних элементов толщиной не более 10 мм для сосудов, работающих при температуре от минус 40 до 475 °С допускается применять листовую сталь и сортовой прокат марок Ст3кп2 и Ст3пс2.

Для материалов опорных частей сосудов, *кронштейнов* для крепления навесного оборудования и других деталей наружных приварных элементов выполняются требования таблицы 2.

7.2.6. Сварные соединения

При сварке обечаек и труб, приварке днищ к обечайкам следует применять *стыковые швы* с полным проплавлением.

Допускается применять *угловые и тавровые сварные соединения (угловые швы)* при приварке штуцеров, люков, труб, трубных решеток, плоских днищ и фланцев.

Допускается применять *нахлесточные сварные соединения (угловые швы)* для приварки укрепляющих колец и опорных элементов.

Не допускается применение *угловые и тавровые сварные соединения* для приварки штуцеров, люков, бобышек и других деталей к корпусу с неполным проплавлением (конструктивным зазором):

в сосудах 1, 2, 3-й групп при диаметре отверстия более 120 мм, в сосудах 4-й и 5а групп при диаметре отверстия более 275 мм;

в сосудах 1, 2, 3, 4-й и 5а групп из низколегированных марганцовистых и марганцевокремнистых сталей с температурой стенки ниже минус 30 °С без термообработки и ниже минус 40 °С с термообработкой;

в сосудах всех групп, предназначенных для работы в средах, вызывающих коррозионное растрескивание, независимо от диаметра патрубка, за исключением случаев, когда предусмотрена засверловка отверстия в зонах конструктивного зазора.

Сварные швы сосудов следует расположить так, чтобы обеспечить возможность их визуального осмотра и контроля качества неразрушающим методом (ультразвуковым, радиографическим и др.), а также устранения в них дефектов.

Допускается в сосудах 1, 2, 3, 4-й и 5а групп не более одного, в сосудах 5б группы не более четырех, в теплообменниках не более двух стыковых швов, доступных для визуального осмотра только с одной стороны. Швы необходимо выполнять способами, обеспечивающими провар по всей толщине свариваемого металла (например, с применением аргонодуговой сварки корня шва, *подкладного кольца, замкового соединения*). Возможность применения остающегося подкладного кольца и замкового соединения в сосудах 1-й группы следует обосновывать в проекте в установленном порядке.

Продольные сварные швы горизонтально устанавливаемых сосудов следует располагать вне центрального угла 140° нижней части корпуса, если нижняя часть недоступна для визуального осмотра, о чем должно быть указано в проекте. Сварные швы сосудов не следует перекрывать опорами. Перекрывание мест пересечения швов не допускается. Продольные швы обечаек не должны быть продолжением меридиональных швов днищ. Смещение швов (см. рис. 1) $\Delta = 3 \cdot s$, не менее 100 мм.

При сварке стыковых сварных соединений элементов разной толщины необходимо предусмотреть плавный переход от одного элемента к другому постепенным утонением более толстого элемента. Угол скоса α элементов разной толщины (рисунок 2, а, б, в, г, е) должен быть не более 20° (уклон 1 : 3). Сварку патрубков разной толщины допускается выполнять в соответствии с рис. 2, д, е. При этом расстояние l должно быть не менее толщины S , но не менее 20 мм, а радиус $r \geq S_2 - S$.

Допускается выполнять сварку стыковых швов без предварительного утонения более толстого элемента, если разность в толщинах соединяемых элементов не превышает 30 % толщины более тонкого элемента, но не более 5 мм; при этом форма шва должна обеспечивать плавный переход от толстого элемента к тонкому.

В сосудах, выполняемых из двухслойной стали, скос кромок осуществляется со стороны основного слоя.

Смещение кромок B листов (рисунок 3), измеряемое по срединной поверхности, в стыковых соединениях, определяющих прочность сосуда, не должно превышать $B = 0,1 S$, но не более 3 мм (S - наименьшая толщина свариваемых листов).

Смещение кромок в кольцевых швах монометаллических сосудов, а также в кольцевых и продольных швах биметаллических сосудов со стороны коррозионностойкого слоя не должно превышать величин, указанных в таблице 7.5.

Смещение кромок свариваемых заготовок днищ не должно превышать $0,1 S$, но не более 3 мм (S - толщина листа), а днищ из двухслойных сталей со стороны плакирующего слоя не должно превышать величин, указанных в таблице 7.5.

К стыковым соединениям, определяющим прочность сосуда, следует относить продольные швы обечаек, хордовые и меридиональные швы выпуклых днищ.

При измерении смещения B кромок листов толщиной S и S_1 в стыковых соединениях следует учитывать, что:

$$B_1 \leq 0,5 (S_1 - S) + B ; \quad B_2 \leq 0,5 (S_1 - S) - B ,$$

где B_1 и B_2 - расстояния между кромками листов.

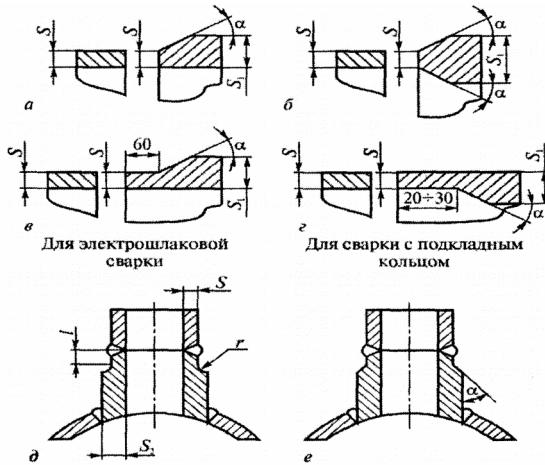


Рис. 7.2 - Стыковка элементов разной толщины

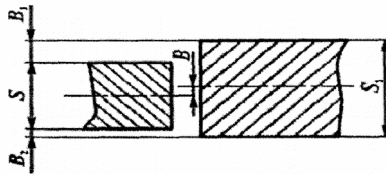


Рис. 7.3 - Смещение кромок

Таблица 7.5 – Смещение кромок в кольцевых швах сосудов, выполняемых всеми видами сварки, за исключением электрошлаковой

Толщина свариваемых листов S , мм	Максимально допустимое смещение стыкуемых кромок, мм	
	в кольцевых швах на монометаллических сосудах	в кольцевых и продольных швах на биметаллических сосудах со стороны коррозионностойкого слоя
До 20	$0,1 S^{+1}$	50 % толщины плакирующего слоя
Свыше 20 до 50	$0,15 S$, но не более 5	50 % толщины плакирующего слоя
Свыше 50 до 100	$0,04 S + 3,5^{1)}$	$0,04 S + 3,0$, но не более толщины плакирующего слоя
Свыше 100	$0,025 S + 5,0$, но не более $10^{1)}$	$0,025 S + 5,0$, но не более 8 мм и не более толщины плакирующего слоя

¹⁾ При условии наплавки с уклоном 1 : 3 на стыкуемые поверхности для сварных соединений, имеющих смещение кромок более 5 мм.

7.2.7. Термическая обработка

Сосуды (сборочные единицы, детали) из углеродистых и низколегированных сталей, изготовленные с применением сварки, штамповки или вальцовки, подлежат термической обработке, если:

а) толщина стенки цилиндрического или конического элемента, днища, фланца или патрубка сосуда в месте их сварного соединения более 36 мм для углеродистых сталей и более 30 мм для низколегированных марганцовистых и марганцевокремнистых сталей (марок 16ГС, 09Г2С, 17Г1С, 10Г2 и др.);

б) номинальная толщина стенки S цилиндрических или конических элементов сосуда (патрубка), изготовленных из листовой стали вальцовкой (штамповкой), превышает величину, вычисленную по формуле

$$S = 0,009 (D + 1200),$$

где D - минимальный внутренний диаметр элемента, мм.

в) сосуды (сборочные единицы, детали) предназначены для эксплуатации в средах, вызывающих коррозионное растрескивание (жидкий аммиак, аммиачная вода, растворы едкого натрия и калия, азотнокислого натрия, калия, аммония, кальция, этаноламина, азотной кислоты и др.) и об этом есть указание в проекте;

г) днища сосудов и их элементов, независимо от толщины, изготовленных холодной штамповкой или холодным *фланжированием*;

д) необходимость термической обработки обосновывается в проекте.

Для снятия остаточных напряжений в соответствии с требованиями подпунктов «а», «б» допускается в обоснованных случаях вместо термической обработки применять другие методы, например, метод пластического деформирования.

Сварные соединения из углеродистых, низколегированных марганцовистых, марганцевокремнистых и хромомолибденовых сталей, выполненные электрошлаковой сваркой, подлежат *нормализации* и *высокому отпуску*, за исключением случаев, указанных в документации.

При электрошлаковой сварке заготовок штампуемых и вальцуемых элементов из сталей марок 16ГС, 09Г2С и 10Г2С1, предназначенных для работы при температуре не ниже минус 40 °С, нормализация может быть совмещена с нагревом под штамповку с окончанием штамповки при температуре не ниже 700 °С.

Сосуды (сборочные единицы, детали) из сталей марок 12МХ, 12ХМ, 15ХМ, 12Х1МФ, 10Х2М1А-А, 10Х2ГНМ, 15Х2МФА-А, 1Х2М1, 15Х5, Х8, 15Х5М, 15Х5ВФ, 12Х8ВФ, Х9М и из двухслойных сталей с основным слоем из сталей марок 12МХ, 12ХМ, 20Х2М, подвергнутые сварке, необходимо термообрабатывать независимо от диаметра и толщины стенки.

Сосуды (сборочные единицы, детали) из сталей марок 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б и других аустенитных сталей, стабилизированных титаном или ниобием, предназначенные для работы в средах, вызывающих *коррозионное*

растрескивание, а также при температурах выше 350 °С в средах, вызывающих *межкристаллитную коррозию*, подвергаются термической обработке по требованию, оговоренному в проекте.

При определении толщины свариваемого элемента принимается вся толщина двухслойной стали.

При наличии в проекте требования на стойкость против межкристаллитной коррозии технология сварки и режим термообработки сварных соединений двухслойных сталей должны обеспечивать стойкость сварных соединений коррозионностойкого слоя против межкристаллитной коррозии.

Днища и детали из углеродистых и низколегированных марганцево-кремнистых сталей, штампуемые (вальцуемые) в горячую с окончанием штамповки (вальцовки) при температуре не ниже 700 °С, а также днища и детали из аустенитных хромоникелевых сталей, штампуемых (вальцуемых) при температуре не ниже 850 °С, термической обработке не подвергаются, если к указанным материалам не предъявлены специальные требования.

Днища и другие штампуемые (вальцуемые) в горячую элементы, изготавливаемые из сталей марок 09Г2С, 10Г2С1, работающие при температуре от минус 41 °С до минус 70 °С, следует подвергать термической обработке - нормализации или закалке и высокому отпуску.

Днища и другие элементы из низколегированных сталей марок 12ХМ и 12МХ, штампуемые (вальцуемые) в горячую с окончанием штамповки (вальцовки) при температуре не ниже 800 °С, допускается подвергать только отпуску (без нормализации).

Технология изготовления днищ и других штампуемых элементов должна обеспечивать необходимые механические свойства, указанные в стандартах или технических условиях, а при наличии требования в проекте и стойкость против межкристаллитной коррозии.

Возможность совмещения нормализации с нагревом под горячую штамповку днищ из сталей, работающих при температуре от минус 41 °С до минус 70 °С, определяется в обоснованных случаях.

Допускается не подвергать термической обработке горячештампованные днища из аустенитных сталей с отношением внутреннего диаметра к толщине стенки более 28, если они не предназначены для работы в средах, вызывающих коррозионное растрескивание.

Днища и другие элементы, выполненные из коррозионностойких сталей аустенитного класса методом холодной штамповки или холодным фланжированием, следует подвергать термической обработке (аустенизации или стабилизирующему отжигу), если они предназначены для работы в средах, вызывающих коррозионное растрескивание. В остальных случаях термообработку допускается не проводить, если относительное удлинение при растяжении в исходном состоянии металла не менее 30 % при степени деформации в холодном состоянии не более 15 %.

Гнутые участки труб из углеродистых и низколегированных сталей с

наружным диаметром более 36 мм подлежат термообработке, если отношение среднего радиусагиба к номинальному наружному диаметру трубы составляет менее 3,5, а отношение номинальной толщины стенки трубы к ее номинальному диаметру превышает 0,05.

Приварка внутренних и наружных устройств к сосудам, подвергаемым термической обработке, должна проводиться до термической обработки сосуда.

Допускается местная термическая обработка сварных соединений сосудов, при проведении которой следует обеспечивать равномерный нагрев и охлаждение по всей длине шва и прилегающих к нему зон основного металла.

Ширина зоны нагрева определяется в соответствии с требованиями нормативно-технической документации по промышленной безопасности. Объемная термическая обработка производится в печах или путем нагрева сосуда (сборочной единицы, детали) вводом во внутреннюю полость теплоносителя.

При термообработке проводятся мероприятия, предохраняющие сосуд (сборочную единицу, деталь) от деформаций, вызванных местным перегревом, неправильной установкой сосуда, действием собственного веса сосуда. Свойства металла обечаек, днищ, патрубков, решеток после всех циклов термической обработки должны соответствовать установленным требованиям.

Контроль механических свойств основного металла можно не проводить в том случае, если температура отпуска металла не превышает:

650 °С - для сталей марок Ст3, 20К, 16ГС, 09Г2С;

710 °С - для сталей марок 12ХМ, 12МХ.

Если элементы сосудов из углеродистых и низколегированных сталей подвергаются нормализации или нормализации и последующему отпуску, или *закалке* и последующему отпуску, то проводится только испытание на ударный изгиб при рабочей температуре сосуда ниже 0 °С.

7.3. Конструирование аппаратов из высоколегированных сталей

Перегрев легированных сталей при сварке приводит к выгоранию легирующих элементов. Высоколегированная сталь при этом может потерять химическую стойкость металла шва и *зоны термического влияния*. Конструкция сварного соединения должна обеспечивать одновременное расплавление соединяемых деталей. Это достигается равнотолщинностью соединяемых деталей (рисунок 7.4).

При сварке тонкостенных деталей из разнородных сталей (высоколегированная и углеродистая) возможно изменение состава направленного металла, что может привести к потере его коррозионной стойкости ($Cr < 13\%$). Для устранения возможности появления такого явления между соединяемыми деталями устанавливается промежуточный элемент из высоколегированной стали (рисунок 7.5).

7.4. Конструирование аппаратов из цветных металлов и сплавов

В химическом аппаратостроении широко применяются цветные металлы и сплавы, в частности медь и алюминий. Медные аппараты чаще всего применяются в установках *глубокого холода*. Их изготавливают из медного проката. Для увеличения поперечной жёсткости медных тонкостенных обечаек их выполняют с гофрами (рисунок 7.6, а).

Неразъёмные соединения частей медных аппаратов получают пайкой (мягкими и твёрдыми припоями), сваркой и клёпкой. Для пайки силовых элементов применяют Cu–Zn припой марок ПМЦ–47, ПМЦ–52. Пайку мягкими Sn–Pb припоями (ПОС–30, ПОС–40) выполняют внахлёстку (рис. 7.6, б). Для увеличения прочности паяных обечаек применяют замки или фальцы (рис. 7.6, в).

Конструкция алюминиевой аппаратуры должна учитывать низкую механическую прочность алюминия и интенсивное окисление при нарушении окисной плёнки. Фланцы выполняются стальными на отбортовке (рис. 7.7) при любых диаметрах.

Опоры алюминиевых аппаратов выполняют из стали и приваривают к разъёмному стальному кольцу, которое стягивается болтами. Сварные соединения выполняют стыковыми швами при соблюдении равнотолщинности соединяемых элементов.

7.5. Конструирование эмалированных аппаратов

Эмалевое покрытие наносится для защиты поверхности аппарата, контактирующей с рабочей средой, от коррозии, истирания, высоких температур и т.п. В качестве конструкционных материалов для изготовления эмалированных аппаратов применяют стали 08, 10 или чугун СЧ15. Технология эмалирования требует простой и плавной по очертаниям поверхности, подлежащей эмалированию, отсутствия острых углов, краёв и впадин.

Узлы должны быть равностенными, не допускать наличия массивных деталей. Опоры (лапы и стойки) приваривают после эмалирования к специальным накладкам, которые присоединяют к корпусу до эмалирования (рисунок 7.8, а, б).

Штуцера выполняют с коническими патрубками, привариваемыми встык к краю отбортованного отверстия (рисунок 7.8 в). На патрубках устанавливают малогабаритные фланцы с втулкой. Аппаратные фланцы изготавливают под стяжные зажимы (рисунок 7.9). Зажим состоит из двух взаимозаменяемых *траверс* 1, которые стягиваются болтом 2 и гайкой 3. Специальные пазы и выступы в траверсах зажима исключают возможность изгиба болтов

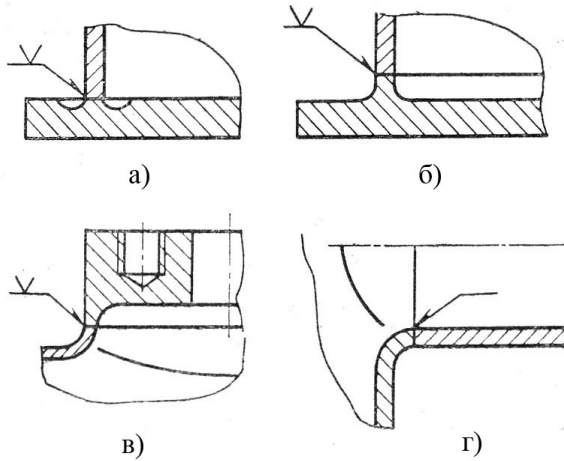


Рис. 7.4 - Конструктивное оформление сварных узлов деталей из высоколегированных сталей созданием равнотолщинности: а) обечайка и трубная решётка с проточками; б) обечайка и трубная решётка с выступом; в) обечайка и бобышка; г) обечайка и патрубок фланца

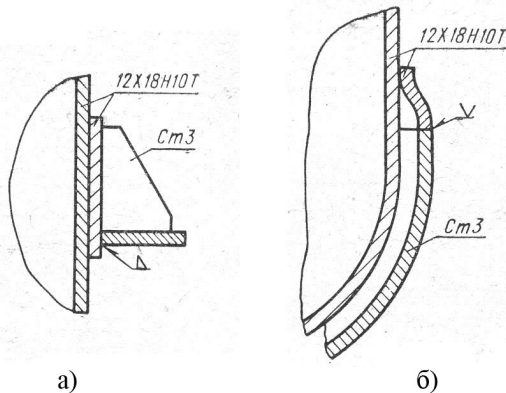


Рис. 7.5 - Конструктивное оформление сварных узлов деталей из разнородных сталей с использованием промежуточного элемента из высоколегированной стали: а) крепление лапы; б) крепление рубашки

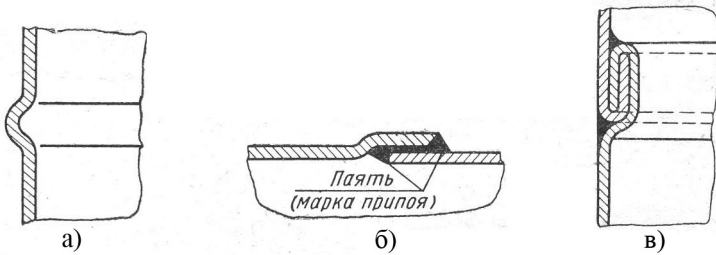


Рис. 7.6 - Конструктивное оформление узлов медных аппаратов: а) *гофра* для увеличения жёсткости тонкостенной обечайки; б) конструкция паяного соединения внахлестку; в) выполнение нахлесточного паяного соединения *фальцем*

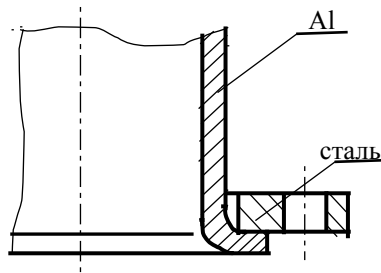


Рис. 7.7 - Стальной свободный фланец на отбортовке для алюминиевого аппарата

7.6. Конструирование аппаратов из неметаллических материалов

Элементы аппаратов из термореактивных материалов (*реактопластов*) изготавливают формованием из мягких листов и *отверждением* термической обработкой при соответствующей температуре.

Элементы аппаратов из термопластичных материалов (*термопластов*) формуют из листов, предварительно нагретых до температуры размягчения, затем склеивают или сваривают.

При конструировании элементов из пластмасс, изготавливаемых прессованием, им необходимо придать форму, которая обеспечивает обтекаемость, минимальный расход материалов, лёгкость извлечения изделий из *пресс-формы*. Стенки пластмассовых изделий должны плавно сопрягаться, края деталей должны быть прочными, но без чрезмерных утолщений (рисунок 7.10, а, б).

Отверстия изготавливают формовкой или сверлением. Резьбу в деталях при диаметре отверстия больше 5 мм выполняют прессованием; применяют метрическую или круглую резьбу.

Элементы аппаратов рассчитывают на прочность по тем же формулам, что и стальные.

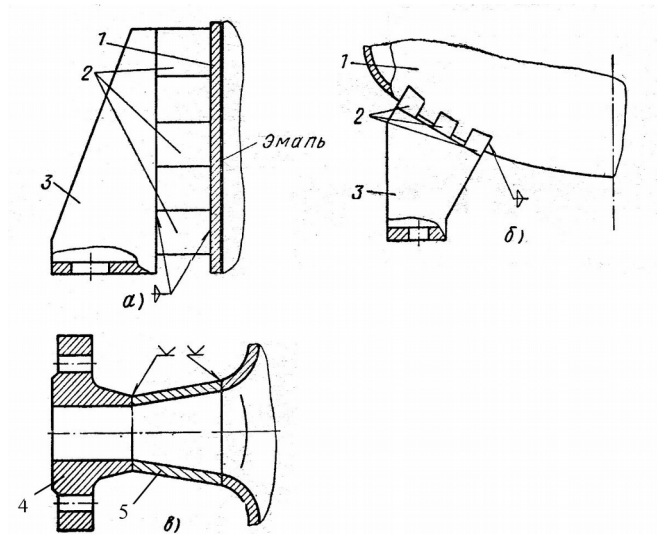


Рис. 7.8 - Конструктивное оформление узлов эмалированных аппаратов: а, б – с приварными лапами; в – с приварным штуцером; 1 – корпус; 2 – накладка; 3 – лапа; 4 – фланец штуцера; 5 – конический патрубкок штуцера

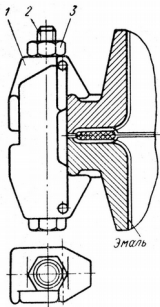


Рис. 7.9 - Зажим для соединения фланцев эмалированных аппаратов:
1 – траверса; 2 – стяжной болт; 3 – гайка

Опорами для вертикальных аппаратов (рисунок 7.10, в) служат стальные лапы, которые крепят к стальному разъёмному бандажу. Нагрузка от массы аппарата передаётся опорам через приварное кольцо, опирающееся на бандаж.

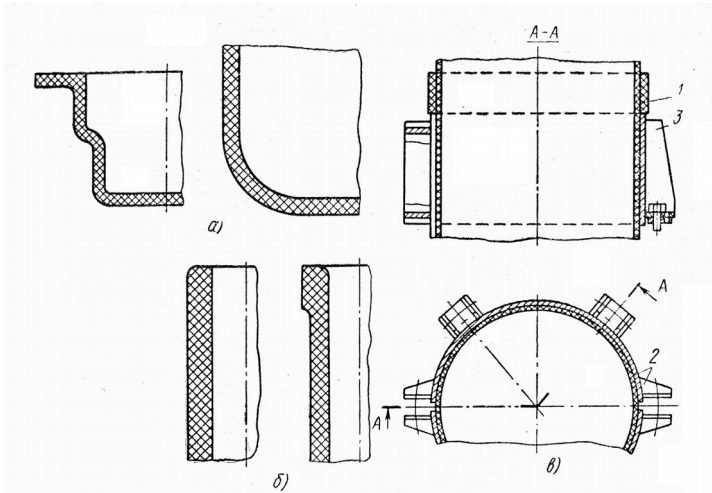


Рис. 7.10 - Конструктивное оформление узлов аппаратов из пластмасс: а – сопряжение стенок; б – оформление края детали; в – крепление опоры; 1 – приварное кольцо бандажа; 2 – бандаж; 3 – стальная лапа

7.7. Конструктивные решения снижения массы силовых элементов оборудования и конструкций

Снижение массы силовых элементов оборудования и конструкций при сохранении прочности и жёсткости является стратегическим направлением развития конструирования в химическом машино- и аппаратостроении. При этом конструктор учитывает все факторы, влияющие на прочность и жёсткость элемента оборудования.

Значительного уменьшения массы элемента оборудования можно достигнуть, придавая ему равнопрочную форму, чтобы напряжения в каждой точке сечения были одинаковыми. Как известно, этого можно добиться лишь при работе элемента конструкции на растяжение-сжатие. На рисунке 7.11 показана конструктивная разгрузка шатуна от изгиба. При симметричном расположении ребра жёсткости шатуна (рис. 7.11 в) материал работает на растяжение-сжатие и масса шатуна будет наименьшей из трёх вариантов конструктивного исполнения, показанного на рис. 7.11.

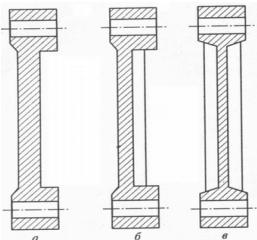


Рис. 7.11 - Конструктивная разгрузка шатуна от изгиба: а – шатун подвержен изгибу; б – изгибающий момент уменьшен; в – шатун работает на растяжение-сжатие

При конструировании элементов оборудования часто используется то обстоятельство, что некоторые конструкционные материалы по-разному сопротивляются растяжению и сжатию. Особенно это ярко выражено у чугуна. Для литого чугунного кронштейна, изображённого на рисунке 7.12, при горизонтальном приложении внешней нагрузки рациональной является конструкция, в которой изгиб вертикальной стойки кронштейна заменён растяжением-сжатием наклонных стоек.

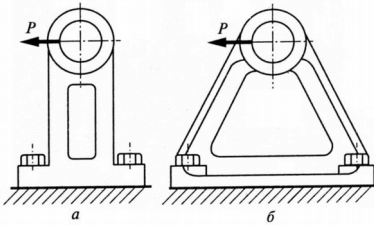


Рис. 7.12 - Приложение нагрузки к чугунному кронштейну: а – нерациональное (работа на изгиб); б – рациональное (работа на растяжение-сжатие)

В ряде случаев удаётся облегчить элемент оборудования удалением металла из менее нагруженных участков детали. На рисунке 7.13 показаны варианты выполнения кольца фланца, позволяющие снизить массу кольца фланца до 24%. При этом следует иметь, что переход от круглого кольца фланца (рис. 7.12 а) к сложным формам кольца усложняет изготовление кольца фланца. Поэтому при принятии того или иного варианта конструктивного исполнения того или иного элемента оборудования следует учитывать весь комплекс влияющих факторов.

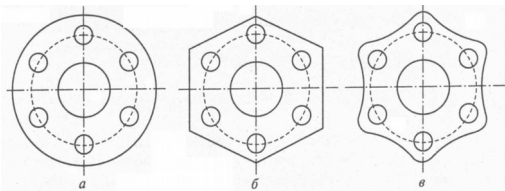


Рис. 7.13 - Облегчение фланца удалением металла из менее нагруженных участков: условная масса $m=1$ (а), $m=0,85$ (б), $m=0,76$ (в)

Сохранение жёсткости и прочности элементов оборудования является обязательным условием при выборе рационального конструктивного решения. Можно сформулировать некоторые конструктивные решения для увеличения жёсткости элементов оборудования. На рисунке 7.14 представлены плоский приварной (рис. 7.14 а) и приварной встык (рис. 7.14 б) фланцы. Плоский приварной фланец имеет коническую втулку при переходе от кольца фланца к обечайке аппарата и вследствие этого большую жёсткость.

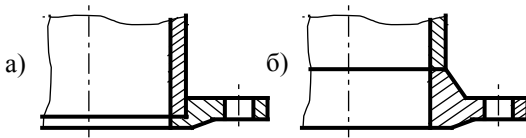
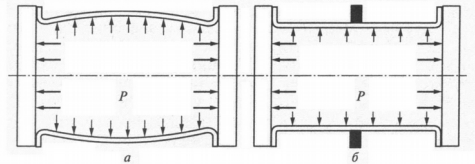


Рис. 7.14 - Конструктивное исполнение фланцев: а – плоский приварной; б – приварной встык (рациональная конструкция)

7.15. Блокировка деформаций: а – неукреплённая обечайка; б – обечайка, укреплённая ребром жёсткости



На рисунке 7.15 показана блокировка деформаций обечайки, нагруженной внутренним давлением. С этой целью на участке наибольшей деформации (середина обечайки) устанавливается кольцо, работающее на растяжение. При таком способе обеспечения жёсткости затраты металла меньше, чем при увеличении толщины стенки обечайки.

На рисунке 7.16 показаны варианты конструктивного исполнения аппаратов, нагруженных сжимающей осевой силой. При нагружении цилиндрической обечайки аппарата (рис. 7.16 а) нагрузка вызывает прогиб днища аппарата, который через пояс сопряжения обечайки с днищем вызывает изгиб обечайки (деформация показана штриховой линией). Аппарат цилиндрической формы при сжатии является нежёстким. При использовании аппарата конической формы (рис. 7.16 б) стенки его работают преимущественно на сжатие, что обеспечивает аппарату бо́льшую жёсткость. Наибольшей жёсткостью при наименьшей массе обладают конусы с углом при вершине 60-90°. Повышенную жёсткость при сжатии имеют аппараты сферической и яйцевидной формы (рис. 7.16 в и 7.16 г).

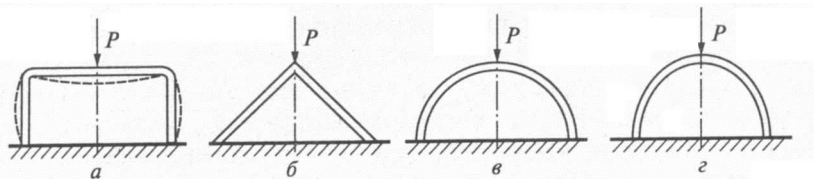


Рис. 7.16 - Конструкции, нагруженные осевой силой: а – цилиндрическая (нерациональная); б – коническая; в – сферическая; г – яйцевидная

7.8. Терминологический словарь к разделу 7

Аппарат – сосуд, оборудованный внутренними устройствами, предназначенный ведения химико-технологических процессов (РД 26–18–89).

Баллон – передвижной сосуд, имеющий одну или две горловины для установки вентилей или штуцеров, предназначенный для транспортирования, хранения и использования сжатых, сжиженных или растворенных под давлением газов (РД 26–18–89).

Барокамера – герметически закрываемая камера, в которой искусственно создаётся пониженное (вакуумная *Б.*) или повышенное (компрессионная *Б.*) давление.

Бобышка – местное утолщение стенки сосуда или приваренная деталь, выполняющая роль местного утолщения, позволяющее осуществить присоединение к сосуду трубопроводов, трубопроводной арматуры контрольно-измерительных приборов и других элементов (РД 26–18–89).

Бочка – передвижной сосуд цилиндрической или другой формы, который можно перекачивать с одного места на другое и ставить на торцы без дополнительных опор, предназначенный для транспортирования и хранения жидких и других веществ. цилиндрический сосуд для хранения и транспортирования жидкостей (объём до 0,5 м³) (РД 26–18–89).

Глубокий холод – область температур ниже –120°. Для получения *Г.х.* может быть использовано изохалатическое (эффект Джоуля-Томсона) или изохалатическое (с совершением внешней работы) расширение газа.

Гофр – волна на боковой поверхности обечайки для придания оболочке поперечной жёсткости. *Г.* получают прокаткой с использованием валков специальной формы.

Долговечность – свойство изделия (технического устройства) сохранять работоспособность (при установленной системе технического обслуживания и ремонтов) до наступления предельного состояния. Количественно оценивается, например, техническим ресурсом.

Днище – неотъемная часть корпуса сосуда, ограничивающая внутреннюю полость с торца (РД 26–18–89).

Драга – плавучий горно-обоганительный комплекс, производящий подводную разработку обводнённых россыпных месторождений полезных ископаемых, их обогащение и укладку пустой породы в отвалы.

Закалка – вид термической обработки материалов (нагрев, а затем ускоренное охлаждение). 3. углеродистой и низколегированной стали приводит к получению в её структуре мартенсита, характеризующегося высокой твёрдостью. 3. высоколегированных сталей типа 12Х18Н10Т называется аустенизацией. В данном случае 3. используется для получения в изделии однородного твёрдого раствора аустенита.

Змеевик – теплообменное устройство, выполненное в виде изогнутой трубы (РД 26–18–89).

Зона термического влияния – область основного металла, прилежащая к сварочному шву, в которой возможна полная или частичная закалка металла, что может привести к образованию холодных трещин при сварке.

Класс опасности вредных веществ — условная величина, предназначенная для упрощённой классификации потенциально опасных веществ. Класс опасности устанавливается в соответствии с нормативными отраслевыми документами. Для разных объектов — для химических веществ, для отходов, для загрязнителей воздуха и др. — установлены различные нормативы и показатели.

Коллектор – техническое устройство, представляет собой элемент сосуда, собирающий среду из других полостей сосуда для дальнейшего транспортирования (канализационные *К.*, оросительные *К.* и др.).

Компрессор – машина для сжатия воздуха или газа до избыточного давления не ниже 0,015 МПа (0,15 кгс/см²).

Коррозионное растрескивание – один из видов коррозионных разрушений (коррозии) металлов, при котором в металле зарождается и развивается множество трещин. Возникает *К.р.* при одновременном воздействии на металл агрессивной коррозионной среды и растягивающих напряжений. Характерной особенностью *К.р.* является практически полное отсутствие пластической деформации металлического изделия, предшествующей его разрушению. *К.р.* сталей наблюдается в растворах, которые содержат кислоты, хлориды, щелочи, нитраты, H₂S, CO₂, NH₃. Менее склонны к *К.р.* углеродистые стали с перлитной или перлитно-ферритной структурой, содержащие в своем составе более 0,2% углерода. Мартенситная структура стали является самой чувствительной к данному виду коррозии, т.к. все режимы термообработки, в результате которых образуется мартенсит, делают сталь склонной к *К.р.*

Коррозия металлов – разрушение металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с внешней (коррозионной) средой.

Крышка – отъёмная часть сосуда, закрывающая внутреннюю полость (РД 26–18–89).

Кронштейн – консольная опорная деталь или конструкция для крепления на вертикальной стене или колонне выступающих или выдвинутых в горизонтальном направлении частей машин или аппаратов.

Люк-лаз – устройство, обеспечивающее доступ во внутреннюю полость аппарата (РД 26–18–89).

Моральный износ – уменьшение стоимости в результате старения находящихся в эксплуатации изделий (машин, бытовых товаров и др.) независимо от того, снизилась или не снизилась их физическая пригодность. *М. и.* – следствие трёх причин: снижения себестоимости производства (и соответственно цены) таких же изделий в результате повышения производительности труда в соответствующей отрасли; появления технически более совершенных изделий; изменения потребительских требований, связанных со вкусом, модой.

Наплавка – нанесение слоя металла на деталь или режущую часть инструмента методами газовой, дуговой, электрошлаковой или др. сварки для образования более прочного, износостойкого и кислотостойкого поверхностного слоя, а также для восстановления изношенной поверхности.

Насос – гидромашина (аппарат, система) для напорного перемещения гл. образом капельной жидкости (в т.ч. с твёрдыми и газообразными включениями) в результате преобразования подводимой энергии в гидравлическую (механическую) энергию потока жидкости.

Нормализация – термическая обработка стали, заключающаяся в её нагреве до температуры аустенитного состояния (примерно до 750...950 °С), выдержке и последующем охлаждении на воздухе. *Н.* производят для повышения механических свойств стали, а также для улучшения обрабатываемости резанием.

Обечайка – цилиндрическая или коническая оболочка замкнутого профиля, открытая с торцов (РД 26–18–89).

Отверждение – необратимый переход жидких олигомеров или (и) мономеров в твёрдые неплавкие и нерастворимые (сетчатые) полимеры. *О.* – важная технологическая операция при формовании изделий из реактопластов, герметизации заливочными компаундами, получении клеевых соединений и лакокрасочных покрытий.

Отпуск металлов – вид термической обработки сплавов, осуществляемый после закалки, в результате которой образуется мартенсит (при сварке мартенсит образуется в зоне термического влияния сварного шва). При *О.* сплав нагревают до некоторой температуры с последующим охлаждением (как правило, на воздухе или в воде). Различают низкий (120...250 °С), средний (300...400 °С) и высокий (450...650 °С) *О.* Выбор режима отпуска определяется требуемым соотношением прочности и пластичности металла изделия.

Плакирование – нанесение на поверхность металлических листов, плит, волоки, труб тонкого слоя другого металла или сплава термомеханическим способом. *П.* осуществляется в процессе горячей прокатки (например, *П.* листов и плит) или прессования (*П.* труб). Применяется для получения биметалла (одностороннее *П.*) и триметалла (двустороннее *П.*), создания антикоррозионного слоя алюминия на полуфабрикатах из алюминиевых сплавов, нанесения латунного покрытия на листы стали (вместо электролитического покрытия) и т.д.

Подкладное кольцо – кольцо, устанавливаемое внутри трубы, используемое для стыковки труб при сварке (РД 38.13.004–86).

Пресс-форма – приспособление для изготовления объёмных изделий из пластмасс и др. материалов низкой твёрдости, в также формования изделий из порошковых материалов путём прессования. *П.-ф.* представляет собой две металлические плиты с полостью, соответствующей конфигурации изделия.

Реактопласты – пластические массы, переработка которых в изделия сопровождается необратимой химической реакцией, приводящей к образованию

неплавкого и нерастворимого вещества. Наиболее распространены *Р.* на основе феноло-формальдегидных смол, эпоксидных смол и др.

Резервуар – стационарный сосуд, предназначенный для хранения газообразных, жидких и других веществ (РД 26–18–89). Распространены металлические и ж.-б. *Р.*, реже каменные, деревянные, из полимерных материалов.

Работоспособность – состояние изделия, при котором в данный момент времени его основные параметры, характеризующие способность изделия выполнять заданные функции, находятся в пределах, установленных требованиями нормативно-технической документации.

Ремонтопригодность – свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению, отысканию и устранению причин и последствий повреждений (отказов) путём проведения технического обслуживания и ремонтов.

Ростехнадзор – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. *Р.* является федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке и реализации государственной политики и нормативно-правовому регулированию в установленной сфере деятельности, а также в сфере технологического и атомного надзора, функции по контролю и надзору в сфере безопасного ведения работ, связанных с пользованием недрами, промышленной безопасности, безопасности при использовании атомной энергии (за исключением деятельности по разработке, изготовлению, испытанию, эксплуатации и утилизации ядерного оружия и ядерных энергетических установок военного назначения), безопасности электрических и тепловых установок и сетей (кроме бытовых установок и сетей), безопасности гидротехнических сооружений (за исключением судоходных гидротехнических сооружений), безопасности производства, хранения и применения взрывчатых материалов промышленного назначения, а также специальные функции в области государственной безопасности в указанной сфере.

Рубашка – теплообменное устройство, состоящее из оболочки, охватывающей корпус сосуда или его часть, и образующее совместно со стенкой корпуса сосуда полость, заполненную теплоносителем (РД 26–18–89).

Соединение сварное замковое – сварное соединение стыковое без скоса кромок типа С6 (ГОСТ 5264–80).

Соединение сварное нахлёсточное – сварное соединение, в котором сваренные элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (ГОСТ 2601–84).

Соединение сварное стыковое – сварное соединение двух элементов, примыкающих друг к другу торцовыми поверхностями (ГОСТ 2601–84).

Соединение сварное тавровое – сварное соединение, в котором торец одного элемента примыкает под углом и приварен к боковой поверхности другого элемента (ГОСТ 2601–84).

Соединение сварное угловое – сварное соединение двух элементов, расположенных под углом и сваренных в месте примыкания их краёв (ГОСТ 2601–84).

Сосуд – изделие (устройство), имеющее внутреннюю полость, предназначенное для ведения технологических процессов, а также для хранения и транспортирования газообразных, жидких и других веществ (РД 26–18–89).

Строповые устройства – приварные элементы корпуса аппарата, служащие для обеспечения надёжности и безопасности строповки аппаратов канатами, цепями и др. при подъёме и перемещении их при монтаже и демонтаже, а также ремонте. В качестве строповых устройств вертикальных аппаратов используют крюки, цапфы и монтажные штуцера, размещаемые на боковых стенках, в также ушки, размещаемые на крышках аппаратов.

Тарелка массообменного аппарата – отбортованный металлический диск с устройствами (отверстия, клапаны, колпачки) для ввода пара (газа) на *T*. и слива жидкости.

Термопласты – пластмассы, способные размягчаться при нагревании и затвердевать при охлаждении. *T.*: полиэтилен, полипропилен, полистирол и др.

Технологичность – соответствие изделия требованиям производства и эксплуатации. Различают производственную и эксплуатационную *T*. Технологичным считается изделие, для которого минимизированы затраты на производство и эксплуатацию.

Траверса – горизонтальная деталь, являющаяся частью различных конструкций и машин (главным образом станин) и работающая преимущественно на изгиб.

Трубчатая печь – аппарат для высокотемпературного нагрева среды, состоящий из труб (змеевиков).

Трубная решётка – перфорированная круглая пластина, в отверстиях которой закреплены трубы.

Турбина – двигатель с вращательным движением рабочего органа – ротора и непрерывным рабочим процессом, преобразующий в механическую работу энергию подводимого рабочего тела – пара, газа или жидкости.

Фальц – место соединения деталей из тонколистового металла путём совместного загиба кромок.

Фланжирование – способ пластической обработки металла давлением, при котором заданный профиль формируется накаткой из круглой плоской заготовки. *Ф.* применяется во многих отраслях промышленности, где возникает необходимость получить бесшовное изделие сферической, торосферической или эллиптической формы.

Фланцевое соединение – неподвижное разъёмное соединение оболочек, герметичность которого обеспечивается путем сжатия уплотнительных поверхностей непосредственно друг с другом или через посредство расположенных между ними прокладок из более мягкого материала, сжатых крепежными деталями (РД 26–18–89).

Футеровка – защитная внутренняя облицовка (из кирпичей, плит, блоков, а также набивная и др.) тепловых агрегатов, печей, топок, труб, ёмкостей и т.д. Различают Ф. огнеупорные (шамотные, диасовые, магнезитовые, доломитовые и др.), химически стойкие и теплоизоляционные.

Цистерна – передвижной сосуд, постоянно установленный на раме железнодорожного вагона, на шасси автомобиля (прицепа) или на других средствах передвижения, предназначенный для транспортирования газообразных, жидких и других веществ (РД 26–18–89). Вместимость автомобильных Ц. – 1,5... 5 м³; ж.-д. Ц. до 140 м³.

Шов кольцевой – стыковой сварной шов обечайки или днища, перпендикулярный образующей оболочки.

Шов продольный – стыковой сварной шов обечайки или днища, параллельный образующей оболочки.

Шов стыковой – сварной стыкового соединения (ГОСТ 2601–84).

Шов угловой – сварной шов углового, нахлесточного и таврового соединения (ГОСТ 2601–84).

Штуцер – устройство, предназначенное для присоединения к сосуду трубопроводов, трубопроводной арматуры, контрольно-измерительных приборов и т.п. (РД 26–18–89).

Эмаль – прочное стеклообразное покрытие, наносимое на поверхность изделия электрохимическим способом. Э. наносится для защиты поверхности аппарата, контактирующей с рабочей средой, от коррозии, истирания, высоких температур и т.п.

Эрозия металлов – постепенное разрушение поверхности металлических изделий в потоке газа или жидкости, а также под влиянием механического воздействия или электрических разрядов.

Эффективность – продуктивность использования ресурсов в достижении какой-либо цели.

8. Контрольные задачи

Задача 1.1.

Определить давление гидравлического испытания стального сварного аппарата. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.1. Пояснения: p_p – рабочее давление, МПа; t_p – рабочая температура, град С.

Таблица 8.1 - Исходные данные для решения задачи 1.1.

№№	Сталь	p_p	t_p	№№	Сталь	p_p	t_p
1.1.1	СтЗсп	0,6	200	1.1.11	12ХМ	0,6	400

1.1.2	СтЗсп	0,7	250	1.1.12	12ХМ	0,7	450
1.1.3	СтЗсп	0,8	300	1.1.13	12ХМ	0,8	470
1.1.4	СтЗсп	0,9	350	1.1.14	12ХМ	0,9	500
1.1.5	СтЗсп	1	400	1.1.15	12ХМ	1	540
1.1.6	20К	0,6	200	1.1.16	09Г2С	0,6	200
1.1.7	20К	0,7	250	1.1.17	09Г2С	0,7	250
1.1.8	20К	0,8	300	1.1.18	09Г2С	0,8	300
1.1.9	20К	0,9	350	1.1.19	09Г2С	0,9	350
1.1.10	20К	1	400	1.1.20	09Г2С	1	400

Задача 1.2.

Определить допускаемое напряжение стали для рабочих условий аппарата. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.2. Пояснения: рабочая температура t_p , град С.

Таблица 8.2 - Исходные данные для решения задачи 1.2.

№№	Сталь	t_p	№№	Сталь	t_p
1.2.1	СтЗсп	210	1.2.11	12ХМ	410
1.2.2	СтЗсп	220	1.2.12	12ХМ	420
1.2.3	СтЗсп	230	1.2.13	12ХМ	430
1.2.4	СтЗсп	260	1.2.14	12ХМ	510
1.2.5	СтЗсп	270	1.2.15	12ХМ	520
1.2.6	20К	210	1.2.16	09Г2С	210
1.2.7	20К	220	1.2.17	09Г2С	220
1.2.8	20К	230	1.2.18	09Г2С	230
1.2.9	20К	260	1.2.19	09Г2С	260
1.2.10	20К	270	1.2.20	09Г2С	270

Задача 1.3.

Определить допускаемое напряжение материала для условий испытания аппарата. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.3. Пояснения: марка – марка материала; вид исп. – вид испытания (гидравл. – гидравлическое; пневмат. – пневматическое).

Таблица 8.3 - Исходные данные для решения задачи 1.3.

№№	Марка	Вид исп.	№№	Марка	Вид исп.
1.3.1.	20К	гидравл.	1.3.11.	20К	пневмат.
1.3.2.	16ГС	гидравл.	1.3.12.	16ГС	пневмат.
1.3.3.	09Г2С	гидравл.	1.3.13.	09Г2С	пневмат.
1.3.4.	12ХМ	гидравл.	1.3.14.	12ХМ	пневмат.
1.3.5.	15Х5М	гидравл.	1.3.15.	15Х5М	пневмат.

1.3.6.	12X18H10T	гидравл.	1.3.16.	12X18H10T	пневмат.
1.3.7.	06XH28МДТ	гидравл.	1.3.17.	06XH28МДТ	пневмат.
1.3.8.	BT1-0	гидравл.	1.3.18.	BT1-0	пневмат.
1.3.9.	M3p	гидравл.	1.3.19.	M3p	пневмат.
1.3.10.	АМц	гидравл.	1.3.20.	АМц	пневмат.

Задача 1.4.

Определить условное давление для стального аппаратного фланца. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 7.4. Пояснения: t_p – рабочая температура, град С; p_p – расчётное давление, МПа.

Таблица 7.4 - Исходные данные для решения задачи 1.4.

№№	Сталь	t_p	p_p	№№	Сталь	t_p	p_p
1.4.1.	20	250	1,5	1.4.11.	20	400	2,2
1.4.2.	20К	250	1,5	1.4.12.	20К	400	2,2
1.4.3.	09Г2С	250	1,5	1.4.13.	09Г2С	400	2,2
1.4.4.	16ГС	250	1,5	1.4.14.	16ГС	400	2,2
1.4.5.	12X18H10T	250	1,5	1.4.15.	12X18H10T	400	2,2
1.4.6.	06XH28МДТ	250	1,5	1.4.16.	06XH28МДТ	400	2,2
1.4.7.	15X5M	250	1,5	1.4.17.	15X5M	400	2,2
1.4.8.	16ГС	250	1,5	1.4.18.	16ГС	400	2,2
1.4.9.	09Г2С	250	1,5	1.4.19.	09Г2С	400	2,2
1.4.10.	12XM	250	1,5	1.4.20.	12XM	400	2,2

Задача 1.5.

Определить расчётное давление среды в аппарате. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.5. Пояснения: $p_{\text{раб}}$ – рабочее давление в аппарате, МПа; ρ – плотность среды, кг/м³; L – высота аппарата, м.

Таблица 8.5 - Исходные данные для решения задачи 1.5.

№№	$p_{\text{раб}}$	ρ	L	№№	$p_{\text{раб}}$	ρ	L
1.5.1.	1,6	1060	3	1.5.11.	1,2	1360	4,8
1.5.2.	1,4	950	4,2	1.5.12.	0,8	1297	6
1.5.3.	1,2	1555	4,2	1.5.13.	0,6	870	6,6
1.5.4.	1	873	5,4	1.5.14.	0,4	1530	7,2
1.5.5.	1,6	793	5,4	1.5.15.	1,6	1060	3,6
1.5.6.	0,8	1188	6,6	1.5.16.	1,4	950	4,8
1.5.7.	0,4	1250	8,4	1.5.17.	1,2	1555	4,8
1.5.8.	0,3	1130	3	1.5.18.	1	873	6

№№	$p_{\text{раб}}$	ρ	L	№№	$p_{\text{раб}}$	ρ	L
1.5.9.	1,6	777	3,6	1.5.19.	1,6	793	6,3
1.5.10.	1,4	1160	4,8	1.5.20.	0,8	1188	6,6

Задача 2.1.

В поперечном сечении растянутого элемента конструкции действует нормальное напряжение σ_{max} . В сечении, наклонённом к оси элемента на угол α , действует касательное напряжение τ_{α} (см. рис.2.2). Определить: значение угла α и величину нормального напряжения σ_{α} , действующего на этой площадке. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.6. Пояснения: σ_{max} , τ_{α} в МПа.

Таблица 8.6 – Исходные данные для решения задачи 2.1.

№№	σ_{max}	τ_{α}	№№	σ_{max}	τ_{α}	№№	σ_{max}	τ_{α}
2.1.1.	50	17	2.1.8.	55	19	2.1.15.	60	21
2.1.2.	50	18	2.1.9.	55	20	2.1.16.	65	17
2.1.3.	50	19	2.1.10.	55	21	2.1.17.	65	18
2.1.4.	50	20	2.1.11.	60	17	2.1.18.	65	19
2.1.5.	50	21	2.1.12.	60	18	2.1.19.	65	20
2.1.6.	55	17	2.1.13.	60	19	2.1.20.	65	21
2.1.7.	55	18	2.1.14.	60	20	2.1.21.	70	20

Задача 2.2.

В некоторой точке элемента конструкции известны значения главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 . Определите значения расчётных напряжений в этой точке элемента конструкции по II, III и IV гипотезам прочности. Дополнительные данные: $\mu = 0,3$. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.7. Пояснения: значения главных напряжений в МПа.

Таблица 8.7 - Исходные данные для решения задачи 2.2.

№№	σ_1	σ_2	σ_3	№№	σ_1	σ_2	σ_3
2.2.1.	125	102	79	2.2.11.	118	99	69
2.2.2.	130	104	78	2.2.12.	123	101	68
2.2.3.	135	106	77	2.2.13.	128	103	67
2.2.4.	140	108	76	2.2.14.	133	105	66
2.2.5.	145	110	75	2.2.15.	138	107	65
2.2.6.	119	112	74	2.2.16.	117	109	64
2.2.7.	124	114	73	2.2.17.	122	111	63

№№	σ_1	σ_2	σ_3	№№	σ_1	σ_2	σ_3
2.2.8.	129	116	72	2.2.18.	127	113	62
2.2.9.	134	118	71	2.2.19.	132	115	61
2.2.10.	139	120	70	2.2.20.	137	117	60

Задача 2.3.

Для тонкостенной цилиндрической обечайки сварного аппарата, находящегося под внутренним давлением, проводилось измерение напряжений по двум взаимно перпендикулярным направлениям с нормальными α , β (см. рисунок к примеру 2.3). Для значений углов α , β измерены напряжения σ_α , σ_β . Определить значения главных напряжений в стенке обечайки. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.8. Пояснения: значения углов α , β в градусах; значения напряжений в МПа.

Таблица 8.8 - Исходные данные для решения задачи 2.3.

№№	α	β	σ_α	σ_β	№№	α	β	σ_α	σ_β
2.3.1.	42	132	23,28	21,72	2.3.11.	42	132	38,81	36,19
2.3.2.	40	130	23,80	21,20	2.3.12.	40	130	39,67	35,33
2.3.3.	35	125	25,07	19,93	2.3.13.	35	125	41,78	33,22
2.3.4.	30	120	26,25	18,75	2.3.14.	30	120	43,75	31,25
2.3.5.	25	115	27,32	17,68	2.3.15.	25	115	45,53	29,47
2.3.6.	42	132	31,05	28,95	2.3.16.	42	132	46,57	43,43
2.3.7.	40	130	31,74	28,26	2.3.17.	40	130	47,60	42,40
2.3.8.	35	125	33,42	26,58	2.3.18.	35	125	50,13	39,87
2.3.9.	30	120	35,00	25,00	2.3.19.	30	120	52,50	37,50
2.3.10.	25	115	36,43	23,57	2.3.20.	25	115	54,64	35,36

Задача 2.4.

Элементы колосниковой решётки изготовлены из стального двутавра № дв. Определить величину допустимой силы [P], приложенной в заданной точке элемента колосниковой решётки на расстоянии «а, м» от левой опоры (рисунок к примеру 2.4.). Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.9. Пояснения: № дв. – номер профиля (см. таблицу П 16); l – длина элемента колосниковой решётки, м; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение стали двутавра, МПа.

Таблица 8.9 - Исходные данные для решения задачи 2.4.

№№	№ дв.	l	a	$[\sigma]$	№№	№ дв.	l	a	$[\sigma]$
2.4.1.	12	3	1,5	140	2.4.11.	12	3	1,2	170
2.4.2.	14	3	2,0	140	2.4.12.	14	3	1,0	170
2.4.3.	16	3	2,4	140	2.4.13.	16	3	1,5	170
2.4.4.	18	3	1,7	140	2.4.14.	18	3	2,0	170
2.4.5.	10	3	1,2	130	2.4.15.	10	3	2,4	140

2.4.6.	12	4	1,3	130	2.4.16.	12	4	2,3	140
2.4.7.	14	4	2,0	130	2.4.17.	14	4	1,6	140
2.4.8.	16	4	2,7	130	2.4.18.	16	4	1,3	140
2.4.9.	18	4	3,2	130	2.4.19.	18	4	2,0	140
2.4.10.	10	4	2,3	170	2.4.20.	10	4	2,7	140

Задача 2.5.

Элементы колосниковой решётки изготовлены из стального двутавра № дв. Определить величину допустимой интенсивности равномерно распределённой нагрузки $[q]$, приложенной к элементу колосниковой решётки (рисунок к примеру 2.5). Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.10. Пояснения: № дв. – номер профиля (см. таблицу П 16); l – длина элемента колосниковой решётки, м; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение стали двутавра, МПа.

Таблица 8.10 - Исходные данные для решения задачи 2.5.

№№	№ дв.	l	$[\sigma]$	№№	№ дв.	l	$[\sigma]$
2.5.1.	12	3	140	2.5.11.	12	3	170
2.5.2.	14	3	140	2.5.12.	14	3	170
2.5.3.	16	3	140	2.5.13.	16	3	170
2.5.4.	18	3	140	2.5.14.	18	3	170
2.5.5.	10	3	130	2.5.15.	10	3	140
2.5.6.	12	4	130	2.5.16.	12	4	140
2.5.7.	14	4	130	2.5.17.	14	4	140
2.5.8.	16	4	130	2.5.18.	16	4	140
2.5.9.	18	4	130	2.5.19.	18	4	140
2.5.10.	10	4	170	2.5.20.	10	4	140

Задача 2.6.

Определить экономичность при изгибе балок из прокатного профиля двутавра № дв или швеллера № шв и кольцевого сечения $s = d/D$. Балки имеют равновеликие сечения. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.11. Пояснения: № дв. – номер двутавра (см. таблицу П 16); № шв – номер швеллера (см. таблицу П 16); s – отношение внутреннего диаметра к наружному для кольцевого сечения; D, d – размеры кольцевого сечения балки, равновеликой сечению прокатного профиля.

Таблица 8.11 - Исходные данные для решения задачи 2.6.

№№	№ дв.	№ шв.	s	№№	№ дв.	№ шв.	s
2.6.1.	12	—	0,75	2.6.11.	—	10У	0,75
2.6.2.	14	—	0,75	2.6.12.	—	12У	0,75
2.6.3.	16	—	0,75	2.6.13.	—	14У	0,75
2.6.4.	18	—	0,75	2.6.14.	—	16У	0,75

2.6.5.	10	—	0,75	2.6.15.	—	18У	0,75
2.6.6.	12	—	0,85	2.6.16.	—	10У	0,85
2.6.7.	14	—	0,85	2.6.17.	—	12У	0,85
2.6.8.	16	—	0,85	2.6.18.	—	14У	0,85
2.6.9.	18	—	0,85	2.6.19.	—	16У	0,85
2.6.10.	10	—	0,85	2.6.20.	—	18У	0,85

Задача 3.1.

Для стальных аппаратов, работающих под внутренним давлением.

1. Определить расчётную толщину стенки тонкостенных аппаратов различного конструктивного исполнения (таблица 3.1): а) сферическая обечайка; б) цилиндрическая обечайка; в) стандартное эллиптическое днище; г) коническое днище $2\alpha = 90^\circ$.

2. Проверить выполнение условия тонкостенности для аппарата с наибольшей толщиной стенки.

Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.12. Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата, м; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала, МПа; p – давление в аппарате, МПа; ϕ – коэффициент прочности сварного шва; c – конструктивная прибавка, мм.

Таблица 8.12 - Исходные данные для решения задачи 3.1.

№№	Вид	D_B	p	$[\sigma]$	ϕ	c	№№	Вид	D_B	p	$[\sigma]$	ϕ	c
3.1.1.	а	1,1	1	170	1	1	3.1.11.	в	1,1	1	170	1	1
3.1.2.	а	1,2	1	140	1	1	3.1.12.	в	1,2	1	140	1	1
3.1.3.	а	1,3	1	160	1	1	3.1.13.	в	1,3	1	160	1	1
3.1.4.	а	1,4	1	180	1	1	3.1.14.	в	1,4	1	180	1	1
3.1.5.	а	1,5	1	130	1	1	3.1.15.	в	1,5	1	130	1	1
3.1.6.	б	1,1	1	170	1	1	3.1.16.	г	1,1	1	170	1	1
3.1.7.	б	1,2	1	140	1	1	3.1.17.	г	1,2	1	140	1	1
3.1.8.	б	1,3	1	160	1	1	3.1.18.	г	1,3	1	160	1	1
3.1.9.	б	1,4	1	180	1	1	3.1.19.	г	1,4	1	180	1	1
3.1.10.	б	1,5	1	130	1	1	3.1.20.	г	1,5	1	130	1	1

Задача 3.2.

Тонкостенные аппараты работают под внутренним давлением. Определить допустимое давление для аппаратов различного конструктивного исполнения (таблица 3.1): а) сферическая обечайка; б) цилиндрическая обечайка; в) стандартное эллиптическое днище; г) коническое днище $2\alpha = 90^\circ$.

Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.13. Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата, м; s – исполнительная толщина стенки, м; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала, МПа; ϕ – коэффициент прочности сварного шва; c – конструктивная прибавка, мм.

Таблица 8.13 - Исходные данные для решения задачи 3.2.

№№	Вид	D _в	s	[σ]	φ	c	№№	Вид	D _в	s	[σ]	φ	c
3.2.1.	a	1,1	3,5	170	1	1	3.2.11.	в	1,1	7	170	1	1
3.2.2.	a	1,2	4	140	1	1	3.2.12.	в	1,2	8	140	1	1
3.2.3.	a	1,3	4,5	160	1	1	3.2.13.	в	1,3	9	160	1	1
3.2.4.	a	1,4	3	180	1	1	3.2.14.	в	1,4	6	180	1	1
3.2.5.	a	1,5	5	130	1	1	3.2.15.	в	1,5	10	130	1	1
3.2.6.	б	1,1	7	170	1	1	3.2.16.	г	1,1	7	170	1	1
3.2.7.	б	1,2	8	140	1	1	3.2.17.	г	1,2	8	140	1	1
3.2.8.	б	1,3	9	160	1	1	3.2.18.	г	1,3	9	160	1	1
3.2.9.	б	1,4	6	180	1	1	3.2.19.	г	1,4	6	180	1	1
3.2.10.	б	1,5	10	130	1	1	3.2.20.	г	1,5	10	130	1	1

Задача 3.3.

Определить расчётную толщину плоского неотбортованного стального днища (тип 1) аппарата, нагруженного внутренним давлением. Днище имеет центральное технологическое отверстие диаметром $d = 100$ мм. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.14. Пояснения: D_в – внутренний диаметр аппарата, м; [σ] – допускаемое напряжение материала, МПа; p – давление в аппарате, МПа.

Таблица 8.14 - Исходные данные для решения задачи 3.3.

№№	D _в	[σ]	p	№№	D _в	[σ]	p
3.3.1.	0,7	140	0,125	3.3.11.	1,0	160	0,33
3.3.2.	0,8	140	0,15	3.3.12.	1,1	160	0,31
3.3.3.	0,9	140	0,175	3.3.13.	1,2	160	0,29
3.3.4.	1,0	140	0,2	3.3.14.	0,6	160	0,27
3.3.5.	1,1	140	0,225	3.3.15.	0,7	160	0,25
3.3.6.	1,2	147	0,25	3.3.16.	0,8	180	0,23
3.3.7.	0,6	147	0,275	3.3.17.	0,9	180	0,21
3.3.8.	0,7	147	0,3	3.3.18.	1,0	180	0,19
3.3.9.	0,8	147	0,325	3.3.19.	1,1	180	0,17
3.3.10.	0,9	147	0,35	3.3.20.	1,2	180	0,15

Задача 3.4.

Определить допускаемое рабочее давление в стальном аппарате с плоским неотбортованным днищем (тип 1). Днище имеет центральное технологическое отверстие диаметром $d = 150$ мм. Конструктивная прибавка к толщине стенки $c = 1$ мм. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.15. Пояснения: D_в – внутренний диаметр аппарата, м; [σ] – допускае-

мое напряжение материала, МПа; s_1 – исполнительная толщина стенки аппарата, мм.

Таблица 8.15 - Исходные данные для решения задачи 3.4.

№№	D_B	$[\sigma]$	s_1	№№	D_B	$[\sigma]$	s_1
3.4.1.	0,7	140	13	3.4.11.	1,0	160	27
3.4.2.	0,8	140	16	3.4.12.	1,1	160	29
3.4.3.	0,9	140	19	3.4.13.	1,2	160	30
3.4.4.	1,0	140	23	3.4.14.	0,6	160	16
3.4.5.	1,1	140	26	3.4.15.	0,7	160	17
3.4.6.	1,2	147	29	3.4.16.	0,8	180	18
3.4.7.	0,6	147	16	3.4.17.	0,9	180	19
3.4.8.	0,7	147	20	3.4.18.	1,0	180	20
3.4.9.	0,8	147	23	3.4.19.	1,1	180	20
3.4.10.	0,9	147	26	3.4.20.	1,2	180	21

Задача 3.5.

Определить исполнительную толщину и массу стандартного согласно ГОСТ 6533–68 эллиптического отбортованного днища стального аппарата, работающего под внутренним давлением. Конструктивная прибавка к толщине стенки $s = 1$ мм. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.16. Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата, м; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала, МПа; p – давление в аппарате, МПа.

Таблица 8.16 - Исходные данные для решения задачи 3.5.

№№	D_B	$[\sigma]$	p	№№	D_B	$[\sigma]$	p
3.5.1.	0,7	140	1,9	3.5.11.	1,2	160	1,9
3.5.2.	0,8	140	1,8	3.5.12.	0,6	160	1,8
3.5.3.	0,9	140	1,7	3.5.13.	0,7	160	1,7
3.5.4.	1	140	1,6	3.5.14.	0,8	160	1,6
3.5.5.	1,2	140	1,5	3.5.15.	0,9	160	1,5
3.5.6.	0,6	147	1,4	3.5.16.	1	180	1,4
3.5.7.	0,7	147	1,3	3.5.17.	1,2	180	1,5
3.5.8.	0,8	147	1,2	3.5.18.	0,7	180	1,4
3.5.9.	0,9	147	2,1	3.5.19.	0,8	180	1,3
3.5.10.	1	147	2	3.5.20.	0,9	180	1,2

Задача 3.6.

Определить площадь поверхности цельносварного аппарата (рис. 3.3), подлежащего гуммированию., опираясь в качестве базового на внутренний диаметр аппарата. Исходные данные для решения задачи представлены в та-

блице 8.17. Пояснения: V – объём полости аппарата, м^3 ; D_B – внутренний (базовый) диаметр аппарата, м ;

Таблица 8.17 - Исходные данные для решения задачи 3.6.

№№	D_B	V	№№	D_B	V	№№	D_B	V
3.6.1.	0,7	0,9	3.6.8.	0,8	1,3	3.6.15.	0,9	2,3
3.6.2.	0,8	1,5	3.6.9.	0,9	2	3.6.16.	1	3,3
3.6.3.	0,9	2,1	3.6.10.	1	2,7	3.6.17.	1,2	4,6
3.6.4.	1	3	3.6.11.	1,2	3,8	3.6.18.	0,6	7,9
3.6.5.	1,2	4,2	3.6.12.	0,6	6,6	3.6.19.	0,7	0,85
3.6.6.	0,6	7,2	3.6.13.	0,7	1	3.6.20.	0,8	1,4
3.6.7.	0,7	0,8	3.6.14.	0,8	1,6			

Задача 3.7.

Определить высоту цельносварного цилиндрического аппарата с неотбортованными эллиптическими днищами (рис. 3.3), опираясь в качестве базового на внутренний диаметр аппарата. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.18. Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата (базовый диаметр), м ; V – объём полости аппарата, м^3 .

Таблица 8.18 - Исходные данные для решения задачи 3.7.

№№	D_B	V	№№	D_B	V	№№	D_B	V
3.7.1.	0,7	0,9	3.7.8.	0,8	1,3	3.7.15.	0,9	2,3
3.7.2.	0,8	1,5	3.7.9.	0,9	2	3.7.16.	1	3,3
3.7.3.	0,9	2,1	3.7.10.	1	2,7	3.7.17.	1,2	4,6
3.7.4.	1	3	3.7.11.	1,2	3,8	3.7.18.	0,6	7,9
3.7.5.	1,2	4,2	3.7.12.	0,6	6,6	3.6.19.	0,7	0,85
3.7.6.	0,6	7,2	3.7.13.	0,7	1	3.6.20.	0,8	1,4
3.7.7.	0,7	0,8	3.7.14.	0,8	1,6			

Задача 3.8.

Определить площадь поверхности и вместимость конического неотбортованного днища (рис. 3.4 а). Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.19. Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата, м , α_k – угол конуса днища, град.

Таблица 8.19 - Исходные данные для решения задачи 3.8.

№№	D_B	α_k	№№	D_B	α_k	№№	D_B	α_k
3.8.1.	0,7	45	3.8.8.	0,8	40	3.8.15.	0,9	60
3.8.2.	0,8	45	3.8.9.	0,9	40	3.8.16.	1	60

3.8.3.	0,9	45	3.8.10.	1	40	3.8.17.	1,2	55
3.8.4.	1	45	3.8.11.	1,2	60	3.8.18.	0,6	55
3.8.5.	1,2	45	3.8.12.	0,6	60	3.8.19.	0,7	55
3.8.6.	0,6	45	3.8.13.	0,7	60	3.8.20.	0,8	55
3.8.7.	0,7	40	3.8.14.	0,8	60			

Задача 3.9.

Определить размеры заготовки из листа для конического неотбортованного днища (рис. 3.4 б). Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.20. Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата, м, α_k – угол конуса днища, град.

Таблица 8.20 - Исходные данные для решения задачи 3.9.

№№	D_B	α_k	№№	D_B	α_k	№№	D_B	α_k
3.9.1.	0,7	45	3.9.8.	0,8	40	3.9.15.	0,9	60
3.9.2.	0,8	45	3.9.9.	0,9	40	3.9.16.	1	60
3.9.3.	0,9	45	3.9.10.	1	40	3.9.17.	1,2	55
3.9.4.	1	45	3.9.11.	1,2	60	3.9.18.	0,6	55
3.9.5.	1,2	45	3.9.12.	0,6	60	3.9.19.	0,7	55
3.9.6.	0,6	45	3.9.13.	0,7	60	3.9.20.	0,8	55
3.9.7.	0,7	40	3.9.14.	0,8	60			

Задача 4.1.

В цилиндрической обечайке имеется одиночное отверстие для трубы. Проверить необходимость укрепления отверстия для трубы с наружным диаметром d_H (мм) в обечайке с внутренним диаметром D_B (м) (см. рис.4.1). Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.21. Пояснения: s_p – расчётная толщина стенки обечайки, мм; s – исполнительная толщина стенки обечайки, мм; c – конструктивная прибавка к толщине стенки обечайки, мм.

Таблица 8.21 - Исходные данные для решения задачи 4.1.

№№	d_H	D_B	s_p	s	c	№№	d_H	D_B	s_p	s	c
4.1.1.	168	1,1	7,53	10	1	4.1.11.	203	1,1	3,94	6	1
4.1.2.	168	1,2	10,29	13	1	4.1.12.	203	1,2	4,73	7	1
4.1.3.	168	1,3	6,67	9	1	4.1.13.	203	1,3	5,60	8	1
4.1.4.	168	1,4	8,14	11	1	4.1.14.	203	1,4	5,37	7	1
4.1.5.	168	1,5	10,27	13	1	4.1.15.	203	1,5	6,20	8	1
4.1.6.	180	1,1	3,94	6	1	4.1.16.	219	1,1	4,87	7	1
4.1.7.	180	1,2	8,63	11	1	4.1.17.	219	1,2	5,67	8	1

4.1.8.	180	1,3	11,71	15	1	4.1.18.	219	1,3	6,53	9	1
4.1.9.	180	1,4	7,54	10	1	4.1.19.	219	1,4	7,45	10	1
4.1.10.	180	1,5	9,16	12	1	4.1.20.	219	1,5	8,43	11	1

Задача 4.2.

В обечайке размещены два патрубка из трубы с внутренним диаметром $d_{п1}$, $d_{п2}$ (мм). Расстояние между осями патрубков A (мм) (рис.4.2). Толщина стенки патрубков $s_{п1}$, $s_{п2}$ (мм). Определить необходимость учёта взаимного влияния отверстий для патрубков при их укреплении. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.22.

Таблица 8.22 - Исходные данные для решения задачи 4.2.

№№	$d_{п1}$	$d_{п2}$	A	$s_{п1}$	$s_{п2}$	№№	$d_{п1}$	$d_{п2}$	A	$s_{п1}$	$s_{п2}$
4.2.1.	166	178	250	6	6	4.2.11.	205	166	250	7	7
4.2.2.	166	191	250	7	7	4.2.12.	178	166	250	8	8
4.2.3.	178	205	250	8	8	4.2.13.	166	178	250	6	6
4.2.4.	191	229	250	6	6	4.2.14.	166	191	250	7	7
4.2.5.	205	166	250	7	7	4.2.15.	178	205	250	8	8
4.2.6.	229	166	250	8	8	4.2.16.	191	229	250	6	6
4.2.7.	166	178	250	6	6	4.2.17.	205	166	250	7	7
4.2.8.	166	191	250	7	7	4.2.18.	229	166	250	8	8
4.2.9.	178	205	250	8	8	4.2.19.	166	191	250	6	6
4.2.10.	191	178	250	6	6	4.2.20.	166	205	250	7	7

Задача 4.3.

В обечайке размещены два патрубка из трубы с внутренним диаметром $d_{п1}$, $d_{п2}$ (мм). Расстояние между осями патрубков A (мм) (рис. 4.2). Из предварительных расчётов получено, что при укреплении отверстий в обечайке требуется учитывать их взаимное влияние. Определить значение условного диаметра отверстия при расчёте укрепления двух смежных отверстий. Дополнительные данные: конструктивная прибавка к толщине стенки патрубка c (мм). Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.23.

Таблица 8.23 - Исходные данные для решения задачи 4.3.

№№	$d_{п1}$	$d_{п2}$	A	c	№№	$d_{п1}$	$d_{п2}$	A	c
4.3.1.	166	178	250	1	4.3.11.	205	166	250	1
4.3.2.	166	191	250	1	4.3.12.	178	166	250	1
4.3.3.	178	205	250	1	4.3.13.	166	178	250	1
4.3.4.	191	229	250	1	4.3.14.	166	191	250	1
4.3.5.	205	166	250	1	4.3.15.	178	205	250	1
4.3.6.	229	166	250	1	4.3.16.	191	229	250	1

4.3.7.	166	178	250	1	4.3.17.	205	166	250	1
4.3.8.	166	191	250	1	4.3.18.	229	166	250	1
4.3.9.	178	205	250	1	4.3.19.	166	191	250	1
4.3.10.	191	178	250	1	4.3.20.	166	205	250	1

Задача 5.1.

Гладкая цилиндрическая обечайка (рис. 5.1) работает под внешним давлением. Определить категорию обечайки (длинная, короткая). Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.24. Пояснения: D_B – внутренний диаметр обечайки, м; l_p – расчётная длина обечайки, м; s – исполнительная толщина стенки, мм; c – конструктивная прибавка к толщине стенки, мм.

Таблица 8.24 - Исходные данные для решения задачи 5.1.

№№	D_B	l_p	s	c	№№	D_B	l_p	s	c
5.1.1.	1,1	8	10	1	5.1.11.	1,1	8	6	1
5.1.2.	1,2	6	13	1	5.1.12.	1,2	6	7	1
5.1.3.	1,3	5	9	1	5.1.13.	1,3	5	8	1
5.1.4.	1,4	7	11	1	5.1.14.	1,4	7	7	1
5.1.5.	1,5	8	13	1	5.1.15.	1,5	8	8	1
5.1.6.	1,1	8	6	1	5.1.16.	1,1	8	7	1
5.1.7.	1,2	6	11	1	5.1.17.	1,2	6	8	1
5.1.8.	1,3	5	15	1	5.1.18.	1,3	5	9	1
5.1.9.	1,4	7	10	1	5.1.19.	1,4	7	10	1
5.1.10.	1,5	8	12	1	5.1.20.	1,5	8	11	1

Задача 5.2.

Гладкая короткая цилиндрическая обечайка (рис. 5.1) работает под внешним давлением. Проверить для обечайки выполнение условия работы в пределах упругости

$$0,052 \cdot \sqrt[6]{\frac{p}{10^{-6} \cdot E}} \leq \frac{L}{D_B} \leq 7,68 \cdot \sqrt[6]{\frac{10^{-6} \cdot E}{p}}.$$

Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.25. Пояснения: $E = 1,99 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости материала; D_B – внутренний диаметр обечайки, м; L – длина обечайки, м; p – внешнее давление, МПа.

Таблица 8.25 - Исходные данные для решения задачи 5.2.

№№	D_B	L	p	№№	D_B	L	p
5.2.1.	1,1	4	0,67	5.2.11.	1,1	4	0,45
5.2.2.	1,2	6	0,69	5.2.12.	1,2	6	0,47

5.2.3.	1,3	5	0,71	5.2.13.	1,3	5	0,49
5.2.4.	1,4	7	0,73	5.2.14.	1,4	7	0,51
5.2.5.	1,5	8	0,75	5.2.15.	1,5	8	0,53
5.2.6.	1,1	5	0,35	5.2.16.	1,1	4	0,55
5.2.7.	1,2	6	0,37	5.2.17.	1,2	6	0,57
5.2.8.	1,3	5	0,39	5.2.18.	1,3	5	0,59
5.2.9.	1,4	7	0,41	5.2.19.	1,4	7	0,61
5.2.10.	1,5	8	0,43	5.2.20.	1,5	8	0,63

Задача 5.3.

Гладкая короткая цилиндрическая обечайка (рис. 5.1) работает под внешним давлением в пределах упругости. Определить расчётную толщину стенки обечайки. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.26. Пояснения: $E = 1,99 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости материала; D_B – внутренний диаметр обечайки, м; L – длина обечайки, м; p – внешнее давление, МПа.

Таблица 8.26 - Исходные данные для решения задачи 5.3.

№№	D_B	L	p	№№	D_B	L	p
5.3.1.	1,1	4	0,16	5.3.11.	1,1	4	0,26
5.3.2.	1,2	6	0,17	5.3.12.	1,2	6	0,27
5.3.3.	1,3	5	0,18	5.3.13.	1,3	5	0,28
5.3.4.	1,4	7	0,19	5.3.14.	1,4	7	0,29
5.3.5.	1,5	8	0,2	5.3.15.	1,5	8	0,3
5.3.6.	1,1	5	0,21	5.3.16.	1,1	4	0,31
5.3.7.	1,2	6	0,22	5.3.17.	1,2	6	0,32
5.3.8.	1,3	5	0,23	5.3.18.	1,3	5	0,33
5.3.9.	1,4	7	0,24	5.3.19.	1,4	7	0,34
5.3.10.	1,5	8	0,25	5.3.20.	1,5	8	0,35

Задача 5.4.

Гладкая короткая цилиндрическая обечайка (рис. 5.1) работает под внешним давлением в пределах упругости. Определить допускаемое давление для обечайки из условия устойчивости. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.27. Пояснения: $E = 1,99 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости материала; D_B – внутренний диаметр обечайки, м; L – длина обечайки, м; s – исполнительная толщина стенки обечайки, мм; c – конструктивная прибавка к толщине стенки, мм.

Таблица 8.27 - Исходные данные для решения задачи 5.4.

№№	D_B	L	s	c	№№	D_B	L	s	c
----	-------	-----	-----	-----	----	-------	-----	-----	-----

5.4.1.	1,1	4	10	1	5.4.11.	1,1	4	12	1
5.4.2.	1,2	6	12	1	5.4.12.	1,2	6	14	1
5.4.3.	1,3	5	12	1	5.4.13.	1,3	5	14	1
5.4.4.	1,4	7	14	1	5.4.14.	1,4	7	17	1
5.4.5.	1,5	8	16	1	5.4.15.	1,5	8	18	1
5.4.6.	1,1	5	12	1	5.4.16.	1,1	4	12	1
5.4.7.	1,2	6	13	1	5.4.17.	1,2	6	15	1
5.4.8.	1,3	5	13	1	5.4.18.	1,3	5	15	1
5.4.9.	1,4	7	16	1	5.4.19.	1,4	7	18	1
5.4.10.	1,5	8	17	1	5.4.20.	1,5	8	19	1

Задача 5.5.

Гладкая короткая цилиндрическая обечайка (рис. 5.1) работает под внешним давлением в пределах упругости. Определить допускаемое давление для обечайки из условия прочности. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.28. Пояснения: $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала при рабочей температуре; D_B – внутренний диаметр обечайки, м; L – длина обечайки, м; s – исполнительная толщина стенки обечайки, мм; c – конструктивная прибавка к толщине стенки, мм.

Таблица 8.28 - Исходные данные для решения задачи 5.5.

№№	D_B	$[\sigma]$	s	c	№№	D_B	$[\sigma]$	s	c
5.5.1.	1	140	5	1	5.5.11.	2,4	184	14	1,1
5.5.2.	1,4	160	6	0,7	5.5.12.	2,8	150	13	0,3
5.5.3.	1,6	170	6	0,9	5.5.13.	2,8	160	14	0,2
5.5.4.	1,6	170	7	1,1	5.5.14.	1,2	140	5	1
5.5.5.	1,8	171	6	0,6	5.5.15.	1,6	160	6	0,7
5.5.6.	1,8	140	7	0,8	5.5.16.	1,8	170	7	0,9
5.5.7.	1,6	128	8	1	5.5.17.	1,8	170	7	1,1
5.5.8.	2	158	8	0,6	5.5.18.	2	171	7	0,6
5.5.9.	2	140	10	1,2	5.5.19.	2	140	8	0,8
5.5.10.	2,4	170	11	0,8	5.5.20.	1,4	128	7	1

Задача 5.6.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости. Определить допускаемое давление для обечайки из условия прочности и устойчивости. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.29. Пояснения: $[p_n]_\sigma$ – допускаемое давление из условия прочности, МПа; $[p_n]_E$ – допускаемое давление из условия устойчивости, МПа.

Таблица 8.29 - Исходные данные для решения задачи 5.6.

№№	$[p_H]_{\sigma}$	$[p_H]_E$	№№	$[p_H]_{\sigma}$	$[p_H]_E$
5.6.1.	1,12	0,137	5.6.11.	1,97	0,095
5.6.2.	1,21	0,168	5.6.12.	1,35	0,081
5.6.3.	1,08	0,114	5.6.13.	1,57	0,080
5.6.4.	1,25	0,116	5.6.14.	0,93	0,104
5.6.5.	1,02	0,102	5.6.15.	1,06	0,138
5.6.6.	0,96	0,104	5.6.16.	1,15	0,150
5.6.7.	1,12	0,137	5.6.17.	1,11	0,097
5.6.8.	1,16	0,099	5.6.18.	1,09	0,134
5.6.9.	1,23	0,091	5.6.19.	1,00	0,129
5.6.10.	1,44	0,094	5.6.20.	1,09	0,114

Задача 5.7.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости, дополнительно на обечайку действует осевая сжимающая сила. Определить допускаемое значение осевой сжимающей силы из условия устойчивости. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.30. Пояснения: E – модуль упругости материала, МПа; D_B – внутренний диаметр обечайки; m ; s – исполнительная толщина стенки обечайки; мм, c – конструктивная прибавка к толщине стенки; мм. При решении коэффициент запаса устойчивости принять $n_y = 2,4$.

Таблица 8.30 - Исходные данные для решения задачи 5.7.

№№	$E \times 10^{-5}$	D_B	s	c	№№	$E \times 10^{-5}$	D_B	s	c
5.7.1.	1,99	1	5	1	5.7.11.	2,00	2,4	14	1,1
5.7.2.	1,99	1,4	6	0,7	5.7.12.	2,00	2,8	13	0,3
5.7.3.	1,99	1,6	6	0,9	5.7.13.	2,00	2,8	14	0,2
5.7.4.	1,99	1,6	7	1,1	5.7.14.	1,99	1,2	5	1
5.7.5.	2,00	1,8	6	0,6	5.7.15.	2,00	1,6	6	0,7
5.7.6.	1,99	1,8	7	0,8	5.7.16.	1,99	1,8	7	0,9
5.7.7.	1,99	1,6	8	1	5.7.17.	1,99	1,8	7	1,1
5.7.8.	1,99	2	8	0,6	5.7.18.	2,00	2	7	0,6
5.7.9.	1,99	2	10	1,2	5.7.19.	1,99	2	8	0,8
5.7.10.	1,99	2,4	11	0,8	5.7.20.	1,99	1,4	7	1

Задача 5.8.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости, дополнительно на обечайку действует осевая сжимающая сила. Определить допускаемое значение осевой

сжимающей силы из условия прочности. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.31. Пояснения: D_B – внутренний диаметр обечайки, м; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала, МПа; s – исполнительная толщина стенки обечайки, мм; c – конструктивная прибавка к толщине стенки, мм.

Таблица 8.31 - Исходные данные для решения задачи 5.8.

№№	D_B	$[\sigma]$	s	c	№№	D_B	$[\sigma]$	s	c
5.7.1.	1	140	5	1	5.7.11.	2,4	184	14	1,1
5.7.2.	1,4	160	6	0,7	5.7.12.	2,8	150	13	0,3
5.7.3.	1,6	170	6	0,9	5.7.13.	2,8	160	14	0,2
5.7.4.	1,6	170	7	1,1	5.7.14.	1,2	140	5	1
5.7.5.	1,8	171	6	0,6	5.7.15.	1,6	160	6	0,7
5.7.6.	1,8	140	7	0,8	5.7.16.	1,8	170	7	0,9
5.7.7.	1,6	128	8	1	5.7.17.	1,8	170	7	1,1
5.7.8.	2	158	8	0,6	5.7.18.	2	171	7	0,6
5.7.9.	2	140	10	1,2	5.7.19.	2	140	8	0,8
5.7.10.	2,4	170	11	0,8	5.7.20.	1,4	128	7	1

Задача 5.9.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости, дополнительно на обечайку действует осевая сжимающая сила. Определить допустимую осевую сжимающую силу из условия прочности и устойчивости. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.32. Пояснения: $[F]_\sigma$ – допустимая осевая сжимающая сила из условия прочности, МН; $[F]_E$ – допустимая осевая сжимающая сила из условия устойчивости, МН.

Таблица 8.32 - Исходные данные для решения задачи 5.9.

№№	$[F]_\sigma$	$[F]_E$	№№	$[F]_\sigma$	$[F]_E$
5.9.1.	1,77	2,60	5.9.11.	17,99	31,52
5.9.2.	3,74	4,44	5.9.12.	16,83	28,06
5.9.3.	4,37	3,77	5.9.13.	19,52	34,54
5.9.4.	5,06	5,43	5.9.14.	2,12	2,37
5.9.5.	5,24	4,13	5.9.15.	4,28	4,18
5.9.6.	4,93	5,80	5.9.16.	5,88	5,57
5.9.7.	4,52	8,33	5.9.17.	5,69	5,12
5.9.8.	7,37	8,56	5.9.18.	6,90	5,99
5.9.9.	7,77	13,20	5.9.19.	6,36	8,00
5.9.10.	13,13	17,43	5.9.20.	3,39	6,06

Задача 5.10.

Аппарат с перемешивающим устройством (рис. 5.1), работает под внешним давлением. Определить величину осевой сжимающей силы, действующей на обечайку аппарата. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.33. Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата, м; $p_{нр}$ – расчётное наружное давление, МПа; m – масса перемешивающего устройства, кг.

Таблица 8.33 - Исходные данные для решения задачи 5.10.

№№	D_B	$p_{нр}$	m	№№	D_B	$p_{нр}$	m
5.10.1.	1	0,09	730	5.10.11.	2,4	0,07	2150
5.10.2.	1,4	0,091	1000	5.10.12.	2,8	0,07	2300
5.10.3.	1,6	0,089	1270	5.10.13.	2,8	0,06	2150
5.10.4.	1,6	0,082	1770	5.10.14.	1,2	0,09	730
5.10.5.	1,8	0,079	2150	5.10.15.	1,6	0,091	1000
5.10.6.	1,8	0,088	2300	5.10.16.	1,8	0,089	1270
5.10.7.	1,6	0,09	730	5.10.17.	1,8	0,082	1770
5.10.8.	2	0,085	1000	5.10.18.	2	0,079	2150
5.10.9.	2	0,08	1270	5.10.19.	2	0,088	2300
5.10.10.	2,4	0,08	1770	5.10.20.	1,4	0,09	730

Задача 5.11.

Гладкая короткая цилиндрическая стальная обечайка работает под внешним давлением в пределах упругости, дополнительно на обечайку действует осевая сжимающая сила (см. рис. 5.1). Проверить выполнение условия устойчивости обечайки. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.34. Пояснения: $p_{нр}$ – расчётное наружное давление, МПа; $[p_n]$ – допустимое наружное давление, МПа; F – осевая сжимающая сила, МН; $[F]$ – допустимая осевая сжимающая сила, МН.

Таблица 8.34 - Исходные данные для решения задачи 5.11.

№№	$p_{нр}$	$[p_n]$	F	$[F]$	№№	$p_{нр}$	$[p_n]$	F	$[F]$
5.11.1.	0,09	0,136	0,078	1,46	5.11.11.	0,07	0,095	0,338	15,63
5.11.2.	0,091	0,166	0,150	2,86	5.11.12.	0,07	0,081	0,453	14,44
5.11.3.	0,089	0,114	0,191	2,86	5.11.13.	0,06	0,079	0,390	16,99
5.11.4.	0,082	0,115	0,182	3,70	5.11.14.	0,09	0,104	0,109	1,58
5.11.5.	0,079	0,102	0,222	3,24	5.11.15.	0,091	0,137	0,193	2,99
5.11.6.	0,088	0,103	0,246	3,75	5.11.16.	0,089	0,148	0,239	4,04
5.11.7.	0,09	0,136	0,188	3,98	5.11.17.	0,082	0,097	0,226	3,81
5.11.8.	0,085	0,099	0,277	5,59	5.11.18.	0,079	0,133	0,269	4,52

№№	p_{np}	$[p_H]$	F	[F]	№№	p_{np}	$[p_H]$	F	[F]
5.11.9.	0,08	0,091	0,264	6,70	5.11.19.	0,088	0,128	0,299	4,98
5.11.10.	0,08	0,094	0,379	10,49	5.11.20.	0,09	0,114	0,146	2,96

Задача 6.1.

Определить расчётную толщину стенки цилиндрической обечайки АВД (рис. 6.1). Материал обечайки сталь 20К. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.35. Пояснения: $\phi = 0,95$ – коэффициент прочности сварного шва; D_B – внутренний диаметр аппарата, м; p – давление в аппарате, МПа; $t_{раб}$ – рабочая температура в аппарате, град С.

Таблица 8.35 - Исходные данные для решения задачи 6.1.

№№	D_B	p	$t_{раб}$	№№	D_B	p	$t_{раб}$
6.1.1.	1,1	45	200	6.1.11.	1,1	30	400
6.1.2.	1,2	40	250	6.1.12.	1,2	15	450
6.1.3.	1,3	35	300	6.1.13.	1,3	20	200
6.1.4.	1,4	30	350	6.1.14.	1,4	15	250
6.1.5.	1,5	25	400	6.1.15.	1,5	25	300
6.1.6.	1,1	20	450	6.1.16.	1,1	40	350
6.1.7.	1,2	15	200	6.1.17.	1,2	15	400
6.1.8.	1,3	15	250	6.1.18.	1,3	10	450
6.1.9.	1,4	20	300	6.1.19.	1,4	25	200
6.1.10.	1,5	15	350	6.1.20.	1,5	20	250

Задача 6.2.

Определить расчётную толщину плоского днища АВД (рис.6.1). Днище не имеет технологических отверстий. Материал днища сталь 20К. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 7.36. Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата, м; p – давление в аппарате, МПа; $t_{раб}$ – рабочая температура в аппарате, град С.

Таблица 7.36 - Исходные данные для решения задачи 6.2.

№№	D_B	p	$t_{раб}$	№№	D_B	p	$t_{раб}$
6.2.1.	1,1	45	200	6.2.11.	1,1	30	400
6.2.2.	1,2	40	250	6.2.12.	1,2	15	450
6.2.3.	1,3	35	300	6.2.13.	1,3	20	200
6.2.4.	1,4	30	350	6.2.14.	1,4	15	250
6.2.5.	1,5	25	400	6.2.15.	1,5	25	300
6.2.6.	1,1	20	450	6.2.16.	1,1	40	350
6.2.7.	1,2	15	200	6.2.17.	1,2	15	400

№№	D _В	p	t _{раб}	№№	D _В	p	t _{раб}
6.2.8.	1,3	15	250	6.2.18.	1,3	10	450
6.2.9.	1,4	20	300	6.2.19.	1,4	25	200
6.2.10.	1,5	15	350	6.2.20.	1,5	20	250

Задача 6.3.

АВД (рис.6.1) имеет крышку с двухконусным обтюратором (угол конуса стального обтюратора $\alpha = 30^\circ$, угол трения стали по меди $\rho = 15^\circ$). Материал крышки сталь 20К. Определить расчётное усилие Q шпилек крышки АВД. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.37. Дополните конструктивные размеры обтюратора см. в таблице 6.1. Пояснения: D_В – внутренний диаметр аппарата, м; p – давление в аппарате, МПа.

Таблица 8.37 - Исходные данные для решения задачи 6.3.

№№	D _В	p	№№	D _В	p	№№	D _В	p
6.3.1.	0,8	45	6.3.8.	0,8	15	6.3.15.	0,8	25
6.3.2.	1	40	6.3.9.	1	20	6.3.16.	1	40
6.3.3.	1,2	35	6.3.10.	1,2	15	6.3.17.	1,2	15
6.3.4.	1,4	30	6.3.11.	1,4	30	6.3.18.	1,4	10
6.3.5.	1,6	20	6.3.12.	1,6	15	6.3.19.	1,6	25
6.3.6.	1,8	20	6.3.13.	1,8	20	6.3.20.	1,8	20
6.3.7.	2	15	6.3.14.	2	15	6.3.21.	2	10

Задача 6.4.

Крышка АВД (рис 6.1) имеет затвор с двухконусным обтюратором. Определить диаметр гладкой части шпилек d_ш для крепления крышки АВД. Шпильки типа В по ГОСТ 9066–75 имеют центральное отверстие d_о (см. табл. П17). Число шпилек z принять конструктивно (см. табл. 6.1). Материал шпилек сталь 35Х, $[\sigma] = 282$ МПа. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.38. Пояснения: D_В – внутренний диаметр аппарата, м; Q – расчётное усилие шпилек, МН.

Таблица 8.38 - Исходные данные для решения задачи 6.4.

№№	D _В	Q	№	D _В	Q	№№	D _В	Q
6.4.1.	0,8	24,84	6.4.8.	0,8	8,28	6.4.15.	0,8	13,80
6.4.2.	1	34,24	6.4.9.	1	17,12	6.4.16.	1	34,24
6.4.3.	1,2	42,81	6.4.10.	1,2	18,35	6.4.17.	1,2	18,35
6.4.4.	1,4	49,64	6.4.11.	1,4	49,64	6.4.18.	1,4	16,55
6.4.5.	1,6	42,94	6.4.12.	1,6	32,20	6.4.19.	1,6	53,67
6.4.6.	1,8	54,18	6.4.13.	1,8	54,18	6.4.20.	1,8	54,18

Таблица 8.38 - Исходные данные для решения задачи 6.4.

6.4.7.	2	50,19	6.4.14.	2	50,19	6.4.21.	2	33,46
--------	---	-------	---------	---	-------	---------	---	-------

Задача 6.5.

Крышка АВД (рис.6.1) изготовлена из стали 09Г2С. В крышке отсутствуют технологические отверстия. Определить расчётную толщину крышки АВД. Исходные данные для решения задачи представлены в таблице 8.39. Дополнительные конструктивные размеры (D_6 , D_{cp}) крышки и обтюратора см. в таблице 6.1. Диаметр отверстий под шпильки $d_{отв} = d_{рез} + 3$, мм. Пояснения: D_B – внутренний диаметр аппарата, м; D_H – наружный диаметр крышки ($D_H = D_6 + 2 \cdot d_{рез}$); D_6 – диаметр установки шпилек, м; D_{cp} – средний диаметр уплотнительной поверхности, м; p – давление в аппарате, МПа; Q – усилие шпилек, МН; $d_{рез}$ – номинальный диаметр резьбы шпилек, мм; $t_{раб}$ – рабочая температура в аппарате.

Таблица 8.39 - Исходные данные для решения задачи 6.5.

№№	D_B	Q	p	$d_{рез}$	$t_{раб}$	№№	D_B	Q	p	$d_{рез}$	$t_{раб}$
6.5.1.	0,8	24,84	45	76	200	6.5.11.	1,4	49,64	30	110	200
6.5.2.	1	34,24	40	90	250	6.5.12.	1,6	32,20	15	80	250
6.5.3.	1,2	42,81	35	100	300	6.5.13.	1,8	54,18	20	100	300
6.5.4.	1,4	49,64	30	110	350	6.5.14.	2	50,19	15	100	350
6.5.5.	1,6	42,94	20	90	400	6.5.15.	0,8	13,80	25	60	400
6.5.6.	1,8	54,18	20	100	200	6.5.16.	1	34,24	40	90	200
6.5.7.	2	50,19	15	100	250	6.5.17.	1,2	18,35	15	68	250
6.5.8.	0,8	8,28	15	52	300	6.5.18.	1,4	16,55	10	64	300
6.5.9.	1	17,12	20	64	350	6.5.19.	1,6	53,67	25	100	350
6.5.10.	1,2	18,35	15	68	400	6.5.20.	1,8	54,18	20	100	400

ПриложенияТаблица П1 - Рабочее давление для теплообменных аппаратов в зависимости от условного давления p_y и температуры t

p_y , МПа	Группа назначения теплообменников*	Предельное рабочее давление (МПа) при t (°C)				
		до 100	200	250	300	350

0,6	А	0,6	0,5	0,5	0,45	0,42
	Б	0,5	0,45	0,45	0,42	0,40
1,0	А	1,0	0,85	0,85	0,75	0,70
	Б	0,9	0,75	0,75	0,70	0,65
1,6	А	1,6	1,40	1,35	1,20	1,10
	Б	1,4	1,25	1,20	1,15	1,06
2,5	А	2,5	2,20	2,15	1,95	1,75
	Б	2,2	1,95	1,90	1,80	1,65
4,0	А	4,0	3,5	3,40	3,10	2,9
	Б	3,5	3,3	3,25	3,05	2,75
6,4	А	6,4	5,6	5,45	5,05	4,6
	Б	5,5	5,2	5,10	4,80	4,3
* Группа А – теплообмен между взрыво- и пожаробезопасными средами и средами, не обладающими токсичностью; группа Б – теплообмен между взрыво- и пожароопасными и токсичными средами						

Таблица П 2 - Расчётное давление для аппаратных фланцев в зависимости от условного давления p_y и температуры t

p _y , МПа	Марка стали	Расчётное давление фланца (МПа) при t (°C)								
		до 100	200	250	300	350	400	450	500	540
0,6	20; 20К	0,6	0,57	0,51	0,46	0,45	0,38	0,26	—	—
	09Г2С; 16ГС		0,55	0,54	0,50	0,46	0,39		—	—
	12Х18Н10Т			0,53	0,52	0,50	0,49	—	—	—
	10Х17Н13М2Т									
	06ХН28МДТ		0,54	0,51	0,48	0,47	0,45	0,43	0,37	0,30
	15Х5М		0,57	0,54	0,51	0,48	0,45	0,40	0,34	0,23
1,0	20; 20К	1,0	0,95	0,85	0,77	0,73	0,63	0,43	—	—
	09Г2С; 16ГС		0,93	0,91	0,84	0,77	0,66		—	—
	12Х18Н10Т		0,92	0,88	0,86	0,84	0,82	0,72	0,62	0,50
	10Х17Н13М2Т									
	06ХН28МДТ		0,90	0,85	0,80	0,78	0,75	—	—	—
	15Х5М		0,95	0,90	0,85	0,81	0,74	0,67	0,57	0,38
1,6	20; 20К	1,6	1,52	1,40	1,33	1,17	1,01	0,69	—	—
	09Г2С; 16ГС		1,48	1,45	1,34	1,23	1,05	—	—	—
	12Х18Н10Т		1,47	1,44	1,36	1,32	1,29	1,15	0,99	0,80
	10Х17Н13М2Т									
	06ХН28МДТ		1,44	1,36	1,28	1,24	1,19	—	—	—
	15Х5М		1,52	1,44	1,36	1,29	1,19	1,07	0,91	0,53
2,5	20; 20К	2,5	2,38	2,32	2,09	1,87	1,60	—	—	—
	09Г2С; 16ГС		2,31	2,26		1,90	1,64	1,08	—	—

p _y , МПа	Марка стали	Расчётное давление фланца (МПа) при t (°C)								
		до 100	200	250	300	350	400	450	500	540
	12X18H10T		2,32	2,25	2,15	2,10	2,05	1,80	1,55	1,25
	10X17H13M2T									
	06XH28MDT		2,25	2,12	1,99	1,94	1,87	—	—	—
	15X5M		2,38	2,25	2,13	2,00	1,80	1,57	1,22	—
4,0	20; 20K	4,0	3,83	3,72	3,35	2,99	2,59	1,73	—	—
	09Г2С; 16ГС		3,70	3,60		3,07	2,62			
	12X18H10T		3,70	3,52	3,40	3,25	3,00	2,68	2,28	1,32
	10X17H13M2T									
	06XH28MDT		3,59	—	3,20	3,10	2,98	—	—	—
	15X5M		3,80	3,60	3,40	3,20	3,00	2,68	2,28	1,32
6,3	20; 20K	6,3	6,00	5,76	5,38	4,69	4,06	2,78	—	—
	09Г2С; 16ГС		5,83	5,80	5,33	4,13				
	12X18H10T		5,94	5,76	5,55	5,37	5,25	4,61	3,97	3,20
	10X17H13M2T									
	15X5M		6,08	5,76	5,45	5,12	4,80	4,28	3,65	2,10
Приведённые в таблице значения технологических параметров соответствуют ГОСТ 28759.1–90										

Таблица П 3 - Перечень материалов, стойких в некоторых технологических средах

Параметры среды		Рекомендуемые материалы*
Конц., %	t, °C	
Азотная кислота HNO ₃		
Любая	20–t _{кип}	Титан: BT1–0, BT1–00
	до 50	Стали: 08X17T, 12X17, 14X17H2
	до 20	Стали: 08X13, 12X13, 12X18H10T, 08X18H12Б Ферросилиды: ЧС15, ЧС17
Аммиак NH ₃		
Любая ¹	до 100	Стали: 08X13, 12X13, 12X17, 08X17T, 14X17H2, 15X25T, 12X18H10T, 08X17H13M2T
	до 60	Фторопласт-3
	20–t _{кип}	Стали: Ст3сп, 10, 20. Диабаз плавленный, фарфор кислотоупорный
Мочевина (карбамид) CO(NH ₂) ₂		
Любая ²	20–t _{кип}	Керамика кислотоупорная, эмаль кислотоупорная
	20	Стали: 12X13, 20X13, 12X17, 12X18H10T
Расплав ³	–	Ферросилид ЧС15
Серная кислота H ₂ SO ₄		
Любая	20–t _{кип}	Фарфор кислотоупорный, стекло кварцевое

Параметры среды		Рекомендуемые материалы*
Конц., %	t, °C	
	до 150	Эмаль кислотоупорная
	20	Ферросилиды: ЧС15, ЧС17
0,01–0,05	20	Латунь Л62
0,1–96	30–50	Стали: 08Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т
0,5–80	20–t _{кип}	Свинец: С1, С2, С3
Сернистая кислота H ₂ SO ₃		
2	20	Стали: 12Х21Н5Т, 12Х18Н10Т
20	20	Стали: 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 08Х17Н13М2Т
Нас.р-ры ⁴	100	Стали: 08Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т
Сернистый ангидрид SO ₂		
Любая ⁵	до 750	Ферросилиды: ЧС15, ЧС17
	20	Алюминий А0; медь М3; свинец С4
	20–70	Титан: ВТ1–0, ВТ1–00, ВТ1–1
Любая ⁶	до 300	Стали: 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 10Х17Н13М2Т
Сероводород H ₂ S		
Любая ⁵	до 900	Ферросилиды: ЧС15, ЧС17
	до 250	Алюминий: А95, А85, А8
	до 200	Стали: 08Х17Т, 08Х21Н5Т, 08Х21Н6М2Т, 08Х18Н12Б, 10Х17Н13М2Т
	20	Свинец С4
Соляная кислота HCl		
Любая ⁷	20–t _{кип}	Антихлор ЧС15М4; антегмиты: АТМ–1, АТМ–1Г, АТМ–10
0,2	до 50	Сплав (Fe–Ni): 06Х23Н28М3Д3Т
до 0,5	до 100	Титан: ВТ1–0, ВТ1–00
1–20	до t _{кип}	Сплав Ni – хастеллой В
4	20	Медь: М1, М2
Хлор Cl ₂		
100 (сухой газ)	Любая	Графит и уголь формованные
	до 500	Ферросилиды: ЧС15, ЧС17
	до 300	Алюминий: А95, А85, А8
	20	Стали: 12Х13, 20Х13, 30Х13, 12Х17, 14Х17Н2, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12
		Свинец С4
Фосфорная кислота H ₃ PO ₄		
Любая	20–t _{кип}	Базальт плавленный, графит и уголь формованные, фторопласт–4

Параметры среды		Рекомендуемые материалы*
Конц., %	t, °C	
	до 50	Стали: 15Х25Т, 15Х28, 15Х28АН, 75Х28Л
	20	Ферросилиды: ЧС15, ЧС17
Плавиковая кислота HF		
5	20–65	Монель НМЖМц 28–2,5–1,5
10–100	20	Латунь Л62
		Сталь 08Х17Н13М2Т
		Сплав (Fe–Ni): 06Х23Н28МЗДЗТ
Примечания: * данные [2]. Обозначение сред: 1 – аммиак газообразный, жидкий, водные растворы; 2 – водные растворы карбамида; 3 – расплав, содержащий аммиак; 4 – насыщенные растворы; 5 – сухой газ; 6 – влажный газ; 7 – водные растворы;		

Таблица П 4 - ОСТ 26-291-94 Применение листовой стали

ГОСТ марка	ГОСТ на техн. требования	Рабочие условия	
		Температура стенки, °C	Давление среды МПа, не более
380–2005 Ст3кп2, Ст3пс2, Ст3сп2	14637–89	от –20 до +200	5
Ст3сп5	14637–89	от –20 до +425	5
1050–88 08кп	9045–93	от –40 до +425	не ограничено
5520–79 16К, 18К, 20К, 22К	5520–79	от –20 до +200	не ограничено
5520–79 09Г2С, 10Г2С1	5520–79	от –70 до +200	не ограничено
5520–79 17ГС, 17Г1С, 16ГС	5520–79	от –40 до +200	не ограничено
5520–79 12ХМ кат. 3	5520–79	от –40 до +560	не ограничено
19281–89 10ХСНД, 15ХС- НД	19281–89	от –20 до +200	16
5632–72 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т	7350–77	от –253 до +610	не ограничено
5632–72	7350–77	от +20 до +700	не ограничено

ГОСТ марка	ГОСТ на техн. требования	Рабочие условия	
		Температура стенки, °С	Давление среды МПа, не более
08X17T			
5632–72 15X25T	7350–77	от +20 до +1000	не ограничено
Пример обозначения полуфабриката из листового проката по ГОСТ 5520–79 : Листовой прокат нормальной точности прокатки (Б), нормальной плоскостности (ПН), необрезными кромками (НО), размером 12×1500×6000 мм из стали 20К, категория 4, очищенной от окалины (ОП), нормализованной (Н) <i>ЛИСТ Б – ПН – НО – 12 × 1500 × 6000 ГОСТ 19903 – 74</i> <i>20К – 4 – ОП – Н ГОСТ 5520 – 79</i>			

Таблица П 5 - ОСТ 26-291-94 Применение стальных труб

ГОСТ марка стали	ГОСТ на техн. тре- бования	Рабочие условия	
		Температура стен- ки, °С	Давление среды МПа, не более
380–2005 14637–89 Ст3сп3, Ст3пс3	3262–75 трубы водогазопро- водные (усиленные)	от 0 до +200	1,6
Ст3сп4, Ст3пс4	10706–76 трубы электросвар- ные	от –20 до +200	5
1050–88 10, 20	ТУ14-3-624 трубы электросвар- ные	от –30 до +400	4
10, 20	550–75 8731–87	от –30 до +475	16
19281–89 09Г2С	ТУ14–3–1128	от –60 до +475	не ограничено
ТУ14–3–460 15ХМ	ТУ14–3–460	от –40 до +560	не ограничено
5632–72 12Х18Н10Т	9940–81	от –253 до +350	не ограничено
5632–72 06ХН28МДТ	ТУ14–3–318 ТУ14–3–763 ТУ14–3–822	от –196 до +400	не ограничено
5632–72 15Х25Т	9940–81 9941–81	от 0 до +900	не ограничено
5632–72 08Х13	9940–81 9941–81	от –40 до +600	не ограничено

ГОСТ марка стали	ГОСТ на техн. тре- бования	Рабочие условия	
		Температура стен- ки, °С	Давление среды МПа, не более
Пример обозначения полуфабрикатов из труб:			
1. Труба наружным диаметром 76 мм, толщиной стенки 5 мм, обычной точности изготовления, немерной длины из стали марки 08Х18Н10Т			
<i>Труба 76 × 5 – 08Х18Н10Т ГОСТ 9940 – 81</i>			
2. Труба с наружным диаметром 70 мм, толщиной стенки 3,5 мм, длиной, кратной 1250 мм, обычной точности изготовления, из стали марки 10, изготовляется по группе Б ГОСТ 8731–74			
<i>Труба $\frac{70 \times 3,5 \times 1250 \text{кр.ГОСТ 8732} - 78}{Б10 \text{ГОСТ 8731} - 74}$</i>			

Таблица П 6 - ГОСТ 10885–85. Состав слоёв двухслойной стали

Плакирующий слой	Основной слой					
	Ст3сп	20К	16ГС	09Г2С	10ХСНД	12МХ
08Х13	+	+	+	+	—	+
12Х18Н10Т	+	+	+	+	+	+
10Х17Н13М2Т	+	+	+	+	—	—
06ХН28МДТ	+	+	+	+	—	—
ХН65МВ	—	—	+	—	—	—
Н70МФВ–ВИ	—	—	+	—	—	—
Монель НМЖМц 28-2,5-1,5	+	+	—	—	—	—
Примечание. Двухслойные листы с сочетанием слоёв, не отмеченные знаком «+», изготовляют по согласованию с потребителем. Пример обозначения полуфабриката из двухслойной листовой стали: Лист толщиной 20 мм, шириной 1400 мм и длиной 4000 мм с основным слоем из стали марки 16ГС категории 3 по ГОСТ 5520–79 и коррозионно-стойким слоем из стали марки 08Х13 по ГОСТ 5632–72, класса сплошности сцепления слоёв 2, с нормальной толщиной коррозионно-стойкого слоя <i>Лист $\frac{20 \times 1400 \times 4000 \text{ГОСТ 10885} - 85}{(16\text{Г}С3 + 08\text{Х}13) - \text{кл.}2}$</i>						

Таблица П 7 - ГОСТ Р 52857.1–2007. Допускаемые напряжения сплавов

Стали

Марка	Значение $[\sigma]$ в МПа при t (°C)												
	20	200	250	300	350	400	450	470	500	540	600	700	
Ст3сп	140	126	120	108	98	85	—	—	—	—	—	—	
10	130	118	112	100	88	74	51	42	—	—	—	—	
20, 20К	147	136	132	119	106	92	61	49	—	—	—	—	
16ГС, 09Г2С	170	148	145	134	123	105	71	56	—	—	—	—	
12ХМ, 12МХ	147	145	145	141	137	132	124	117	96	47	—	—	
15Х5М	146	134	127	120	114	105	94	89	79	54	25	—	
12Х18Н10Т	160	140	136	130	126	121	117	115	113	111	74	30	
10Х17Н13М2Т	184	160	154	148	144	137	132	130	127	111	74	30	
03Х21Н21М4ГБ	180	171	167	149	143	140	—	—	—	—	—	—	
06ХН28МДТ	147	124	117	110	107	103	—	—	—	—	—	—	
Пояснения: Ст3сп, 10, 20, 20К – стали углеродистые; 16ГС, 09Г2С – стали низколегированные; 12ХМ, 12МХ, 15Х5М – стали теплоустойчивые; 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т – стали жаростойкие, жаропрочные и коррозионностойкие; 03Х21Н21М4ГБ – сталь, стойкая против межкристаллитной коррозии; 06ХН28МДТ – железоникелевый сплав, стойкий против межкристаллитной коррозии													

Таблица П 7. Продолжение

Цветные сплавы						
Марка	Значение $[\sigma]$ в МПа при t (°C)					
	20	50	100	200	250	300
АД00	17	16	14	—	—	—
АМг5М	74	73	64	—	—	—
М3	54	49	44	39	32	—
Л63	70	68	65	50	30	—
ЛЖМц 59-1-1	136	132	124	106	30	—
ВТ 1-0	141	134	129	107	95	86
АТ3	230	212	202	171	164	145
Пояснения: АД00 – алюминий технический; АМг5М – алюминиевый сплав; М3 – техническая медь; Л63, ЛЖМц 59-1-1 – латуни; ВТ 1-0 – технический титан; АТ3 – титановый сплав.						

Таблица П 8 - ГОСТ Р 52857.1–2007. Предел текучести (МПа) сталей и сплавов при комнатной температуре

Марка	Значение	Марка	Значение
Ст3сп	250	06ХН28МДТ	220
10	195	ВТ1-0	304
20, 20К	220	АТ-3	530
16ГС, 09Г2С	300	М3р	81
12ХМ, 12МХ	220	Л63	105

Марка	Значение	Марка	Значение
15Х5М	220	А85М	24
12Х18Н10Т	270	АМц	50
10Х17Н13М2Т	276	АМг5М	115
03Х21Н21М4ГБ	270		
Пояснения: см. Пояснения к таблице П 7.			

Таблица П 9 - Модуль продольной упругости Е сплавов

Материал	Значения $E \cdot 10^{-5}$ (МПа) при температуре (°С)							
	20	100	150	200	300	450	550	650
Углеродистые и низколегированные стали	1,99	1,91	1,86	1,81	1,71	1,4	—	—
Теплоустойчивые и коррозионно-стойкие хромистые стали	2,15	2,15	2,05	1,98	1,90	1,71	1,54	—
Жаропрочные и жаростойкие аустенитные стали	2,00	2,00	1,99	1,97	1,90	1,74	1,60	1,43
Алюминий и его сплавы	0,72	0,69	0,67	—	—	—	—	—
Сплавы на основе меди	1,05	1,02	1,00	0,98	—	—	—	—
Сплавы титана	1,1	1,06	1,02	0,96	0,83	—	—	—

Таблица П 10 - Коэффициенты прочности (φ) сварных швов для стальных сосудов и аппаратов

Вид сварного шва; способ сварки	φ при объёме контроля	
	100%	10-50%
Стыковой или тавровый с двусторонним сплошным проваром; АДС, ПДС	1,0	0,9
Стыковой с подваркой корня шва или тавровый с двусторонним сплошным проваром; РДС	1,0	0,9
Стыковой, доступный сварке только с одной стороны и имеющий в процессе сварки металлическую подкладку со стороны корня шва, прилегающую по всей длине шва к основному металлу	0,9	0,8
Втавр с конструктивным зазором свариваемых деталей	0,8	0,65
Стыковой односторонний с флюсовой или керамической подкладкой; АДС, ПДС	0,9	0,8
Стыковой; РДС	0,9	0,65
Пояснение: объём контроля швов определяется техническими требованиями на изготовление		

Обозначение способов дуговой сварки: РДС – ручная; АДС – автоматическая; ПДС – полуавтоматическая

Таблица П 11 - Коэффициенты прочности (ϕ) сварных швов для сосудов и аппаратов из алюминия и его сплавов

Вид сварного шва и способ сварки	ϕ
Стыковой двусторонний, односторонний с технологической подкладкой, выполняемые сваркой в защитном газе или плазменной сваркой; угловой с двусторонним сплошным проваром таврового соединения, выполняемый сваркой в защитном газе	0,9
Стыковой односторонний, тавровый с односторонним сплошным приваром, выполняемые сваркой в защитном газе	0,85
Стыковой с двусторонним сплошным проваром, выполняемый ручной дуговой сваркой	0,8
Стыковой односторонний, тавровый, выполняемые всеми способами сварки	0,75

Таблица П 12 - Коэффициенты прочности (ϕ) сварных и паяных швов для сосудов и аппаратов из меди и её сплавов

Вид сварного шва или паяного соединения и способ сварки	ϕ
Стыковой с двусторонним сплошным проваром, стыковой односторонний с технологической подкладкой, выполняемые автоматической дуговой сваркой неплавящимся электродом в защитном газе	0,92
Стыковой с двусторонним сплошным проваром, стыковой с подваркой корня шва, стыковой односторонний с технологической подкладкой, выполняемые ручной или полуавтоматической сваркой открытой дугой неплавящимся электродом или автоматической сваркой под флюсом	0,90
Стыковой с двусторонним сплошным проваром, выполняемый ручной дуговой сваркой	0,85
Стыковой односторонний с технологической подкладкой, выполняемый ручной дуговой сваркой	0,80
Паяное внахлестку	0,75

Таблица П 13 - Коэффициенты прочности (ϕ) сварных швов для сосудов и аппаратов из титана и его сплавов

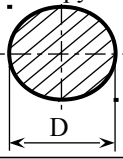
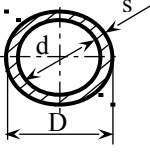
Вид сварного шва и способ сварки	ϕ при объёме контроля	
	100%	10-50%
Стыковой с двусторонним проваром автоматической сваркой под флюсом, автоматическая или ручная сварка в среде	0,95	0,85

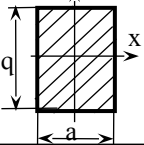
Вид сварного шва и способ сварки	φ при объёме контроля	
	100%	10-50%
аргона или гелия с двусторонним сплошным проплавлением		
Соединение втавр при обеспечении сплошного двустороннего провара автоматической или ручной сваркой в среде аргона или гелия	0,9	0,8
Соединение втавр, сплошной провар не обеспечивается	0,8	0,65
Стыковое соединение, доступное к сварке с одной стороны в защитной среде аргона или гелия и обеспечении защиты с обратной стороны	0,7	0,6
Пояснение: объём контроля швов определяется техническими требованиями на изготовление		

Таблица П 14 - ГОСТ 6533–68. Масса стального эллиптического отбортованного днища

D _в , м	Масса днища (кг) при толщине стенки (мм)						
	4	6	8	10	12	14	16
0,6	13,9	21,0	28,2	35,5	43,2	50,7	58,3
0,7	18,6	28,1	37,7	47,4	57,1	67,5	81,8
0,8	24,0	36,2	48,5	60,9	73,5	90,3	105
0,9	30,0	45,3	60,7	76,2	95,9	112	129
1,0	36,7	55,5	74,3	93,2	117	137	157
1,2	—	78,9	105	137	165	193	221
Пояснения: D _в – внутренний диаметр аппарата (базовый размер)							

Таблица П 15 - Формулы геометрических характеристик некоторых видов сечений при растяжении, изгибе и кручении

Вид	F	J _x , J _y	J _p	W _x , W _y	W _p
Круг 	$0,25 \cdot \pi \cdot D^2$ $=$ $0,785 \cdot D^2$	$\frac{\pi \cdot D^4}{64}$	$\frac{\pi \cdot D^4}{32}$	$\frac{\pi \cdot D^3}{32}$	$\frac{\pi \cdot D^3}{16}$
Кольцо 	$0,785 \cdot D^2$ $\times (1 - c^2)$	$\frac{\pi \cdot D^4}{64}$ $\times (1 - c^4)$	$\frac{\pi \cdot D^4}{32}$ $\times (1 - c^4)$	$\frac{\pi \cdot D^3}{32}$ $\times (1 - c^4)$	$\frac{\pi \cdot D^3}{16}$ $\times (1 - c^4)$

Вид	F	J _x , J _y	J _p	W _x , W _y	W _p
Тонкое кольцо $c=d/D$	$\pi \cdot d_{cp} \cdot s$	$\frac{\pi \cdot d_{cp}^3 \cdot s}{8}$	$\frac{\pi \cdot d_{cp}^3 \cdot s}{4}$	$\frac{\pi \cdot d_{cp}^2 \cdot s}{4}$	$\frac{\pi \cdot d_{cp}^2 \cdot s}{2}$
Прямоугольник 	a·b	$J_y = \frac{b \cdot a^3}{12}$ $J_x = \frac{a \cdot b^3}{12}$	—	$W_y = \frac{b \cdot a^2}{6}$ $W_x = \frac{a \cdot b^2}{6}$	—

Пояснения: X, Y – центральные оси сечения; F– площадь поперечного сечения, см²; J_x, J_y– осевые моменты инерции сечения, см⁴; J_p– полярный момент инерции сечения, см⁴; W_x W_y – осевые моменты сопротивления сечения, см³; W_p– полярный момент сопротивления сечения, см³.

Таблица П 16 - Геометрические характеристики стальных горячекатаных профилей

№	h	F	m	W _x	W _y	№	h	F	m	W _x	W _y
Двутавры ГОСТ 8239–89						Швеллеры ГОСТ 8240–97					
10	10	12,0	9,46	39,7	6,49	10У	10	10,9	8,59	34,8	6,46
12	12	14,7	11,50	58,4	8,72	12У	12	13,3	10,4	50,6	8,52
14	14	17,4	13,70	81,7	11,50	14У	14	15,6	12,3	70,2	11,0
16	16	20,2	15,90	109,0	14,50	16У	16	18,1	14,2	93,4	13,8
18	18	23,4	18,40	143,0	18,40	18У	18	20,7	16,3	121,0	17,0

Пояснения: № – номер профиля; h – высота профиля, см; F – площадь поперечного сечения профиля, см²; m – погонная масса профиля, кг/м; W_x, W_y – осевой момент сопротивления изгибу, см³.

Таблица П 17 - ГОСТ 9066–75. Размеры (мм) шпилек фланцев (тип В)

d _p	52	60	64	68	76	80	90	100	110
d _ш	44	52	58	62	70	74	84	94	104
d _о	10				20				

Пояснения: d_p – номинальный диаметр резьбы; d_ш – диаметр гладкой части; d_о – диаметр осяевого отверстия.

Библиографический список**Основной**

1. Поникаров И.И., Поникаров С.И. Конструирование и расчёт элементов оборудования: учебник. – М.: Альфа–М, 2010. – 382 с.
2. Лашинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры: Справочник. 3-е изд., стереотипное. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 752 с.
3. Арзамасов Б.Н., Соловьёва Т.В., Герасимов С.А. и др. Справочник по конструкционным материалам: Справочник/ Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьёвой. – М.: Изд-во МГТУ, 2005. – 640 с.

Дополнительный

4. Тимонин А.С., Балдин Б.Г., Борщев В.Я. и др. Машины и аппараты химических производств. / Под общ. редакцией А.С.Тимонина. – Калуга: Издательство Н.Ф.Бочкаревой, 2008. – 872 с.
5. Расчёт и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи /М.Ф. Михалёв, Н.П.Третьяков, А.И. Мильченко, В.В. Зобнин; Под общ. ред. М.Ф. Михалёва. – 2-е изд. М.: ООО «Торгово-Издательский Дом «Арис», 2010. – 312 с.
6. Вихман Г.Л., Круглов С.А. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов. М.: Машиностроение, 1978. – 328 с.
7. Криворот А.С. Конструкция и основы проектирования машин и аппаратов химической промышленности. М.: Машиностроение, 1976. – 376 с.
8. Лукьяница А.И., Сафонов Б.П. Основные правила проектирования сосудов и аппаратов химической промышленности НИ РХТУ, Новомосковск, 2012. – 119 с.

Нормативные документы

9. ГОСТ 2601–84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий.
10. ГОСТ 5264–80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
11. ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 11 июня 2003 г. N 91).
12. ПБ 03-584-03. Правила проектирования, изготовления и приёмки сосудов и аппаратов стальных сварных (утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 13 июня 2003 г. N 81).
14. РД 26-18-89. Сосуды. Термины и определения.
15. РД 38.13.004–86. Эксплуатация и ремонт трубопроводов под давлением до 10,0 МПа.
16. ГОСТ 12.1.007–76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования.
17. ГОСТ 12.1.044–89. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.

Оглавление

Предисловие.....	3
Условные обозначения, используемые в тексте.....	4
Введение.....	7
1. Исходные данные для расчёта на прочность элементов оборудования.....	8
1.1. Температура.....	8
1.2. Давление.....	9
1.3. Конструкционные материалы и металлические полуфабрикаты.....	13
1.4. Допускаемое напряжение, допускаемая нагрузка.....	23
1.5. Примеры расчёта.....	24
2. Элементы теории напряжённого состояния, расчёт несущей способности элементов оборудования.....	28
2.1. Основные определения и расчётные формулы.....	28
2.2. Примеры расчёта.....	31
3. Расчёт на прочность тонкостенных корпусов аппаратов.....	36
3.1. Расчётные формулы.....	36
3.2. Примеры расчёта.....	42
4. Расчёт укрепления отверстий тонкостенных аппаратов.....	47
4.1. Расчётные формулы.....	47
4.2. Примеры расчёта.....	48
5. Расчёт устойчивости формы тонкостенных аппаратов.....	50
5.1. Расчётные формулы.....	50
5.2. Примеры расчёта.....	54
6. Расчёт на прочность корпусов аппаратов высокого давления (АВД).....	59
6.1. Расчётные формулы.....	59
6.2. Примеры расчёта.....	61
7. Правила конструирования, изготовления, монтажа и эксплуатации химического оборудования.....	64
7.1. Подведомственность аппаратуры Ростехнадзору.....	65
7.2. Некоторые правила по устройству и изготовлению сварных аппаратов.....	68
7.3. Конструирование аппаратов из высоколегированных сталей.....	77
7.4. Конструирование аппаратов из цветных металлов.....	77
7.5. Конструирование эмалированных аппаратов.....	78
7.6. Конструирование аппаратов из неметаллических материалов.....	80
7.7. Конструктивные решения снижения массы силовых элементов оборудования и конструкций.....	82
7.8. Терминологический словарь к разделу 7.....	84
7. Контрольные задачи.....	90
Приложения.....	110
П1. Значения рабочего давления для теплообменных аппаратов в зави-	

симости от условного давления p_y и температуры	110
П2. Расчётное давление для аппаратных фланцев в зависимости от условного давления p_y и температуры t	110
П3. Перечень материалов, стойких в некоторых агрессивных средах.....	111
П4. ОСТ 26–291–94. Применение листовой стали.....	113
П5. ОСТ 26–291–94. Применение стальных труб.....	114
П6. ГОСТ 10885–85. Состав слоёв двухслойной стали.. ..	115
П7. ГОСТ Р 52857.1–2007. Допускаемые напряжения сплавов.....	116
П8. ГОСТ Р 52857.1–2007. Предел текучести (МПа) сталей и сплавов при комнатной температуре.....	116
П9. Модуль продольной упругости E сплавов.....	117
П10. Коэффициенты прочности (ϕ) сварных швов для стальных сосудов и аппаратов.....	117
П11. Коэффициенты прочности (ϕ) сварных швов для сосудов и аппара- тов из алюминия и его сплавов.....	118
П12. Коэффициенты прочности (ϕ) сварных и паяных швов для сосудов и аппаратов из меди и её сплавов.....	118
П13. Коэффициенты прочности (ϕ) сварных швов для сосудов и аппара- тов из титана и его сплавов.....	118
П14. ГОСТ 6533–68. Масса стального эллиптического отбортованного днища.....	119
П15. Формулы геометрических характеристик сечений при растяжении, изгибе и кручении.....	119
П16. Геометрические характеристики стальных горячекатаных профи- лей..	120
П17. ГОСТ 9066–75. Размеры (мм) шпилек фланцев (тип В).....	120
Библиографический список.....	121

Учебное издание

Сафонов Борис Петрович

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Часть 1

Учебное пособие по КРЭО

Изд. 3-е, переработанное и дополненное

Редактор Туманова Е.М.

Подписано в печать 24.12.2018 г. Формат 60×84^{1/16}

Бумага «Снегурочка». Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 7,2. Уч.–изд. л. 4,3.

Тираж 66 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»

Новомосковский институт (филиал). Издательский центр.

Адрес университета: 125047, Москва, Миусская пл., 9

Адрес института: 301650, Тульская обл., Новомосковск, ул. Дружбы, 8