

**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации**

**ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева»**

Новомосковский институт (филиал)

В.И. Клочков, М.Н. Каменский, Б.П. Сафонов

**ТИПОВОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ: КОНСТРУКЦИИ,
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОСНОВЫ
РАСЧЁТА**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**Новомосковск
2021**

УДК 621.01
ББК 34.41

Рецензенты:

докт. техн. наук, проф. Леонов В.Т.
ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева,
Орабио А.А.

Начальник Отдела развития АО НАК «Азот»

В.И. Клочков, М.Н. Каменский, Б.П. Сафонов. Типовое технологическое оборудование химических производств: конструкции, конструкционные материалы, основы расчёта. Учебное пособие. / Под общей редакцией Б.П.Сафонова – ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковский институт (филиал); Новомосковск, 2021. –136 с.

В учебном пособии рассматривается типовое технологическое оборудование химических производств. Номенклатура рассматриваемого оборудования соответствует учебной программе дисциплины «Технологические машины и оборудование химических производств» для бакалавров направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» Новомосковского института РХТУ им. Д.И. Менделеева.

В учебном пособии приведены конструкции типового оборудования для реализации тепловых, массообменных, химических и гидромеханических процессов, а также оборудование для измельчения твёрдых материалов, конструкции трубопроводной арматуры и вспомогательных элементов оборудования.

В учебном пособии рассмотрены конструкторско-технологические расчёты представленных видов технологического оборудования, а также основы расчёта на прочность элементов оборудования и применяемые конструкционные материалы. В пособие включен терминологический словарь для облегчения работы с разделом 1.5 «Основные правила конструирования, изготовления, монтажа и эксплуатации технологического химического оборудования».

Рис.67, табл. 27, библиогр. список 25 назв.

УДК 621.01
ББК 34.41

© В.И. Клочков, М.Н. Каменский,
Б.П. Сафонов
© ФГБОУ ВО «Российский химико-
технологический университета им.
Д.И.Менделеева», Новомосковский институт
(филиал), 2021

1. Общая информация о технологическом оборудовании химических производств

1.1. Технологические процессы химических производств и их аппаратурная реализация

В химической технологии реализуются разнообразные процессы, в которых исходные материалы при химическом взаимодействии претерпевают глубокие превращения, сопровождающиеся изменением агрегатного состояния, внутренней структуры и состава вещества. Наряду с химическими реакциями, являющимися основой химико-технологических процессов, последние обычно включают многочисленные физические и физико-химические процессы. К таким процессам можно отнести: перемещение жидкостей и твердых материалов, измельчение и классификация, сжатие и транспортирование газов, нагревание и охлаждение веществ, их перемешивание, разделение жидких и газовых неоднородных смесей, выпаривание растворов, сушка материалов и др.

Процессы химической технологии разделяют в зависимости от закономерностей, характеризующих их протекание, на пять основных групп:

1. Гидродинамические процессы, скорость которых определяется законами гидродинамики – науки о движении жидкостей и газов. К этим процессам относятся перемещение жидкостей, осуществляемое гидродинамическими машинами - насосами; перемещение и сжатие газов, осуществляемое гидродинамическими машинами – компрессорами; разделение жидких и газообразных неоднородных систем в поле центробежных сил, осуществляемое в центрифугах; разделение неоднородных систем под действием разности давлений при движении через пористые слои, осуществляемое фильтрами различных конструкций и перемешивание жидких однородных и неоднородных систем, осуществляемое в аппаратах с различными конструкциями перемешивающих устройств.

2. Тепловые процессы, протекающие со скоростью, определяемой законами теплопередачи – науки о способах и закономерностях распространения тепловой энергии. Такими процессами являются нагревание, охлаждение, выпаривание и конденсация паров. Данные тепловые процессы проводятся в специальных аппаратах, называемых теплообменными, выпарными аппаратами и конденсаторами. К тепловым процессам, могут быть отнесены и процессы охлаждения до температур более низких, чем температура окружающей среды (процессы глубокого охлаждения). В силу многих специфических особенностей эти процессы выделены в отдельную группу холодильных процессов и проводятся в специальных холодильных агрегатах.

В процессах искусственного охлаждения снижение температуры холодильного агента производится с помощью: 1) испарения низкокипящих жидкостей и 2) расширения предварительно сжатых газов.

Расширение газов можно осуществить: а) при пропускании газа через дросселирующее устройство (в случае дросселирования расширение протекает адиабатически и без совершения внешней работы); б) при расширении газа в детандере – машине, устроенной подобно поршневому компрессору (процесс протекает также адиабатически, но с совершением внешней работы).

Скорость тепловых процессов в значительной степени зависит от гидродинамических условий (скоростей, режимов течения), при которых осуществляется перенос тепла между теплоносителями.

3. Массообменные (диффузионные) процессы, характеризующиеся переносом одного или нескольких компонентов исходной смеси из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз. Обычно лимитирующей стадией массообменных процессов является молекулярная диффузия распределяемого вещества. К этой группе процессов, описываемых законами массопередачи, относятся абсорбция, адсорбция, перегонка (ректификация), экстракция из растворов, растворение и экстракция из пористых твердых тел, кристаллизация и сушка. Протекание процессов массообмена тесно связано с гидродинамическими условиями в фазах и на границе их раздела и часто с сопутствующими массообмену процессами переноса тепла (теплообмену).

В конструкциях аппаратов, осуществляющих массообменные процессы, а это абсорберы, адсорберы, ректификационные колонны, экстракторы самыми важным конструктивным элементами являются элементы, обеспечивающие максимальную площадь поверхности контакта взаимодействующих фаз. Это, как правило, насадочные или тарельчатые конструктивные элементы.

Адсорбционные процессы получают дальнейшее развитие с использованием для разделения газов пористых кристаллов и ионообменных смол, а также использование псевдоожигенных (кипящих) слоев адсорбента или катализатора. Аппаратура, использующая псевдоожигенные слои зернистого материала, интенсифицирует протекание гетерогенных массообменных процессов при сушке и кристаллизации.

4. Химические (реакционные) процессы, связанные с превращением веществ и изменением их химических свойств. Скорость этих процессов определяется закономерностями химической кинетики. Аппараты, в которых осуществляются химические превращения, называются реакторами. Конструкции реакционных аппаратов определяются спецификой протекающих процессов и технологических параметров. Общие требования к реакторам могут быть сформулированы в виде следующих положений:

- 1) обеспечение оптимального времени пребывания реагирующих веществ в зоне реакции для получения требуемой степени превращения;
- 2) создание максимального контакта между реагирующими веществами, а также между ними и катализатором;
- 3) обеспечение оптимального температурного режима процесса;

4) механическая прочность аппарата, стойкость его материала к воздействию реакционной среды и отсутствие обратного действия;

5) удобство технического обслуживания и ремонта реактора, а также удобство управления процессом;

6) доступность материалов, дешевизна и простота изготовления.

В основу классификации реакторов положено фазовое состояние реагирующих компонентов, так как в зависимости от этого определяется конструктивное исполнение реактора для обеспечения наилучшего контакта фаз.

В соответствии с изложенным реакторы подразделяются на следующие группы:

- для проведения гомогенных газовых реакций ;
- для проведения гомогенных реакций в жидкой фазе;
- для проведения реакций в газовой фазе над твердыми катализаторами;
- для проведения реакций в газовой фазе над жидкими катализаторами;
- для переработки жидкостей и эмульсий над жидкими и твердыми катализаторами;
- для проведения реакций между газами и жидкостями над твердыми катализаторами.

Во всех реакторах имеют место определенные физические процессы (гидродинамические, тепловые, диффузионные), которые формируют условия для проведения собственно химического превращения вещества (химическая реакция). Для осуществления этих физических процессов реактор имеет в своем устройстве конструктивные элементы, широко применяемые в аппаратах для проведения собственно физических процессов (мешалки, контактные устройства, теплообменные устройства и т.д.).

5. Механические процессы, описываемые законами механики твердых тел.

Данные процессы применяют для подготовки исходных твердых материалов и обработки конечных твердых продуктов, а также для транспортировки кусковых и сыпучих материалов. К механическим процессам относятся: измельчение, транспортирование, сортировка (классификация) и смешение. Все данные процессы обеспечиваются таким оборудованием, как измельчающие машины, транспортеры, питатели, сита, грохоты, классификаторы, сепараторы.

1.2. Требования к технологическому оборудованию химических производств

Технологическое оборудование должно быть безопасным для работников при его монтаже, вводе в эксплуатацию, эксплуатации, ремонте, транспортировании и хранении. На все оборудование должна быть техническая документация (паспорт, руководство по эксплуатации).

Монтаж оборудования должен выполняться в соответствии с проектно-сметной документацией, разработанной в установленном порядке, и

требованиями завода-изготовителя. Не допускается выполнение монтажных работ без утвержденного проекта или с отступлением от него без согласования с проектной организацией – разработчиком проекта, кроме монтажа единичного оборудования. Оборудование должно быть полностью укомплектовано. Снятие каких-либо узлов и деталей, а также эксплуатация без них не допускаются. Стационарное оборудование должно устанавливаться на фундамент и надежно крепиться болтами. Оборудование, являющееся источником вибрации, должно монтироваться на специальных, соответствующих техническому расчету фундаментах, основаниях и виброизолирующих устройствах, обеспечивающих допустимый уровень вибрации. Оборудование не должно иметь острых углов, кромок и неровностей поверхностей, представляющих опасность травмирования работающих. Компоновка составных частей оборудования должна обеспечивать свободный доступ к ним, безопасность при монтаже и эксплуатации. Опрокидывающиеся части оборудования не должны быть источником опасности. Оборудование должно быть выполнено так, чтобы воздействие на работников вредных излучений было исключено или ограничено безопасными уровнями. Материалы конструкции оборудования не должны оказывать опасное и вредное воздействие на организм человека на всех заданных режимах работы, а также создавать пожаровзрывоопасные ситуации. Оборудование должно отвечать требованиям безопасности в течение всего периода эксплуатации при выполнении потребителем требований, установленных в эксплуатационной документации.

Основные требования могут быть сведены к следующему:

1. Материалы конструкции оборудования не должны оказывать опасное и вредное воздействие на организм человека на всех заданных режимах работы и предусмотренных условиях эксплуатации, а также создавать пожаровзрывоопасные ситуации.

2. Оборудование должно быть оснащено устройствами, предотвращающими возникновение разрушающих нагрузок, или иметь ограждения, исключающие создание травмоопасных ситуаций при разрушении деталей.

3. Конструкция оборудования и его отдельных частей должна исключать возможность их падения, опрокидывания и самопроизвольного смещения при всех предусмотренных условиях эксплуатации и монтажа.

4. При необходимости должны быть предусмотрены специальные средства и методы закрепления элементов конструкции.

5. Конструкция оборудования должна исключать выбрасывание предметов (инструментов, обработанных деталей, стружки и т. п.), представляющих опасность для работающих, а также выбросы смазывающих, охлаждающих и других рабочих жидкостей.

6. Движущиеся или горячие части оборудования, являющиеся возможными источниками травмоопасности, должны быть ограждены или

расположены так, чтобы исключить возможность прикасания к ним работающих.

7. Конструкция защитного ограждения должна исключать самопроизвольное перемещение из положения, обеспечивающего защиту работающего, и допускать его перемещение только с помощью инструмента.

8. Конструкция зажимных, захватывающих, подъемных и загрузочных устройств или их приводов должна исключать возможность возникновения опасности при полном или частичном самопроизвольном прекращении подачи энергии, а также исключать самопроизвольное изменение состояния этих устройств при восстановлении подачи энергии.

9. Части оборудования, механическое повреждение которых может вызвать возникновение опасности, должны быть защищены.

10. Оборудование, являющееся источником шума, ультразвука и вибрации, вредных веществ и микроорганизмов, должно быть выполнено так, чтобы вредные проявления не превышали установленных норм.

11. Технологическое оборудование должно быть оснащено местным освещением, если его отсутствие может явиться причиной перенапряжения органа зрения работника или повлечь за собой другие виды опасности.

12. Конструкция оборудования должна исключать ошибки при монтаже, которые могут явиться источником опасности.

13. Система управления технологическим оборудованием должна включать средства экстренного торможения и аварийного останова (выключения), если их использование может уменьшить или предотвратить опасность.

14. Конструкция и расположение средств, предупреждающих о возникновении опасных ситуаций, должны обеспечивать безошибочное реагирование на возникновение таких ситуаций, своевременное оповещение персонала.

1.3. Конструкционные материалы для изготовления технологического оборудования химических производств

Условия работы технологического оборудования химических производств характеризуются широким спектром рабочих параметров: давление – от вакуума до 320 МПа и выше; температура – от -254°C до $+1000^{\circ}\text{C}$ и выше; агрессивное действие технологической среды. Коррозионная стойкость конструкционных материалов характеризуется десятибалльной шкалой, основанной на значениях скорости коррозии $[\text{П}] = [\text{мм/год}]$.

Таблица 1.1 - 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 П1, приведён краткий перечень конструкционных материалов, стойких в некоторых агрессивных средах.

При выборе материалов для аппаратов, работающих под давлением при низких или высоких температурах, необходимо учитывать, что механические свойства материалов существенно изменяются в зависимости от рабочей температуры в аппарате. Повышение рабочей температуры приводит к снижению прочности конструкционных материалов (разупрочнение). При отрицательных температурах может наблюдаться снижение ударной вязкости материалов (охрупчивание).

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 разрушение 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 допускаемая 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. Технология 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 ответственного 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/см^2 ($2 \text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$) 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. В то же время 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 КСУ 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 конструкционного материала для сварного аппарата.

Свариваемость 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, обязателен 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

$$\text{CE} = \text{C} + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/4 + \text{Ni}/40 + \text{Cu}/13 + \text{V}/14 + \text{P}/2, \% \quad (1.1)$$

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:

- $\text{CE} < 0,35$ – 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

$$T_{II} = 350 \cdot \sqrt{CE \cdot (1 + 0,005 \cdot s)} - 0,25, \text{град C} \quad (1.2)$$

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

В таблице 1.2 приведены значения углеродного эквивалента и температуры подогрева при сварке для некоторых сталей, используемых для сварной химической аппаратуры.

Таблица 1.2 - 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
СтЗсп	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 2, рабочие условия применения стальных труб – в таблице П 3.

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 4).

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 $+250^{\circ}\text{C}$. 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% Mo. Образованные 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 обрабатываемость 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 $\text{Cu}+\text{Zn}$) (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 . Коррозионное растрескивание, обусловленное наличием внутренних напряжений, предупреждается отжигом изделий при $250...300^{\circ}\text{C}$.

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 АТ3, 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 литьё, 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 $-40\dots+500^\circ\text{C}$) 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 $+100^\circ\text{C}$.

Вязущие 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.

Углеграфитовые материалы изготовляют 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, хорошо 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% MgO, 50...56% CaO), шамотный кирпич (50...60% SiO₂ и 30...42% Al₂O₃) 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 – твёрдый 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°C и давлении до 1 МПа со средами средней и повышенной агрессивности.

Полипропилен – твёрдый 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°C и давлении до 0,07 МПа со средами средней и повышенной агрессивности.

Полистирол – твёрдый 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, теплостоек 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 изготавливают обечайки, днища, штуцера и другие детали сварной или клееной химической аппаратуры, работающей при температуре от -0 до $+40^\circ\text{C}$ и давлении до 0,6 МПа.

Органическое стекло (полиметилметакрилат) – твердый продукт полимеризации метилметакрилата. Используется для получения бесколочного 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 $+140^\circ\text{C}$ и давлении до 0,06 МПа.

Материалы на основе каучука. Резину и эбонит используют для гуммирования 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 изготавливают 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. Основы расчёта на прочность элементов технологического оборудования химических производств

1.4.1. Исходные данные для прочностного расчёта элементов оборудования

Основными параметрами работы элементов химического оборудования являются: рабочая температура, рабочее давление и состав рабочей среды.

Температура – один из основных параметров технологического процесса в аппарате. В настоящее время 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 1.3.

Таблица 1.3 - 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 – 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

$$p_{абс} = p_a + p_{изб} \quad (1.3)$$

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 (рэф), $1 \text{ psf} = 1 \text{ фунт-сила/кв. фут}$. Коэффициенты для пересчёта единиц давления представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - 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_p – 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

$$p_r = \rho \cdot g \cdot L, \quad (1.4)$$

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 проводят испытания сосуда или аппарата.

Таблица 1.5 - 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:

- $[\sigma]_{20}$, $[\sigma]_t$ – допускаемое напряжение для материала сосуда или его элементов соответственно при 20°C и рабочей температуре.
- Для сосудов, работающих при отрицательной температуре, $p_{\text{пр}}$ принимается таким же, как при температуре 20°C.
- Для сосудов, работающих при температуре стенки от +200°C до +400°C, $p_{\text{пр}}$ не должно превышать рабочее давление $p_{\text{раб}}$ более, чем в 1,5 раза, а при температуре +400°C – более, чем в 2 раза.
- 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 $p_{раб}$ и рабочей температуры $t_{раб}$ 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 $p_{пр.арм}$ (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) – $p_{пр.арм}$ 60.

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

$$p_{пр.арм} = \kappa \cdot p_{раб} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}, \quad (1.5)$$

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 1.6

Таблица 1.6 - Значения поправочного коэффициента κ при определении пробного давления для арматуры

$p_{раб} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$, 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 листовых материалов, базовым является внутренний диаметр $D_{\text{в}}$, а для изготавливаемых из труб – наружный диаметр $D_{\text{н}}$. 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.

1.4.2 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 $[\tau]$

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \quad (1.6)$$

$$\tau_{\max} \leq [\tau] \quad (1.7)$$

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

Выражения (1.6, 1.7) 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_T – предел текучести, $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, σ_b – временное сопротивление (предел прочности), σ_T^f – 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 $n_{II} = 1$).

В таблице П 5 приведены значения допускаемых напряжений при различных температурах для сталей и цветных сплавов. Если значение рабочей температуры в аппарате t_x не совпадает с температурами, приведёнными в таблице П 5, 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

$$[\sigma]_x = [\sigma]_{t_1} - \frac{[\sigma]_{t_1} - [\sigma]_{t_2}}{t_2 - t_1} \cdot (t_x - t_1) \quad (1.8)$$

Допускаемое напряжение при испытании аппарата $[\sigma]_{II}$ определяется по формуле

$$[\sigma]_{II} = \frac{\sigma_{T20}}{n_{II}}, \quad (1.9)$$

здесь σ_{T20} – минимальное значение предела текучести материала аппарата при 20°C (таблица П 6); n_{II} – запас прочности материала при испытании (гидравлическое испытание $n_{II} = 1,1$; пневматическое – $n_{II} = 1,2$).

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

Допускаемая нагрузка используется при расчёте элементов конструкций по допускаемой нагрузке.

$$P_{\max} \leq [P] \quad (1.10)$$

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

Нагрузка P_{\max} в выражении (1.10) 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.

1.4.3. Элементы расчёта на прочность тонкостенных корпусов аппаратов

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).

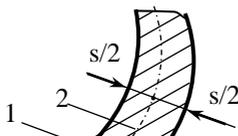


Рисунок 1.1 - Схема образования оболочки: 1 – внутренняя стенка; 2 – средняя поверхность; 3 – наружная стенка

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 1.2). *Полюс* – точка пересечения срединной с осью вращения (т. s на рисунке 1.2).

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. 1.2 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. 1.2 б): $\rho_m = \infty$; $\rho_k = R$. Конус образован вращением гипотенузы треугольника вокруг одного из катетов (рис. 1.2 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

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_k}{\rho_k} = \frac{p}{s_p} \quad (1.11)$$

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

$$\frac{s_p + c}{D_B} \leq 0,1 \quad (1.12 \text{ а})$$

для труб $D_B < 200$ мм

$$\frac{s_p + c}{D_B} \leq 0,3 \quad (1.12 \text{ б})$$

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

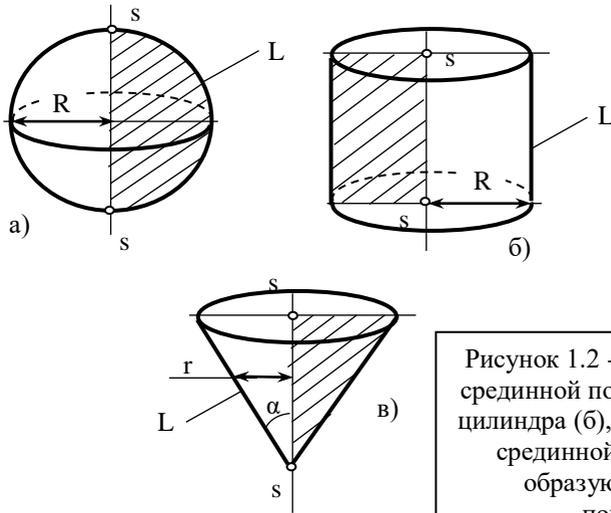
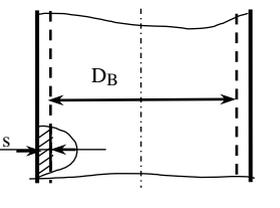
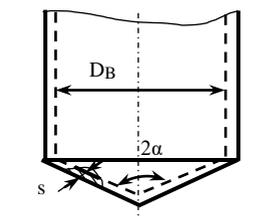
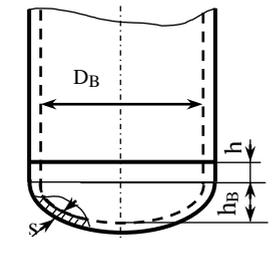
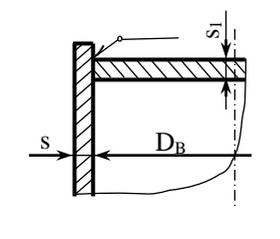


Рисунок 1.2 - Схемы образования срединной поверхности сферы (а), цилиндра (б), конуса (в): s – полус срединной поверхности; L – образующая срединной поверхности

В таблице 1.7 приведены формулы для определения расчётной толщины стенки и допустимого давления простейших тонкостенных оболочек, нагруженных внутренним давлением.

Таблица 1.7 - Формулы для определения расчётной толщины стенки и допустимого давления тонкостенных оболочек

Вид	Расчётная схема	Формулы
Сферическая оболочка		$s_p = \frac{p \cdot D_B}{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p} \quad (1.13)$
		$[p] = \frac{4 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + (s - c)} \quad (1.14)$

Вид	Расчётная схема	Формулы
Цилиндрическая обечайка		$s_p = \frac{p \cdot D_B}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p} \quad (1.15)$ $[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + (s - c)} \quad (1.16)$
Коническое днище $2\alpha \leq 120^\circ$		$s_p = \frac{p \cdot D_B}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - p) \cdot \cos \alpha} \quad (1.17)$ $[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c) \cdot \cos \alpha}{D_B + (s - c)} \quad (1.18)$
Стандартное эллиптическое отбортованное днище		$s_p = \frac{p \cdot D_B}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot p} \quad (1.19)$ $[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D_B + 0,5 \cdot (s - c)} \quad (1.20)$
Плоское неотбортованное днище тип 1		$s_{1p} = \frac{k}{k_0} \cdot D_B \cdot \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} \quad (1.21)$ $[p] = \left[\frac{k_0}{k} \cdot \frac{(s_1 - c)}{D_B} \right]^2 \cdot [\sigma] \quad (1.22)$

Пояснения: D_B – внутренний диаметр; s_p – расчётная толщина стенки оболочки; s – исполнительная толщина стенки оболочки; c – прибавка к расчётной толщине стенки; p – внутреннее давление; φ – коэффициент прочности сварного шва (таблицы П8-П11); $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала оболочки при рабочей температуре (таблица П5); h – высота борта эллиптического днища; h_B – внутренняя высота выпуклой части эллиптического днища; s_{1p} – расчётная толщина плоского днища; s_1 – исполнительная толщина плоского днища; k – коэффициент конструкции

плоского дна; k_0 – коэффициент ослабления отверстия диаметром d ; при $d/D_B \leq 0,35$ $k_0=1-0,43 \cdot d/D_B$; при $0,35 < d/D_B \leq 0,75$ $k_0=0,85$; при наличии нескольких отверстий $k_0=(1- d/D_B)^{0,5}$

Толщину стенки сосудов и аппаратов, работающих под наливом или атмосферным давлением, выбирают из конструктивных или технологических соображений с последующей проверкой на прочность и устойчивость. С учётом технологии изготовления, жёсткости и качества сварных швов не рекомендуется применять исполнительную толщину стенки сосудов и аппаратов менее 3 мм. Для кожухотрубчатых теплообменников толщину стенки кожуха рекомендуется выбирать в зависимости от диаметра аппарата и категории стали согласно данным таблицы 1.8.

Таблица 1.8 - Минимальная толщина кожуха теплообменников ТН* и ТК**

Сталь	Толщина (мм) стенки кожуха при диаметре аппарата (мм)					
	до 500	600	800	1000	1200	1400
Углеродистая и низколегированная	5	6	6	6	6	6
Высоколегированная хромоникелевая	3	4	4	6	6	6
Пояснения: ТН – кожухотрубчатый теплообменник с неподвижными трубными решётками; ТК – то же с компенсатором на кожухе						

1.4.4. Расчёт укрепления отверстий тонкостенных аппаратов

В обечайках и днищах тонкостенных аппаратов вырезают технологические отверстия для установки штуцеров, люков и др. (рис. 1.3).

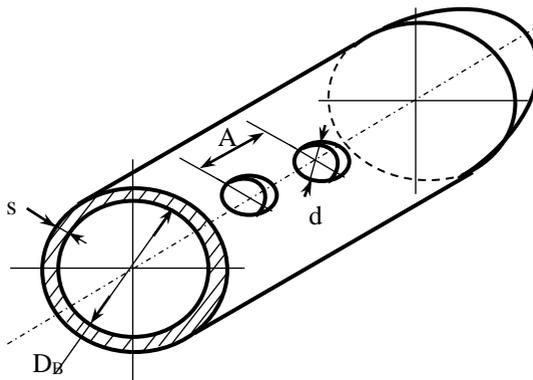


Рисунок 1.3 - Тонкостенный аппарат с технологическими отверстиями (схема)

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

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

Условие прочности укрепления выреза

$$F_0 \leq \Sigma F_i, \quad (1.23)$$

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

$$F_0 = (d - d_\delta) \cdot s_p, \quad (1.24)$$

здесь d – диаметр ослабляющего отверстия (рис. 4.1); d_δ – допустимый диаметр отверстия, не требующего укрепления; $s_p = (s - c)$ – расчётная толщина стенки (рис. 1.3).

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

$$d_\delta = 2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} - 0,8 \right) \cdot \sqrt{D_B \cdot (s - c)} - c \right] \quad (1.25)$$

Формула (1.25) применима при наличии избыточной толщины стенки обечайки.

Конструктивные способы укрепления отверстий см. [10 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. 1.3), то при расчёте укрепления определяется *наименьшее (допустимое) расстояние* A_δ между центрами двух смежных отверстий, при укреплении которых не требуется учитывать их взаимное влияние

$$A_\delta = 0,7 \cdot (d_{n1} + d_{n2}) + 2 \cdot s_{n1} + 2 \cdot s_{n2}, \quad (1.26)$$

здесь d_{n1} , d_{n2} – внутренний диаметр патрубков штуцеров; s_{n1} , s_{n2} – толщина стенки патрубков (см. рис 1.4)

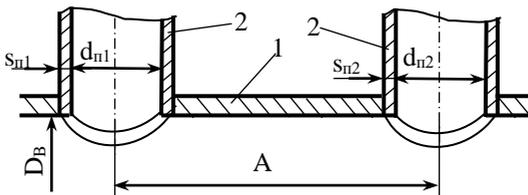


Рисунок 1.4 - Схема обечайки со смежными отверстиями: 1 – обечайка;

2 – патрубков штуцера

Если конструктивное расстояние между отверстиями A (см. рис. 1.4) больше расчётного значения A_{δ} , то взаимное влияние отверстий не учитывается и расчёт укрепления отверстий проводится как для одиночных. В противном случае, когда $A < A_{\delta}$, требуется учитывать взаимное влияние отверстий. В этом случае расчёт укрепления проводят для одиночного отверстия с некоторым *условным диаметром* d_y

$$d_y = A + 0,5 \cdot (d_{n1} + d_{n2}) + 2 \cdot c \quad (1.27)$$

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

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

$$\beta = \frac{D_H}{D_B} > 1,2 \quad (1.28)$$

$$D_H = D_B + 2 \cdot s, \quad s > 0,1 \cdot D_B, \quad (1.29)$$

здесь D_H , D_B – наружный и внутренний диаметр сосуда, соответственно; s – толщина стенки сосуда (рис. 1.5).

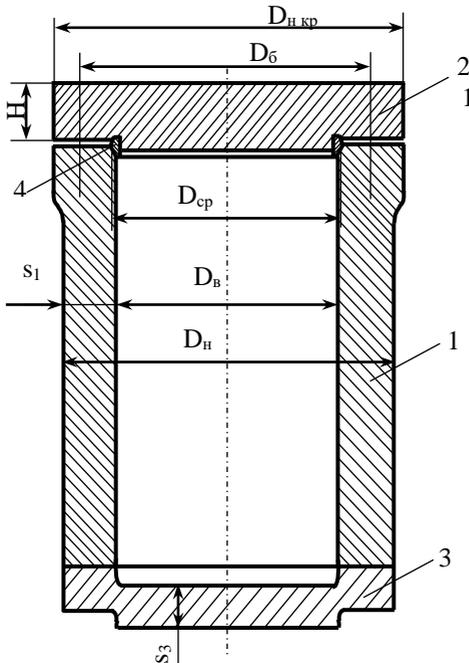


Рисунок 1.5 - Схема АВД с плоскими днищем и крышкой: 1 – обечайка; 2 – крышка; 3 – днище; 4 – двухконусный обтюратор (на рисунке обозначено: D_B – внутренний диаметр обечайки; D_H – наружный диаметр обечайки; $D_{ср}$ – средний диаметр уплотнительной поверхности; $D_б$ – диаметр установки шпилек; $D_{н\ кр}$ – диаметр крышки наружный; s_1 – толщина обечайки; s_3 – толщина днища; H – толщина крышки)

Расчётная толщина стенки обечайки АВД (рис. 1.5)

$$s_{p1} = 0,5D_B \cdot (\beta - 1) \quad (1.30)$$

Наружный диаметр стенки обечайки АВД

$$D_H = \beta \cdot D_B + 2 \cdot c \quad (1.31)$$

При проектном расчёте АВД коэффициент толстостенности определяется по формуле

$$\beta = e^{\frac{p}{[\sigma] \cdot \varphi}}, \quad (1.32)$$

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 АВД (рис. 1.5)

$$s_{p3} = 0,45 \cdot D_B \cdot \sqrt{\frac{p}{[\sigma] \cdot \psi}} \quad (1.33)$$

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

Расчётную толщину крышки АВД (рис. 1.5) определяют из условия прочности на изгиб в диаметральной сечении, наиболее ослабленном отверстиями

$$H_p = 0,45 \cdot \sqrt{\frac{3,8 \cdot Q \cdot (D_o - D_{cp}) + D_{cp}^3 \cdot p}{(D_{нкр} - 2 \cdot d_{ome} - \sum d_i) \cdot [\sigma]}}, \quad (1.34)$$

где Q – расчётное усилие крышки, МН; D_o – диаметр установки шпилек (см. рис. 1.5), м; D_{cp} – средний диаметр уплотнительной поверхности, м; p – давление в аппарате, МПа; $D_{нкр}$ – наружный диаметр крышки, м; d_o – диаметр отверстия под шпильку, м; d_i – диаметр технологического отверстия, ослабляющего крышку, м; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала крышки, МПа.

Для затворов с двухконусным обтюратором расчётное усилие крышки определяется по формуле

$$Q = Q_D + Q_B \quad (1.35)$$

Равнодействующая внутреннего давления

$$Q_d = 0,785 \cdot D_{cp}^2 \cdot p \quad (1.36)$$

Осевая составляющая внутреннего давления

$$Q_B = 1,571 \cdot D_{cp} \cdot A_{cp} \cdot \text{tg}(\alpha - \rho) \cdot p, \quad (1.37)$$

здесь A_{cp} – ширина обтюрационного кольца по средней линии уплотнительной поверхности (принимается конструктивно по таблице 1.9); $\alpha = 30^\circ$ – угол наклона уплотнительных поверхностей обтюраатора; ρ – угол трения стального кольца обтюраатора по мягкой металлической прокладке (алюминий по стали $\rho = 15^\circ$); p – давление в аппарате, МПа.

Таблица 1.9 - Конструктивные размеры (м) крышек АВД и двухконусного обтюраатора

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 обтюрационного кольца по средней линии уплотнительных поверхностей

Шпильки для крепления крышек АВД принимают по ГОСТ 9066–75 (таблица П 12). Шпильки имеют центральное отверстие для смазки резьбы. Для размещения шпилек в крышке делают 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

$$d_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot Q}{\pi \cdot z \cdot [\sigma]} + d_o^2}, \quad (1.38)$$

где k – коэффициент, учитывающий крутящий момент при затяжке шпилек ($k = 1,0$ для затвора с двухконусным обтюраатором); z – число шпилек (принимается конструктивно см. таблицу 1.8); $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала шпильки при рабочей температуре (для стали 35Х $[\sigma] = 282$ МПа); d_o – диаметр центрального отверстия (для шпилек М64...М72 $d_o = 10$ мм; для шпилек М80...М110 $d_o = 20$ мм).

1.5. Основные правила конструирования, изготовления, монтажа и эксплуатации технологического химического оборудования

При проектировании сосудов и аппаратов 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 1.10.

Таблица 1.10 – 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)	Ниже минус 20	
	До 1,6 (16)	От 200 до 400	
	Более 1,6 (16) до 2,5 (25)	До 400	
	Более 2,5 (25) до 4,0 (40)	До 200	
4	Более 4,0 (40) до 5,0 (50)	От минус 40 до 200	
	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

1.5.1. 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 $t_{\text{кип}}=115$ °C при $p=0,175$ 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 м³), у которых произведение давления в МПа (кгс/см²) на вместимость в м³ (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 люков, допускается установка меньших люков или выполнение отверстий, закрываемых 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.

1.5.2. Некоторые правила по устройству и изготовлению сварных аппаратов

Цельносварной аппарат (см. рис. 7.1) состоит из обечайки и эллиптических днищ. Аппарат имеет *люк-лаз* 3 и два *штуцера* 4. Обечайка

аппарата сварена из трёх частей кольцевыми швами I. Каждая часть обечайки сварена из листовой заготовки продольными швами II.

1.5.2.1. 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:

$2 \cdot c$ – для несъемных нагруженных элементов, а также для внутренних крышек и трубных решеток теплообменников;

$0,5 \cdot c$, но не менее 2 мм – для съемных нагруженных элементов;

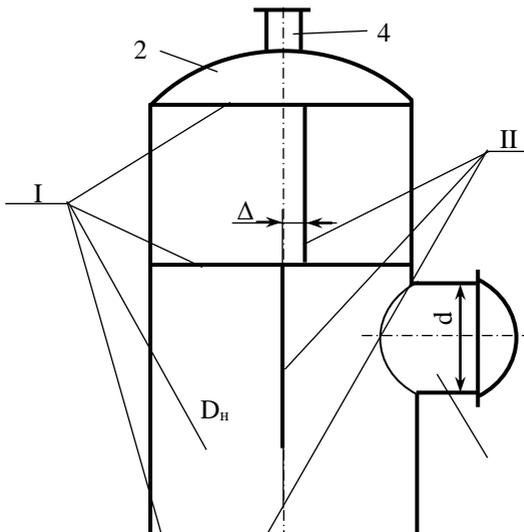
c – для несъемных ненагруженных элементов.

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*.



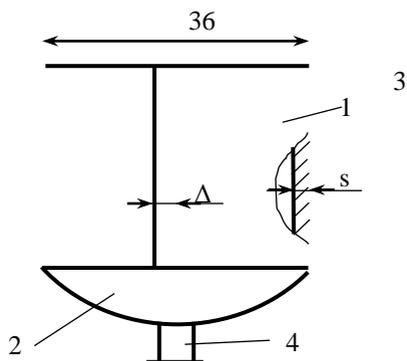


Рисунок 1.6 - Схема цельносварного аппарата: 1 – обечайка; 2 – днище; 3 – люк-лаз; 4 – штуцер; I – *кольцевые швы*; II – *продольные швы*; Δ – смещение швов

1.5.2.2. 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.

1.5.2.3. 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.

1.5.2.4. 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.

1.5.2.5. 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 1.11, 1.12).

Таблица 1.11 – 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	5520–2017	–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	5520–2017, ТУ14-1-642	–40...540	не огр.
08Х18Н10	5632–2014, 5582–75	–270...600	не огр.
12Х18Н10Т	5632–2014, 7350–77	–270...610	не огр.
ХН65МВУ	ТУ14-1-4253	–70...500	5

Таблица 1.12 – 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.
15ХМ; ТУ14-3-460	ТУ14-3-460	–40...560	не огр.
15Х5М, 15Х5ВФ; ГОСТ 20072–74	550–75 группы А, Б	–40...650	не огр.
12Х18Н10Т; 5632–2014	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 1.13.

Таблица 1.13 – 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 плюс 475 °С допускается применять листовую сталь и сортовой прокат марок Ст3кп2 и Ст3пс2.

1.5.2.6. 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. Перекрытие мест пересечения швов не допускается. Продольные швы обечаек не должны быть продолжением меридиональных швов днищ. Смещение швов (см. рис. 1.6) $\Delta = 3 \cdot s$, 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 1.7, *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 1.8), 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 1.13.

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 лакирующего слоя не должно превышать величин, указанных в таблице 1.14.

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.

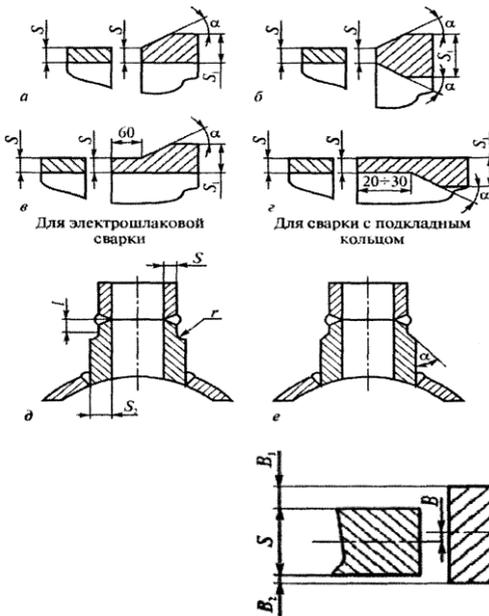


Рисунок 1.7 -
Стыковка элементов
разной толщины

Рисунок 1.8 - Смещение кромок

Таблица 1.14 – Смещение кромок в кольцевых швах сосудов, выполняемых всеми видами сварки, за исключением электрошлаковой

Толщина	Максимально допустимое смещение стыкуемых кромок, мм
---------	--

свариваемых листов S , 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.

1.5.3. 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

$$S = 0,009 (D + 1200), \quad (1.39)$$

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 термообработать 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 марганцевокремнистых 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.

1.5.4. 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 1.9).

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 1.10).

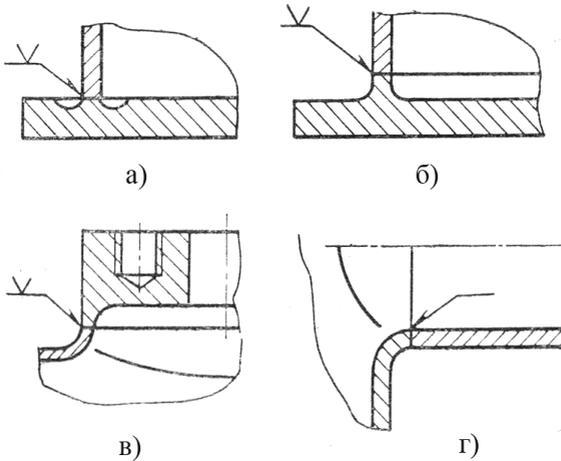


Рисунок 1.9 - Конструктивное оформление сварных узлов деталей из высоколегированных сталей созданием равнотолщинности: а) обечайка и трубная решётка с проточками; б) обечайка и трубная решётка с выступом; в) обечайка и бобышка; г) обечайка и патрубок фланца

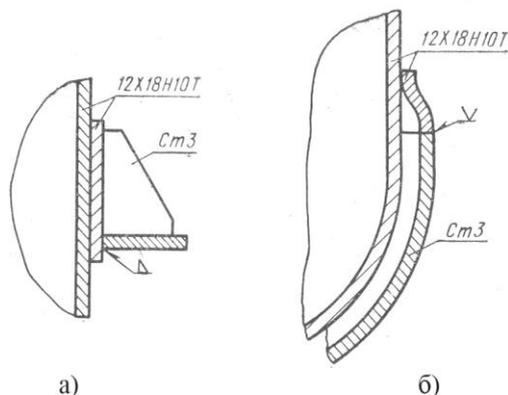


Рисунок 1.10 - Конструктивное оформление сварных узлов деталей из разнородных сталей с использованием промежуточного элемента из высоколегированной стали: а) крепление лапы; б) крепление рубашки

1.5.5. 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 обечаяк их выполняют с гофрами (рисунок 1.11, 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 обечаяк применяют замки или фальцы (рис. 1.11, в).

Конструкция алюминиевой аппаратуры должна учитывать низкую механическую прочность алюминия и интенсивное окисление при нарушении окисной плёнки. Фланцы выполняются стальными на отбортовке (рис. 1.12) 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.

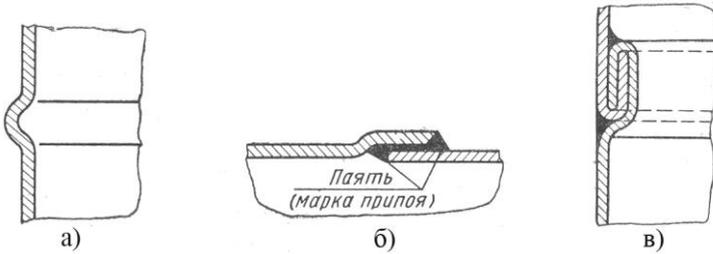


Рисунок 1.11 - Конструктивное оформление узлов медных аппаратов: а) гофр для увеличения жёсткости тонкостенной обечайки; б) конструкция паяного соединения внахлестку; в) выполнение нахлесточного паяного соединения фальцем

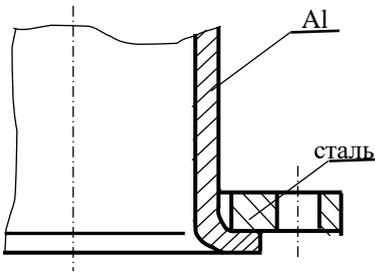


Рисунок 1.12 - Стальной свободный фланец на отбортовке для алюминиевого аппарата

1.5.6. 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 1.13 а, б).

Штуцера выполняют с коническими патрубками, привариваемыми встык к краю отбортованного отверстия (рисунок 1.13 в). На патрубках устанавливают малогабаритные фланцы с втулкой. Аппаратные фланцы изготовляют под стяжные зажимы (рисунок 1.14). 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

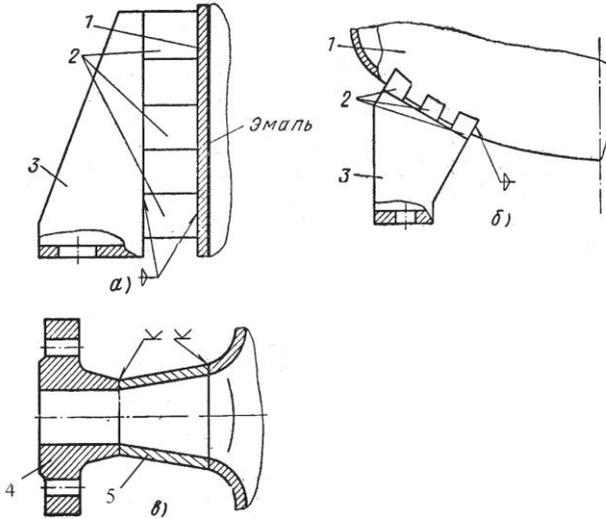


Рисунок 1.13 - Конструктивное оформление узлов эмалированных аппаратов:
 а, б – с приварными лапами; в – с приварным штуцером; 1 – корпус; 2 – накладка; 3 – лапа; 4 – фланец штуцера; 5 – конический патрубок штуцера

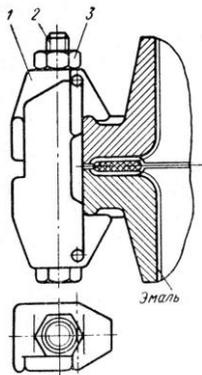


Рисунок 1.14 - Зажим для соединения фланцев эмалированных аппаратов:
 1 – траверса; 2 – стяжной болт; 3 – гайка

1.5.7. 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 1.15, а, б).

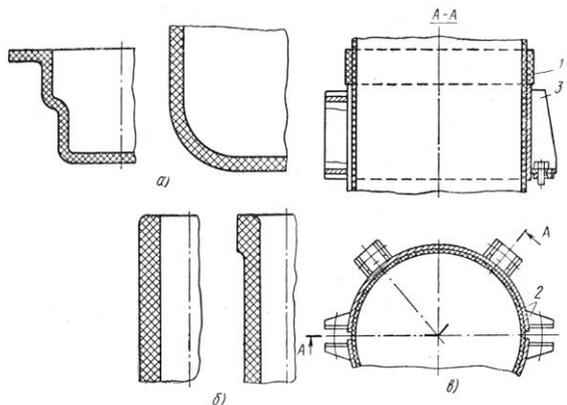


Рисунок 1.15 - Конструктивное оформление узлов аппаратов из пластмасс:
 а – сопряжение стенок; б – оформление края детали; в – крепление опоры;
 1 – приварное кольцо бандажа; 2 – бандаж; 3 – стальная лапа

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. Опорами для вертикальных аппаратов (рисунок 1.15, в) служат стальные лапы, которые крепят к стальному разъёмному бандажу. Нагрузка от массы аппарата передаётся опорам через приварное кольцо, опирающееся на бандаж.

2. Типовое оборудование для массообменных процессов

2.1. Колонные массообменные аппараты

В химической технологии широко распространены процессы массопередачи, характеризуемые переходом одного или нескольких веществ из одной фазы в другую. Виды процессов массопередачи: абсорбция, адсорбция, ректификация, сушка, кристаллизация, растворение и экстракция.

Каждому виду процесса массообмена (массопередачи) может соответствовать аппарат, в котором возможно осуществление данного процесса. Эти аппараты, в зависимости от проводимых в них массообменных процессов могут называться абсорберами, адсорберами, ректификационными

колоннами, кристаллизаторами, выпарными аппаратами, сушилками, экстракторами.

Аппараты для осуществления процессов массообмена можно разбить на два основных вида – ёмкостные и колонные. По конструктивным элементам эти аппараты могут быть похожими, но они всегда отличаются по высоте. Колонными называют аппараты, высота которых более 5 диаметров. Высота колонного аппарата определяется технологическими требованиями процесса.

Основной задачей любого массообменного аппарата является обеспечение максимальной площади поверхности контакта фаз взаимодействующих веществ. Все процессы массопередачи носят диффузионный характер.

Обеспечить максимальную площадь поверхности фаз в массообменных аппаратах удаётся обеспечить при помощи различных конструктивных элементов. К подобным элементам, развивающим поверхность соприкосновения фаз, можно отнести массообменную насадку, массообменные тарелки и другие элементы.

Массообменные аппараты, использующие в качестве массообменного элемента насадку, называются насадочными массообменными аппаратами. На рис.2.1 представлена конструкция колонного насадочного массообменного аппарата (на примере насадочного абсорбера).

Массообменная насадка разбита на две равные части по высоте аппарата с целью борьбы с пристеночным эффектом. После каждого слоя насадки устанавливается перераспределительная тарелка для сбора и распределения жидкой фазы по нижележащему слою насадки. Пристеночный эффект может возникать вследствие того, что плотность упаковки частиц в аппарате у стенок всегда меньше, а порозность (доля свободного пространства между частицами в единице объёма) слоя всегда выше, чем в центральной части аппарата. Высота каждого слоя насадки в аппарате должна быть не более 5 диаметров. Только в этом случае удаётся максимально исключить влияние пристеночного эффекта.

Массообменная насадка должна удовлетворять следующим основным требованиям: обладать большой поверхностью в единице объёма, хорошей смачиваемостью жидкой фазой, иметь малое гидравлическое сопротивление газовому потоку, равномерно распределять жидкую фазу, иметь малый удельный вес, обладать высокой коррозионной стойкостью в агрессивной среде аппарата, обладать достаточной механической прочностью, иметь низкую стоимость.

В промышленности применяют разнообразные по форме и размерам массообменную насадку (рис.2.2). Типы насадки: 1-кольца Рашига; 2,3-кольца с перегородками; 4-кольца Паля; 5- металлическое кольцо Рашига; 6-сёдла Берля; 7-сёдла «Ингаллокс». Для изготовления насадки могут применяться различные материалы: дерево, керамика, пластмасса, металл, фарфор, стекло и др. Выбор материала определяется величиной удельной поверхности,

смачиваемостью, механической и коррозионной стойкостью. Насадка может укладываться правильными рядами (регулярная насадка) или засыпаться в аппарат навалом (нерегулярная насадка). Регулярная насадка имеет меньшее гидравлическое сопротивление и допускает большие скорости газа в аппарате.

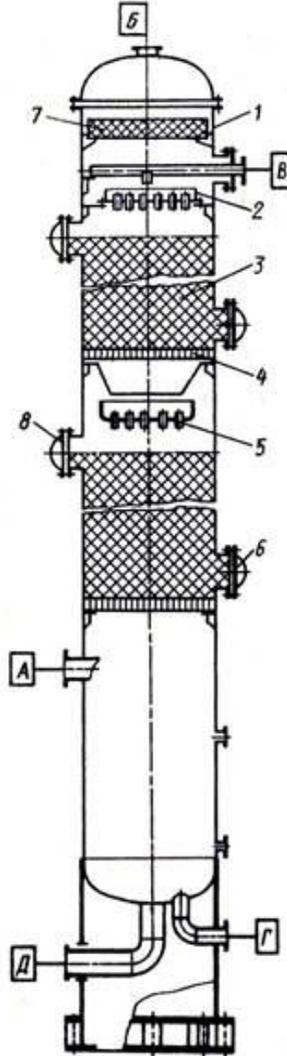


Рисунок 2.1 - Колонный насадочный массообменный абсорбер: 1- корпус; 2- тарельчатый ороситель; 3- насадка; 4- колосниковая решетка; 5- перераспределительная тарелка по жидкости; 6- люк-лаз; 7- каплеотбойник - сепаратор; 8- люк-лаз

Экспликация штуцеров: А-штуцер подачи газа; Б-выхода газа; В-штуцер подачи жидкости; Г- дренаж; Д- штуцер вывода жидкости.

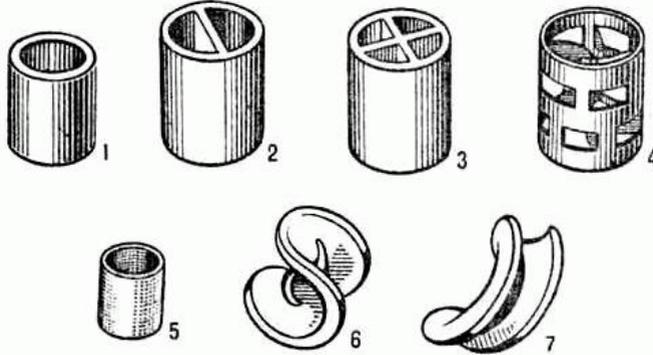


Рисунок 2.2 - Элементы массообменной насадки: 1- кольцо Рашига; 2,3,4- кольца с перегородками; 5- металлическое кольцо Рашига; 6- седло Берля; 7- седло «Инталлокс»

Основными достоинствами насадочных массообменных колонн является простота устройства и относительно низкое гидравлическое сопротивление при достаточной эффективности проведения процесса массообмена. Недостатками следует считать сложности в отводе тепла и плохую смачиваемость при низких плотностях орошения. Насадочные колонны мало пригодны для работы с загрязнёнными жидкостями.

На рис.2.3 представлена конструкция перераспределительной тарелки для жидкой фазы. Данная тарелка устанавливается после каждого слоя насадки в аппарате и предназначена для сбора жидкости и равномерного распределения её по нижележащему слою насадки.

Массообменные аппараты использующие в качестве массообменного элемента массообменные тарелки называются тарельчатыми массообменными аппаратами. Колонный тарельчатый массообменный аппарат отличается от насадочного конструкцией внутренних устройств, в качестве которых используются контактные элементы, называемые тарелками.

Тарельчатые массообменные аппараты могут быть с организованным переливом жидкой фазы, когда тарелки снабжены переливными устройствами, и с неорганизованным переливом жидкости без переливных устройств. Тарелки с переливными устройствами имеют переливные сегменты или патрубки для перетока жидкости с тарелки на тарелку, причем газ через переливные устройства не проходит. На тарелках без переливных устройств (провальных тарелках) жидкость и газ проходят через одни и те же отверстия, прорези или щели в полотне тарелки. Перетекание (проваливание) жидкости с одной тарелки на нижележащую происходит в момент, когда масса жидкости на тарелке превышает гидростатическое давление газового потока.

По характеру взаимодействия газового потока и жидкостного потоков различают тарелки барботажного и струйного типов. Барботажными называют тарелки, на которых сплошной фазой является жидкость, а дисперсной – газ (пар). На струйных тарелках сплошной фазой является газ (пар), а дисперсной – жидкость. Потоки взаимодействуют в прямоточном режиме на поверхности капель или жидкостных струй, взвешенных в газовом потоке. В зависимости от устройств ввода газа (пара) в жидкость различают тарелки следующих типов: ситчатые, колпачковые и клапанные.

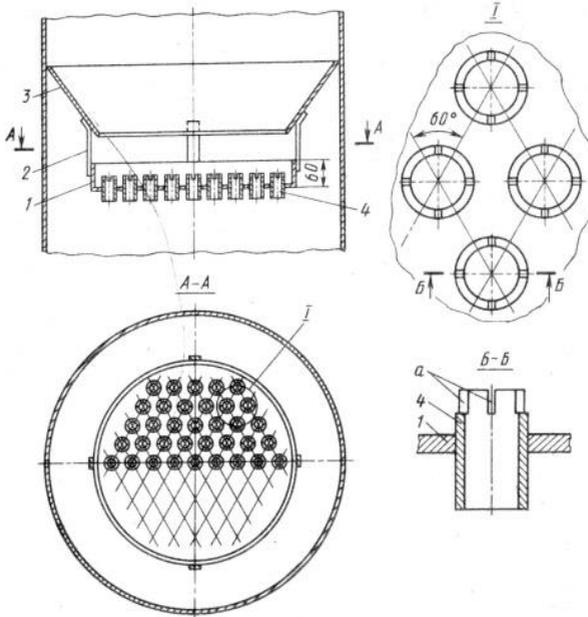


Рисунок 2.3 - Конструкция перераспределительной тарелки для жидкой фазы:

- 1 – тарелка; 2 – крепежные планки; 3 – направляющий конус;
- 4 – переливные патрубки со сливными прорезями (а)

К тарелкам предъявляют следующие требования: они должны обеспечивать хороший контакт между жидкостью и газом (паром), обладать малым гидравлическим сопротивлением, устойчиво работать при значительных колебаниях расходов газа и жидкости. Тарелки должны быть просты по конструкции, удобны в эксплуатации и ремонтах, иметь малый вес и быть нечувствительными к различным осадкам и отложениям при работе с загрязненными жидкостями.

В тарелках без переливных устройств газ и жидкость проходят через одни и те же отверстия (щели). На тарелке одновременно с взаимодействием жидкости и газа путём барботажного происходит сток части жидкости на нижерасположенную тарелку – проваливание жидкости. Поэтому тарелки такого типа называются провальными (рис. 2.4). К ним относятся ситчатые

(дырчатые), решётчатые, трубчатые и волнистые. Форма отверстий в ситчатых тарелках может быть круглой (дырчатой), щелевидной и просечной. Круглые отверстия в ситчатых тарелках бывают диаметром от 3 до 10 мм. Скорость газа (пара) в отверстиях принимают 10 – 12 м/сек.

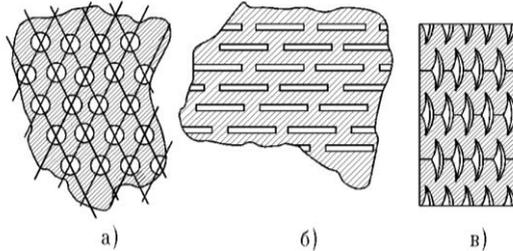


Рисунок 2.4 - Тарелки провального типа: (а)- ситчатая (дырчатая); (б)- решетчатая; (в)- просечная

Стандартные решётчатые тарелки имеют прорези длиной 60 мм, шириной прорези 4 и 6 мм и расстояние между прорезями 10 мм. Решетчатые тарелки используют в колоннах с большой плотностью орошения.

Ситчатые и решетчатые тарелки просты по конструкции и достаточно эффективны в работе, имеют относительно невысокое гидравлическое сопротивление. Недостатком их является необходимость точного регулирования заданного режима (особенно по расходу газа) и чувствительность к осадкам и отложениям, забивающим отверстия. В случае внезапного прекращения подачи газа или значительного снижения его давления с ситчатых тарелок сливается вся жидкость, и для возобновления процесса требуется вновь запускать колонну.

Колпачковые тарелки (рис. 2.5) более сложны по конструкции и металлоемки по сравнению с тарелками других типов.

Колпачковые тарелки менее чувствительны к загрязнениям, отличаются более высоким интервалом устойчивой работы при различных скоростях газов (паров) и плотностях орошения жидкостей. Колпачки изготавливают круглыми и продолговатыми (туннельными). Колпачки различных типов отличаются конструкцией, размерами и способами крепления на тарелке. Крепление колпачков может быть разъёмным или неразъёмным. Разъёмные соединения более сложны, однако они допускают регулировку уровня колпачка при монтаже тарелки. Стальные, медные и алюминиевые колпачки штампуются, чугунные отливаются. Стальные штампованные колпачки крепятся с помощью изогнутой шпильки, приваренной к газовому патрубку. Патрубок развальцовывают или приваривают к тарелке. Диаметры колпачков принимают равными 60, 80, 100 или 150 мм. Колпачки располагают на тарелке по вершинам равносторонних треугольников или в шахматном порядке. Расстояние между краями колпачков принимают 40-60 мм. Если это расстояние велико, то ухудшается контакт между жидкостью и газом, образуется слой невоспененной или так называемой «светлой» жидкости. При малом расстоянии возрастает

сопротивление движению жидкости по тарелке, тарелка начинает «захлебываться».

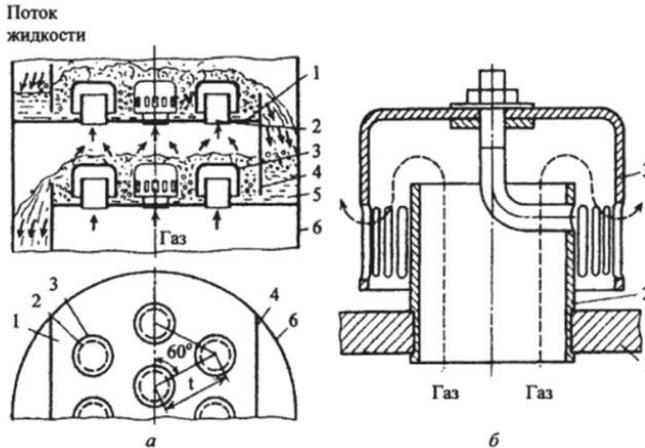


Рисунок 2.5: - а: Конструкция колпачковой тарелки: 1- тарелка; 2-газовый патрубков; 3- колпачок; 4- сливной патрубок (переливной сегмент); 5-гидрозатвор; 6- корпус колонны.
- б: Устройство колпачка: 1-тарелка; 2- газовый патрубок; 3-колпачок

Зазор между колпачками и краем тарелки должен быть минимальным. Слой жидкости на тарелке над верхним обрезом колпачков принимают от 25 до 40 мм. Если высота этого слоя мала, то часть газа проскакивает без контакта с жидкостью. При увеличении высоты слоя возрастает гидравлическое сопротивление тарелки. Переливы делают в виде сегментов или в виде патрубков овального или круглого сечения. Для предотвращения прорыва газа через переливной патрубок конец его опускают в слой жидкости и создают гидрозатвор.

Клапанные тарелки (рис.2.6) отличаются высокой эффективностью работы в широком диапазоне скоростей газа, даже самых незначительных.

Основные элементы клапанной тарелки – подъемные клапаны круглой или прямоугольной формы, закрывающие отверстия в тарелке. Конструктивно клапан выполнен так, что подъем его возможен на определенную высоту. Высота подъема клапана ограничивается специальными лапками или кронштейнами-ограничителями. Принцип действия клапанных тарелок состоит в том, что свободно лежащий над отверстием в тарелке круглый или прямоугольный клапан с изменением расхода газа своим весом автоматически регулирует величину зазора между клапаном и плоскостью тарелки и тем самым поддерживает постоянной скорость газа при его истечении в барботажный слой. Гидравлическое сопротивление колонны при этом увеличивается незначительно. Круглые

клапаны имеют диаметр 45-50 мм, отверстия под клапаном делают диаметром 35-40 мм, при шаге 75-100 мм. Высота подъема клапана 6-8 мм.

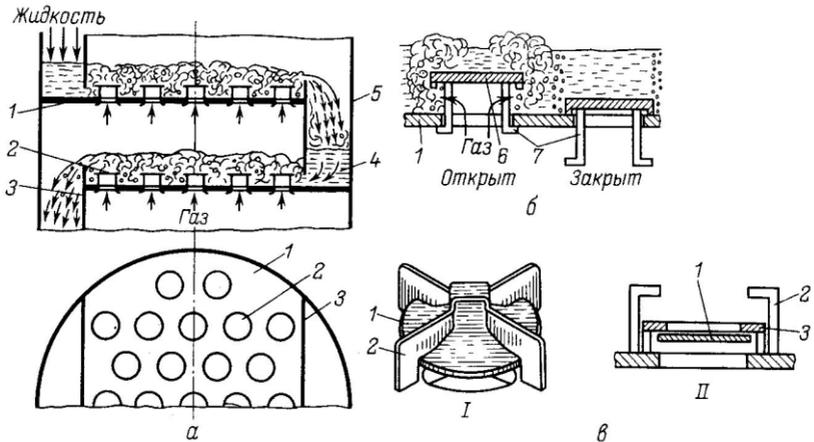


Рисунок 2.6 - Конструкция клапанной тарелки: (а) и (б)- работа клапанной тарелки; 1- тарелка; 2- клапан; 3- сливной сегмент; 4- гидрозатвор; 5- колонна; 6,7- ограничители. Клапанная тарелка с круглыми клапанами (в): I-круглый клапан (1- клапан; 2 – кронштейн - ограничитель.); II – элемент балластной клапанной тарелки (1- легкий круглый клапан; 2- кронштейн-ограничитель; 3 – балластный клапан)

В балластных тарелках при небольших скоростях газа поднимается легкий круглый клапан – 1, с дальнейшим увеличением скорости газа клапан – 1 начинает упираться в балласт – 3 и подниматься вместе с ним. Балластные тарелки отличаются более равномерной работой и полным отсутствием провала жидкости в широком интервале скоростей газа.

В отечественной промышленности наибольшее распространение получили клапанные прямоточные тарелки с дисковыми клапанами.

2.2. Промышленные адсорберы с неподвижным слоем адсорбента

Адсорбция – процесс поглощения одного или нескольких компонентов из газовых смесей или растворенных веществ из растворов твёрдыми поглотителями, называемым адсорбентами.

Особенностью процесса адсорбции являются избирательность и обратимость. Обратимость процесса адсорбции позволяет выделять поглощенные вещества из адсорбента проведением процесса десорбции. В процессе адсорбции участвуют как минимум два агента: тело, на поверхности которого или в объёме пор которого происходит концентрация поглощаемого вещества (адсорбент), и поглощаемое вещество. Поглощаемое вещество, если оно находится в газовой или жидкой объёмной фазе, т.е. в неадсорбированном состоянии называется адсорбтивом, а после перехода в адсорбированное состояние – адсорбатом.

В качестве характеристики адсорбционных свойств твердых тел используют зависимость поглотительной способности от давления при постоянной температуре – изотерма адсорбции, т.е. $a = T(p)$ при $T = \text{const}$.

Согласно изотермы адсорбции поглотительным свойствам твердых тел (адсорбентам) благоприятствуют низкие температуры и для газов высокие давления. Для процесса десорбции оптимальны повышенная температура и для газов пониженное давление.

В промышленности в качестве адсорбентов чаще всего применяют активированный уголь, синтетические цеолиты, силикагель, и алюмогель. Эти вещества обладают большой удельной поверхностью и высокой поглотительной способностью.

Процесс адсорбции проводится в адсорберах по периодической схеме в аппаратах с неподвижным слоем адсорбента и по непрерывной схеме в аппаратах с движущимся или псевдооживленным слоем адсорбента.

Рассмотрим конструкции адсорберов с неподвижным слоем адсорбента. Наиболее часто применяют в химической технологии адсорберы вертикального (рис.2.7а), горизонтального (рис.2.7б) типа, также адсорберы вертикальные с кольцевой засыпкой поглотителя.

Конструкции современных адсорберов предусматривают последовательное проведение процесса адсорбции с последующим процессом десорбции (регенерации адсорбента).

На рис.2.7а представлена конструкция вертикального адсорбера периодического действия с неподвижным слоем поглотителя. Цилиндрическая обечайка аппарата при высоте 2.2 м может иметь диаметр от 2 до 5 м в зависимости от производительности. Высота слоя адсорбента от 1.5 м до 3 м. Адсорбент помещается на разборных колосниковых решетках. Над слоем адсорбента помещают несколько слоёв металлической сетки для предотвращения уноса адсорбента при десорбции. На колосниковую решётку также укладывается металлическая сетка или слой инертной насадки в виде слоя гравия высотой от 100мм и выше для исключения возможности попадания адсорбента через отверстия в колосниковой решетке в днище. Для десорбции в качестве теплоносителя применяют водяной пар.

На рис.2.7а: 1-цилиндрическая обечайка; 2-штуцер для подачи парогазовой смеси (при адсорбции) и воздуха (при десорбции) для сушки и охлаждения адсорбента; 3-штуцер для отвода очищенного газа после адсорбции и воздуха после сушки и охлаждения адсорбента после десорбции; 4-паровой барботёр для подачи острого пара при десорбции; 5-штуцер для отвода паров десорбции; 6-штуцер для отвода конденсата; 7-люк для загрузки поглотителя; 8,9- люки-лазы для технического обслуживания и ремонта и для загрузки адсорбента; 10- слой поглотителя.

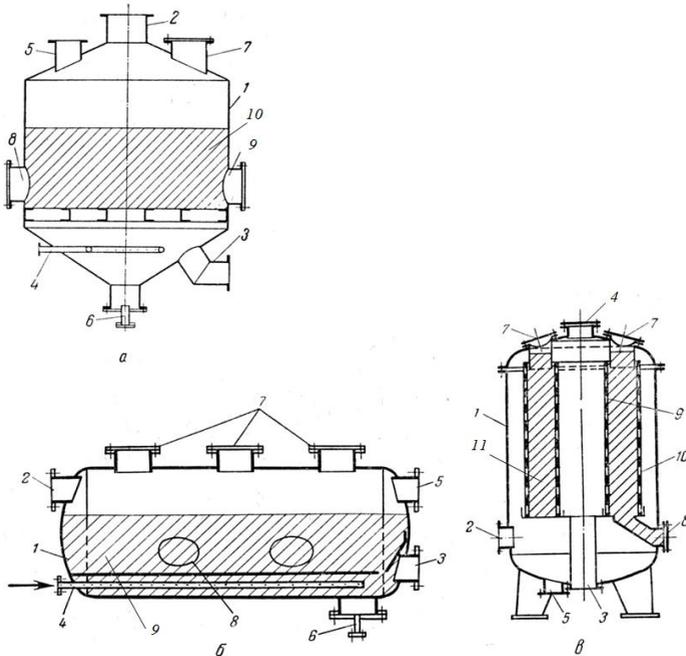


Рисунок 2.7 - Конструкции адсорберов с неподвижным слоем адсорбента:
 а- вертикальный адсорбер; б- горизонтальный адсорбер;
 в- кольцевой адсорбер

Периодические процессы адсорбции проводят четырехфазным способом, при котором процесс проходит в четыре стадии.

На первой стадии проводится собственно адсорбция, когда паро-газовая смесь подаётся в корпус 1 (рис.2.7а) через штуцер 2 и далее через слой поглотителя 10, на котором происходит насыщение поглотителя адсорбируемым компонентом. Освобождённая от целевого компонента паро-газовая смесь выводится из аппарата через штуцер 3.

Вторая стадия – десорбция поглощённого компонента из адсорбента. Подача паро-газовой смеси прекращается и в аппарат подаётся водяной пар через паровой барботёр 4. Продукты десорбции, состоящие из паров десорбированных компонентов и водяных паров, выводятся из адсорбера через штуцер 6.

На третьей стадии осуществляется сушка поглотителя, для чего на его поверхность подается горячий воздух через штуцер 2, который затем выводится через штуцер 3.

Четвертая стадия – охлаждение поглотителя. Прекращается подача горячего воздуха, после чего адсорбент охлаждают холодным воздухом, поступающим в аппарат через штуцер 2 и выводимым из аппарата через штуцер 3. Охлаждение адсорбента необходима для обеспечения оптимальных

условий для процесса адсорбции. Загрузку адсорбента и выгрузку отработанного производят периодически через люки-лазы 8 и 9.

На рис.2.7б представлена конструкция адсорбера горизонтального типа, который состоит из следующих основных элементов: 1- корпус; 2 – штуцер для подачи паро-газовой смеси, 3 – штуцер для вывода адсорбированной паро-газовой смеси; 4 – паровой барботёр; 5 – штуцер для отвода паров адсорбции; 6 – штуцер для отвода конденсата; 7, 8 – люки-лазы для загрузки и выгрузки адсорбента; 9 – слой поглотителя.

Промышленный адсорбер может иметь следующие размеры: длина – бм; диаметр – 2м; высота слоя адсорбента 0,8 – 1,2м. Работа горизонтального адсорбера аналогична работе вертикального. В данных адсорберах недостаточно равномерное распределение газа по сечению аппарата. Такие аппараты чаще всего применяют для адсорбции больших количеств газа в условиях, когда к степени очистки не предъявляют слишком высокие требования.

На рис.2.7в представлена конструкция вертикального кольцевого адсорбера: 1 –корпус; 2 – штуцер для подачи паро-воздушной смеси, сушильного и охлаждающего воздуха; 3 – штуцер для отвода адсорбированной паро-воздушной смеси, а также для подачи водяного пара при десорбции и отвода охлаждающего воздуха; 4 –смотровой люк; 5 –штуцер для подвода охлаждающей воды и отвода конденсата при десорбции; 6 –установочные лапы; 7 – люки для загрузки адсорбента; 8 – люки для выгрузки отработанного адсорбента; 9 и 10 – внутренние и наружная стенки перфорированного цилиндра; 11 – слой поглотителя.

Промышленный кольцевой адсорбер может иметь следующие размеры: общая высота – 7.8м; диаметр – 3.2м: высота слоя адсорбента – 5.2м; диаметр внешнего слоя адсорбента (внешнего перфорированного цилиндра) -2.8м; диаметр внутреннего слоя адсорбента (внутреннего перфорированного цилиндра) – 1м. В кольцевое пространства адсорбера загружается 14 т рекуперационного активированного угля типаАР.

Адсорбер работает следующим образом. Паро-газовая смесь поступает в аппарат через штуцер 2, заполняет его, а затем продавливается через кольцевой слой адсорбента, засыпанного между внутренней 9 и внешней 10 стенками перфорированного цилиндра. Очищенный газ выводится из адсорбера через штуцер 3. При дегазации водяной пар поступает в аппарат через штуцер 3. Конденсат и пары десорбции удаляются через штуцер 5. Сушильный и охлаждающий воздух подводится через штуцер 2, выводятся через штуцер 5.

Кольцевые адсорберы более компактны и производительны, имеют относительно невысокое гидравлическое сопротивление, кроме того они более эффективно используют адсорбент, поскольку по мере снижения концентрации целевого компонента в паро-газовой смеси уменьшается и площадь сечения слоя (уменьшается диаметр кольца).

3. Типовое оборудование для тепловых процессов

3.1. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты жесткой конструкции

Конструктивным признаком кожухотрубчатых теплообменных аппаратов (КТТ) жесткой конструкции (типа ТН) является то, что трубы жестко соединены с трубными решетками, а решетки приварены к кожуху. На рис. 3.1 представлена конструкция горизонтального двухходового по трубам теплообменника типа ТН. Он состоит из цилиндрического сварного кожуха 1, распределительной камеры 11. С обеих сторон цилиндрический кожух закрыт эллиптическими днищами 4. Трубный пучок образован трубами 7, закрепленными в двух трубных решетках 3. Трубные решетки приварены к кожуху.

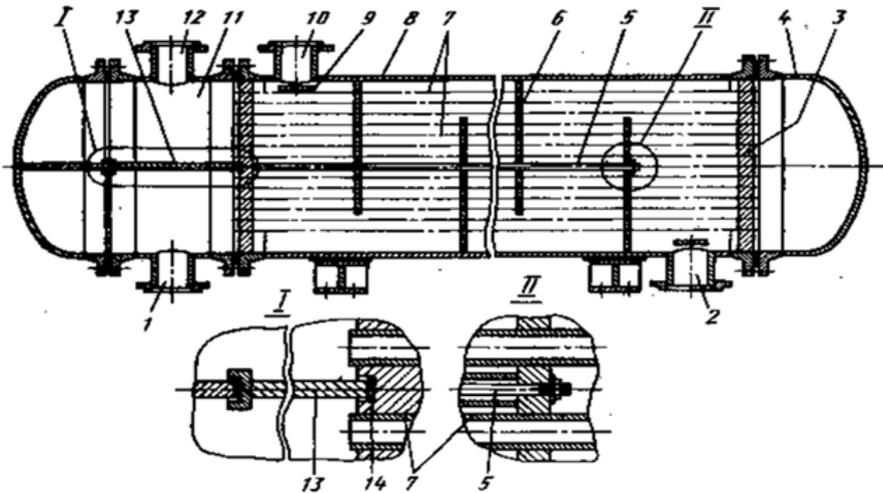


Рисунок 3.1 - Двухходовой горизонтальный КТТ типа ТН: 1- штуцер ввода теплоносителя в трубное пространство; 2- штуцер вывода теплоносителя из межтрубного пространства; 3- трубная решетка; 4- днище; 5- стяжка; 6- сегментная перегородка; 7- теплообменные трубки; 8- кожух; 9- отбойник; 10- штуцер ввода теплоносителя в межтрубное пространство; 11- распределительная камера; 12- штуцер вывода теплоносителя из трубного пространства; 13- перегородка; 14- прокладка для герметизации перегородки

Днища, распределительная камера и кожух соединены корпусными фланцами. В кожухе и распределительной камере установлены штуцеры для ввода и вывода теплоносителя из трубного (штуцеры 1, 12) и межтрубного (штуцеры 2, 10) пространств. Двухходовость теплообменника по трубному пространству обеспечивается перегородкой в распределительной камере 13.

Для герметизации узла соединения продольной перегородки с трубной решеткой использована прокладка 14, уложенная в паз решетки 3.

Интенсивность теплоотдачи при поперечном обтекании труб теплоносителем выше, чем при продольном, поэтому в межтрубном пространстве теплообменника установлены зафиксированные стяжками - 5 поперечные перегородки- 6, обеспечивающие зигзагообразное по длине аппарата движение теплоносителя в межтрубном пространстве. На входе теплоносителя в межтрубное пространство предусмотрен отбойник 9 – круглая или прямоугольная пластина, предохраняющая трубы от эрозионного воздействия потока.

Теплообменники типа ТН имеют два существенных недостатка. Во-первых, наружная поверхность теплообменных труб остается недоступной для очистки от загрязнений механическим способом, а теплоносители могут содержать примеси, способные оседать на поверхности труб в виде накипи и различных отложений. Слой таких отложений имеет малый коэффициент теплопроводности и способен существенно ухудшить теплопередачу в аппарате.

Во-вторых, область применения теплообменных аппаратов типа ТН ограничена возможным возникновением в кожухе и трубах температурных напряжений вследствие разности их температур. Температура кожуха близка к температуре теплоносителя, циркулирующего в межтрубном пространстве, а температура труб – к температуре теплоносителя с большим коэффициентом теплоотдачи. Разность температурных удлинений возрастает, если кожух и трубы изготовлены из материалов с различными температурными коэффициентами линейного расширения. Возникающие при этом напряжения в сумме с напряжениями от давления среды в аппарате могут вызвать устойчивые деформации и даже разрушение конструкций.

По указанной причине теплообменники типа ТН рекомендовано использовать при разности температур кожуха и труб не более $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом возможна так называемая самокомпенсация конструкции. Однако многие аппараты типа ТН, серийно выпускаемые промышленностью, рекомендованы для работы при ещё меньшей разности температур (менее $30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для исключения значительных температурных напряжений при пуске аппаратов типа ТН сначала теплообменную среду направляют в межтрубное пространство, для выравнивания температур кожуха и труб, а затем вводят среду в трубы.

В кожухотрубчатых теплообменниках для достижения больших коэффициентов теплоотдачи необходимы высокие скорости теплоносителей: для газов 8 – 30 м/с, для жидкостей не менее 1.5 – 2 м/с. Скорость теплоносителей обеспечивается соответствующим подбором площади сечения трубного и межтрубного пространства.

Конструктивные размеры кожухотрубных теплообменных аппаратов определяются на основании расчетной величины площади поверхности теплообмена (F). Величина поверхности теплообмена $F(\text{м}^2)$ определяется из

основного уравнения теплопередачи $Q = K \Delta t_{cp} F$. При непрерывной работе теплообменника:

$$F = Q / K \Delta t_{cp}, \quad (3.1)$$

где Q – тепловая нагрузка аппарата, Вт.

По величине поверхности теплообмена по каталогам и справочникам выбирают теплообменный аппарат с соответствующими размерами. Для кожухотрубных теплообменников необходимо, задавшись диаметром труб и их длиной, рассчитать их количество для обеспечения расчетной поверхности теплообмена F . При этом, чем меньше диаметр теплообменных, тем выше поверхность теплообмена на единицу объема аппарата и ниже расход металла. Однако, при этом повышается трудоемкость изготовления теплообменника и усложняется их чистка. Для стальных теплообменников применяют трубы наружным диаметром 20, 25, 38 и 57 мм. Трубы диаметром 38 и 57 мм используют при работе с загрязненными или вязкими теплоносителями.

3.2. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с плавающей головкой

В теплообменниках с плавающей головкой (типа ТП) теплообменные трубы закреплены в двух трубных решетках, одна из которых неподвижно связана с корпусом, а другая имеет возможность свободно перемещаться в осевом направлении, что исключает температурные деформации кожуха и труб.

На рис. 3.2. показан горизонтальный двухходовой КТТ типа ТП. Он состоит из кожуха 10 и трубного пучка. Одна из трубных решеток-1 жестко соединена с кожухом и распределительной камерой-2 корпусным фланцем. В распределительной камере установлена перегородка-4, обеспечивающая двухходовость теплообменника по трубному пространству. Распределительная камера закрыта плоской крышкой-3. Правая, подвижная трубная решетка, установлена внутри кожуха свободно и образует вместе с дополнительным днищем 8 так называемую «плавающую головку». Со стороны плавающей головки аппарат закрыт крышкой-7. При возникновении температурных деформаций плавающая головка может перемещаться внутри кожуха.

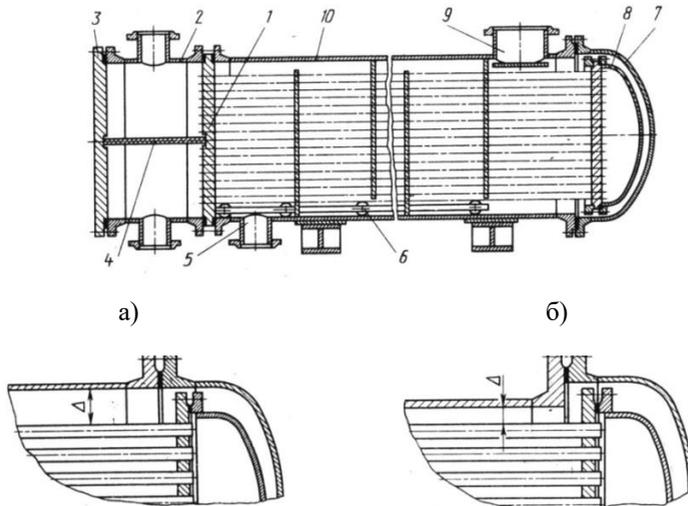


Рисунок 3.2 - Горизонтальный двухходовой КТТ с плавающей головкой

Для обеспечения свободного перемещения трубного пучка внутри кожуха в теплообменных аппаратах диаметром 800 мм и более трубный пучок снабжают опорной подвижной опорой-6. Верхний штуцер-9 предназначен для ввода пара и имеет большое сечение, а нижний штуцер-5 предназначен для ввода конденсата и имеет меньшие размеры.

Значительный коэффициент теплоотдачи при конденсации практически не зависит от режима движения среды и поперечные перегородки в межтрубном пространстве в данном случае служат для придания жесткости трубного пучка.

Наиболее важным узлом теплообменника с плавающей головкой является узел соединения плавающей трубной решетки с крышкой. Это соединение должно обеспечивать возможность легкого извлечения трубного пучка из кожуха аппарата, а также минимальный зазор Δ между стенкой кожуха и крайней трубкой пучка. Вариант исполнения (а) позволяет извлекать трубный пучок, но зазор Δ получается больше на ширину фланца плавающей головки.

Размещение плавающей головки внутри крышки, диаметр которой больше диаметра кожуха, позволяет уменьшить зазор Δ , но при этом усложняется демонтаж плавающей головки из кожуха.

Необходима конструкция узла крепления плавающей головки с трубной решеткой, позволяющая легко извлекать трубный пучок из кожуха теплообменника при минимальном зазоре Δ между трубным пучком и кожухом.

Такая конструкция использует разрезной фланец, состоящий из двух полуколец, стянутых ограничительным кольцом.

3.3. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с линзовым компенсатором на кожухе

В теплообменниках с линзовым компенсатором на кожухе (тип ТК) для частичной компенсации температурных деформаций используют специальные гибкие элементы (расширители и компенсаторы), которые располагаются на кожухе аппарата, как показано на рис. 3.3. Теплообменники типа ТН и ТК отличаются наличием у последнего вваренного между двумя частями кожуха- 1 линзового компенсатора-2 и обтекателя-3. Обтекатель снижает возможность попадания в компенсатор загрязнений от теплоносителя и уменьшает гидравлическое сопротивление межтрубного пространства аппарата. Обтекатель приваривают к кожуху со стороны в межтрубное пространство стыковыми швами. На узле линзового компенсатора (I): 1- стенка кожуха; 2- линзовый компенсатор; 3- защитная втулка предназначена для защиты полости линзового компенсатора от попадания твердых частиц и для снижения гидравлического сопротивления теплообменника

Наиболее часто в аппаратах типа ТК используются одно- и многоэлементные линзовые компенсаторы, изготавливаемые из коротких цилиндрических обечаек. Линзовый элемент могут быть сварены из двух полулинз, полученных из листа штамповкой. Компенсирующая способность линзового компенсатора пропорциональна числу линзовых элементов в нем. Однако, применять компенсаторы с числом линз более четырех чаще всего не рекомендуется в связи с резким снижением сопротивления кожуха изгибу. Для увеличения компенсирующей способности линзового компенсатора он может быть при сборке кожуха предварительно сжат при возможной работе на растяжение или растянут при возможной работе на растяжение.

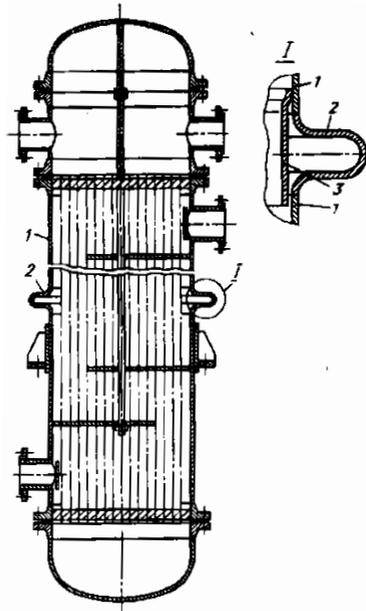


Рисунок 3.3- Вертикальный КТТ типа ТК: 1- кожух; 2- линзовый компенсатор

При установке линзового компенсатора на горизонтальных аппаратах в нижней части линзы сверлят дренажные отверстия с заглушками для слива воды после гидравлических испытаний аппарата.

К аппаратам, обеспечивающим частичную компенсацию температурных расширений за счет гибких элементов в кожухе, относятся также теплообменные аппараты с расширителем на кожухе.

3.4. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с U-образными трубами

В кожухотрубчатых теплообменных аппаратах с U-образными трубками конструктивно обеспечивается свободное удлинение труб, исключая возможность возникновения температурных напряжений, за счет наличия одной трубной решетки.

Конструкция теплообменника показана на рис.3.4. Он состоит из кожуха-3 и трубного пучка, имеющего одну трубную решетку-2 и U-образные трубки-4. Трубная решетка вместе с распределительной камерой-1 крепится к кожуху аппарата при помощи корпусного фланца.

Теплообменники типа ТУ являются двухходовыми по трубному и одно- или многоходовыми по межтрубному пространствам. Многоходовость по трубному пространству обеспечивается перегородкой, устанавливаемой в распределительной камере, которая разделяет также ввод и вывод циркулирующего по трубам теплоносителя. Многоходовость по межтрубному

пространству обеспечивается установкой перегородок-5. Кожух теплообменника закрыт с обеих сторон днищами-6.

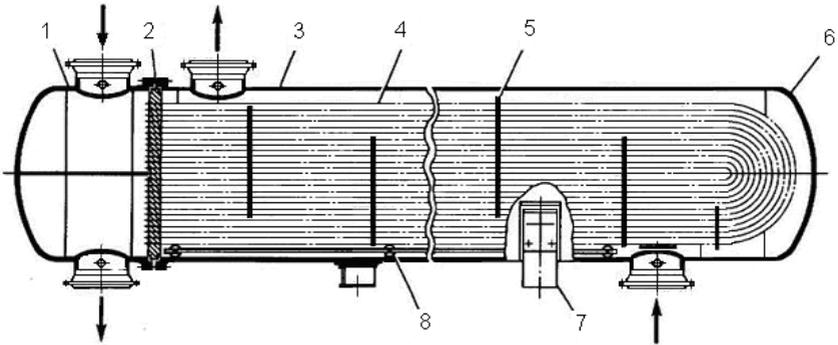


Рисунок 3.4 - Двухходовой КТТ с U – образными трубами

В КТТ типа ТУ обеспечивается свободное температурное удлинение труб: каждая труба может расширяться независимо от кожуха и соседних труб. Разность температур стенок труб в этих аппаратах не должна превышать 100°C . В противном случае могут возникнуть опасные температурные напряжения в трубной решетке вследствие температурного скачка на линии стыка двух ее частей.

3.5. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с двойными трубами (трубами Фильда)

Конструкция КТТ с двойными трубами (трубами Фильда) показана на рис.3.5.

С одной стороны теплообменного аппарата с двойными трубами расположены две трубные решетки 4, причем в верхней решетке закреплен пучок труб -5 меньшего диаметра, открытый с обоих концов, а в решетке -4 трубы -2 большего диаметра с заглушенными нижними концами. Трубы трубного пучка -5 входят в трубы большего диаметра. Теплоноситель Т1 движется по трубному пространству труб малого диаметра – 5, в нижней части трубы он разворачивается вследствие заглушенности труб -2 и далее движется по кольцевому зазору между трубами вверх и выводится из аппарата. Теплоноситель Т2 попадает в межтрубное пространство трубного пространства, образованного трубами –2 и, пройдя сверху вниз, удаляется из теплообменника. Теплообмен между теплоносителями осуществляется через стенку труб малого диаметра.

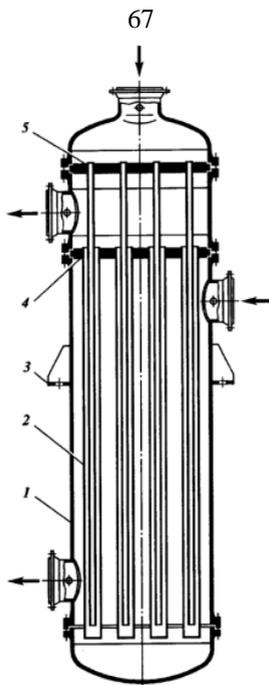


Рисунок 3.5 - Вертикальный КТТ с двойными трубками (трубками Фильда): 1 –кожух; 2 –наружные теплообменные трубы; 3 –опорные лапы; 4 – трубные решетки; 5 – внутренний пучок теплообменных труб

3.6 Спиральные и пластинчатые теплообменные аппараты

Спиральные теплообменники в последнее время получили широкое распространение из-за простоты изготовления, компактности и высокой эффективности. Выпускают теплообменники с поверхностью теплообмена от 10 до 100 м², которые могут работать от вакуума до 1МПа при температурах среды от 20 до 250⁰С.

Спиральные теплообменные аппараты способны для реализации процесса теплообмена между средами жидкость-жидкость, газ-газ, газ-жидкость, а также для конденсации паров и парогазовых смесей.

На рис.3.6 представлена конструкция спирального теплообменника, в котором поверхность теплообмена образована двумя стальными листами - 1 толщиной 3.5 – 6 мм и шириной 400 – 1250 мм, свернутыми в спираль – 8 так, что получаются каналы прямоугольного сечения. По образованным каналам противоточно движутся теплоносители. На поверхности спирали с шагом 70 – 100 мм приварены дистанционные вставки, обеспечивающие постоянный зазор между навиваемыми листами, который для стандартных теплообменников составляет 8 12 мм. С торцов аппарат закрыт крышками – 2 на прокладках -6. В зависимости от способа уплотнения спиральных каналов с торцов различают теплообменники с тупиковыми и сквозными каналами.

Тупиковые канала (рис.3.6) образуют приваркой полосовых вставок – 2 к торцу спирали; с торцов каналы закрыты крышками – 3 с прокладкой – 1. После снятия крышек и прокладок оба канала можно почистить. Такой способ уплотнения каналов исключает возможность смешения теплоносителей даже при прорыве прокладки и поэтому наиболее предпочтителен.

Сквозные каналы (рис.3.7) с обоих торцов закрыты крышками – 2 и прокладками – 1, легко поддаются чистке, но не исключают возможности смешения теплоносителей при нарушении сплошности прокладки.

Спиральные теплообменники с тупиковыми каналами изготавливают в двух вариантах: с плоской крышкой (для теплообмена между жидкостями и газами) и с конической или эллиптической крышкой (для конденсации паров и нагрева высоковязких жидкостей). В аппаратах с плоской крышкой обеспечивается противоточное движение фаз, а в аппаратах с конической или эллиптической – перекрестное.

Теплообменники с тупиковыми каналами конической или эллиптической крышкой используют как конденсаторы и обычно устанавливают вертикально, как показано на рис 3.7в. Вертикальное расположение каналов исключает образование пробок конденсата и гидравлические удары. Благодаря конической крышке парогазовая смесь (рабочая среда) подается в аппарат сверху через штуцер-1.Образующийся конденсат стекает по вертикальной стенке канала, собирается в нижней части аппарата и сливается через штуцер -3. Несконденсировавшиеся газы проходят несколько наружных витков, охлаждаются и выводятся через штуцер-2 на корпусе. Хладагент подается в аппарат через штуцер-5 и выводится через штуцер-4.

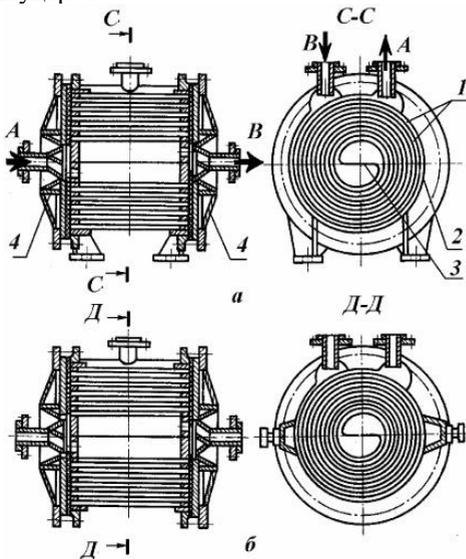


Рисунок 3.6 -
Конструкция
спирального
теплообменника: 1 –
спиральные каналы; 2 –
обечайка; 3 –
разделительная
перегородка; 4 –

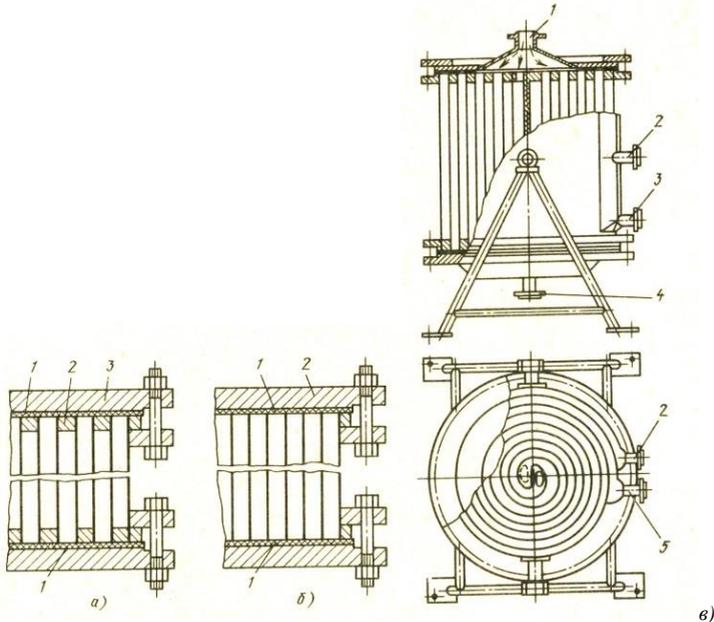


Рисунок 3.7 - Спиральные теплообменники с тупиковыми (а) и сквозными (б) каналами; спиральный конденсатор (в)

Пластинчатые теплообменные аппараты представляют собой аппараты, теплообменная поверхность которых образована набором тонких штампованных пластин с гофрированной поверхностью. Их различают по степени доступности поверхности теплообмена для механической очистки и осмотра на разборные, полуразборные и неразборные (сварные).

Наиболее распространены разборные пластинчатые теплообменники, в которых пластины отделяются друг от друга резиновыми прокладками. Монтаж и демонтаж таких аппаратов осуществляется достаточно быстро и очистка теплообменных поверхностей проста и не требует значительных затрат труда. Пластины полуразборных теплообменников сварены попарно и доступ к поверхности теплообмена возможен только со стороны хода одной из рабочих сред. Пластины неразборных теплообменников сварены в блоки и соединены на прокладках в общий пакет.

Пластинчатые теплообменники изготавливают с поверхностью теплообмена от 3 до 600 м² в зависимости от типоразмера пластин.

Пластинчатые теплообменники используются при давлении до 1,6 МПа и температуре сред от -30 до +180⁰С для реализации теплообмена между жидкостями и парами (газами) в качестве холодильников и конденсаторов.

Серийно выпускаемые пластинчатые теплообменники могут работать с загрязненными рабочими средами при размерах твердых включений не более 4 мм.

Разборный пластинчатый теплообменник на двух опорной раме показан на рис.3.8. Аппарат состоит из ряда теплообменных пластин-3, размещенных на верхней и нижней горизонтальных штангах-9. Концы штанг закреплены в неподвижной плите-1 и на стойке-4. Нажимной плитой-4 и винтом-5 пластины сжимаются, образуя теплообменную секцию.

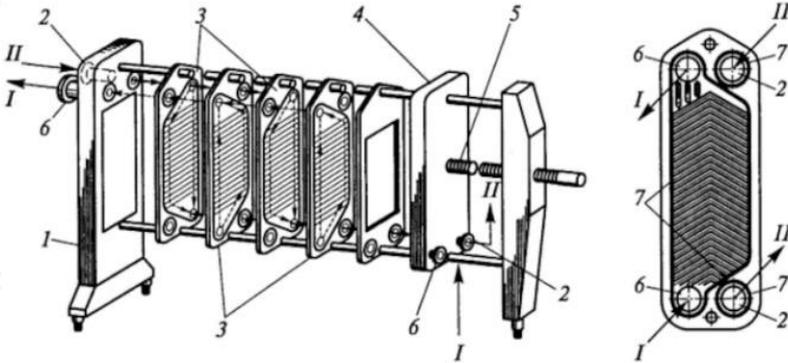


Рисунок 3.8 - Разборный пластинчатый теплообменник на двухопорной раме:

1 – неподвижная плита; 2 – штуцеры теплоносителя II; 3 – теплообменные пластины; 4 – нажимная (подвижная) плита; 5 – винт; 6 – штуцеры ввода и вывода теплоносителя I; 7 – прокладки; 8 – винт; 9 – направляющие штанги

Теплообменные пластины имеют четыре проходных отверстия (IиII), которые образуют две изолированные одна от другой системы каналов. Для уплотнения пластин и каналов используются прокладки. Прокладка-7 уложена в паз по контуру пластины и охватывает два отверстия на пластине, через которые происходит приток и вывод теплоносителя в канал между смежными пластинами, а прокладка-6 герметизирует два других отверстия на пластине. Для ввода и вывода теплоносителей в аппарат и из него предназначены штуцеры 2 и 6, расположенные на неподвижной и подвижной плитах.

4. Типовое оборудование для измельчения твёрдых материалов

4.1. Измельчающие машины ударного действия

В измельчителях ударного действия измельчение материала производится за счет ударных нагрузок. Эти нагрузки могут возникать при падении измельчающих тел на материал, столкновении летящего материала с неподвижной поверхностью, столкновении материала и измельчающих тел в полете, столкновении в полете самих измельчающихся частиц друг с другом.

Различают стесненный и свободный удар. При стесненном ударе материал разрушается между двумя соударяющимися поверхностями и осколки разрушаемого тела свободно разлетаются только в боковые стороны. В этом случае разрушающий эффект зависит от массы ударяющего тела и скорости его движения в момент удара. При свободном ударе разрушающий

эффект зависит главным образом от скорости столкновения тел и не зависит от того, какое из них движется – разрушающее или разрушаемое.

К измельчителям ударного действия относятся: молотковые, центробежные, барабанные, пневматические и струйные.

Основными рабочими элементами молотковых измельчителей являются ротор с молотками и статор–корпус (станина). В нижней части корпуса установлена подовая (колосниковая) решетка, отверстия которой регулируют размер размалываемых частиц. Стенки корпуса защищены броневыми плитами.

На рис.4.1 показана конструкция молотковой дробилки. Измельчение материала в этих машинах производится свободным или стесненным ударом. Попадающий через приёмную воронку материал разрушается от столкновения с молотками и отбрасывается к броневой плите. Ударившись об эту плиту, частицы отлетают от неё и попадают вновь под молотки. Разрушенные и отброшенные второй раз к броневой плите частицы снова возвращаются под молотки. Такое движение и разрушение материала происходит до тех пор, пока частицы не попадут на колосниковую решетку и не выйдут из зоны измельчения через её отверстия. Куски материала, не успевшие разрушиться за первый проход через зону измельчения до нужного размера, движущимися молотками могут разрушаться, находясь на подовой решетке, или подниматься и возвращаться опять в зону интенсивного измельчения.

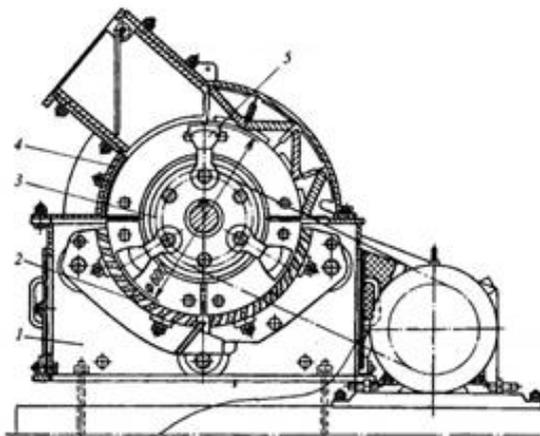


Рисунок 4.1 - Молотковая дробилка: 1- станина; 2- колосниковая решетка; 3- ротор; 4 – корпус; 5 – молотки

Размер частиц измельченного материала определяется и регламентируется размером отверстий в подовой решетке, которая обычно предусматривается сменной. Увеличение скорости вращения ротора вызывает более глубокое разрушение частиц, но в продуктах измельчения повышается

содержание мелочи и пыли, что нежелательно с технологической точки зрения.

Производительность молотковых дробилок определяется по формуле:

$$V = \frac{k \cdot D^2 \cdot L \cdot n^2}{3600 \cdot (i - 1)}, \text{ м}^3/\text{час}; \quad (4.1)$$

где: k – коэффициент, зависящий от конструкции дробилки и твердости материала ($k=4\div 6,2$); D – диаметр ротора, м; L – длина ротора, м; n – частота вращения ротора, об/мин; i – степень измельчения (отношение средних диаметров кусков до и после измельчения).

В молотковой дробилке можно измельчать материал и без подовой решетки, но в этом случае гранулометрический состав измельчаемого продукта будет иметь большой разброс и не будет контролироваться.

4.2. Измельчающие машины раскалывающего и разламывающего действия

Измельчение или разрушение кусков материала раскалыванием или разламыванием осуществляется действием на тело сосредоточенных нагрузок. При этом возникают местные разрушающие напряжения, которые и вызывают деление тела на части. Измельчители раскалывающего и разламывающего действия особенно эффективны при крупном и среднем измельчении, а также при получении кускового материала с минимальным выходом мелочи.

К измельчителям, работающим на принципе раскалывания и разламывания относятся щёковые, конусные и зубовалковые дробилки.

Рабочим элементом щёковой дробилки щеки являются две щеки: неподвижная (станина) и качающаяся (броневая плита). Щеки образуют пасть. Материал поступает в пасть сверху. При сближении щек куски материала разрушаются, а при расхождении измельченный материал выпадает через нижнюю щель пасти.

На рис.4.2 показана конструкция щековой дробилки с верхним подвесом подвижной щеки на эксцентриковом валу. Дробилка состоит из литой или сварной станины -1, броневых плит -2, распорных клиньев -3, подвижной щеки -4, подвешенной на эксцентриковом валу -5, маховика -6, подъёмного винта -7, подвижного клина -8, натяжной пружины -9, тяги -10, упорного клина -11 и нажимной плиты -12.

Зонай измельчения является пасть, образованная передней торцевой и боковыми стенками станины и подвижной щекой. Для уменьшения износа станины и подвижной щеки, а также для измельчения материала на рабочие поверхности устанавливают броневые плиты -2 и клинья -3. Плиты и клинья изготавливают из износостойкой стали или закаленного чугуна.

Процесс разрушения материала происходит в период движения подвижной щеки в направлении неподвижной. При обратном ходе измельченный материал удаляется через нижнюю щель. Крупность

получаемого материала регулируют изменением выходной щели с помощью специальных клиньев и пружинной тяги.

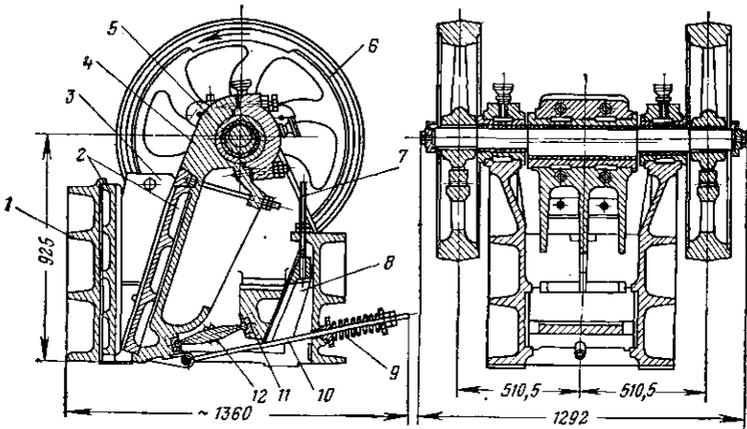


Рисунок 4.2 - Щековая дробилка с верхним подвесом подвижной щеки на эксцентриковом валу

В щековой дробилке с верхним подвесом щеки верхний её конец посажен непосредственно на эксцентрик приводного вала, нижний опирается на нажимную плиту -12 и подтягиваться к ней тягой -10 через пружину -9. При такой схеме установки щеки верхний её конец совершает круговое движение, а нижний – по дуге радиуса, равного длине нажимной плиты. Суммарное движение щеки является сложным, поэтому дробилка получила название дробилки со сложным движением щеки. В то время как верхняя часть щеки движется в направлении неподвижной щеки и разрушает крупные куски материала, её нижняя часть отходит от неподвижной щеки, освобождая выход измельченному материалу, и, наоборот, когда верхняя часть отходит от неподвижной щеки и измельченный материал опускается вниз, нижняя часть приближается к неподвижной щеке и дополнительно измельчает материал.

В щековой дробилке со сложным качением щеки отсутствует холостой ход. При отходе верхней части щеки работает нижняя, а при отходе нижней – работает верхняя. Так как подвижная щека движется не только в направлении неподвижной щеки, но и вдоль собственной оси, то к прямому раскалывающему действию выступов броневых плит добавляется разрезающее.

Массивные маховики на щековых дробилках способствуют смягчению неравномерных нагрузок на двигатель и отдельные узлы и детали.

Чтобы избежать поломки сложных и дорогостоящих деталей дробилки в случаях попадания в неё неразрушающихся элементов (кувалды, куса рельса и т.п.), предусматривается ослабление некоторых простых деталей. В щековой дробилке такой деталью является одна из нажимных плит, которая и будет выходить из строя, сохраняя в целостности другие узлы и детали.

Наиболее распространены клепаные нажимные плиты, в которых при нагружении срезаются заклёпки и они могут использоваться повторно.

Для уменьшения износа станины и подвижной щеки, а также для измельчения материала на рабочие поверхности устанавливают бронеовые плиты -2 и клинья -3. Плиты и клинья изготавливают из износостойкой стали или закаленного чугуна. Наибольшему износу подвергается нижняя часть зоны измельчения плиты. Для увеличения срока службы эти плиты делают такими, чтобы их по мере износа нижней части можно было перевернуть верхним концом вниз.

На 4.3 представлена расчётная схема щековой дробилки с простым качанием щеки.

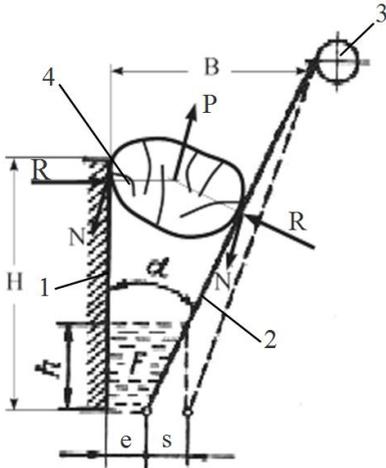


Рисунок 4.3 - Схема к расчёту щековой дробилки с простым качанием подвижной плиты: 1 – неподвижная плита; 2 – подвижная плита; 3 – ось вращения подвижной плиты; 4 – кусок дробимого материала. Основные технологические размеры дробилки: L – длина (размер, перпендикулярный плоскости рисунка); B – ширина пасти; H – высота передней стенки; e – ширина

Расчёт дробилки проводится в следующей последовательности. По заданной объёмной V ($\text{м}^3/\text{с}$) или массовой G ($\text{кг}/\text{с}$) производительности, крупности кусков (мм) d_n (начальная) и d_k (конечная), насыпной плотности материала ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) определяются угол захвата α , частота вращения вала (см. 5 на рис. 4.2) n ($\text{об}/\text{мин}$), технологические геометрические размеры, потребляемая мощность.

Размеры B и e дробилки принимают конструктивно

$$B = (1,15 \div 1,2) \cdot d_n \quad (4.2)$$

$$e = 0,5 d_n \quad (4.3)$$

Величину s (мм) определяют по эмпирической формуле

$$s = a_1 + a_2 \cdot e, \quad (4.4)$$

здесь a_1 , a_2 – эмпирические коэффициенты (для дробилки с простым качанием плиты $a_1 = 8 \text{ мм}$, $a_2 = 0,26$)

Величину H принимают конструктивно

$$H = (B - e) / \text{tg} \alpha \quad (4.5)$$

Дробление реализуется в случае, если дробимый материал 4 не выталкивается из рабочей камеры дробилки, а постепенно перемещается вниз к выходной щели. Крупность кусков при этом уменьшается и становится равной d_k .

Реализации дробления имеет место, если удерживающие силы $N+N$ больше выталкивающей силы P , т.е.

$$2N \geq P \quad (4.6)$$

Рассмотрим силы, действующие на кусок дробимого материала.

$$P = 2R \cdot \sin(\alpha/2) \quad (4.7)$$

$$N = f_{\text{тр}} \cdot R \cdot \cos(\alpha/2), \quad (4.8)$$

здесь R – сила реакции дробящих плит; $f_{\text{тр}}$ – коэффициент внешнего трения дробимого материала.

Учитывая (4.7, 4.8), 4.6 перепишем в виде

$$2 f_{\text{тр}} \cdot R \cdot \cos(\alpha/2) \geq 2R \cdot \sin(\alpha/2) \quad (4.9)$$

После преобразований получим

$$f_{\text{тр}} \geq \text{tg}(\alpha/2) \quad (4.9 \text{ a})$$

Учитывая, что $f_{\text{тр}} \geq \text{tg}\varphi_{\text{тр}}$ ($\varphi_{\text{тр}}$ – угол внешнего трения дробимого материала), условие реализации дробления (4.6) запишем в виде

$$\alpha \leq 2\varphi_{\text{тр}} \quad (4.10)$$

Для реализации дробления угол захвата щековой дробилки должен быть вдвое меньше угла внешнего трения дробимого материала. Угол захвата стандартных дробилок составляет $\alpha = 15 \div 25^\circ$.

Частоту качания подвижной плиты дробилки определяют из следующих соображений:

– для высыпания из рабочей камеры материала, объем которого высоте h необходимо время τ_2 (с)

$$\tau_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} \quad (4.11)$$

– в то же время τ_2 должно быть равно времени половины качания подвижной плиты τ_1 (с)

$$\tau_1 = 1/(2n), \quad (4.12)$$

здесь n – частота качаний подвижной плиты, с^{-1}

– пренебрегая изменением угла захвата при качании подвижной плиты, примем

$$h = s/\text{tg}\alpha, \quad (4.13)$$

здесь s – размах качаний подвижной плиты (см. рис. 4.3)

Тогда из равенства $\tau_1 = \tau_2$ следует, что частота качания подвижной плиты (с^{-1}) будет равна

$$n = \sqrt{\frac{g \cdot \text{tg}\alpha}{8 \cdot s}} \quad (4.14)$$

Зная объемную производительность дробилки V ($\text{м}^3/\text{с}$), крупность кусков d_k (м), размах качаний подвижной плиты s (м), частоту качаний подвижной плиты n (с^{-1}), определим требуемую длину дробилки L (м)

$$L = V \cdot \text{tg} \alpha / (d_k \cdot s \cdot \mu \cdot n), \quad (4.15)$$

здесь $\mu = 0,2 \div 0,6$ – коэффициент разрыхления материала.

Мощность привода (Вт) дробилок отечественного производства определяют по эмпирической формуле

$$N = 3,9 \cdot 10^4 \cdot S^{1,25} \cdot n / \eta, \quad (4.16)$$

здесь $S = B \times L$ – площадь загрузочного отверстия дробилки, м^2 ; n – число качаний подвижной плиты в секунду; $\eta = 0,75$ – к.п.д. привода.

5. Оборудование для разделения неоднородных систем

5.1. Конструкции и принцип работы циклонов и рукавных фильтров

Циклонами называют аппараты для выделения твердых частиц из запыленных газов под действием центробежных сил, возникающих во вращающемся потоке газа. Циклоны улавливают частицы размерами более 10 мкм. Различают возвратно-поточные и прямоточные циклоны. Наиболее распространены возвратно-поточные циклоны, называемые также противоточными, в которых направление потока газа меняется на противоположное при движении по оси аппарата.

На рис. 5.1 представлена конструкция возвратно-поточного циклона, состоящего из цилиндрического корпуса – 1, выводной (выхлопной) трубы 2, улитки – 3, входной патрубка – 4, приёмного бункера для пыли и автоматического затвора – 5 для выгрузки.

Сущность циклонного процесса состоит в том, что поток, несущий взвешенные, поступает в аппарат тангенциально через входной патрубок со скоростью от 10 до 40 м/с. Поток под действием центробежной силы начинает вращаться вокруг выводной трубы, совершая несколько оборотов. При этом взвешенные частицы отбрасываются к периферии, оседают на внутренней поверхности корпуса, а затем под действием сил тяжести оседают в приёмный бункер и удаляются из аппарата. Освобожденный от твёрдых частиц поток газа через выхлопную трубу и улитку удаляется из циклона.

Вращение газовому потоку сообщается путём ввода его в аппарат с большой скоростью, либо по касательной к стенке корпуса, либо с помощью закручивающих устройств. Корпус бывает либо цилиндрическим с конической нижней частью, либо коническим полностью. Пыль, выделяемая при вращении потока и осевшая на стенках корпуса, далее выводится в бункер через пылевывпускное отверстие в суженном конце конической части.

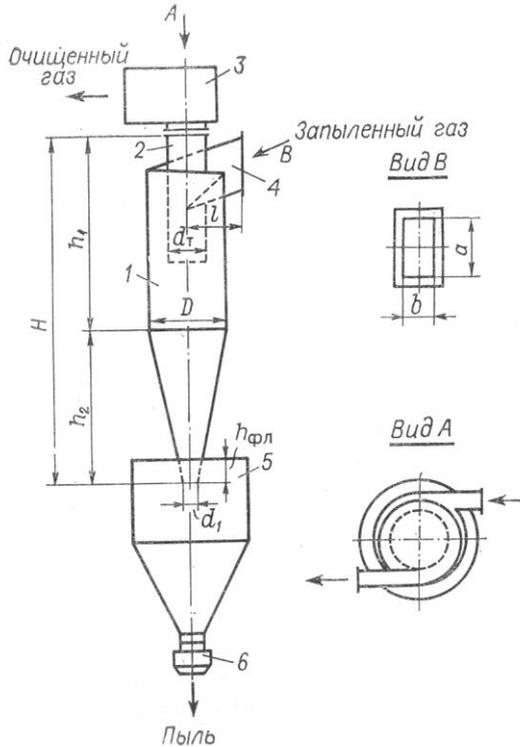


Рисунок 5.1 - Возвратно-проточный циклон: 1- корпус; 2- выхлопная труба; 3- улитка; 4- входной патрубок; 5- бункер; 6- затвор для выгрузки пыли

Эффективность очистки в циклоне определяется размерами улавливаемых частиц, т.е. дисперсным составом пыли, и их плотностью, а также вязкостью очищаемого газа. Кроме того, эффективность очистки зависит от диаметра циклона и скорости газа в нём.

Поскольку величина центробежной силы обратно пропорциональна радиусу вращения, оказалось целесообразнее применять циклоны с корпусами малого диаметра, а для достижения заданной производительности аппарат для очистки выполнять в виде батареи из нескольких параллельно работающих циклонов малого диаметра, названных элементами батарейного циклона.

На рис.5.2 представлена конструкция батарейного циклона и его элемента с закручивающим устройством. Батарейный циклон состоит из цилиндрического корпуса – 1, перегородок -2 и 3, входного патрубка – 4, элементов батарейного циклона – 5, выхлопной трубы и бункера для сбора пыли.

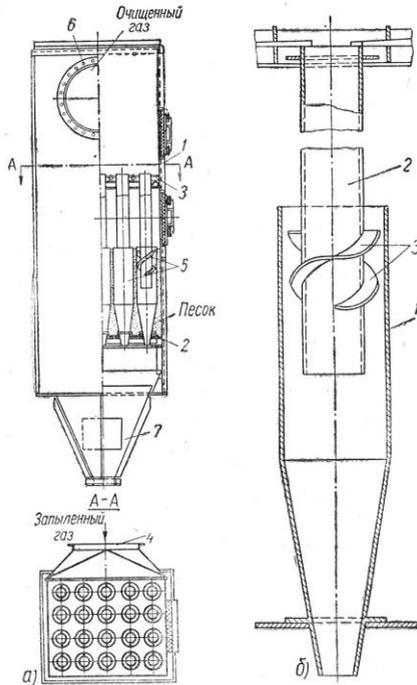


Рисунок 5.2 - Конструкция батарейного циклона (а), элемент батарейного циклона с закручивающим устройством (б)

Одним из конструктивных приёмов, обеспечивающих эффективную работу циклонов, является выполнение выхлопной трубы с винтовой поверхностью. Элемент батарейного циклона на рис.5.2б состоит из корпуса – 1, выхлопной трубы – 2 с винтовыми лопастями – 3.

Циклонные пылеуловители имеют следующие преимущества:

- 1) отсутствие движущихся частей;
- 2) надёжная работа при температурах до 500⁰С без конструктивных изменений;
- 3) возможность улавливания абразивных частиц при защите поверхности циклона специальными покрытиями или выборе износостойких материалов;
- 4) пыль улавливается в сухом виде;
- 5) гидравлическое сопротивление циклонов относительно незначительное и почти постоянно;
- 6) возможность очистки газов при высоком давлении;
- 7) пылеуловители просты в изготовлении, в обслуживании и ремонте;
- 8) рост запылённости газов не снижает функциональную эффективность очистки.

Степень очистки газов в циклоне определяется размерами улавливаемых частиц и наиболее эффективна для частиц от 5 до 15 мкм. Гидравлическое сопротивление высокоэффективных циклонов достигает 1250 – 1500 Па.

В технической характеристики циклона приводятся значения производительности, отнесенной к скорости газа в цилиндрической части аппарата $V=2,5$ и $V=3,5$ м/с. В обычных условиях оптимальной считается скорость 3,5 м/с, а в условиях работы с абразивной пылью принимают скорость 2,5 м/с.

В зависимости от температуры окружающей среды циклоны изготавливают из углеродистой стали при температуре до -40°C и из низколегированных сталей при температуре ниже -40°C .

5.2. Конструкции и принцип работы и рукавных фильтров

Рукавный или тканевый фильтр (рис. 5.3) состоит из корпуса – 9, в котором вертикально закреплены тканевые мешки (рукава) – 10. Нижние открытые концы рукавов закреплены на патрубках тарелки – 12 хомутами – 11. Верхние концы рукавов снабжены крышками (колпачками) – 7, подвешенными на общей раме – 6. Верхние концы рукавов крепятся к крышкам (колпачкам) хомутами – 8. Запыленный газ входит в аппарат через загрузочный люк – 16 и далее попадает в рукава. Проходя через фильтровальную поверхность рукавов твёрдые частицы осаждаются в порах между волокнами, сцепляются друг с другом и образуют пористую перегородку, обеспечивающую совместно с тканью хорошую степень очистки газа. Очищенный газ выводится из аппарата через выхлопной патрубок – 2 при открытом клапане – 1. При образовании пылевого слоя на внутренней поверхности рукава определённой толщины резко увеличивается гидравлическое сопротивление аппарата (до 2000 Па) и производят удаление пыли встряхиванием или обратной продувкой рукавов.

Встряхивание осуществляется при помощи специального кулачкового механизма – 5. В некоторых фильтрах, наряду с механическим встряхиванием, рукава продувают воздухом, который пропускают в направлении, обратном движению очищенного газа. Продувочный газ подают через патрубок – 3 при открытом клапане – 4. Обычно встряхивание и продувка рукавов производится каждые 5-8 минут и длится не более 20 секунд, причём переключение фильтра в рабочее положение и на очистку рукавов производится автоматически. Далее пыль попадает в коническое днище -13 и при помощи шнека -14 через секторный затвор – 15 удаляется из фильтра.

Запыленный газ просасывается через фильтр вентилятором или подается под небольшим избыточным давлением, что в дальнейшем исключает возможность подсоса воздуха через неплотности.

Рукавные фильтры состоят из нескольких секций и работают непрерывно с периодическим отключением какой-либо одной секции для

выгрузки пыли. Последовательное отключение и включение секций производится автоматически.

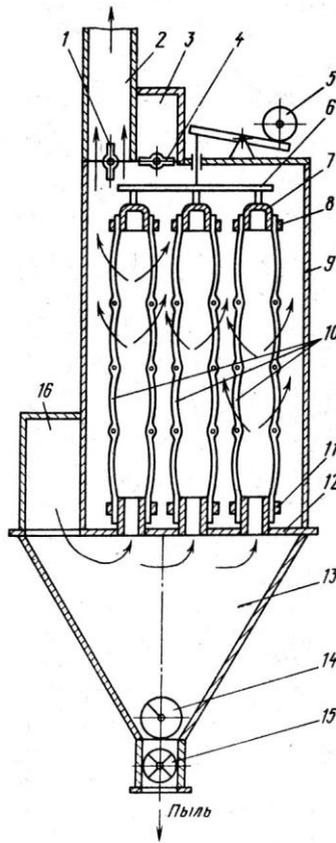


Рисунок 5.3 - Рукавный (тканевый) фильтр: 1- клапан выхода очищенного газа; 2- выхлопная труба очищенного газа; 3- выхлопная труба продувочного газа; 4- клапан продувочного газа; 5- механизм встряхивания; 6- балка крепления рукавов; 7- колпачки; 8- хомуты; 9- корпус; 10- рукава (тканевые мешки); 11- хомуты; 12- тарелка; 13- бункер; 14- шнек; 15- секторный затвор

Производительность рукавных фильтров зависит от предельно допустимой (по величине гидравлического сопротивления) удельной нагрузки ткани, определяемой объемом запыленного газа в м^3 ткани в 1 час. Удельная нагрузка обычно не должна превышать $120 - 150 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ ч}$.

Для изготовления рукавов применяют шерстяные, хлопчатобумажные и синтетические ткани (сукно, байка, ткань ЦМ, лавсан, стеклоткань и др.) Тканевые фильтры работают в диапазоне температур, верхний предел

которых определяется термостойкостью фильтровального материала, а нижний – точкой росы.

Достоинствами рукавных (тканевых) фильтров является высокая степень очистки от тонкодисперстной пыли до 1 мкм при максимальном содержании пыли в газе до 0,02 кг/м³ при степени очистки до 99%. К недостаткам рукавных фильтров можно отнести сравнительно быстрый износ фильтровальной ткани и непригодность для очистки горячих и влажных газов.

5.3. Устройство и принцип работы электрофильтров

При современном уровне развития техники пылеулавливания и очистки газов электрофильтры являются подчас единственными аппаратами для тонкой очистки газов от твердых и жидких веществ во многих отраслях промышленности. Они обеспечивают глубокую очистку газов (до 99%) от взвешенных частиц размерами от 0,01 мкм и более при концентрации этих частиц в газе до 50 г/м³ и выше.

На рис. 5.4 представлена принципиальная схема электрофильтра. Основным элементом электрофильтра является осадительная камера – 1, в которой размещены осадительные электроды – 2, выполненные либо в виде труб (цилиндрических или шестигранных) – 3, либо в виде пластин – 4. По образованным этими электродами каналам снизу вверх или горизонтально движется запылённый газ. Внутри каналов размещены коронирующие электроды, выполненные чаще всего из нихромовой проволоки диаметром от 2 до 5 мм.

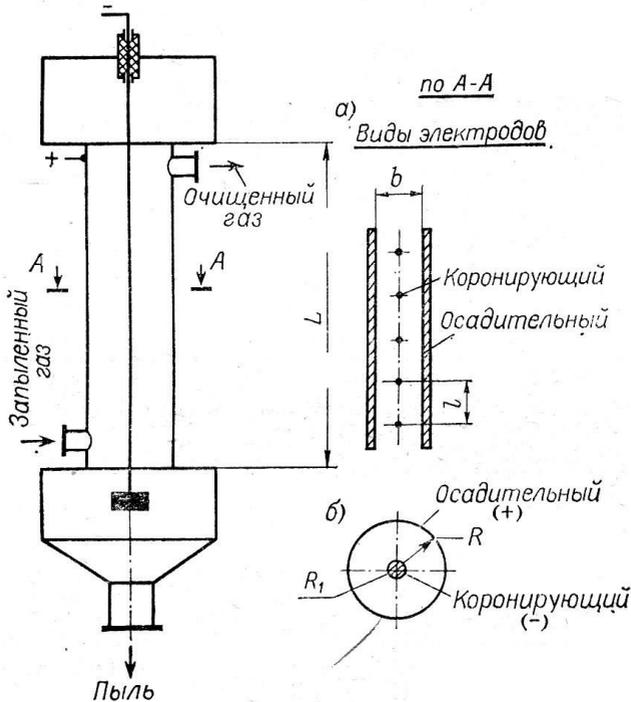


Рисунок 5.4 - Конструктивная схема электрофильтра

Подлежащий очистке газ поступает в электрофильтр, коронирующие электроды которого изолируются от земли и присоединяются к отрицательному полюсу агрегата питания, а осадительные электроды присоединяются к положительному полюсу и заземляются.

При создании между электродами разности потенциалов в 50 – 70 кВ газ ионизируется и заряженные ионами твердые частицы переносятся к осадительному электроду. В процессах электроосаждения происходят следующие электрические явления. Вследствие высокой разности потенциалов на электродах в слое газа у катода образуется односторонний поток электронов, направленный к аноду. В этом слое в результате соударений электронов с нейтральными молекулами газ ионизируется. Внешним признаком ионизации является свечение слоя газа или образования «короны» у катода. При ионизации образуются как положительные, так и отрицательные ионы. Положительные остаются вблизи «короны», а отрицательные направляются с большой скоростью к аноду, встречая и заряжая на своём пути взвешенные в газе частицы.

Получившие отрицательный заряд частицы под действием электрического поля перемещаются к аноду, т.е. к осадительному электроду, где и осаждаются. Электроды периодически встряхивают путем сообщения возбуждающего усилия, способного оторвать слой пыли с поверхности

осадительных электродов. Для отряхивания электродов применяют механические системы ударно-молоткового, пневматического, магнитно-импульсного или вибрационного действия.

Для очистки высокотемпературных дымовых газов электростанций, вращающихся печей цементных и огнеупорных заводов, мартеновских печей применяют «сухие» электрофильтры. Для тонкой очистки холодных газов от пыли, смол, туманов применяют «мокрые» электрофильтры.

Влияние температуры и влажности очищаемого газа на эффективность работы электрофильтров значительно. Снижение температуры газов уменьшает вязкость и сопротивление движению заряженных частиц к осадительному электроду, увеличивает электрическую прочность разрядного промежутка, снижает величину удельного электрического сопротивления пыли. Значительное снижение температуры газов влияет на эффективность электрофильтров вследствие снижения скорости газа в активной зоне. Конструктивное отличие «сухих» и «мокрых» электрофильтров в основном связано с различием в выборе конструкционных материалов.

Подбор электрофильтров производится в соответствии с заданными условиями его работы по площади сечения активной зоны с последующим проверочным расчетом степени очистки.

Площадь сечения активной зоны электрофильтра:

$$F = K \cdot V_{\Gamma} / \omega_{\Gamma}, \quad (5.1)$$

где V_{Γ} – объёмный расход газа при температуре очистки, $\text{м}^3/\text{с}$; ω_{Γ} – скорость газа в электрофильтре (0,8 – 2), $\text{м}/\text{с}$; $K = 1,1$ – коэффициент запаса, учитывающий подсос воздуха.

Степень очистки газа в электрофильтре:

$$\eta = \exp(-\omega_{\Gamma} \cdot a), \quad (5.2)$$

где ω_{Γ} – скорость дрейфа частиц по направлению к осадительному электроду, $\text{м}/\text{с}$; a – коэффициент, характеризующий геометрические размеры аппарата.

Коэффициент a для всех типов осадительных электродов рассчитывают по формуле:

$$a = L \cdot \Pi / (F \cdot \omega_{\Gamma}); \quad (5.3)$$

где L – длина осадительного электрода, м ; Π – активный периметр осадительного электрода, м ; F – площадь сечения активной, ограниченной стенками осадительного электрода, м^2 .

Для пластинчатых электродов $\Pi/F = 2/b$, где b – расстояние между пластинами. Для всех электрофильтров $b = 0,3 \text{ м}$.

Далее рассчитывается напряженность электрического поля, линейная плотность тока и критическое напряжение возникновения коронного разряда.

Основные преимущества электрофильтров:

- высокая степень очистки (до 99%);
- низкие энергетические затраты, состоящие из потерь энергии на преодоление гидравлического сопротивления аппарата, не превышающие, как

правило, 150 – 200 Па и затрат энергии обычно 0,3 – 1,8 МДж (0,1 кВт ч) на 1000 м³ газа;

- возможность эффективного улавливания частиц размером до 0.005 мкм, при максимальном содержании частиц в газе от 0,01 до 0,05 мкм;

- возможность улавливания горячих газов до 500⁰С;

- возможность полной автоматизации электрофильтров.

К недостаткам можно отнести:

- высокая чувствительность аппарата к изменению технологических параметров процесса (температура газа, влажность, объём газа и др.).

- высокая чувствительность к механическим дефектам в электродной системе.

6. Типовое оборудование для гидромеханических процессов

6.1. Устройство и принцип действия центробежного насоса

Насосами называют машины для перемещения и создания напора жидкостей всех видов, а также механических смесей жидкостей с твердыми, коллоидными веществами и газами. Насосы – гидравлические машины, которые преобразуют механическую энергию двигателя в энергию перемещаемой жидкости, повышая её давление. Разность давлений жидкости в насосе и трубопроводе обуславливает её перемещение.

Центробежные насосы относятся к лопастным гидравлическим машинам, в которых давление создаётся центробежной силой, действующей на жидкость при вращении лопастных колёс.

Под действием центробежной силы при вращении рабочего колеса с лопатками происходит равномерно и непрерывно всасывание и нагнетание жидкости в центробежном насосе. Центробежная сила отбрасывает жидкость в канал переменного сечения между стенкой спиралеобразного корпуса и рабочим колесом, где скорость жидкости уменьшается до значения, равного скорости в нагнетательном патрубке. При этом (согласно уравнению Бернулли) происходит преобразование кинетической энергии жидкости в статический напор, что обеспечивает повышение давления жидкости. На входе в рабочее колесо создаётся разрежение, и жидкость непрерывно поступает в насос через всасывающий патрубок (рис.6.1).

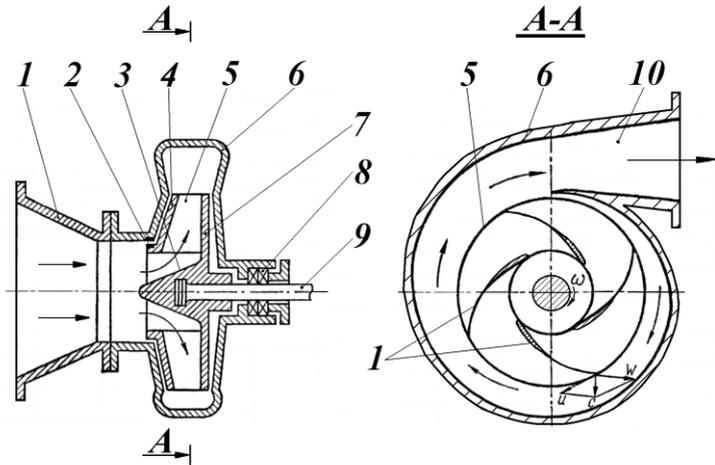


Рисунок 6.1 - Схема центробежного насоса: 1-всасывающий патрубок; 2- уплотнение; 3- крепление рабочего колеса; 4 – передний диск; 5 – лопасти; 6 - спиралевидный отвод; 7 – задний диск; 8 – уплотнение вала; 9 – вал; 10- напорный патрубок

Для создания большого напора и лучшего стекания жидкости лопаткам придают выпуклую форму, причем рабочее колесо должно вращаться выпуклой стороной в направлении нагнетания.

Давление, развиваемое центробежным колесом, зависит от скорости вращения. Вследствие значительных зазоров между колесом и корпусом насоса разрежения, возникающего при вращении колеса, не достаточно для подъема жидкости по всасывающему трубопроводу, если он и корпус не залиты жидкостью. Поэтому перед пуском центробежный насос заполняют перекачиваемой жидкостью.

Большую группу центробежных насосов представляют насосы консольного типа. Консольный центробежный насос одностороннего всасывания типа К представлен на рис.6.2.

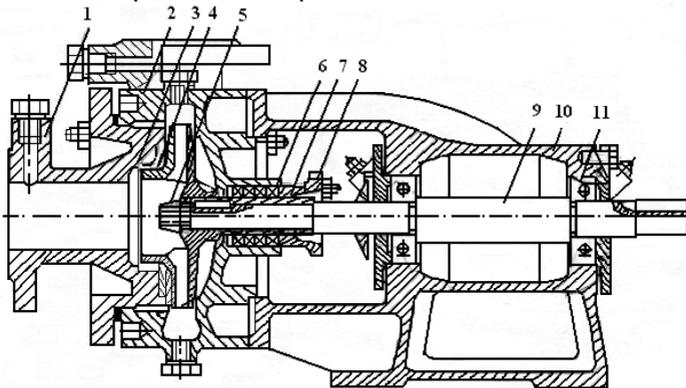


Рисунок 6.2 - Конструкция центробежного консольного насоса:

- 1-фланец всасывающего патрубка; 2-крышка; 3-уплотнение; 4-рабочее колесо; 5-крепежная гайка; 6- сальник; 7-защитная втулка; 8-прижимная втулка; 9-вал; 10-корпус; 11-подшипник

Напор одноступенчатого центробежного насоса, как правило, не превышает 50 м. Для создания более высоких напоров применяют многоступенчатые центробежные насосы.

6.2. Устройство и принцип действия центробежного компрессоров

Центробежным компрессором называется лопаточная машина, в которой происходит преобразование подводимой механической работы в энергию давления газа, при этом сжатие осуществляется за счёт действия центробежных сил инерции на массы рабочего тела, увлекаемые во вращательное движение совместно с рабочим колесом компрессора.

Конструкция центробежного компрессора представлена на рис.6.3.

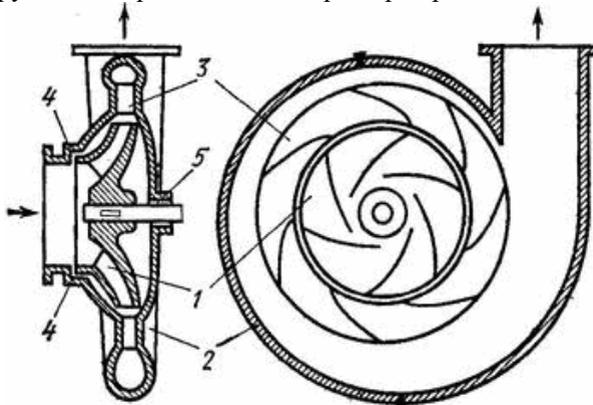


Рисунок 6.3 - Конструкция центробежного компрессора: 1- рабочее колесо; 2- корпус; 3- отвод (лопаточный диффузор); 4- подвод (входное устройство); 5- вал

Подводом называется часть проточной полости центробежного компрессора, предназначенная для создания равномерного осесимметричного потока рабочего тела (газа) на входе в рабочее колесо. При осесимметричном входе вектор абсолютной скорости потока направлен по оси симметрии компрессора. Под абсолютной скоростью понимается скорость потока, измеренная в неподвижной относительно центробежного компрессора системе координат, одна из осей которой совпадает с осью симметрии машины.

Подвод в центробежных компрессорах изготавливают в форме сужающегося канала (конфузора). Конфузорный эффект позволяет увеличить скорость движения рабочего тела во входном устройстве (до 70...90 м/сек) за счет снижения давления, т. е. потенциальная энергия переходит в кинетическую. Вследствие наличия газодинамического трения потока о

стенки канала в конфузоре возникают потери энергии, составляющие порядка 5%.

В некоторых случаях вход газа в рабочее колесо может выполняться с предварительной закруткой.

Рабочее колесо представляет собой диск с торцевыми радиальными лопатками, образующими расширяющиеся межлопаточные каналы. На входе в рабочее колесо поток направлен по оси симметрии компрессора. Перед входом в межлопаточные каналы поток разворачивается на 90° и направление течения потока изменяется из осевого в радиальное. В межлопаточном канале газ взаимодействует с вращающейся лопаткой и центробежные силы инерции совершают работу по перемещению газа по радиусу рабочего колеса от центра к периферии. При этом на входе в рабочее колесо образуется значительное разрежение, вызывающее поступление в компрессор новой порции газа. Работа центробежных сил на пути газа по межлопаточным каналам сопровождается увеличением абсолютной скорости и ростом кинетической энергии, в рабочем колесе повышается давление.

Отводом (диффузором), называется часть проточной полости центробежного компрессора, в котором кинетическая энергия потока (динамическое давление) преобразуется в потенциальную энергию (статическое давление). Он устанавливается непосредственно за рабочим колесом. Наибольшее распространение в центробежных лопаточных машинах получил лопаточный отвод (лопаточный диффузор) с кольцевой полостью

Лопаточный диффузор – 2 (рис. 6.4) представляет собой диффузорный канал с профилированными лопатками. В лопаточном диффузоре происходит поворот потока рабочего тела, уменьшение скорости его движения и повышение давления. Кольцевая полость – 3 представляет собой безлопаточный диффузор, в котором происходит дальнейшее снижение скорости потока вследствие увеличения проходной площади из-за роста радиуса. Кроме того, в безлопаточном диффузоре происходит выравнивание скоростей потока после рабочего колеса. Таким образом, в лопаточном диффузоре с кольцевой полостью происходит дополнительное повышение статического давления.

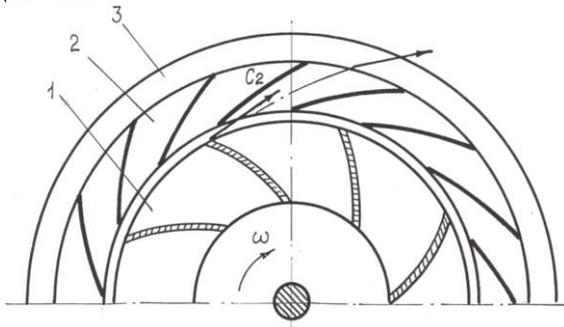


Рисунок 6.4 - Корпус центробежного компрессора в разрезе: 1- рабочее колесо; 2- лопаточный диффузор; 3- безлопаточный диффузор

В центробежном компрессоре давление повышается как в рабочем колесе, так и в лопаточном отводе (лопаточном диффузоре). Кроме того, повышение давления происходит и в нагнетательной улите, но её вклад по сравнению с рабочим колесом и диффузором невелик в силу низких скоростей движения газа в улите. Улита – разновидность безлопаточного диффузора.

Основное повышение давления происходит в рабочем колесе.

Отношение работы по повышению давления в рабочем колесе (L_k) к общей работе по повышению давления в ступени центробежного компрессора (L_c) называется степенью реактивности.

$$Q = \frac{L_k}{L_c} \quad (6.1)$$

В современных центробежных компрессорах $Q = 0.6 \dots 0.7$, т.е. основное повышение давления происходит в рабочем колесе.

Корпус. Ротор центробежного компрессора устанавливается в корпусе на двух опорах (консольно или двухопорно). Передняя опора ротора обычно представляет собой опорный подшипник скольжения, воспринимающий радиальные нагрузки. Задняя опора ротора, как правило, представляет собой опорно-упорный подшипник скольжения, который кроме радиальных нагрузок воспринимает и осевую нагрузку. Последняя возникает в результате разных по значению и направлению давлений, действующих на внешние поверхности рабочего колеса (составляющая от разности давлений) и в результате взаимодействия потока рабочего тела с рабочим колесом при повороте его на 90^0 (инерционная составляющая).

В одной ступени центробежного компрессора можно получить степень повышения давления $\Delta_{ст.} = 1.2 \div 1.35$ (для природного газа), и $\Delta_{ст.} \leq 1.6$ (для воздуха). При необходимости получения больших значений степени повышения давления центробежные компрессоры выполняют многоступенчатыми (двух – реже трёх или четырёхступенчатыми). На магистральных газопроводах в составе газоперекачивающих агрегатов применяются двухступенчатые центробежные нагнетатели газа, обеспечивающие общую степень повышения давления $\Delta_k = 1.35 \dots 1.45$.

6.3. Устройство и принцип действия объемных роторно-пластинчатых насосов и компрессоров

В роторе роторно-пластинчатого насоса (рис. 6.5) имеются радиальные или расположенные под углом пазы, в которые вставлены пластины-3. Статор-4 по отношению к ротору расположен с эксцентриситетом – e . К торцам статора и ротора с малым зазором ($0,02-0,03$ мм) прилегают торцевые распределительные диски-5 с серповидными окнами. Окно-6 каналами в корпусе соединено с гидролинией всасывания-7, а окно-8 с напорной гидролинией (нагнетания)-9. Между ними устанавливаются уплотнительные перемычки-10, обеспечивающие герметизацию зон всасывания и нагнетания.

Центральный угол, образованный этими перемычками, больше угла между двумя соседними пластинами.

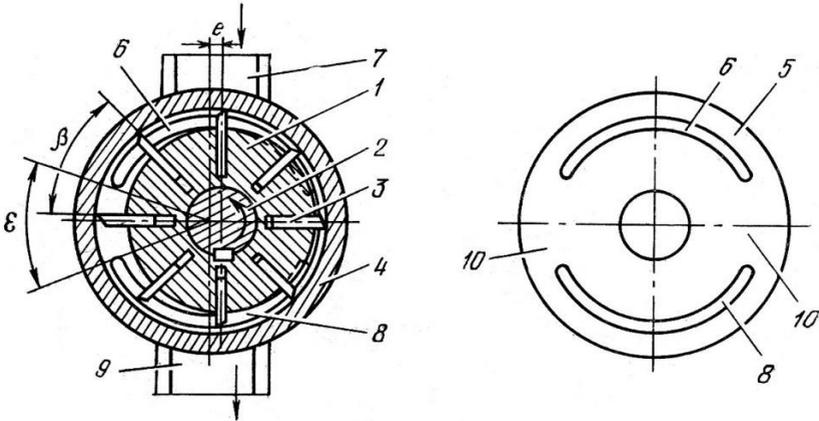


Рисунок 6.5 - Роторно-пластинчатый насос однократного действия: 1- ротор; 2- вал; 3- пластина; 4- корпус (статор); 5- распределитель; 6- окно гидролинии всасывания; 7; 8- окно гидролинии нагнетания; 9; 10- перемычка

Роторно-пластинчатый насос однократного действия работает следующим образом: при вращении ротора -1 под действием центробежной силы или пружин пластины -3 выдвигаются из пазов и прижимаются к внутренней поверхности статора. Благодаря эксцентриситету объём рабочих камер между пластинами вначале увеличивается и происходит всасывание, а затем уменьшается и происходит нагнетание. Жидкость из линии всасывания через окна распределительных дисков поступает в рабочую камеру, а затем через другие окна вытесняется в напорную линию.

Средняя действительная подача при частоте вращения n (об/мин) с учетом стеснения объёма лопатками (пластинами) и утечки жидкости будет равна:

$$Q = \frac{ben}{60} (\pi D - Zl) \eta_0 \quad (6.2)$$

где b – ширина ротора (0,8-1,7D), м;

e – эксцентриситет (0,05-0,08D), м;

D – диаметр расточки статора, м;

l – толщина пластины, м; Z – число пластин (6-12);

η_0 – объёмный КПД (0,7- 0,9).

В насосах двухкратного действия (рис. 6.6), в отличие от насосов однократного действия, статор имеет в поперечном сечении овальную форму. В этих насосах ротор-1 и статор-2 – соосны. Эти насосы имеют по две симметрично расположенные полости всасывания и полости нагнетания. Число пластин-3 в насосах двойного действия принимается чётным. Торцевые распределительные диски-5 имеют четыре окна. Два окна-6 каналами в корпусе соединяются с гидролинией всасывания-7, а другие два окна-8 – с

гидролинией нагнетания-9. Также как и в насосах однократного действия, между окнами имеются уплотнительные перемычки -10. Для герметизации зон всасывания и нагнетания должно быть соблюдено условие $\varepsilon > \beta$ (рис. 6.6).

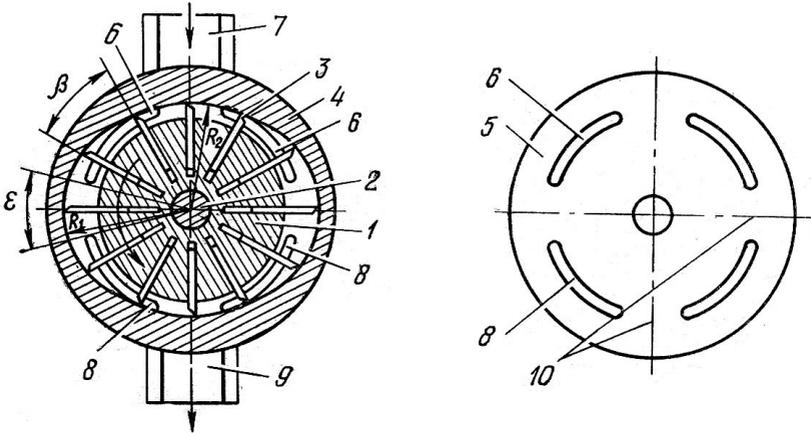


Рисунок 6.6 - Роторно-пластинчатый насос двукратного действия: 1- ротор; 2- вал; 3- пластины; 4- корпус (статор); 5- распределитель; 6- окно гидролинии всасывания- 7; 8- окно гидролинии нагнетания- 9; 10 - перемычка

Основные этапы работы насоса:

1. После прохождения пластинами -3 участка с минимальным зазором между ротором -1 и статором -4 объём рабочей камеры увеличивается. Это приводит к тому, что в ней резко снижается давление, а значит создается область разрежения, происходит соединение со всасывающей магистралью и наполнение рабочей камеры перекачиваемой жидкостью.

2. Когда рабочая камера, наполненная жидкостью, проходит следующий участок с минимальным зазором между ротором и статором, в ней увеличивается давление рабочей среды, что способствует вытеснению последней в нагнетательную магистраль.

Таким образом, за счет овальной формы поперечного сечения корпуса (статора), весь процесс всасывания и нагнетания происходит два раза.

Роторно-пластинчатые компрессоры относятся к машинам объёмного типа, в которых, как и в роторно-пластинчатых насосах, увеличение давления газа происходит вследствие уменьшения объёма. К ротационным компрессорам относятся:

- роторно-пластинчатые (одновальные);
- жидкостно-кольцевые (одновальные);
- двух-роторные (двухвальные); винтовые (двух и трехвальные);
- с качающимся ротором (одновальные);
- спиральные компрессоры.

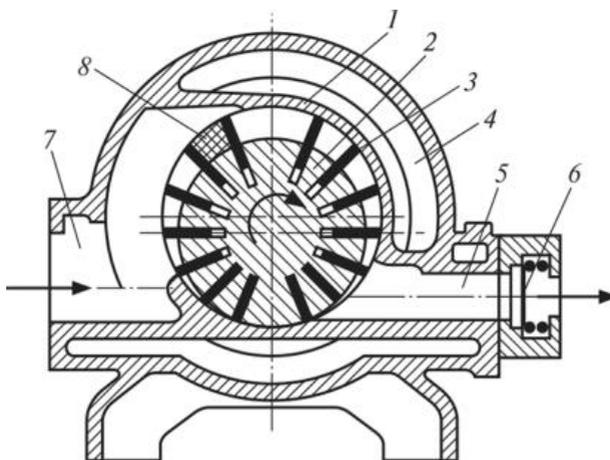


Рисунок 6.7 - Роторно-пластинчатый компрессор: 1- корпус(статор); 2- ротор; 3- пластины; 4- водяная рубашка; 5- нагнетательный патрубок; 6- клапан; 7- всасывающий патрубок; 8- сектор переменного сечения

В роторно-пластинчатом компрессоре (рис. 6.7) газ поступает в компрессор через всасывающий патрубок - 7. При вращении ротора -2 рабочие пластины -3 выдвигаются из пазов и плотно прижимаются к стенкам корпуса, образуя герметичные сектора между соседними пластинами. Сжатие газа происходит в герметичных секторах -8 при непрерывном уменьшении рабочего объема при вращении ротора, установленного в статоре - 1 с эксцентриситетом. В нагнетательный трубопровод сжатый газ поступает через патрубок -5. В нижней части статора пластины полностью утоплены в пазы ротора, который прижат к корпусу, что должно исключить прорыв газа со стороны нагнетания при всасывании.

При скольжении пластин по стенкам статора возможен разогрев как стенок, так и газа, что неблагоприятно сказывается на работе компрессора. В ротационно-пластинчатых компрессорах предусмотрены водяные рубашки -4, предназначенные для охлаждения стенок статора.

7. Типовое оборудование для реализации химических процессов

7.1. Конструкция реактора высокого давления с внутренним теплообменом

Реактором высокого давления с внутренним теплообменом является колонна синтеза аммиака, являющегося важнейшим продуктом для получения азотных удобрений. В агрегатах по производству аммиака мощностью 1360 – 1500 т/сутки получили распространение колонны с аксиальной полочной катализаторной коробкой.

Особенностью процесса синтеза аммиака является высокая температура синтеза $500 - 550^{\circ}\text{C}$ и высокое давление 32 МПа. Процесс синтеза проходит в присутствии катализатора. В конструкции реактора (колонны) синтеза используется принцип внутреннего теплообмена, когда в качестве хладагента для охлаждения стенок колонны и создания оптимального теплового режима в реакционной зоне используется холодный исходный компонент (синтез-газ).

Основной поток холодного синтез-газа поступает в колонну снизу (рис. 7.1), проходит по кольцевому зазору между корпусом колонны -15 и кожухом катализаторной коробки – 3, охлаждая при этом стенки корпуса колонны и снимая излишки тепла из реакционной зоны. Далее синтез-газ поступает в межтрубное пространство теплообменника – 6. Здесь синтез-газ нагревается отходящим из реакционной зоны аммиаком до температуры, близкой к температуре реакции порядка $420 - 450^{\circ}\text{C}$ и проходит последовательно четыре слоя катализатора - 8,10,12,14. Между слоями катализатора циркулирует исходный компонент в качестве холодного байпаса, регулируя температуру в реакционной зоне.

После четвертого слоя катализатора синтетический аммиак при температуре $500 - 550^{\circ}\text{C}$ поднимается по центральной циркуляционной трубе -2, проходит по трубкам теплообменника – 6, нагревая исходную газовую смесь и охлаждаясь при этом до $320 - 350^{\circ}\text{C}$. С этой температурой продукт покидает колонну.

Корпус катализаторной коробки изготовлен из высоколегированной хромоникельмолибденовой стали 10X18H12M2T, корпус колонны и кожух теплообменника из 12X18H10T.

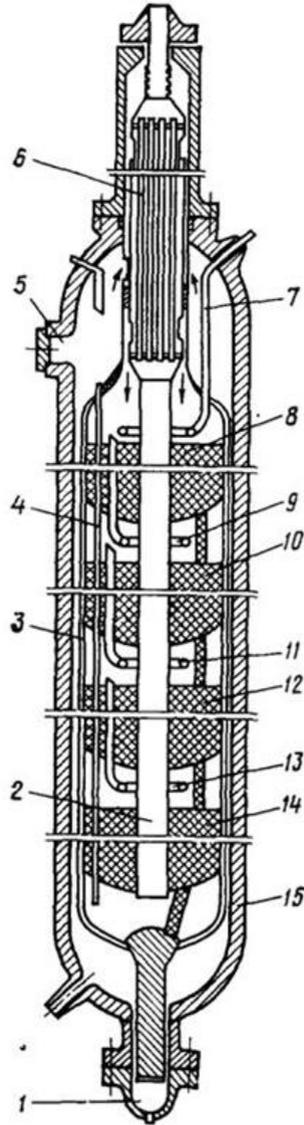


Рисунок 7.1 - Колонна синтеза аммиака:

- 1 – крышка штуцера выгрузки катализатора; 2 – центральная циркуляционная труба; 3 – корпус катализаторной коробки; 4 – термопара; 5 - штуцер;
 6 – теплообменные трубки встроенного кожухотрубчатого теплообменника;
 7, 9, 11, 13 – трубы холодного байпаса; 8,10,12,14 – слои катализатора;
 15 – корпус высокого давления реактора (колонны)

7.2. Конструкция реактора идеального смешения с рубашкой и перемешивающим устройством

Реакторы идеального смешения с рубашкой и перемешивающим устройством используется в химической технологии для осуществления химических процессов, протекающих с теплообменом реагирующих компонентов и когда необходимо интенсивное перемешивание.

Перемешивание способствует выравниванию концентрации компонентов в объёме реактора, усреднению температуры, исключению разделения сложных систем, отложению осадков, налипания полимерных вязкотекучих компонентов на стенки аппарата, их загустевания или полимеризации.

Иногда перемешивание служит для эмульгирования одной жидкости в другой или диспергирования жидкости, а иногда основная задача перемешивания заключается в создании высоких скоростей среды около теплообменных поверхностей с целью интенсификации теплообмена.

В зависимости от числа оборотов мешалки условно делятся на тихоходные и быстроходные. К тихоходным относят лопастные, рамные, якорные и листовые, имеющие число оборотов не более 80-100 об/мин. К быстроходным – турбинные и пропеллерные.

При выборе типа мешалки и её параметров учитывают требования процесса, свойство жидкости (вязкость, наличие осадков, и т.д.), форму аппарата и другие факторы. При выборе следует использовать следующие рекомендации:

1) лопастные мешалки (рис.7.2а, б) относятся к группе тихоходных; их недостатками являются малая интенсивность перемешивания и отсутствие значительных вертикальных потоков, вследствие чего они мало эффективны для взмучивания тяжелых осадков и работы с расслаивающимися жидкостями. Однако, лопастные мешалки широко применяют для различных процессов. Они просты по конструкции и достаточно эффективны при работе с вязкими жидкостями и в аппаратах значительного объема. Часто для улучшения осевого перемешивания жидкости применяют лопастные мешалки с наклонными лопастями.

2) рамные (в) мешалки являются разновидностью лопастных, состоящих из двух горизонтальных лопастей, соединенных несколькими вертикальными планками. Эти мешалки применяют в аппаратах большой ёмкости (до 100 м³), они обеспечивают удовлетворительное перемешивание жидких сред большой вязкости.

3) листовые мешалки сравнительно редко и, в основном, для маловязких жидкостей. Для повышения эффективности перемешивания в листовых мешалках высверливают отверстия.

4) якорные мешалки (д) применяют для обработки вязких, загрязненных и термолабильных жидкостей. Профиль мешалки повторяет очертания аппарата, зазор между стенкой аппарата и мешалкой делают

минимальными. Лопастей такой мешалки создают интенсивное перемешивание непосредственно около стенок и очищают их от налипших осадков. Для особо вязких сред применяют якорные мешалки с «пальцами» - дополнительными вертикальными и наклонными планками. Общие недостатки тихоходных мешалок: громоздкость, значительные пусковые нагрузки, необходимость применения редукторов с большим передаточным отношением.

5) турбинные мешалки (в) относятся к быстроходным. Они работают по принципу центробежного насоса – всасывают жидкость в середину и за счет центробежной силы отбрасывают к периферии. Турбинные мешалки сообщают жидкости кроме кругового и интенсивное радиальное движение. Турбинные мешалки, как и рабочие колеса центробежных насосов бывают открытого и закрытого типа. Турбинные мешалки применяют при широком диапазоне вязкостей и плотностей перемешиваемых жидкостей, а также для подъема тяжелых суспензий, эмульгирования жидкостей с большой разностью плотностей, диспергирования газов в жидкостях.

В аппаратах с турбинными мешалками обязательна установка отражательных перегородок. При отсутствии перегородок образуется глубокая воронка, резко ухудшающая эффект перемешивания. Обычно устанавливают четыре перегородки в виде радиально расположенных вертикальных планок шириной не более $0,1D$.

6) Пропеллерные мешалки (г) создают мощные осевые потоки жидкости. Чем больше угол подъема лопасти, тем интенсивнее осевые потоки, но при этом возрастает расход мощности на перемешивание. Пропеллерные мешалки применяют для химических процессов растворения, эмульгирования, взмучивания, диспергирования и весьма эффективны в интенсификации процесса теплообмена в реакторе. В аппаратах с пропеллерными мешалками также целесообразно устанавливать направляющие перегородки.

С целью увеличения насосного действия пропеллерные мешалки иногда устанавливают внутри диффузора, что значительно улучшает перемешивание. Но усложняет конструкцию реактора.

Интенсивность перемешивания зависит от частоты вращения вала и конструкции мешалки. Привод перемешивающего устройства осуществляется, как правило, при помощи моторов-редукторов с регулированием число оборотов мешалки.

Для поддержания оптимального температурного режима в реакторах используют различные теплообменные устройства, обеспечивающие нагрев или охлаждение реакционной массы. По конструктивному оформлению их можно разделить на встроены и выносные.

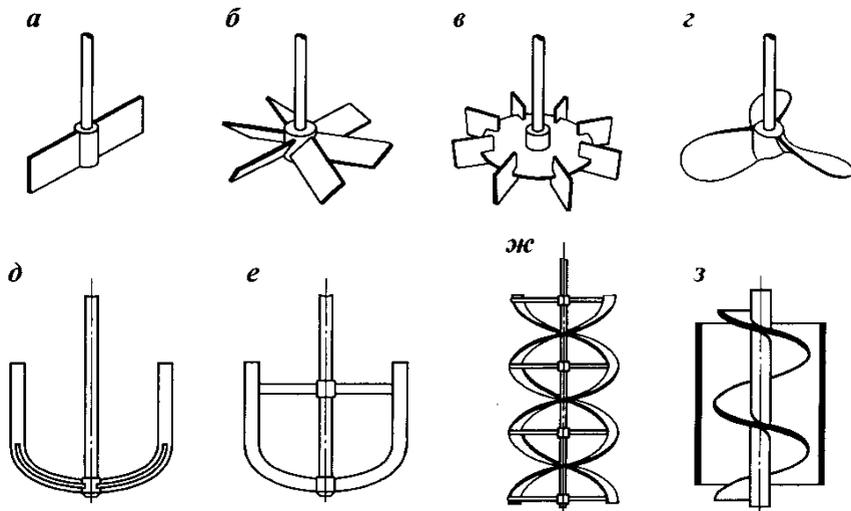


Рисунок 7.2 - Конструкции мешалок: а – лопастная; б – лопастная с наклонными лопастями; в – турбинная; г – пропеллерная; д – якорная; е – рамная; ж - ленточная; з – шнековая

Встроенные в аппарат устройства в свою очередь подразделяют на наружные и внутренние. К наружным относятся рубашки и змеевики, приваренные снаружи к стенкам реактора. К внутренним относятся погружные теплообменные элементы, чаще всего – змеевики.

С точки зрения удобства контроля состояния реактора и теплообменных устройств, а также простоты конструкции и обеспечения более мягкого и равномерного нагрева реакционной массы, для уменьшения расхода энергии на перемешивание предпочтение отдают наружным теплообменным устройствам – рубашкам.

Теплообмен в реакторах идеального смешения осуществляется при помощи рубашек. Рубашки могут быть приварными или съёмными. Конструкции разъёмных соединений рубашек с цилиндрическими и комическими корпусами реакторов показаны на рис.7.4.

Несъёмные рубашки приваривают к корпусу аппарата, а съёмные крепят при помощи фланцев. Съёмными рубашки делают на аппаратах из чугуна или цветных металлов, а также при использовании загрязнённого теплоносителя.

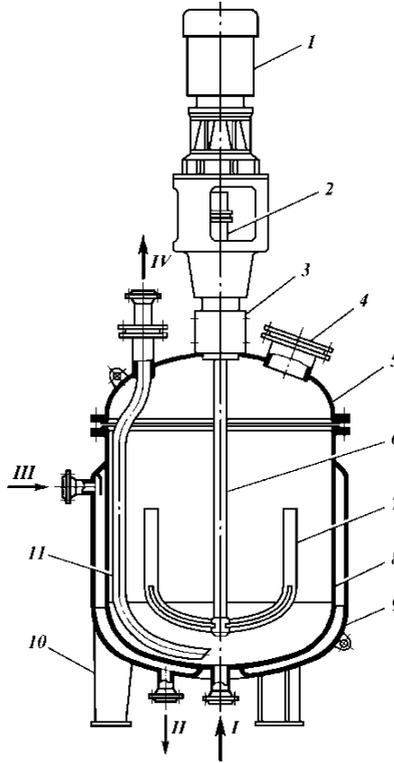


Рисунок 7.3 - Реактор идеального смешения с рубашкой и перемешивающим устройством: 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – узел уплотнения вала; 4 – люк-лаз; 5- крышка; 6- вал; 7- якорная мешалка; 8- корпус; 9- рубашка; 10- опорные лапы; 11- труба для вывода продукта

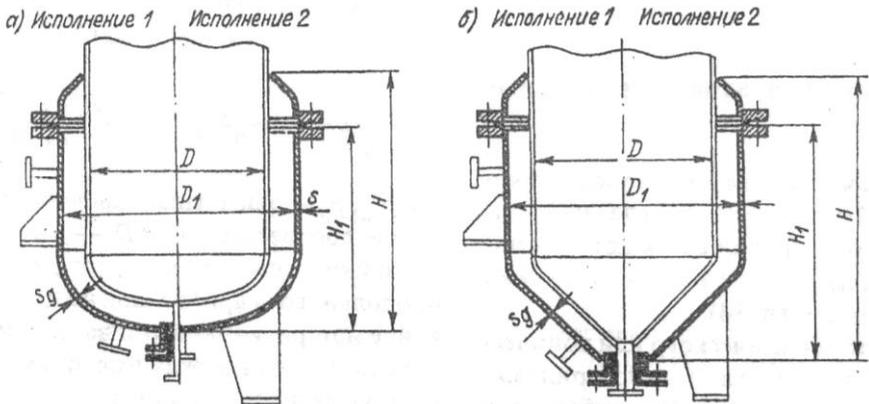


Рисунок 7.4 - Конструкции съёмных теплообменных рубашек реакторов идеального смешения

Приварку осуществляют с помощью отбортовки или приварного кольца. Приварка с помощью отбортовки более предпочтительна. Зазор между стенками рубашки и корпуса делают минимальным с целью увеличения скорости теплоносителя. Диаметр рубашки обычно принимают на 50-100 мм больше диаметра аппарата, а приваривают на 80-150 мм ниже соединения крышки с корпусом.

Пар подают в рубашку всегда через верхний штуцер, а конденсат отводят через нижний. Жидкий же теплоноситель вводят через нижний штуцер, а выводят через верхний.

При больших давлениях в рубашке корпус аппарата, нагруженный наружным давлением, работает в очень невыгодных условиях, что вызывает увеличение толщины его стенок. Поэтому сплошные рубашки применяют при давлении не более 0.8-1.0 МПа. При больших давлениях целесообразно применять рубашки с «вмятинами». Для этого на их поверхности высверливают отверстия диаметром 40-5- мм с шагом между ними 100-300 мм, края которых отгибают к корпусу реактора и приваривают. Корпус аппарата при этом оказывается жестко связанным с корпусом рубашки. Расстояние между стенками корпуса и рубашки делают минимальными (20-30 мм), чтобы облегчить отбортовку края отверстий. Рубашки с «вмятинами» применяют при давлениях до 3-4 МПа. Толщина стенки корпусов аппаратов с рубашками с «вмятинами» оказывается значительно меньше, чем с обычными рубашками при прочих равных параметрах.

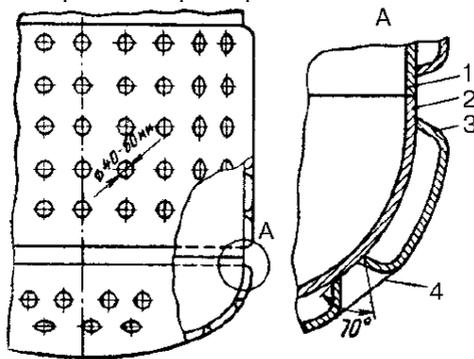


Рисунок 7.5 - Рубашка реактора с «вмятинами»: 1 – корпус реактора; 2 – днище; 3 – рубашка; 4 – отбортованный край

Приварные элементы на поверхности аппарата располагаются по разному: в виде спирали, навитой на цилиндрический корпус аппарата, или зигзагообразно по образующей цилиндра. Приварные теплообменные элементы изготавливают из труб, полутруб или профильного проката (уголков или швеллеров). Элементы из профильного проката применяют только при низких давлениях теплоносителей.

При применении в качестве теплоносителей жидкости коэффициент теплоотдачи к стенке аппарата в значительной степени зависит от скорости. В

сплошных рубашках условия теплообмена неблагоприятные из-за низких скоростей теплоносителей. Чтобы увеличить скорость жидкости в рубашке к корпусу аппарата приваривают ребра (пластины) по спирали, которые к тому же, придают корпусу дополнительную жесткость. Приварные ребра увеличивают эффективность теплообмена в 6-7 раз (рис.7.6).

Если поверхность наружных теплообменных устройств не обеспечивает требуемой поверхности теплообмена, в реактор дополнительно устанавливают внутренние теплообменные устройства в виде змеевиков различных типов.

Конструктивный расчет реакторов смешения периодического действия сводится к определению рабочего объема, диаметра и высоты.

Реактор смешения периодического действия. Используя уравнение материального баланса, можно получить общее характеристическое уравнение реактора идеального смешения периодического действия:

$$CA - (CA + dCA) - r_A \tau = 0, \quad (7.1)$$

где CA – концентрация ключевого компонента; r_A – скорость химической реакции по этому компоненту; τ – время протекания реакции.

Ключевым является компонент, по которому рассчитана скорость химического взаимодействия реагентов.

Тогда из последнего уравнения легко получить

$$d\tau = - \frac{dC_A}{r_A} \quad (7.2)$$

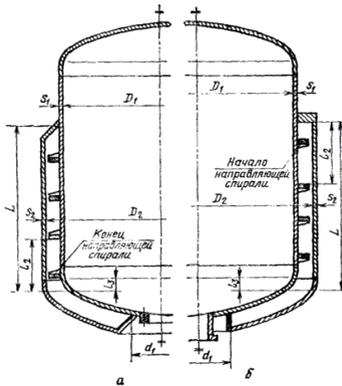


Рисунок 7.6 - Рубашка реактора с приварными ребрами

Интегрируя это уравнение в пределах от 0 до τ и от CA_0 до CA , получим время пребывания реагентов в реакционном пространстве

$$\tau = - \int_{CA_0}^{CA} \frac{dC_A}{r_A} = \int_{CA}^{CA_0} \frac{dC_A}{r_A} = \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} \quad (7.3)$$

где X_A – степень превращения ключевого реагента; CA_0 – его начальная концентрация.

Объем такого реактора будет определяться одновременной загрузкой реагентов, которая зависит от средней годовой производительности и времени пребывания реагентов в реакторе. Тогда рабочий объем реакционной зоны будет равен:

$$V = \frac{G\tau}{\rho} \quad (7.4)$$

где G —производительность реактора по ключевому реагенту, кг/с;

τ —среднее время пребывания реагентов в реакторе, с;

ρ —плотность реагентов, кг/м³.

Реактор смешения непрерывного действия. Для реактора идеального смешения непрерывного действия уравнение баланса массы будет иметь вид

$$v_0CA - v_0(CA + dCA) - r_A V = 0, \quad (7.5)$$

где v_0 —объемный расход (подача) реагентов, м³/с;

V —объем реактора, м³.

Так как в реакторе идеального смешения непрерывного действия $r_A = \text{const}$, то:

$$\frac{V}{v_0} = t = \frac{1}{r_A} \int_{C_A}^{C_{A0}} dC_A = \frac{C_{A0} - C_A}{r_A} = \frac{C_{A0} X_A}{r_A} \quad (7.6)$$

где t —условное время пребывания реагентов в зоне реакции, и рабочий объем реактора определится формулой:

$$V = V_{0t}. \quad (7.7)$$

Общий объем аппарата периодического и непрерывного действия всегда несколько больше рабочего, потому, что при перемешивании на поверхности жидкости может возникать воронка или происходить вспенивание реакционной массы. Чаще всего общий объем аппарата принимается на 15÷20% больше рабочего.

Часто отношение высоты аппарата H к его диаметру D принимают равным единице, поэтому расчет размеров реактора можно определить по уравнению

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} \quad (7.8)$$

Если же отношение высоты аппарата к его диаметру не равно единице, т.е. $H:D=m$, то

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi m}}, \quad (7.9)$$

$$H = mD \quad (7.10)$$

При отсутствии химической реакции объем аппарата с мешалкой определяется исходя из его заданной объемной производительности V_0 .

Тогда:

$$V = \frac{V_0}{\tau}, \quad (7.11)$$

где τ – время обработки среды и подготовительных операций для периодически действующих аппаратов, или среднее время нахождения среды – для непрерывно действующих аппаратов.

Расчет размеров аппарата аналогичен расчету для реакторов.

7.3. Конструкция трубчатого каталитического реактора (на примере реактора дегидрирования этилбензола в стирол)

Рассмотрим трубчатый каталитический реактор на примере реактора дегидрирования этилбензола в стирол. Реактор дегидрирования этилбензола в стирол представляет собою вертикальный цилиндрический аппарат с металлическим корпусом, футерованным огнеупорным кирпичом по внутренней поверхности (рис. 7.7). Реакционные трубки реактора крепятся в трубных решетках и заполняются катализатором.

Процесс дегидрирования этилбензола носит эндотермический характер, поэтому для его осуществления необходимо постоянно подводить в реакционную зону тепловую энергию. В данном реакторе обогрев реакционной зоны производится топочными газами, получаемыми при сгорании топливного газа, смешанного с воздухом. Сгорание происходит в топке – 4, после чего топочные газы заполняют межтрубное пространство реактора. Горячие топочные газы обеспечивают оптимальную температуру в реакционной зоне реактора.

Пары этилбензола подаются в реактор сверху и проходят реакционные трубки - 1, заполненные катализатором. В реакционной зоне идет реакция дегидрирования, полученный стирол (контактный газ) выводится через нижний штуцер в коническом днище. Температура в реакционной зоне порядка 600°C.

По межтрубному пространству реактор разделен глухой вертикальной перегородкой, делящей аппарат на две равные части, каждая из которых имеет камеру горения с тремя горелками, что позволяет вести подогрев с 2-х сторон.

Корпус (кожух) реактора изготавливается из углеродистой стали, поскольку не имеют контакта с высокой температурой и агрессивной средой.

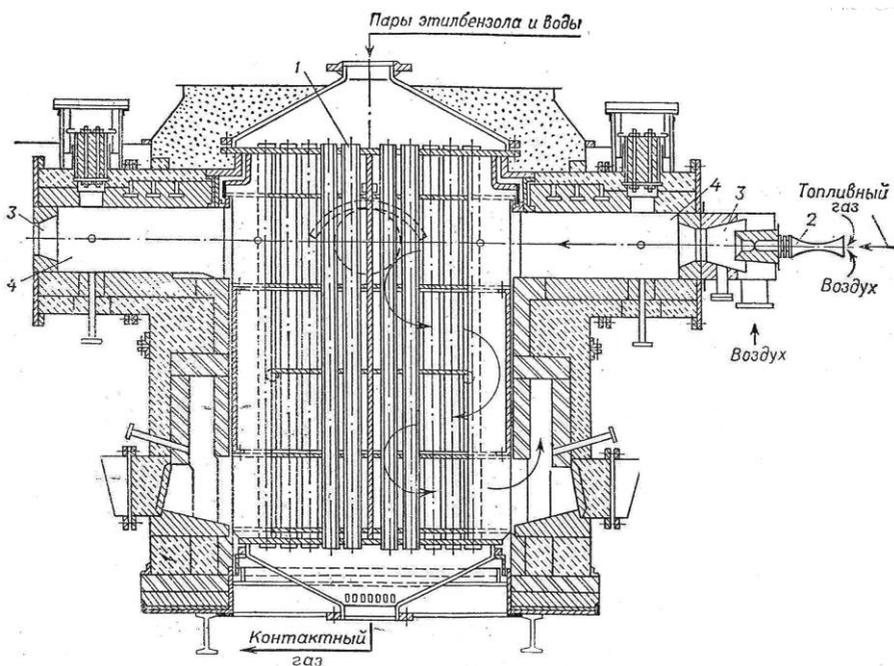


Рисунок 7.7 - Трубчатый каталитический высокотемпературный реактор:

1 – реакционные трубки с катализатором; 2- форсунка (газовая горелка);
3 – смешительное устройство; 4 – топка; 5 – смешительное устройство

Трубки и трубные решетки изготавливают из жаропрочных хромоникельмолибденовых сталей 10X17H13M2T.

7.4. Конструкция, принцип действия и области применения адиабатического каталитического реактора с вводом байпасного охлажденного сырья

При адиабатическом режиме отсутствует теплообмен с окружающей средой. Выделение или поглощение тепла в результате реакции приводит к изменению температуры реакционной смеси и к отклонению от оптимальной. Применение истинных адиабатических реакторов ограничено процессами, протекающим с небольшим тепловым эффектом. Гораздо чаще для обеспечения оптимального температурного режима в реакторе применяют различные теплоносители или хладоагенты, смешиваемые с потоком реагирующего вещества или являющиеся предварительно нагретыми или охлажденными твердыми телами, непосредственно контактирующими с реакционной смесью (катализатор, насадка, гранулированный движущийся теплоноситель). Хотя в таких аппаратах имеет место теплообмен при непосредственном контакте с теплоносителем или хладоагентом, их принято называть формально адиабатическими.

Условия теплообмена в таких реакторах благоприятны, так как имеет место непосредственный контакт газа с катализатором, на поверхности которого протекает реакция, сопровождающаяся выделением или поглощением тепла. Источником тепла в случае эндотермических процессов может служить либо сам газ, либо катализатор, а в случае экзотермических процессов хладагентом может быть только реагирующая смесь.

Применение таких реакторов предполагает неравномерность распределения температур по высоте реакционной зоны, особенно в аппаратах с большим слоем катализатора.

Если требуемый по условиям процесса слой катализатора велик и перепад температуры по высоте слоя превышает допустимые пределы, реактор секционируют. Секционирование заключается в разделении большого слоя катализатора на несколько меньшего размера, в которых проще обеспечить оптимальную температуру. Катализатор укладывают тонким слоем на полки, а между полками устанавливают выносные или встроенные теплообменные устройства для регулирования температуры в реакционной зоне. Кроме того, обеспечения оптимальной температуры в слое катализатора можно добиться введением между слоями дополнительных количеств байпасного охлажденного или горячего сырья.

Примером такого реактора в химической промышленности может служить реактор для синтеза метанола, конструкция которого показана на рис.7.8.

В реакторе слой катализатора разделен на 4 слоя вводами холодного байпаса. Газ основного потока подается в реактор через верхний штуцер и распределяется по сечению слоя катализатора при помощи распределителя кольцевого типа. Газ основного потока проходит все слои катализатора, превращаясь на выходе в конечный продукт – метанол. Холодный исходный компонент (холодный байпас) по распределительному устройству специальной конструкции подается на каждую полку с катализатором, отбирая от реакционной зоны излишки тепла, как результат экзотермического процесса.

Внутренний осмотр, ремонт, а также монтаж внутренних частей аппарата осуществляют через люки-лазы (9) и штуцера. Конструкция реактора позволяет быстро выгрузить из аппарата отработанный катализатор. Реактор установлен на цилиндрической (юбочной) опоре (5). Для строповки аппарата при установке в вертикальное положение предусмотрены монтажные штуцера (3, 12).

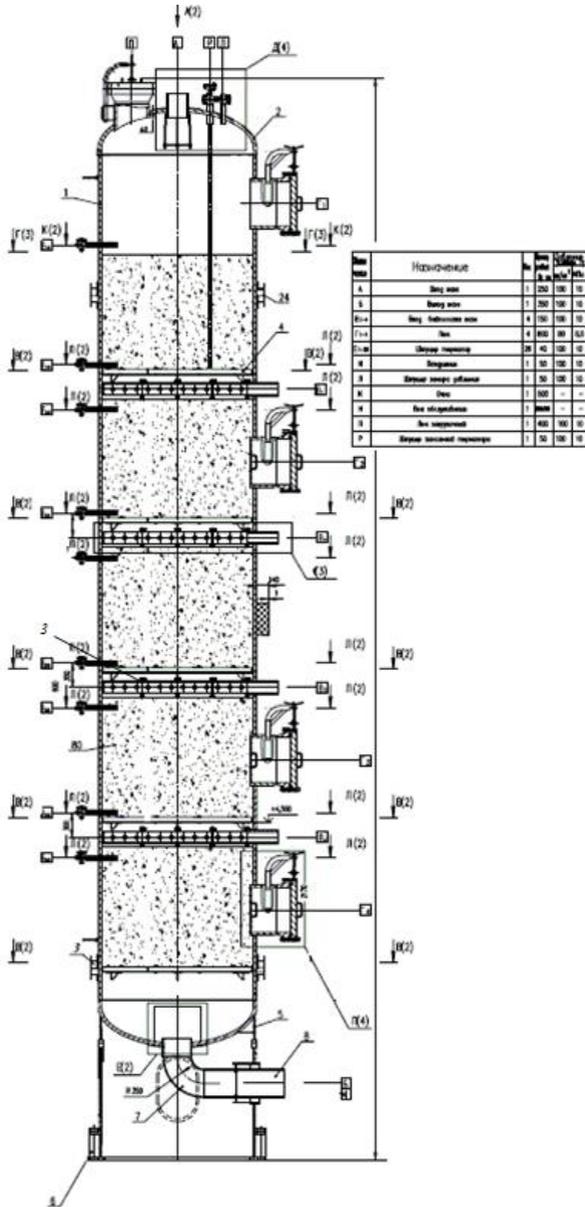


Рисунок 7.8 - Конструкция адиабатического каталитического реактора с вводом байпасного охлажденного сырья: 1 – корпус; 2- днище; 3 -холодные байпасы; 4 - колосниковая решетка (полка); 5 – цилиндрическая опора; 6 – подкладной лист; 7 – смотровой люк; 8 – штуцер вывода продукта; 9– люки-лазы; 10 – катализатор; 11 – монтажные штуцера.

Диаметр реактора – 3,6 м. определен исходя из условий обеспечения минимального гидравлического сопротивления. Высота реактора с опорой – 16.35 м. Материал корпуса реактора – сталь 12X18H10T. Технологические параметры реактора: давление – 5.3 МПа, рабочая температура – 270-280⁰С.

7.5. Конструкции реакторов пленочного типа

В реакторах пленочного типа жидкий реагент стекает тонкой пленкой по внутренней поверхности реакционных трубок или по плоско-параллельной насадке и достигается высокая степень контакта между газом и жидкостью. Пленочные реакторы эффективны для реакций, протекающих в диффузионной области, когда общая скорость химического превращения определяется скоростью диффузии реагирующих компонентов.

Конструктивно все пленочные реакторы отличаются друг от друга способом создания тонкой пленки на реакционной поверхности.

Пленочные реакторы делятся на три группы:

- пленочные реакторы со стекающей пленкой;
- пленочные реакторы с восходящей пленкой;
- пленочные реакторы с закрученным 2-х фазным потоком.

Пленочные реакторы со стекающей пленкой по форме реакционной поверхности подразделяются на трубчатые и пластинчатые. Пленочные реакторы включают распределительное устройство по жидкости, оросительные устройства, сепаратор и распределительное устройство для газа. Распределительное устройство для жидкости – один из важнейших элементов пленочного реактора. Существуют распределительные устройства с 2-х ярусным распределением жидкости, распределительные устройства с кольцевым коллектором, распределительные устройства с вводом жидкости через одиночный центральный патрубков (рис. 7.9).

Распределительные устройства для жидкости необходимы для равномерного распределения жидкости по отдельным элементам (трубам, пластинам) и образования на их поверхности тонкой пленки жидкости. Равномерность распределения жидкости по отдельным элементам определяется равенством гидравлических сопротивлений оросителей и постоянством гидростатических давлений слоя жидкости над каждым из них.

На рис.7.9. показаны конструкции распределительных устройств пленочных реакторов со стекающей пленкой.

По способу образования пленки оросительные устройства можно подразделить на следующие виды (рис. 7.10): переливные (а) и (б), щелевые (в), струйные (г).

Образование пленки в переливных устройствах происходит при сливе жидкости через верхние кромки труб (а) или через прорезы различной конфигурации (б). Такие устройства работают при высоте слоя жидкости над переливом $h = 2 - 20$ мм. Расход жидкости через перелив $v = h^{3/2}$. Для обеспечения равномерной раздачи жидкости по элементам требуется, чтобы h

над всеми оросителями были одинаковым, для чего и устанавливают специальные многоярусные перераспределительные тарелки.

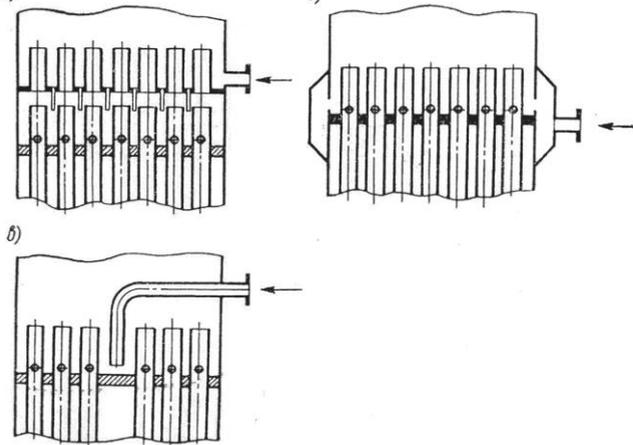


Рисунок 7.9 - Распределительные устройства для жидкости: а) с 2-х ярусным распределение жидкости; б) с кольцевым коллектором; в) с вводом жидкости через одиночный центральный патрубок

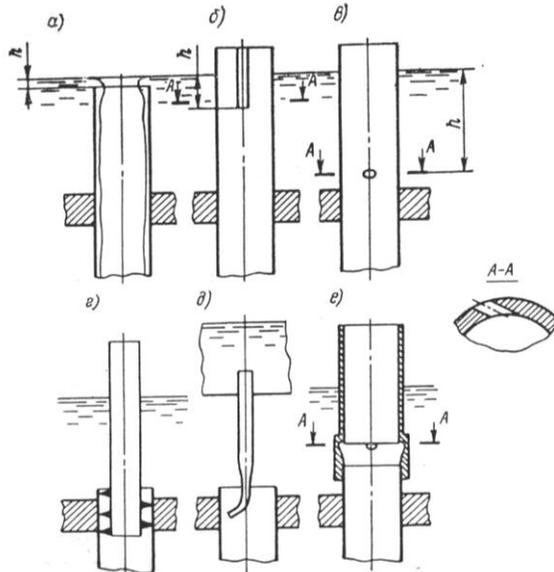


Рисунок - 7.10. Оросительные устройства пленочных реакторов: пленочные (а) и (б), щелевые (в), струйные (г)

К щелевым оросителям относятся устройства, в которых пленка образуется при истечении жидкости через затопленные щели или каналы различного профиля (в). Применение щелевых оросителей позволяет удерживать на трубной решетке слой жидкости высотой 100 мм и выше. В этом случае достаточно иметь распределительные устройства с кольцевым коллектором. Удовлетворительное распределение жидкости достигается при применении оросителей с тангенциальной её подачей на поверхность труб.

Струйные оросители – это устройства, в которых жидкость подается на орошаемую поверхность в виде струй (г). Такие оросители применяются при больших плотностях орошения и пригодны как для трубных реакторов, так и для аппаратов с плоскопараллельной насадкой.

К разбрызгивающим относятся оросительные устройства, в которых пленка образуется из капель, полученных при дроблении жидкости форсунками.

Сепараторы предназначены для выделения капель жидкости из оходящих газов. Применяются 2 типа сепараторов: центробежные и жалюзийные. Они могут устанавливаться как внутри аппарата, так и снаружи.

Пленочные реакторы с восходящей пленкой отличаются от реакторов со стекающей пленкой следующим:

- подвод жидкости снизу аппарата;
- отсутствует газораспределительное устройство (газ самопроизвольно равномерно распределяется по отдельным трубам;
- высокая пропускная способность по газу, поэтому меньшие размеры на ту же производительность.

Равномерное распределение жидкости по периметру труб достигается за счет воздействия газового потока.

Одним из преимуществ аппаратов с восходящим потоком можно считать то, что для создания рециркуляции жидкости не требуется дополнительного насоса. Жидкость, отделенная от газа в сепарационной части реактора, перетекает по сливной трубе в нижнюю часть и вновь потоком газа увлекается в реакционные трубы.

Реакторы с закрученным 2-х фазным потоком конструктивно отличаются от аппаратов со стекающей или восходящей пленкой только наличием закручивающих устройств, размещаемых в контактных трубах. Применение подкрутки газожидкостного потока позволяет равномерно распределить жидкость даже при малых плотностях орошения по поверхности каждой из реакционных труб. Применяются простейшие оросители, задача которых подать определенное количество жидкости в область действия в трубе интенсивно закрученного газового потока.

Жидкость может быть введена или через одиночное отверстие в стенке трубы или при помощи питательного патрубка в центре газового потока, подаваемого тангенциально. Закручивающие устройства (завихрители) разделены на два типа: осевые и тангенциальные. Наиболее распространены осевые завихрители: ленточные, шнековые и лопаточные (рис.7.11).

Скрученная лента или шнек могут устанавливаться или по всей длине (высоте) реакционной трубы или в виде отдельных вставок с некоторым интервалом. Из технологических соображений при углах закрутки $\gamma \leq 45^\circ$ завихрители выполняются в виде ленты, а при $\gamma \geq 45^\circ$ – в виде шнека.

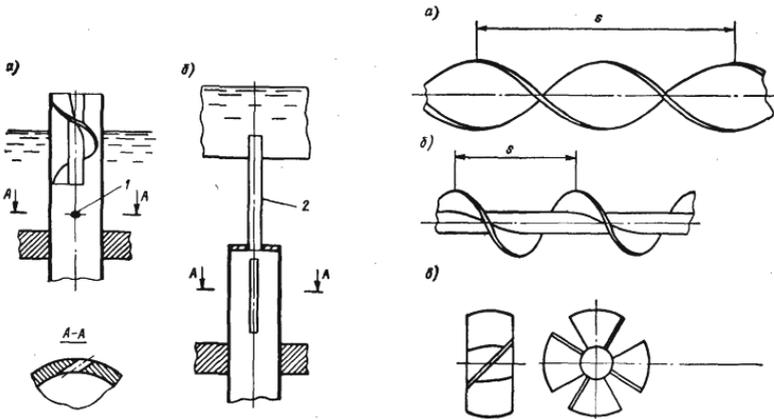


Рисунок 7.11 - Закручивающие устройства (завихрители) пленочных реакторов с 2-х фазным закручивающим потоком: а – ленточный; б – шнековый; в – лопаточный.

7.6. Конструкция роторно-пленочных реакторов

Роторно-пленочные реакторы практически незаменимы при переработке вязкотекучих, термолабильных и кристаллизующих сред. Конструкция роторно-пленочного реактора показана на рис. 7.12.

Корпуса реакторов изготавливают цилиндрическими или коническими. Аппараты с цилиндрическими корпусами, как правило, устанавливаются вертикально, а с коническими – горизонтально. Реактора снабжены теплообменными рубашками.

Распределительное устройство вертикальных роторно-пленочных реакторов (РПР) – 4 выполняют в виде кольца, вращающегося вместе с валом ротора. Жидкость, попадая на кольцо центробежной силой отбрасывается к стенкам, где лопастями формируется пленка.

Лопастя могут быть закреплены жестко или подвешиваться на шарнирах. В роторно-пленочных реакторах лопасти интенсивно перемешивают жидкость в объеме и обновляют пленку жидкости, отложившуюся на стенках. Перемешивание значительно ускоряет процесс массопередачи, а обновление пленки на стенках исключает возможность её загустевания, кристаллизации или полимеризации.

Роторы роторно-пленочных реакторов имеют три разновидности: рис. 7.13.

а) жесткие, лопасти которых жестко соединены с валом и имеют постоянный зазор с внутренней поверхностью корпуса реактора;

б) шарнирные, лопасти которых крепятся шарнирно и во время работы зазор между кромкой лопасти и корпусом аппарата самоустанавливается, достигая в режиме «стирание» значения $S=0$.

в) маятниковые, лопасти которых закреплены шарнирно, но зазор S всегда > 0 ;

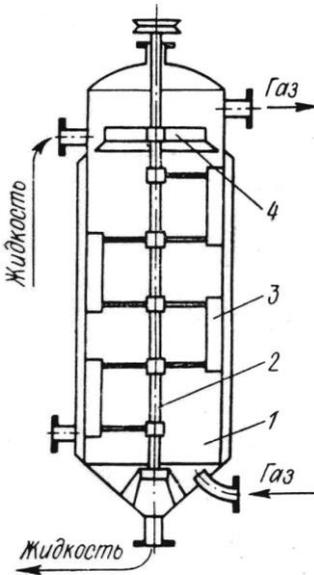


Рисунок 7.12 - Роторно-пленочный реактор: 1 – корпус реактора; 2 – вал ротора; 3 – лопасти ротора; 4 – распределитель жидкости; 5 – рубашка

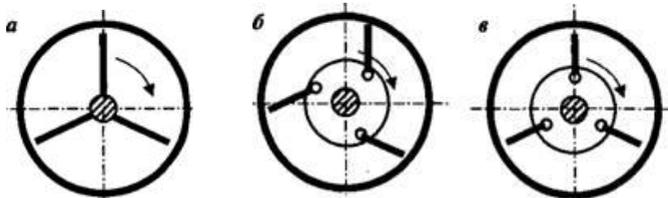


Рис. 7.13. Роторы вертикальных роторно-пленочных реакторов:
а) – жесткие; б)- шарнирные; в)- маятниковые

В реакторах с жестким ротором окружная скорость обычно составляет от 5 до 12 м/с, а зазор $S=0,6 - 3$ мм. Эти аппараты рекомендуются для обработки сред, когда исключается их загрязнение частицами металла, появляющимися при трении лопастей о стенки корпуса. Аппараты с жестким ротором требуют точной обработки корпуса и кромок лопастей, а при монтаже соблюдать параллельность и соосность.

В реакторах шарнирными лопастями окружная скорость ротора составляет от 1.5 до 5 м/с. В них не исключена возможность трения лопастей по внутренней поверхности корпуса реактора. Такие аппараты не требуют точности обработки элементов и их монтажа.

7.7. Конструкция реактора-полимеризатора трубчатого типа с диффузором

Реакторы с диффузором (рис. 7.14) способны осуществлять циркуляцию реагирующих веществ в замкнутом объеме реактора с помощью встроенного осевого насоса. Циркуляция необходима в том случае, когда для получения полимера с постоянными свойствами процесс следует вести в проточном реакторе идеального смешения, в котором концентрация реагентов поддерживается постоянной.

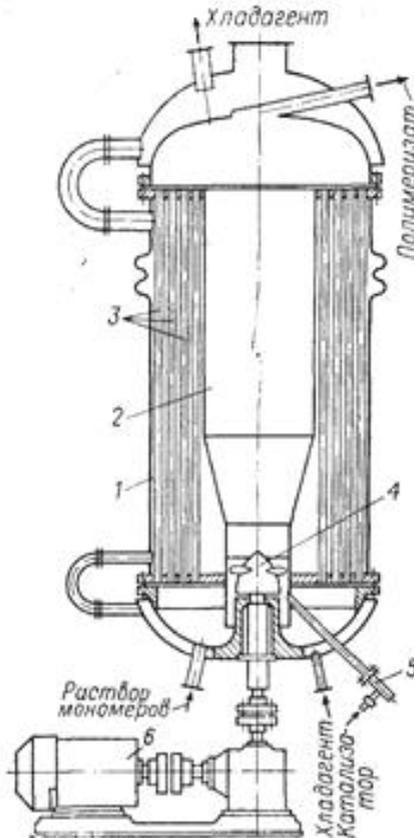


Рисунок 7.14 - Конструкция реактора-полимеризатора трубчатого типа с диффузором: 1- корпус; 2- центральная циркуляционная труба; 3-трубчатка; 4- лопасти осевого насоса; 5- форсунка; 6- привод

Бутилкаучук получают полимеризацией двух мономеров: изопрена и изобутилена. Скорости полимеризации их различны, поэтому в реакторе периодического типа смесь будет постоянно изобутиленом, скорость полимеризации которого больше скорости полимеризации изопрена. Получаемый полимер будет представлять собой смесь частиц с различным содержанием изопрена, а это нежелательно. Поэтому для получения полимера с постоянными свойствами процесс ведут в реакторе, обеспечивающим циркуляцию реагентов внутри аппарата, которая будет значительно превышать внешнюю циркуляцию. Интенсивная внутренняя циркуляция обеспечивается осевым насосом.

Температура в реакторе $t = (-97) - (-98)^{\circ}\text{C}$, избыточное давление $p = 0.03$ Мпа, в качестве катализатора используется хлористый алюминий, в качестве растворителя – хлористый метил. Продолжительность пребывания шихты в реакторе 1 – 2 часа. Далее реактор останавливают на чистку и промывают растворителем при температуре 65°C .

Процесс синтеза идет в присутствии катализатора. Для более быстрого смешения катализатора с циркулирующей реакционной смесью его вводят в реактор через форсунку в центральную циркуляционную трубу под лопасти осевого насоса. Форсунка регулирует расход катализатора.

В промышленности работает реактор следующих размеров: $D = 2\text{ м}$, высота $H = 8\text{ м}$, площадь поверхности теплообмена $F = 310\text{ м}^2$, число оборотов вала осевого насоса $n = 735\text{ об./мин}$.

Рекомендуемые конструкционные материалы для изготовления реактора и его основных элементов: стали 10X18H10T, 12X18H10T, 10X14Г14Н.

7.8. Конструкция реактора-полимеризатора для низкотемпературной полимеризации в эмульсии

При эмульгирование вязкого мономера в воде появляется возможность перемещения его по технологически трубопроводам и аппаратам. В результате реакции полимеризации образуется суспензия полимера в воде, которая имеет вязкость, мало отличающаяся от вязкости воды. Малая вязкость полимера, не только способствует его свободному перемещению, но и позволяет осуществлять эффективный отбор тепла реакции из реакционной зоны и вести процесс полимеризации непрерывно.

Процесс полимеризации может проводиться при температуре 5°C (низкотемпературная полимеризация) и при 50°C (высокотемпературная полимеризация).

Рассмотрим конструкцию реактора-полимеризатора для низкотемпературной полимеризации на примере реактора для производства бутадиен-стирольных каучуков (рис. 7.15).

Непрерывный процесс полимеризации осуществляется в батарее полимеризаторов, имеющей 6 – 8 аппаратов. В качестве хладоагентов для низкотемпературной полимеризации (5°C) применяют рассолы (водные

растворы солей Na, Ca и др.) с температурой -5°C . В качестве хладагента может также использоваться и аммиак. Давление в аппарате порядка 0.7 МПа. Промышленность выпускает полимеризаторы следующих объемов: 3, 6, 12, 20 и 24 м^3 .

Реактор-полимеризатор представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд, снабженный теплообменной рубашкой -2. Для более тонкого регулирования температуры в реакционной зоне, полимеризатор снабжен встроенным змеевиковым холодильником -5. Змеевик состоит из вертикальных труб, расположенных между стенкой аппарата и мешалкой -3 рамного типа. Все секции змеевика, имеющие по три трубы, соединяются при помощи чередующихся проходных и глухих фланцев -6. Для соединения труб в верхней и нижней частях змеевиков имеются коллекторные трубы. Вследствие наличия глухих фланцев хладагент последовательно проходит все вертикальные секции холодильника.

Корпус реактора может быть изготовлен из углеродистой стали, эмалированной по внутренней поверхности, из 2-х слойной стали Ст3+10X18Н10Т устройства изготавливаются из стали 10X18Н10Т. Внутренняя поверхность реактора полируется.

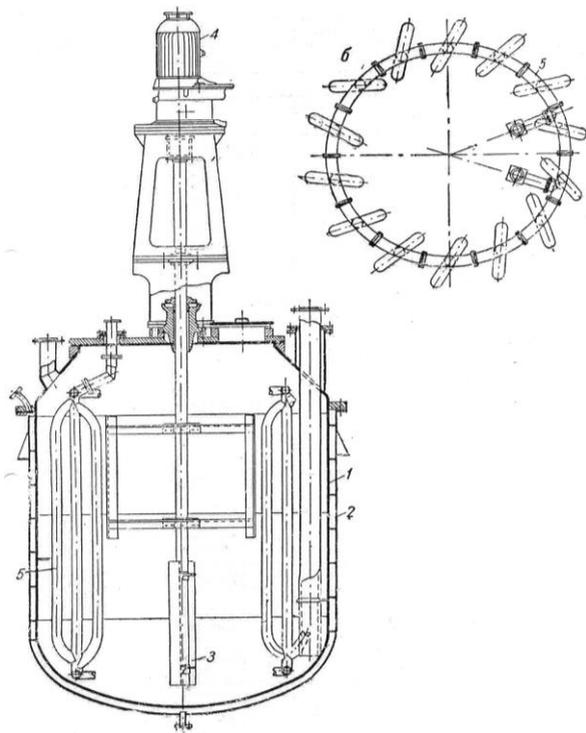


Рисунок 7.15 - Конструкция реактора-полимеризатора для низкотемпературной полимеризации в эмульсии: 1- корпус; 2- рубашка; 3- перемешивающее устройство; 4- мотор-редуктор; 5- змеевиковый холодильник; 6- проходные и глухие фланцы

7.9. Конструкция реактора-полимеризатора скребкового типа

Полимеризаторы скребкового типа применяются в тех случаях, когда полимеризат имеет значительную вязкость. Использование для перемешивания вязкотекучих жидкостей обычных перемешивающих устройств оказывается неэффективным, так как на стенках аппарата остаётся слой обрабатываемой среды большой толщины. Этот слой может загустевать и накапливаться на поверхности реактора, затрудняя перемешивание и снижая теплообмен через рубашку. В скребковых полимеризаторах используются якорные или скребковые мешалки. Скребки скребковых мешалок прижимаются к внутренней поверхности аппарата и снимают (соскребают) с неё налипший слой полимера.

Скребковый полимеризатор представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат, снабжённый теплообменной рубашкой (рис. 7.16). Перемешивающее устройство представляет собой вал-3, на котором размещена металлическая пластина (лента) или труба-4. На ленте крепятся несколько рядов (2-8) скребки-5. По высоте скребки устанавливаются с перекрытием очищаемых поверхностей. Приводом перемешивающего (скребкового) устройства служит мотор-редуктор, который крепится, как правило, на крышке реактора.

В нижней части полимеризатора вращающийся вал ротора опирается на концевой подшипник. Регулирование теплового режима в реакторе осуществляется с помощью рубашки-2. Исходные реагенты вводятся в реактор через штуцер в крышке и выводятся через штуцер в днище.

У типового аппарата с мешалкой коэффициент теплопередачи при работе с вязкими средами составляет 20 -25 Вт/м²К, а у скребкового аппарата он составляет 150 – 180 Вт/м²К.

Основным конструктивным элементом скребкового полимеризатора является скребковое устройство (рис. 7.17). Применение жестких скребков, не имеющих упругих элементов, может приводить к образованию зазора между корпусом аппарата и кромками скребков из-за невозможности выдержать строго цилиндрическую форму аппарата и погрешностей при монтаже вала со скребками. Не имеют упругих элементов и шарнирные скребки, которые поджимаются к стенкам силой давления среды (рис. 7.17-а) или центробежной силой (рис. 7.17-б). Такие типы скребковых устройств могут применяться в случае маловязких систем, чаще всего в пленочных реакторах или в случае вращательного движения скребкового устройства.

Наиболее эффективны скребковые устройства с упругими элементами в виде пружин или пластин (рис. 7.18). Упругие элементы обеспечивают постоянное поджатие скребков к поверхности аппарата. Скребки могут

крепиться к вал мешалки в одной или в нескольких плоскостях. Поскольку скребки находятся в постоянном контакте с металлической поверхностью, их изготавливают из неметаллических материалов, например из текстолита или фторопласта. Скребки могут изнашиваться, но упругие элементы исключают возможность появления зазоров.

В промышленности реакторы - полимеризаторы скребкового типа могут изготавливаться из 2-х слойной стали Ст3+08Х13 или 12Х18Н10Т, элементы перемешивающего устройства из сталей 12Х13, 12Х18Н10Т, лезвие скребка из фторопласта.

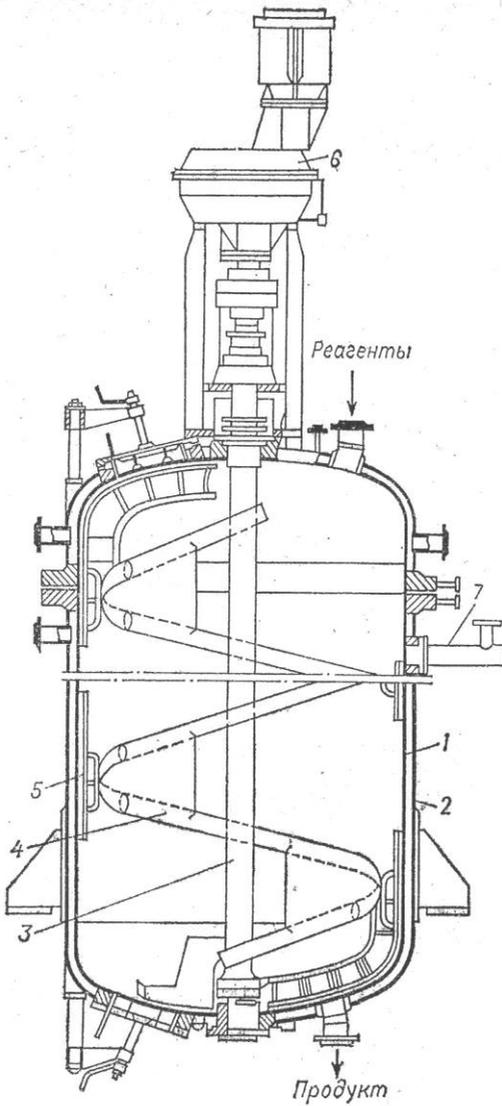


Рисунок 7.16 - Конструкция реактора-полимеризатора скребкового типа: 1 - корпус; 2 - рубашка; 3 - вал ротора; 4 - ленточная мешалка; 5- скребок; 6 - мотор-редуктор

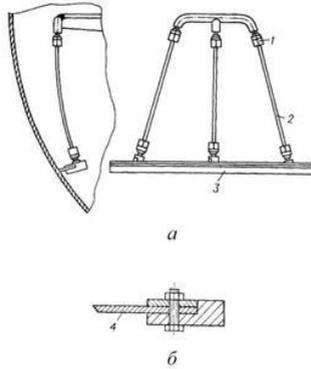


Рисунок 7.17 - Конструкция скребка с упругим элементом: 1- цапговый зажим; 2- упругий элемент (пружина, пластина); 3- планка, 4- лезвие скребка

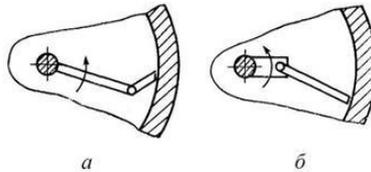


Рисунок 7.18 - Шарнирные скребки

8. Трубопроводная арматура и вспомогательные элементы оборудования

8.1. Конструкции трубопроводной арматуры

По функциональному назначению различают следующие виды трубопроводов:

1. Магистральные трубопроводы, имеющие протяженность в сотни и более километров, служащие для транспортировки природного и других газов, нефти и нефтепродуктов, воды и других жидкостей.

2. Технологические трубопроводы, используемые в пределах отдельных предприятий и установок.

3. Городские коммунальные сети: водопроводы, канализационные, газовые, теплофикационные.

Наиболее широкое применение имеют технологические трубопроводы. Технологическими называют трубопроводы промышленных предприятий, по которым транспортируется сырьё, полуфабрикаты, готовые продукты, вода, пар, топливо, паровой конденсат, отходы производства - все вещества, необходимые для нормального ведения технологического процесса.

В зависимости от размещения на промышленном объекте технологические трубопроводы подразделяют на:

- внутрицеховые, соединяющие машины и аппараты, размещенные в цехе;

- межцеховые, соединяющие технологические установки разных цехов.

Технологические трубопроводы с давлением до 10 МПа включительно являются наиболее распространенными и в зависимости от класса опасности транспортирующего вещества (взрыво-, пожароопасное и вредное) подразделяются на группы: А, Б, В, Г, Д. В зависимости от рабочих параметров среды (давления и температуры) – на пять категорий: I, II, III, IV, V.

В зависимости от условного давления среды (P_y) трубопроводы подразделяются на:

- вакуумные, работающие при абсолютном давлении ниже 0.1 МПа;
- низкого давления, работающие при давлении среды от 0.1 до 1.6 МПа;
- среднего давления, работающие при давлении среды 0.5 до 10 МПа;
- высокого давления, работающие при давлении среды от 10 МПа до 320 МПа и более.

Технологические трубопроводы считаются холодными, если они эксплуатируются при рабочей температуре среды до 50⁰С, и горячими, если рабочая температура среды выше 50⁰С.

По способу перекрытия потока среды трубопроводная арматура подразделяется на следующие типы:

а) клапан (вентиль) имеет затвор в виде тарелки, золотника или конуса, перемещающиеся возвратно-поступательно параллельно оси потока среды, движущейся из-под седла, расположенного в корпусе.

б) кран, затвор которого имеет форму тела вращения (или части его), поворачивающийся вокруг своей оси, расположенной перпендикулярно к оси потока.

в) задвижка, затвор которой выполняется в виде диска или клина, перемещающийся возвратно-поступательно перпендикулярно оси потока среды, параллельно поверхностям сёдел, закрепленным в корпусе.

г) заслонка, затвор которой имеет форму диска, поворачивающегося вокруг оси, расположенной вдоль плоскости затвора.

д) мембранный клапан имеет затвор в виде упругой мембраны, перемещающейся вдоль оси потока в седле клапана.

е) Шланговый клапан, перекрытие потока, в котором происходит за счет пережима эластичного (например, резинового) шланга, внутри которого движется рабочая среда.

Клапаны (вентили) имеют следующие преимущества: высокую герметичность; малый ход золотника (по сравнению с задвижками), необходимый для полного перекрытия прохода (обычно 0.25 D_y); применение при высоких и низких температурах; возможность применения при высоких давлениях и высоких перепадах давления на золотнике; установка на трубопроводе в любом положении; простота конструкции, обслуживания, ремонта; относительно небольшие габаритные размеры и масса; исключение возможности возникновения гидравлического удара.

На рис. 8.1 представлена конструкция проходного клапана (вентиль). Проходными называют клапаны, которые имеют корпус с соосными или параллельными патрубками. Они предназначены для установки в прямолинейных трубопроводах.

К недостаткам клапанов (вентилей) относят: высокое гидравлическое сопротивление (в сравнении с кранами и задвижками), невозможность применения на потоках сильно загрязненных сред, а также на средах с высокой вязкостью, подача среды только в одном направлении.

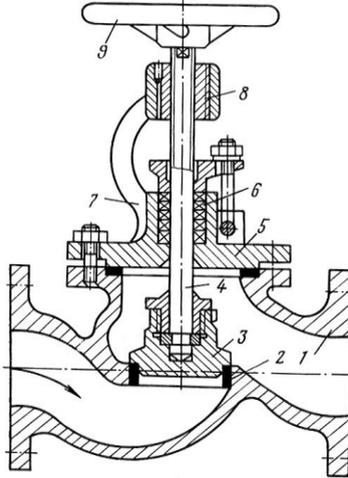


Рисунок 8.1 - Клапан (вентиль) проходной: 1- корпус; 2- уплотнительное кольцо; 3- золотник; 4- шток; 5- крышка; 6- сальник; 7- стойка; 8- ходовая гайка; 9- маховик.

Вследствие того, что усилия, возникающие на золотнике под действием давлений, действуют по оси шпинделя, и в вентилях большого диаметра возникают усилия трения в резьбе, что приводит к необходимости применения мощных приводов и большого потребления электроэнергии и увеличения массы и габаритных размеров.

Конструкции клапанов классифицируются по нескольким признакам.

По конструкции корпуса клапаны подразделяются на проходные, прямоточные, угловые и смесительные.

По назначению их классифицируют на запорные, и запорно-регулирующие. В свою очередь запорно-регулирующие подразделяют по конструкции дроссельных устройств на клапаны (вентили) с профилированным золотником и игольчатые.

Запорные клапаны по конструкции затворов (золотников) подразделяют на тарельчатые и диафрагмовые, а по способу уплотнения шпинделя – на сальниковые и сильфонные.

Задвижки (рис. 8.2) получили широкое распространение как запорная арматура. Они отличаются простотой конструкции, прямоточным движением и относительно малым гидравлическим сопротивлением. Вследствие этого их

можно применять для больших диаметров проходов ($D_y = 50 - 300$ мм) и больших давлений среды ($P_y = 0,4 - 20$ МПа) и температурах до 450°C .

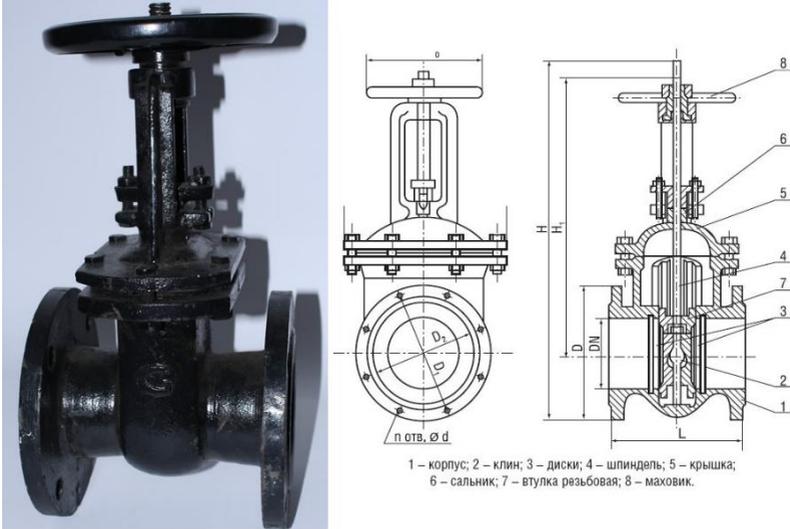


Рисунок 8.2 - Задвижка параллельная 2-х дисковая: 1- корпус; 2- распорный клин; 3- уплотнительные кольца; 4-шток; 5- крышка; 6- сальник; 7- диски; 8- маховик

Существуют самые разнообразные конструкции задвижек. Задвижки обычно изготавливаются полнопроходными, когда диаметры в присоединительных патрубках не сужаются. В ряде конструкций задвижек для работы при высоких перепадах давлений на затворе для уменьшения усилий при управлении площадь прохода выполняют несколько меньшей площади сечения присоединительных патрубков, т.е. с суженным проходом.

Классифицировать задвижки принято по конструкции затвора. По этому признаку они делятся на клиновые и параллельные. У клиновых задвижек уплотнительные кольца в затворе расположены под небольшим углом и образуют клин, а у параллельных кольца в затворе расположены параллельно друг другу.

В свою очередь клиновые задвижки могут быть с цельным, упругим и составным клином из двух дисков. Параллельные задвижки можно подразделить на однодисковые и двухдисковые, с расположенным между ними распорным клином или распорной пружиной.

В зависимости от конструкции системы винт-гайка и её расположения (в среде или вне среды) задвижки могут быть с выдвигным шпинделем (штоком) и с невыдвигным шпинделем (штоком). В задвижках с невыдвигным (рис.8.2) штоком ходовой узел погружен в рабочую среду, к нему закрыт доступ и он подвержен коррозии и действию абразивных частиц, если их содержит среда. Такие задвижки применяют в трубопроводах, транспортирующих нефть, минеральные масла, воду. Задвижки с

невыдвижным штоком имеют меньшую строительную высоту и их целесообразнее применять для подземных коммуникаций.

Преимуществом клиновых задвижек является повышенная герметичность прохода в закрытом положении, а также небольшая величина усилия, необходимого для создания уплотнения. К недостаткам клиновых задвижек можно отнести применение направляющих для перемещения затвора, повышенный износ поверхностей затвора, а также технологические трудности обеспечения герметичности в затворе, связанные с притиркой (подгонкой) уплотнительных поверхностей.

Пример конструкции задвижки с цельным клином и выдвижным штоком показан на рис.8.2. Она состоит из литого корпуса – 5, в который запрессованы или ввинчены уплотнительные сёдла (кольца) – 7, изготовленные, как правило, из высоколегированных или износостойких сталей. Клином – 6 имеет две кольцевые уплотнительные поверхности и шарнирно через сферическую опору подвешен к штоку (шпинделю) – 1. Верхняя крышка – 4 соединяется с корпусом посредством болтов или шпилек. Сальниковое уплотнение – 3 препятствует утечке среды из полости задвижки.

Задвижки с выдвижным шпинделем, у которых ходовая гайка закреплена на стойке или непосредственно в приводе, т.е. вне рабочей полости корпуса, лишены недостатков, связанных с негативным влиянием среды. В этих задвижках шток (шпиндель) совершает только поступательное движение и перемещается вместе с затвором, выдвигаясь из задвижки. При этом улучшаются условия работы сальника, не затруднена смазка резьбовой пары, замена изношенной гайки возможна без остановки движения среды через задвижку.

Клиновые задвижки с цельным клином предназначены в основном для герметичного перекрытия трубопроводов с большим давлением нагнетания жидкости или газа.

Клиновые задвижки с упругим клином применяют для герметичного перекрытия трубопроводов с нефтяными и газовыми средами с высокой температурой и большим давлением.

Задвижки с составным клином рекомендуют для трубопроводов со средним рабочим давлением как жидкой, так и газообразной сред, без абразивных частиц.

Параллельные задвижки предназначены для установки на трубопроводах в процессах, не требующих полной герметизации при больших давлениях и при наличии в средах взвешенных примесей.

Двухдисковые параллельные задвижки рекомендуются для герметичного перекрытия трубопроводов со средним давлением жидкой или газообразной среды. Двухдисковые параллельные задвижки применяют, когда требуется хорошее уплотнение в затворе в закрытом состоянии. В этих задвижках почти полное отсутствие износа уплотнительных поверхностей дисков и седел корпуса, меньшее усилие на маховике при закрытии. К недостаткам можно отнести нежесткость затвора и необходимость наличия

направляющих движения затвора, что усложняет конструкцию и технологию обработки корпуса.

Обратные клапаны и обратные затворы применяют в тех случаях, когда необходимо предотвратить движение среды по трубопроводам в обратном направлении. Такие ситуации могут возникать при аварийных остановках насосов или компрессоров, технологическом снижении давления, разрыве трубопроводов и т.п., когда поток может резко изменять направление движения на обратное. Для исключения аварийной ситуации применяют обратные клапаны или обратные затворы, которые пропускают среду только в одном направлении. Они являются автоматическими самодействующими предохранительными устройствами.

Различают обратные подъёмные (рис. 8.3) и обратные поворотные клапаны (затворы). Обратные подъёмные клапаны устанавливают на горизонтальных участках трубопроводов, а обратные поворотные клапаны (затворы) как на вертикальных, так и на горизонтальных участках.

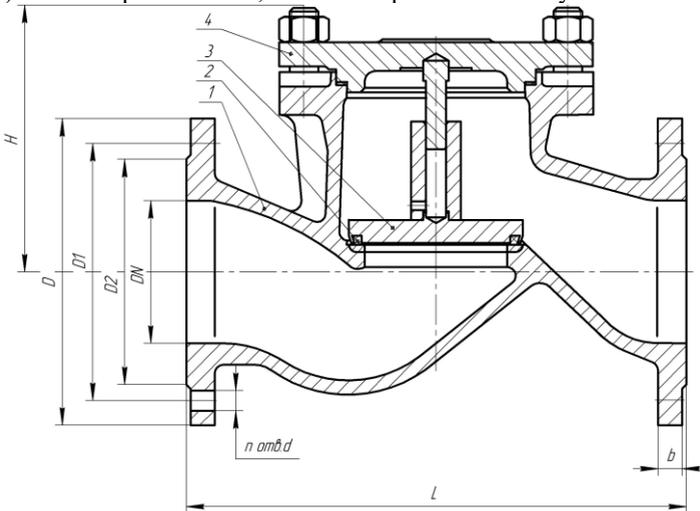


Рисунок 8.3 - Конструкция обратного подъёмного клапана: 1 – корпус; 2 – уплотнительное кольцо; 3 – седло, 4 – крышка; 5 – крышка

Поворотные клапаны (затворы) имеют меньшее гидравлическое сопротивление, они более просты и надежны. Они могут быть как угловыми, так и проходными, причем для их изготовления часто используются корпуса запорных клапанов (вентилей).

8.2. Неподвижные разъёмные соединения элементов аппаратов и трубопроводов

Фланцы являются наиболее распространенными разъёмными соединениями аппаратов и трубопроводов, обеспечивающих герметичность и прочность конструкций. Они служат для соединения отдельных частей

аппаратов, а именно: съёмных крышек, отдельных царг, люков-лазов и т. д. Фланцы применяются также для присоединения к аппаратам трубопроводов, трубопроводной арматуры, датчиков контрольно-измерительных приборов, для соединения между собой отдельных участков трубопроводов и т.д.

По конструкции и способу соединения со штуцером или корпусом аппарата различают следующие основные типы фланцев (рис.8.4): плоские приварные (а), приварные с шейкой приваренной встык (б), свободные (накидные) на отбортовке (в), свободные на бурте (г).

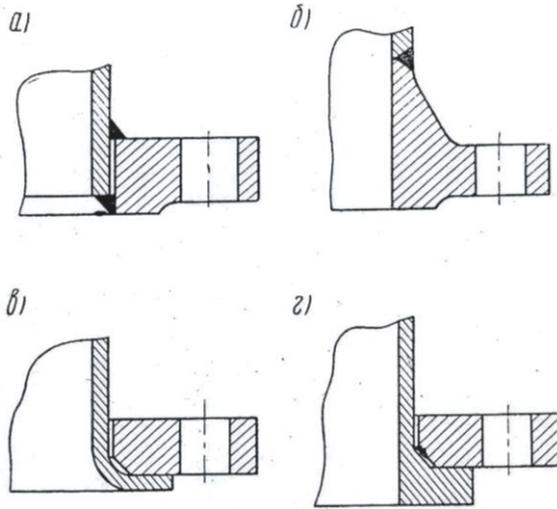


Рисунок 8.4 - Типы фланцев: а – плоский приварной; б – приварной с шейкой; в – свободный на отбортовке; г – свободный на бурте

Фланцевое соединение состоит из двух фланцев, соединительных болтов (шпилек) и прокладки, которая устанавливается между уплотнительными поверхностями и позволяет обеспечить герметичность при относительно небольшом усилии затяжки болтов (шпилек).

Плоские приварные фланцы представляют собой плоские кольца, приваренные к краю обечайки по её периметру. Их рекомендуется применять при условном давлении от 0,3 до 1,6 МПа и температуре до 300⁰С.

Фланцы приварные встык имеют конические втулки-шейки, которые приваривают стыковым швом к обечайке. Эти фланцы рекомендуется применять при условных давлениях от 0,6 до 6,4 МПа и температурах свыше 300⁰С.

Свободные фланцы представляют собой кольца, диаметр отверстия которых несколько больше наружного диаметра обечайки, на которую их свободно надевают. При затяжке фланец упирается в отбортовку обечайки или кольцо, приваренное в её краю. Такие фланцы применяют при условном давлении до 1,6 МПа и температуре до 300⁰С, а число циклов нагружения не

должно превышать $2 \cdot 10^3$. Обычно такие фланцы применяют в аппаратах, изготавливаемых из мягких (медь, алюминий) или хрупких материалов (керамика, стекло).

Конструктивные формы уплотнительных поверхностей представлены на рис.8.5: плоская (гладкая) - а, выступ-впадина – б, шип-паз – в. Уплотнительные поверхности под металлическую прокладку показаны на рис.8.6.

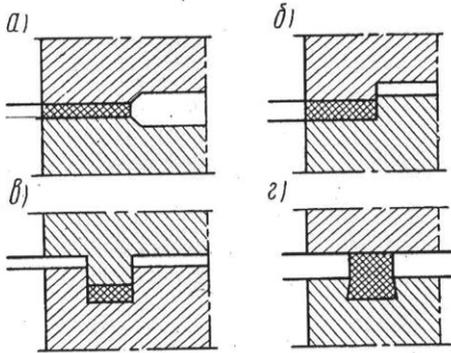


Рисунок 8.5 - Типы уплотнительных поверхностей фланцев:
а)- плоская (гладкая); б)- выступ-впадина; в)- шип-паз; г)- соединение с прокладкой в пазу

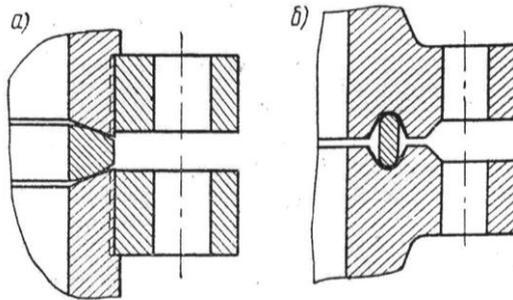


Рисунок 8.6 - Уплотнительные поверхности под металлическую прокладку

Плоская уплотнительная поверхность применяется при внутреннем давлении до 0,6 МПа, фланцы с выступом-впадиной от 0,6 до 1,6 МПа, с шипом-пазом – от 1,6 до 6,4 МПа. Уплотнительные поверхности под металлическую прокладку рекомендуются для давлений от 6,4 до 16 МПа.

Прокладки должны отвечать следующим основным требованиям: при сжатии с возможно малым давлением заполнять все микронеровности уплотнительных поверхностей; сохранять герметичность соединения при упругих перемещениях элементов фланцевого соединения (для чего материал прокладки должен обладать упругими свойствами); сохранять герметичность

соединения при его длительной эксплуатации в условиях воздействия агрессивных сред при высоких и низких температурах; материал не должен быть дефицитным.

9. Терминологический словарь к разделу 1.5

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 изоэнтальпическое (эффект Джоуля-Томсона) или изотропическое (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-обогащительный 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). *З.* углеродистой и низколегированной стали приводит к получению в её структуре мартенсита, характеризующегося высокой твёрдостью. *З.* высоколегированных сталей типа 12Х18Н10Т

называется аустенизацией. В данном случае 3. используется для получения из изделия однородного твёрдого раствора аустенита.

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

Зона термического влияния – область основного металла, прилегающая 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 – отъемная 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, проволоки, 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 нахлесточное – 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, а 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 разъемное 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.

Приложения

Таблица П 1 - Перечень материалов, стойких в некоторых технологических средах

Параметры среды	Рекомендуемые материалы*
-----------------	--------------------------

Конц., %	t, °C	
Азотная кислота HNO_3		
Любая	20– $t_{\text{кип}}$	Титан: ВТ1–0, ВТ1–00
	до 50	Стали: 08Х17Т, 12Х17, 14Х17Н2
	до 20	Стали: 08Х13, 12Х13, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Б Ферросилиды: ЧС15, ЧС17
Аммиак NH_3		
Любая ¹	до 100	Стали: 08Х13, 12Х13, 12Х17, 08Х17Т, 14Х17Н2, 15Х25Т, 12Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т
	до 60	Фторопласт-3
	20– $t_{\text{кип}}$	Стали: СтЗсп, 10, 20. Диабаз плавленный, фарфор кислотоупорный
Мочевина (карбамид) $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$		
Любая ²	20– $t_{\text{кип}}$	Керамика кислотоупорная, эмаль кислотоупорная
	20	Стали: 12Х13, 20Х13, 12Х17, 12Х18Н10Т
Расплав ³	–	Ферросилид ЧС15
Серная кислота H_2SO_4		
Любая	20– $t_{\text{кип}}$	Фарфор кислотоупорный, стекло кварцевое
	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– $t_{\text{кип}}$	Свинец: С1, С2, С3
Сернистая кислота H_2SO_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_2S		
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– $t_{\text{кип}}$	Антихлор ЧС15М4; антегмиты: АТМ–1, АТМ–1Г, АТМ–10

Параметры среды		Рекомендуемые материалы*
Конц., %	t, °C	
0,2	до 50	Сплав (Fe–Ni): 06X23H28M3Д3Т
до 0,5	до 100	Титан: BT1–0, BT1–00
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 Н ₃ Р ₀ 4		
Любая	20–t _{кип}	Базальт плавленный, графит и уголь формованные, фторопласт–4
	до 50	Стали: 15Х25Т, 15Х28, 15Х28АН, 75Х28Л
	20	Ферросилиды: ЧС15, ЧС17
Плавиновая кислота HF		
5	20–65	Монель НМЖМц 28–2,5–1,5
10–100	20	Латунь Л62
		Сталь 08Х17Н13М2Т
		Сплав (Fe–Ni): 06X23H28M3Д3Т
Примечания: * данные [10]. 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 2 - 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
5520–2017 16К, 18К, 20К, 22К	5520–2014	от –20 до +200	не ограничено
5520–2017 09Г2С, 10Г2С1	5520–2014	от –70 до +200	не ограничено

ГОСТ марка	ГОСТ на техн. требования	Рабочие условия	
		Температура стенки, °С	Давление среды МПа, не более
5520–2017 17ГС, 17Г1С, 16ГС	5520–2014	от –40 до +200	не ограничено
5520–2017 12ХМ кат. 3	5520–2014	от –40 до +560	не ограничено
19281–89 10ХСНД, 15ХСНД	19281–89	от –20 до +200	16
5632–2014 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т	7350–77	от –253 до +610	не ограничено
5632–2014 08Х17Т	7350–77	от +20 до +700	не ограничено
5632–2014 15Х25Т	7350–77	от +20 до +1000	не ограничено
<p>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)</p> <p style="text-align: center;"><i>ЛИСТ</i> $\frac{Б - ПН - НО - 12 \times 1500 \times 6000 \text{ ГОСТ } 19903 - 2015}{20К - 4 - ОП - Н \text{ ГОСТ } 5520 - 2017}$</p>			

Таблица П 3 - ОСТ 26-291-94 Применение стальных труб

ГОСТ марка стали	ГОСТ на техн. требования	Рабочие условия	
		Температура стенки, °С	Давление среды МПа, не более
380–2005 14637–89 Ст3сп3, Ст3пс3	3262–75 трубы водогазопроводные (усиленные)	от 0 до +200	1,6
Ст3сп4, Ст3пс4	10706–76 трубы электросварные	от –20 до +200	5
1050–88 10, 20	ТУ14-3-624 трубы электросварные	от –30 до +400	4
10, 20	550–75 8731–87	от –30 до +475	16
19281–89	ТУ14-3-1128	от –60 до +475	не ограничено

ГОСТ марка стали	ГОСТ на техн. требования	Рабочие условия	
		Температура стенки, °С	Давление среды МПа, не более
09Г2С			
ТУ14-3-460 15ХМ	ТУ14-3-460	от -40 до +560	не ограничено
5632-2014 12Х18Н10Т	9940-81	от -253 до +350	не ограничено
5632-2014 06ХН28МДТ	ТУ14-3-318 ТУ14-3-763 ТУ14-3-822	от -196 до +400	не ограничено
5632-2014 15Х25Т	9940-81 9941-81	от 0 до +900	не ограничено
5632-2014 08Х13	9940-81 9941-81	от -40 до +600	не ограничено

Пример обозначения полуфабрикатов из труб:

- Труба наружным диаметром 76 мм, толщиной стенки 5 мм, обычной точности изготовления, немерной длины из стали марки 08Х18Н10Т
Труба 76×5 – 08Х18Н10Т ГОСТ 9940 – 81
- Труба с наружным диаметром 70 мм, толщиной стенки 3,5 мм, длиной, кратной 1250 мм, обычной точности изготовления, из стали марки 10, изготавливается по группе Б ГОСТ 8731-74
*Труба $70 \times 3,5 \times 1250$ кр. ГОСТ 8732 – 78
Б10 ГОСТ 8731 – 74*

Таблица П 4 - ГОСТ 10885-85. Состав слоёв двухслойной стали

Плакирующий слой	Основной слой					
	Ст3сп	20К	16ГС	09Г2С	10ХСНД	12МХ
08Х13	+	+	+	+	—	+
12Х18Н10Т	+	+	+	+	+	+
10Х17Н13М2Т	+	+	+	+	—	—
06ХН28МДТ	+	+	+	+	—	—
ХН65МВ	—	—	+	—	—	—
Н70МФВ-ВИ	—	—	+	—	—	—
Моель НМЖМц 28-2,5-1,5	+	+	—	—	—	—

Примечание. Двухслойные листы с сочетанием слоёв, не отмеченные знаком «+», изготавливают 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

Плакирующий слой	Основной слой					
	СтЗсп	20К	16ГС	09Г2С	10ХСНД	12МХ
<i>Лист</i> $\frac{20 \times 1400 \times 4000 \text{ ГОСТ } 10885 - 85}{(16\text{ГС}3 + 08\text{Х}13) - \text{кл.} 2}$						

Таблица П 5 - ГОСТ 34233.1–2017. Допускаемые напряжения сплавов

<i>Стали</i>												
Марка	Значение $[\sigma]$ в МПа при t (°С)											
	20	200	250	300	350	400	450	470	500	540	600	700
СтЗсп	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: СтЗсп, 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 5. Продолжение

<i>Цветные сплавы</i>						
Марка	Значение $[\sigma]$ в МПа при t (°С)					
	20	50	100	200	250	300
АД00	17	16	14	—	—	—
АМг5М	74	73	64	—	—	—
МЗ	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
АТЗ	230	212	202	171	164	145

Пояснения: АД00 – алюминий технический; АМг5М – алюминиевый сплав; МЗ – техническая медь; Л63, ЛЖМц 59-1-1 – латуни; ВТ 1-0 – технический титан; АТЗ – титановый сплав.

Таблица П 6 - ГОСТ 34233.1–2017. Предел текучести (МПа) сталей и сплавов при комнатной температуре

Марка	Значение	Марка	Значение
-------	----------	-------	----------

Марка	Значение	Марка	Значение
Ст3сп	250	06ХН28МДТ	220
10	195	ВТ1-0	304
20, 20К	220	АТ-3	530
16ГС, 09Г2С	300	МЗр	81
12ХМ, 12МХ	220	Л63	105
15Х5М	220	А85М	24
12Х18Н10Т	270	АМц	50
10Х17Н13М2Т	276	АМг5М	115
03Х21Н21М4ГБ	270		
Пояснения: см. Пояснения к таблице П 5.			

Таблица П 7 - 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 8 - 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 9 - 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 10 - 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 11 - 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 аргона или гелия с двусторонним сплошным проплавлением	0,95	0,85
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 12 - 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_o	10				20				
Пояснения: d_p – номинальный диаметр резьбы; $d_{ш}$ – диаметр гладкой части; d_o – диаметр осевого отверстия.									

Библиографический список

1. Абдрашитов С.А., Туличенков А.А., Вершинин И.М., Тененгольц С.М. Насосы и компрессоры. – М.: Недра, 1974. – 296 с.
2. 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.
3. Вихман Г.Л., Круглов С.А. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов. М.: Машиностроение, 1978. – 328 с.
4. Генералов М.Б., Силин В.С. Химические реакторы производств нитропродуктов. М.: ИНЦ «Академкнига», 2004. – 392 с.
5. Гошко А.Н. Арматура трубопроводов целевого назначения. – М.: Машиностроение, 2003. – 427 с.
6. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984. – 592 с.

7. Конструирование и расчёт машин химических производств/ Ю.И. Гусев, И.Н. Карасёв, Э.Э. Кольман-Иванов и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.
8. Конструкционные материалы: Справочник/ Б.Н.Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А.Буше и др. – М.:Машиностроение, 1990. – 688 с.
9. Криворот А.С. Конструкция и основы проектирования машин и аппаратов химической промышленности. М.: Машиностроение, 1976. – 376 с.
10. Лашинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры: Справочник. 3-е изд., стереотипное. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 752 с.
11. Леонтьева А.И. Оборудование химических производств. – М.: Колос, 2008. – 479 с.
12. Лукьяница А.И., Сафонов Б.П. Основные правила проектирования сосудов и аппаратов химической промышленности НИ РХТУ, Новомосковск, 2012. – 119 с.
13. Машины и аппараты химических производств: Учебное пособие для ВУЗов/ А.С.Тимонин, Б.Г.Балдин, В.Я.Борщев Ю.И. Гусев и др. / Под общ. редакцией А.С.Тимониной. – Калуга: Издательство Н.Ф.Бочкарёвой, 2008. – 872 с.
14. Михайлов А.К., Ворошилов В.П. Компрессорные машины. – М.: Энергомашиздат, 1989. – 288 с.
15. ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 11 июня 2003 г. N 91).
16. 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).
17. Поникаров И.И., Гайнуллин М.Г. Машины и аппараты химических производств и нефтепереработки. – М.: Альфа-М, 2006. – 608 с.
18. Поникаров И.И., Поникаров С.И. Конструирование и расчёт элементов оборудования: учебник. – М.: Альфа-М, 2010. – 382 с.
19. Поникаров И.И., Поникаров С.И., Рачковский С.В. Расчёты машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки (примеры и задачи). – М.: Альфа-М, 2008. – 720 с.
20. 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.
21. РД 26-18-89. Сосуды. Термины и определения.
22. Сафонов Б.П. Расчёт элементов химического оборудования: Учебное пособие в 3-х частях/ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И.Менделеева, Новомосковский институт, Новомосковск. Ч.1 2018, 123 с. Ч.2 2017, 118 с. Ч 3 2020, 90 с.

23. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.

24. Тимонин А.С. Основы конструирования и расчёта технологического и природоохранного оборудования. Справочник. 2001. Т. 1 756 с. Т. 2 988 с. Т3 960 с.

25. Хлумский В. Ротационный компрессоры и вакуум-насосы. – М.: Машиностроение, 1971. – 128 с.

Оглавление

1. Общая информация о технологическом оборудовании химических производств	3
1.1. Технологические процессы химических производств и их аппаратурная реализация	3
1.2. Требования к технологическому оборудованию химических производств	5
1.3. Конструкционные материалы для изготовления технологического оборудования химических производств	7
1.4. Основы расчёта на прочность типовых элементов технологического оборудования химических производств	16
1.5. Основные правила конструирования, изготовления, монтажа и эксплуатации технологического химического оборудования	31
2. Типовое оборудование для массообменных процессов	48
2.1. Колонные массообменные аппараты	48
2.2. Промышленные адсорберы с неподвижным слоем адсорбента	55
3. Типовое оборудование для тепловых процессов	59
3.1. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты жесткой конструкции	59
3.2. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с плавающей головкой	61
3.3. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с линзовым компенсатором на кожухе	62
3.4. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с U-образными трубами	63
3.5. Кожухотрубчатые теплообменные аппараты с двойными трубами (трубами Фильда)	64
3.6. Спиральные и пластинчатые теплообменные аппараты	65
4. Типовое оборудование для измельчения твёрдых материалов	68
4.1. Измельчающие машины ударного действия	68

4.2. Измельчающие машины раскалывающего и разламывающего действия	70
5. Оборудование для разделения неоднородных систем	74
5.1. Конструкции и принцип работы циклонов	74
5.2. Конструкции и принцип работы рукавных фильтров	77
5.3. Устройство и принцип работы электрофильтров	79
6. Типовое оборудование для гидромеханических процессов	81
6.1. Устройство и принцип действия центробежного насоса	81
6.2. Устройство и принцип действия центробежного компрессора	83
6.3. Устройство и принцип действия объемных роторно-пластинчатых насосов и компрессоров	86
7. Типовое оборудование для реализации химических процессов	89
7.1. Конструкция реактора высокого давления с внутренним теплоотводом	89
7.2. Конструкция реактора с рубашкой и перемешивающим устройством	91
7.3. Конструкция трубчатого каталитического реактора	98
7.4. Конструкция адиабатического каталитического реактора с вводом байпасного охлажденного сырья	99
7.5. Конструкции реакторов пленочного типа	102
7.6. Конструкция роторно-пленочных реакторов	105
7.7. Конструкция реактора-полимеризатора трубчатого типа с диффузором	107
7.8. Конструкция реактора-полимеризатора для низкотемпературной полимеризации в эмульсии	108
7.9. Конструкция реактора-полимеризатора скребкового типа	110
8. Трубопроводная арматура и вспомогательные элементы оборудования	112
8.1. Конструкции трубопроводной арматуры	112
8.2. Неподвижные разъемные соединения элементов аппаратов и трубопроводов	117
9. Терминологический словарь к разделу 1.5	120
Приложения	125
Таблица П1 Перечень материалов, стойких в некоторых технологических средах	125
Таблица П2 ОСТ 26-291-94 Применение листовой стали	126
Таблица П3 ОСТ 26-291-94 Применение стальных труб	128
Таблица П4 ГОСТ 10885–85. Состав слоёв двухслойной стали	129
Таблица П5 ГОСТ 34233.1–2017. Допускаемые напряжения сплавов	129
Таблица П6 ГОСТ 34233.1–2017. Предел текучести (МПа) сталей и сплавов при комнатной температуре	130
Таблица П7 Модуль продольной упругости E сплавов	131
Таблица П8 Коэффициенты прочности (ϕ) сварных швов для	

стальных сосудов и аппаратов	131
Таблица П9 Коэффициенты прочности (φ) сварных швов для сосудов и аппаратов из алюминия и его сплавов	132
Таблица П10 Коэффициенты прочности (φ) сварных и паяных швов для сосудов и аппаратов из меди и её сплавов	132
Таблица П11 Коэффициенты прочности (φ) сварных швов для сосудов и аппаратов из титана и его сплавов	133
Таблица П12 ГОСТ 9066–75. Размеры (мм) шпилек фланцев (тип В)	133
Библиографический список	133

Учебное издание

**Типовое оборудование химических производств:
конструкции, конструкционные материалы, основы расчёта**

Учебное пособие

**Клочков Валерий Иванович,
Каменский Михаил Николаевич,
Сафонов Борис Петрович.**

Редактор Туманова Е.М.

Подписано в печать г. Формат 60×84^{1/16}

Бумага «Снегурочка». Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. . Уч.–изд. л. .

Тираж 50 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