

В.Ю. Прокофьев

**Оборудование производств
неорганических веществ**

Учебное пособие

**Иваново
2015**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

В.Ю. Прокофьев

**ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ**

Учебное пособие

Иваново 2015

УДК 66.02:621.22.011:620.19

Прокофьев, В.Ю.

Оборудование производств неорганических веществ: учебное пособие / В.Ю. Прокофьев; Иван. гос. хим.-технол. ун-т, – Иваново, 2015. – 115 с.

ISBN 978–5–9616–0503–7

В учебном пособии описано общезаводское и специальное оборудование, используемое для производства неорганических веществ, приведены методики технологического расчета. Рассмотрены свойства конструкционных материалов, применяемых в химическом машиностроении. Особое внимание уделено механическому расчету наиболее ответственных элементов химической аппаратуры.

Предназначено для студентов химико-технологических специальностей, обучающихся по направлению 18.03.01 «Химическая технология».

Табл. 12. Ил. 36. Библиогр.: 14 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор А.И. Сокольский (Ивановский государственный политехнический университет);

доктор технических наук, профессор О.П. Акаев (Костромской государственный университет им. Н.А. Некрасова)

ISBN 978–5–9616–0503–7

© Прокофьев В.Ю., 2015

© ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет», 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	7
1. ОБОРУДОВАНИЕ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТРЕБОВАНИЯ...	8
1.1. Классификация оборудования.....	8
1.2. Требования к химическому оборудованию.....	9
1.3. Порядок расчета оборудования.....	10
2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	12
2.1. Металлы и сплавы.....	12
2.2. Неметаллические материалы.....	14
2.3. Огнеупорные материалы.....	14
2.4. Теплоизоляционные материалы.....	15
2.5. Прокладочные и набивочные материалы.....	15
2.6. Способы защиты аппаратов от коррозии.....	16
3. ЭЛЕМЕНТЫ АППАРАТОВ И ИХ РАСЧЕТ.....	17
3.1. Выбор исходных данных для расчета аппаратов на прочность.....	17
3.2. Расчет элементов аппаратов низкого давления.....	20
3.2.1. Расчет цилиндрических обечаек, работающих под внутренним давлением.....	20
3.2.2. Расчет цилиндрических аппаратов, нагруженных наружным давлением.....	20
3.2.3. Крышки и днища, работающие под внутренним давлением.....	22
3.2.4. Расчет днищ и крышек, работающих под внешним давлением.....	23
3.2.5. Расчет резервуаров на прочность.....	24
3.3. Фланцы.....	25
3.4. Штуцеры и бобышки.....	26
3.5. Смотровые окна.....	26
3.6. Люки и лазы.....	27
3.7. Опоры.....	27
3.8. Расчет элементов аппаратов высокого давления.....	28
3.8.1. Расчет обечаек.....	28
3.8.2. Расчет днищ и крышек.....	29
3.8.3. Уплотнения.....	29
3.9. Расчет толщины теплоизоляции.....	31
4. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ И УСТРОЙСТВА.....	32
4.1. Кожухотрубные теплообменники.....	33
4.1.1. Основные элементы кожухотрубных теплообменников...	35

4.1.2. Расчет основных элементов кожухотрубных теплообменников.....	36
4.2. Змеевиковые, спиральные и блочные теплообменники.....	38
4.3. Теплообменные устройства аппаратов.....	39
5. АППАРАТЫ С МЕШАЛКАМИ.....	42
5.1. Выбор мешалок.....	42
5.1.1. Расчет мешалок.....	44
5.1.2. Расчет вала.....	46
5.2. Выбор аппарата.....	47
6. КОЛОННЫЕ И БАШЕННЫЕ АППАРАТЫ.....	49
6.1. Тарельчатые колонны.....	49
6.1.1. Колпачковые тарелки.....	50
6.1.2. Ситчатые тарелки.....	50
6.1.3. Клапанные тарелки.....	51
6.1.4. Струйно-направленные тарелки.....	51
6.2. Насадочные колонны.....	51
6.2.1. Насадки.....	52
6.2.2. Устройства для орошения.....	53
7. РАСТВОРИТЕЛИ.....	55
8. КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ.....	56
8.1. Методы кристаллизации.....	56
8.1.1. Кристаллизаторы изогидрической кристаллизации.....	56
8.1.2. Вакуум-кристаллизаторы.....	57
8.1.3. Кристаллизаторы изотермической кристаллизации.....	58
9. АППАРАТЫ ДЛЯ КОНТАКТНО-КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ.....	59
9.1. Контактные аппараты с неподвижным слоем катализатора.....	59
9.2. Контактные аппараты с псевдооживленным слоем катализатора.....	64
10. ПЕЧИ.....	66
10.1. Виды печей.....	67
10.2. Расчет шахтных печей.....	70
10.3. Расчет барабанных печей.....	72
11. СУШИЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.....	75
11.1. Барабанные сушилки.....	76
11.2. Сушилки со взвешенным слоем.....	77
11.3. Распылительные сушилки.....	78
12. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ.....	80
12.1. Дробилки.....	81
12.2. Мельницы.....	83
12.3. Организация измельчения.....	84

13. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ.....	86
13.1. Гранулирование порошкообразных материалов.....	86
13.2. Гранулирование паст.....	90
13.3. Гранулирование расплавов.....	90
14. ТРАНСПОРТ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	92
14.1. Конвейеры и элеваторы.....	93
14.2. Установки пневмотранспорта.....	101
15. ТРУБЫ И ТРУБОПРОВОДНАЯ АРАМАТУРА.....	105
15.1. Трубы и фасонные части трубопроводов.....	105
15.2. Компенсаторы.....	108
15.3. Опоры трубопроводов.....	108
15.4. Арматура.....	108
16. ОБОРУДОВАНИЕ СКЛАДОВ.....	110
16.1. Склады для хранения твердых материалов.....	110
16.2. Склады для хранения жидких продуктов.....	111
16.3. Оборудование для хранения газов.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	113
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	114

ВВЕДЕНИЕ

Значительные объемы выпуска многих видов химической продукции априори предполагают высокие требования к технологии их получения (совершенство технологии, автоматизация и механизация, использование оборудования большой единичной мощности). Особые требования предъявляются к крупному оборудованию, т.к. резервирование не рентабельно, а простои приводят к большим экономическим потерям. Надежность оборудования зависит от многих факторов, в частности, от правильного выбора материала и конструкции отдельных узлов и агрегатов с учетом рабочей среды, давления, температуры и т.п.

Оборудование включает машины, аппараты, транспортные устройства, необходимые для осуществления технологического процесса.

Технология производства и его аппаратурное оформление взаимосвязаны, и каждому способу производства соответствует определенный набор машин и аппаратов.

Технолог должен знать принцип действия и устройство оборудования, его достоинства и недостатки, уметь грамотно выбирать машины и аппараты для заданного процесса, уметь рассчитывать производительность для данного режима работы и выполнять проверочные расчеты наиболее ответственных узлов и деталей. Поскольку устойчивость работы технологической линии во многом зависит от качества проектирования, то технолог также должен знать основы проектирования.

Дисциплина "**Оборудование производств неорганических веществ**" обобщает и систематизирует данные по принципам подбора типа и конструкции аппаратов и машин. Дисциплина базируется на курсах процессов и аппаратов, теории технологических процессов, механики, тесно связана с курсами общей химической технологии и технологии данного производства.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

D – внутренний диаметр аппарата
 E – модуль упругости
 G – вес
 F – сила, усилие
 H – высота аппарата или слоя жидкости
 J – момент инерции сечения кольца жесткости или вала
 K – коэффициент теплопередачи
 L – расчетная длина, расстояние между элементами жесткости
 M – максимальный изгибающий момент
 $M_{кр}$ – крутящий момент
 N – мощность
 P – расчетное давление
 R – радиус кривизны
 S – площадь, площадь поперечного сечения
 T – температура в градусах Кельвина
 Q – количество тепла
 V – объемный расход
 V_a – объем аппарата

c – прибавка на коррозию
 d – диаметр трубы
 h – шаг труб или отверстий
 n – число аппаратов, труб или др. элементов
 t – температура в градусах Цельсия

α – коэффициент запаса производительности
 α_i – коэффициент теплоотдачи
 β – коэффициент запаса мощности
 λ – коэффициент теплопроводности
 δ – толщина стенки
 η – коэффициент полезного действия
 σ – напряжение
[σ] – допустимое напряжение
 τ – время пребывания
[τ] – допустимое напряжение на кручение
 μ – динамическая вязкость
 ρ – плотность
 ω – частота вращения

1. ОБОРУДОВАНИЕ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТРЕБОВАНИЯ

1.1. Классификация оборудования

Классификация по назначению и принципу действия

Машины – механизмы или сочетание механизмов, осуществляющие определенные движения для преобразования энергии или производства работы.

Аппараты – устройства, предназначенные для проведения химических, физико-химических, тепловых, гидромеханических процессов, в которых механические операции играют вспомогательную роль. Они являются основными видами химического оборудования, и их размеры и конструкция определяются условиями проведения заданного процесса.

Классификация по области применения

Универсальное – типовое оборудование, пригодное для многих химических производств (насосы, компрессоры, теплообменники, фильтры, конвейеры и т.п.). Выпускается большими партиями.

Специализированное – предназначено для одного или близких по типу производств (абсорберы, ректификационные колонны, выпарные аппараты, кристаллизаторы и т.п.). Выпускается малыми сериями.

Специальное – применяют для проведения одного определенного технологического процесса или операции (колонны синтеза аммиака, контактные аппараты для окисления диоксида серы, печь обжига колчедана, колонна карбонизации в содовом производстве и т.п.). Выпускаются единично.

Классификация по роли в технологическом процессе

Основное – машины и аппараты для проведения процессов, в результате которых образуются целевые продукты. Размеры и тип основного оборудования определяются заданной производительностью, физико-химическими свойствами участвующих веществ (химическая активность, теплоемкость, тепловой эффект, агрегатное состояние и т.п.), концентрацией, давлением, температурой.

Вспомогательное – не оказывает существенного влияния на технологический процесс (емкости, мерники, хранилища и т.п.). Поэтому тип, конструкцию, размеры вспомогательного оборудования можно варьировать в определенных пределах.

Классификация по условиям работы

Периодического действия – локальная интенсивность и параметры процесса изменяются во времени.

Непрерывного действия – локальная интенсивность и параметры процесса остаются постоянными во времени. Оборудование

непрерывного действия имеет большую производительность, его легче автоматизировать и обслуживать.

Классификация аппаратов по величине, определяющей их производительность

Аппараты *поверхностного* и *объемного* типов.

1.2. Требования к химическому оборудованию

Все химическое оборудование должно удовлетворять ряду требований, обеспечивающих его высокие эксплуатационные характеристики.

Технологические требования

1. *Максимальная производительность при минимальных затратах материалов, энергии, труда на обслуживание.* Достигается выбором оптимальной конструкции и режима работы.

2. *Устойчивость технологического режима, возможность автоматического контроля и управления процессом.* Достигается правильным выбором конструкции и подбором КИП.

3. *Механизация и автоматизация загрузки и выгрузки.*

4. *Оборудование должно отвечать требованиям техники безопасности, исключать вредные выбросы и излучения.* Достигается путем герметизации и изоляции оборудования.

Конструктивные требования

1. *Механическая прочность и устойчивость форм, герметичность.* Т.к. оборудование часто работает под повышенными давлениями и температурами, часто содержатся ядовитые и взрывоопасные вещества, при расчете принимают повышенный запас прочности.

2. *Долговечность и надежность.* Расчетный срок службы 10-12 лет, однако, фактически он выше. Достигается применением коррозионно-стойких материалов и покрытий, периодическим ремонтом наиболее изнашивающихся узлов и деталей. Следует учитывать моральное старение.

3. *Конструктивное совершенство.* Малые габариты и вес аппаратов, малый расход дефицитных и дорогих материалов, простота и дешевизна изготовления, сборки и разборки.

4. *Транспортабельность.* Учет возможности перевозки различными видами транспорта.

5. *Унификация.* Применение аналогичных конструкций аппаратов, узлов. При проектировании необходимо стремиться к максимальной унификации.

1.3. Порядок расчета оборудования

Оборудование должно отвечать ряду технологических и конструктивных требований. Для выполнения этих требований расчеты оборудования проводят в определенной последовательности.

Технологический расчет. Цель данного расчета – определение размеров аппарата или числа аппаратов при заданных размерах. Расчет проводят на основании составления материального баланса с учетом степени превращения, селективности, потерь сырья и продуктов. Основные размеры аппарата: объем или поверхность массо- или теплообмена, – вычисляют на основании законов кинетики данного процесса и норм технологического режима.

Основные величины, определяющие размер аппарата емкостного типа – это необходимое время пребывания, объемная производительность и число аппаратов:

$$V_p = V\tau/n. \quad (1.1)$$

Аппараты для жидкофазных процессов (реакторы, растворители, выпарные аппараты и т.д.) не могут быть заполнены полностью. Поэтому при их расчете следует учитывать степень заполнения реакционной смесью. Отношения объема реакционной смеси к полному объему аппарата называют *коэффициентом заполнения*:

$$\varphi = V_p/V_a. \quad (1.2)$$

Величина φ зависит от типа и конструкции аппарата:

- простые аппараты без внутренних устройств (мерники, сборники, хранилища) $\varphi = 0,85 \div 0,9$;
- аппараты с мешалкой (реакторы, растворители, кристаллизаторы и т.п.) $\varphi = 0,75 \div 0,8$;
- аппараты, в которых протекают процессы с большим пенообразованием $\varphi = 0,4 \div 0,6$.

При расчете аппаратов могут возникнуть ошибки вследствие неточности расчета, недостаточного знания кинетики процесса или свойств материала. Для компенсации этого вводится *коэффициент запаса производительности* α . Величина α зависит от типа и конструкции аппарата:

- простые аппараты без движущихся частей $\alpha = 1,0 \div 1,05$;
- аппараты с внутренними устройствами без вращающихся частей, работающие при низких и средних температурах без давления $\alpha = 1,1 \div 1,15$;
- аппараты с быстровращающимися деталями, работающие при высоких температурах и давлении $\alpha = 1,15 \div 1,20$.

С учетом введенных коэффициентов получим уравнение для расчета объема аппаратов:

$$V_a = \frac{V\tau\alpha}{\varphi n}. \quad (1.3)$$

Способы технологического расчета подробно рассматриваются в курсах специальных дисциплин.

Тепловой расчет. Цель расчета определить поверхность теплопередачи, расхода энергии и теплоносителя, потерь в окружающую среду. Выполняется на основании составления теплового баланса. Кроме того, необходим расчет тепловой изоляции, т.к. температура наружной стенки аппарата по нормам техники безопасности не должна превышать 50°C.

Гидравлический расчет. Цель расчета – определение сопротивления аппарата проходу газа или жидкости при принятых размерах, конструкции аппарата с учетом числа и расположения патрубков и штуцеров.

Энергетический расчет. Необходим для определения мощности привода перемещающих и перемешивающих устройств.

Механический расчет. Проверочный расчет для ответственных узлов и деталей, работающих в наиболее тяжелых условиях. Как правило, выполняют механические расчеты на прочность обечаяк, днищ и крышек аппаратов под давлением, трубных решеток и труб теплообменников, валов и лопастей мешалок, уплотнений аппаратов высокого давления.

2. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Выбор конструкционного материала для изготовления оборудования основан на учете ряда свойств материала (химическая и термическая стойкость, прочность, стоимость, доступность и т.д.) и условий работы. Нет абсолютно идеальных материалов. Химически стойкий может оказаться недостаточно прочным или термостойким. Применение дорогого, но прочного и стойкого материала может оказаться выгоднее использования дешевого материала, т.к. оборудование будет иметь более тонкие стенки. При изготовлении аппаратов часто используют комбинацию различных материалов.

2.1. Металлы и сплавы

Стали. Для аппаратуры, работающей в неагрессивной и слабоагрессивной среде, используют углеродистые стали: обыкновенные и качественные. Они содержат от 0,06 до 0,6 % углерода.

Аппаратуру, работающую при давлении 20 МПа и температурах $-40 \div 450^\circ\text{C}$, изготавливают из *качественных сталей*.

Углеродистые стали устойчивы к концентрированной серной кислоте, слабощелочным растворам, растворам некоторых солей. Их применяют в производстве серной кислоты, некоторых солей и щелочей.

Для изготовления оборудования, работающего в агрессивных средах при повышенных температурах и давлении используют *легированные стали*. В состав легированных сталей, кроме железа и углерода, входят добавки, называемые легирующими:

никель – повышает коррозионную стойкость и механическую прочность;

хром – увеличивает жаропрочность и стойкость к атмосферной коррозии (нержавеющая сталь 11÷14 % хрома);

марганец – при содержании более 10% увеличивается сопротивляемость к ударам и эрозии (детали мельниц и дробилок);

молибден – повышает коррозионную устойчивость к горячим серной, фосфорной кислотам и хлоридам;

титан и ниобий – снижают межкристаллитную коррозию.

Маркировка легированных сталей. Легирующие элементы: Н - никель, Х - хром, Г - марганец, Т - титан, М - молибден, В - вольфрам, Ф - ванадий, Б - ниобий, С - кремний, Д - медь, Ю - алюминий, цифра после буквы – содержание в процентах, если менее 1,5%, то цифра не

ставится. Цифра перед буквами - содержание углерода в сотых долях процента. (12X18H10T – 0,12% С, 18% Cr, 10% Ni, до 1,5% Ti, остальное Fe).

Сталь 12X18H10T – устойчива к азотной кислоте, щелочам, нитратам, газовой коррозии, выдерживает температуру до 800°C.

Для удешевления стоимости сталей выпускают двухслойные (плакированные стали). Основной слой – углеродистая сталь, защитный (плакирующий слой) – легированная сталь.

Чугуны имеют низкую стоимость и удовлетворительные механические свойства, но из-за плохой коррозионной стойкости в химической промышленности применяются ограниченно.

Цветные металлы.

Алюминий. Стоек к действию концентрированных кислот, но не стоек к разбавленным кислотам и щелочным растворам. Имеет высокую теплопроводность и низкую плотность. Используют в производстве азотной кислоты

Медь. Стойкая в растворах щелочей и аммиака, соляной кислоты, разрушается в присутствии окислителей. Имеет максимальную теплопроводность, поэтому используется для изготовления теплообменной аппаратуры.

Латунь. Сплав меди с цинком. Имеет более высокую коррозионную стойкость по сравнению с медью. Область применения та же, что и у меди.

Бронза. Сплав меди с оловом или другими металлами. Бронзы обладают хорошими прочностными и антифрикционными свойствами, хорошо работают в условиях сильного эрозионного износа.

Маркировка. Буквы Л и Бр - латунь и бронза соответственно. Следующие буквы - содержание компонентов: А - алюминий, Мц - марганец, О - олово, Ж - железо, Ц - цинк, Н - никель, Б - бериллий, Ф - фосфор и т.д. с использованием первой буквы русского названия элемента. ЛАН59-3-2 – латунь, 59% Cu, 3% Al, 2% Ni, остальное Zn. БрАЖ9-4 – бронза, 9% Al, 4% Fe, остальное Cu. В химической промышленности чаще используют Л68 и Л62, БрОЦ10-2, БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1,5

Свинец. В настоящее время применяется крайне редко, т.к. мягкий.

Титан. Стоек к растворам нитратов, хлоридов, карбамида. Разрушается в серной, соляной, плавиковой, фосфорной кислотах, в щелочах. Ввиду его большой стоимости часто титан используют как плакирующий слой толщиной 0,5÷3 мм.

Никель. Нашел широкое применение в химической промышленности, особенно для производства реактивов. Часто используют сплавы никеля Н70МФ, ХН65МВ.

2.2 Неметаллические материалы

Диабаз. Получают плавкой при 1400⁰С, содержит примерно 48% диоксида кремния и 16% оксида алюминия. Стоек к кислотам, кроме плавиковой и фторкремниевой. Разъедается щелочами. Используется как футеровочный материал.

Асбест. Волокнистый материал на основе гидросиликатов магнезия. Разновидности: хризотил (щелочестойкий) и амфиболовые асбесты. Используются как теплоизоляционные материалы при температурах 600÷800⁰С.

Керамика устойчива к кислотам, кроме плавиковой и фторкремниевой. Из нее изготавливают кирпичи, плитки, трубы и арматуру, емкости, насадочные тела и т.д. Недостаток – хрупкость.

Графитовые материалы нашли широкое применения благодаря высокой химической стойкости, хорошей теплопроводности, низким коэффициентам линейного расширения, достаточно высокой прочности и термостойкости. Для уменьшения пористости графит пропитывают фенолформальдегидными смолами.

Фоолит. Композиция фенолформальдегидной смолы и наполнителя (графита или асбеста). Термореактивная пластмасса. Стоек к кислотам и растворам многих солей, не рекомендуется применять в растворах щелочей и окислительной среде. Изготавливают трубы, запорную аппаратуру.

Винипласт. Полимер на основе поливинилхлорида с различными добавками. Обладает высокой химической стойкостью.

Полиэтилен. Из него изготавливают трубы и арматуру, обкладки, тару. Полиэтиленовые трубы имеют преимущество перед металлическими, т.к. легче, химически стойкие, при замерзании в них воды не разрушаются.

Резины Обладают высокой химической стойкостью. Используют для создания защитных поверхностей (гуммирование). Недостаток – старение.

2.3. Огнеупорные материалы

В зависимости от исходного сырья огнеупоры делят на 6 групп:

- 1) кремнеземистые;
- 2) алюмосиликатные;
- 3) магнезиальные;

4) углеродсодержащие; 5) оксидные; 6) карбидные, боридные, нитридные. По огнеупорности материалы делят на огнеупорные (1580÷1770°C), высокоогнеупорные (1770÷2000°C), высшей огнеупорности (выше 2000°C).

Динас. Кремнеземистый, огнеупорный материал. Стоек к кислотам, но разъедается в щелочах. Низкая термическая стойкость.

Шамот. Алумосиликатный высокоогнеупорный материал. Достаточно устойчив к кислым и основным шлакам, а также к резким изменениям температуры.

Доломит. Магнезиальный, высокоогнеупорный.

Карборунд (SiC), бориды, карбиды, нитриды, силициды d-элементов (Ti, Zr, Ta, Mo), нитрид кремния – высшей огнеупорности.

2.4. Теплоизоляционные материалы

По способу использования при монтаже делят на мастичные, рулонные, мастично-формованные.

Высокотемпературные теплоизоляционные материалы. Применяют при температурах выше 450°C: асбест, диатомит, пенобетон, шлаковая вата.

Среднетемпературные теплоизоляционные материалы. Применяют при температурах 150÷450°C: асбозурит, ньювель.

Низкотемпературные теплоизоляционные материалы. Применяют при температурах ниже 150°C: войлок, стекловата, пенопласт, отходы текстильной промышленности.

2.5. Прокладочные и набивочные материалы

Для герметизации разъемных соединений между фланцами помещают прокладки из эластичного материала. **Картон** – используют для уплотнения соединений масло- и рассолопроводов. **Асбест** – применяют для газопроводов сухих агрессивных газов при температуре до 600°C. **Паронит** (смесь асбеста и каучука) – основной прокладочный материал для паропроводов. **Резина** – для холодной и горячей воды, слабых растворов минеральных кислот и щелочей.

Для герметизации используются также и другие полимерные материалы, например, **полиизобутилен, полиэтилен, фторопласт.**

Для уплотнения соединений аппаратов высокого давления используют **свинец, медь, алюминий.**

Набивки и набивочные материалы используют для герметизации сальниковых уплотнений машин и аппаратов. Для неагрессивных сред: **хлопок, пенька, лен**. Для агрессивных сред: **асбест, стекловолокно, пластмассы, мягкие металлы, графит**. Набивочные материалы выпускают в виде плетеных шнуров различного сечения и колец.

2.6. Способы защиты аппаратов от коррозии

Основной способ защиты от коррозии – нанесение защитного покрытия. В этом случае корпус обеспечивает прочность, а покрытие предохраняет от воздействия среды. Основные виды покрытий: пленочное, листовое, футеровка.

Пленочные защитные покрытия. Покрытия наносятся одним из следующих способов: 1) осаждение слоя коррозионно-стойкого металла электрохимическим методом. Достоинства способа: простота образования, возможность нанесения слоя на поверхность сложной геометрической формы; 2) многослойная окраска поверхности лаками, красками и битумами, применяют для защиты внешней поверхности от атмосферной коррозии; 3) напыление порошкообразных полимерных материалов с последующим их спеканием, недостаток полимеров – температура их использования не выше 300°C; 4) эмалирование – нанесение слоя эмали с последующим спеканием при 800÷900°C, недостаток эмали – нестойкие к щелочам и плавиковой кислоте.

Листовые покрытия. Покрытие производят наклейкой на горячую поверхность или плакированием (без наклейки) полимерных материалов (полиэтилен, винипласт и т.п.). Широко распространено гуммирование. Достоинства: сравнительная простота, возможность применения стандартных листовых материалов. Недостатки: поверхность должна иметь простую геометрическую форму.

Футеровка аппаратов штучными кислотоупорными изделиями. Плитки и кирпичи из кислотоупорной керамики, фарфора, диабазы закрепляют на защищаемой поверхности специальными вяжущими. По конструкции футеровку делят на простую, многослойную и комбинированную. Однослойную футеровку применяют для защиты поверхности газоходов, полов. Многослойную используют для защиты аппаратов, работающих в наиболее тяжелых условиях.

Ингибиторы коррозии. Вещества, уменьшающие скорость коррозии. Их добавляют в малых количествах в реакционную смесь.

3. ЭЛЕМЕНТЫ АППАРАТОВ И ИХ РАСЧЕТ

В химической технологии в основном используют стандартизованную и нормализованную аппаратуру. Однако при отыскании оптимальных режимов процесса возможно значительное варьирование давления, температуры, состава рабочей среды. В связи с этим необходим поверочный расчет деталей и узлов аппаратов на прочность.

В зависимости от отношения толщины стенки к диаметру аппарата обечайки разделяют на **тонкостенные** и **толстостенные**. Если это отношение пренебрежимо мало, то обечайки считают тонкостенными, в противном случае – толстостенными.

В зависимости от рабочего давления аппараты разделяют на аппараты, работающие под **внешним** и **внутренним** давлением. В свою очередь, аппараты, работающие под внутренним давлением разделяют на аппараты, работающие под **низким давлением** (до 10 МПа), аппараты, работающие под **высоким давлением** (10÷100 МПа), и аппараты, работающие под **сверхвысоким давлением** (>100 МПа).

Аппараты, работающие под низким и внешним давлением, относят к тонкостенным, а аппараты, работающие под высоким и сверхвысоким давлением – к толстостенным.

3.1. Выбор исходных данных для расчета аппаратов на прочность

Прочность, безопасность, долговечность любого аппарата определяются механическим расчетом. Исходными данными является допустимое напряжение $[\sigma]$ при заданной температуре и расчетном давлении. **Допускаемое напряжение** – это то напряжение, при котором обеспечивается механическая прочность аппарата с расчетным запасом и минимальным расходом конструкционного материала. При расчетах аппаратов на устойчивость формы используют **модуль упругости E** , характеризующий жесткость материала, его устойчивость к деформации.

В табл. 3.1 приведены значения нормативных допустимых напряжений и модулей упругости для марок сталей, получивших наибольшее распространение в химическом машиностроении.


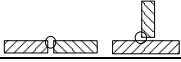

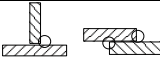
Современная химическая аппаратура изготавливается из отдельных элементов, соединенных сваркой. Поэтому при расчете аппаратов необходимо учитывать прочность сварного шва.

Таблица 3.1. Нормативные допускаемые напряжения (σ , МПа) и модули упругости (E , МПа)

Расчетная температура, °С	Ст-3		10		20, 20К		09Г2С, 16ГС		12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т		15Х25Т	
	σ	$E \cdot 10^{-5}$	σ	$E \cdot 10^{-5}$	σ	$E \cdot 10^{-5}$	σ	$E \cdot 10^{-5}$	σ	$E \cdot 10^{-5}$	σ	$E \cdot 10^{-5}$
20	140	1,99	130	1,99	147	1,99	170	1,99	160	2,00	-	2,04
100	134	1,91	125	1,91	142	1,91	160	1,91	152	2,00	-	2,00
150	131	1,86	122	1,86	139	1,86	154	1,86	146	1,99	-	-
200	126	1,81	118	1,81	136	1,81	148	1,81	140	1,97	-	1,97
250	120	1,76	112	1,76	132	1,76	145	1,76	136	1,94	-	-
300	108	1,71	100	1,71	119	1,71	134	1,71	130	1,91	-	1,89
350	98	1,64	88	1,64	106	1,64	123	1,64	126	1,86	-	-
375	93	-	82	-	96	-	116	-	124	-	-	-
400	85	1,55	74	1,55	92	1,55	110	1,55	121	1,81	-	1,76
410	87	-	70	-	86	-	104	-	120	-	-	-
420	75	-	66	-	80	-	92	-	120	-	-	-
430	71	-	62	-	75	-	86	-	119	-	-	-
440	-	-	56	-	67	-	75	-	118	-	-	-
450	-	1,40	51	1,40	61	1,40	71	1,40	117	1,75	-	-
460	-	-	47	-	55	-	64	-	116	-	-	-
500	-	-	-	-	-	-	-	-	113	1,68	-	1,64
550	-	-	-	-	-	-	-	-	101	1,61	-	-
600	-	-	-	-	-	-	-	-	74	1,53	-	1,40
700	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	77	1,24
800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	1,16

Для этого вводят **коэффициент прочности сварного шва** φ , который характеризует отношение прочности сварного шва к прочности материала. Значение коэффициента зависит от конструкции шва и приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Значения коэффициентов прочности сварного шва

Конструкция шва	Способ сварки	φ
	Автоматическая дуговая двусторонняя	1,00
	Автоматическая дуговая односторонняя	0,95
	Ручная дуговая	0,90
	Ручная дуговая	0,80

Прочность всех материалов с повышением температуры уменьшается, поэтому при расчете аппаратов необходимо учитывать этот фактор. **Расчетная температура** зависит от температуры окружающей среды, методов обогрева и охлаждения. Чаще всего температуру стенки аппарата принимают равной температуре среды, соприкасающейся со стенкой ($t_{cm} = t_{cp}$). Если стенка аппарата покрыта изоляцией или футеровкой, то температуру стенки принимают равной температуре поверхности изоляции, соприкасающейся со стенкой, увеличенной на 20°C ($t_{cm} = t_{\text{изол}} + 20$). При обогреве аппарата открытым пламенем или электрообогревателями, горячими газами с температурой выше 250°C , температуру стенки принимают равной температуре соприкасающейся среды, увеличенной на 50°C ($t_{cm} = t_{cp} + 50$). Для аппаратов, работающих при отрицательных температурах, за расчетную температуру принимают 20°C .

При расчете аппаратов на прочность исходными величинами являются рабочее давление P_c и расчетное давление P_p , МПа. Под **рабочим давлением** понимается то давление, которое имеется в аппарате при нормальном или форсированном режиме работы. Давление, принимаемое при расчетах, называется **расчетным давлением**. Чаще всего его принимают равным рабочему. Если аппарат работает под наливом, то необходимо учитывать гидростатическое давление столба жидкости. В этом случае расчетное давление вычисляют как, МПа

$$P_p = P_c + \rho_{ж} g H \cdot 10^{-6}. \quad (3.1)$$

Для аппаратов, работающих под внешним давлением за расчетное давление принимают разность между внешним и внутренним

давлением. Для аппаратов, работающих под вакуумом за расчетное давление принимают давление в 1 атм.

При расчетах аппаратов на прочность необходимо иметь в виду такие важные факторы, как коррозионное влияние рабочей среды, механическое воздействие абразивных материалов, нормативные допуски на толщину листа или отливки. Поэтому к расчетным величинам делается *прибавка на коррозию, эрозию, округление размеров*.

Величину c рассчитывают, исходя из срока служба аппарата (10÷12 лет), умноженную на скорость коррозии или проницаемость. Как правило, для химического оборудования выбирают стали с проницаемостью 0,1 мм/год. При более интенсивной коррозии конструкционный материал защищают футеровкой. Если стенка аппарата или какой-то элемент подвергаются коррозионному воздействию с двух сторон, то делается двойная прибавка на коррозию. Для чугунных литых аппаратов прибавку на коррозию с учетом отклонения толщины берут в пределах 5÷9 мм.

3.2. Расчет элементов аппаратов низкого давления

3.2.1. Расчет цилиндрических обечаек, работающих под внутренним давлением

Толщину стенки *цилиндрических обечаек, работающих под внутренним давлением*, согласно третьей теории прочности, удовлетворительной для сложного напряженного состояния относительно пластичных материалов (стали и др.), с учетом прибавки на коррозию можно рассчитывать по формуле:

$$\delta = \frac{PD}{2[\sigma]\varphi - P} + c, \quad (3.2)$$

где P – расчетное давление

3.2.2. Расчет цилиндрических аппаратов, нагруженных наружным давлением

Под наружным давлением находятся вакуумные аппараты, корпуса с рубашками и различные внутренние устройства (греющие камеры выпарных установок и др.). При этом в стенках возникают сжимающие напряжения. Толщину стенки аппарата, находящегося под наружным давлением, рассчитывают на прочность по тем же формулам и с теми же запасами прочности, что и аппараты с внутренним давлением. Коэффициент прочности сварного шва в этом случае принимают

равным единице. Однако для аппаратов, находящихся под внешним давлением, одного расчета на прочность недостаточно. Необходимо проверить также устойчивость оболочки. Тонкостенные оболочки под действием наружного давления могут потерять свою первоначальную форму и расплющиться раньше, чем напряжение сжатия достигнет разрушающей величины.

По отношению к расчету на устойчивость оболочки условно разделяют на *длинные* и *короткие*. Если длина оболочки значительна (более 5÷7 диаметров), то оболочку рассчитывают как длинную. В данном случае крышки или кольца жесткости не оказывают укрепляющего действия на среднюю часть оболочки, поэтому толщина стенки не зависит от длины. Если расстояние между крышками или кольцами жесткости невелико, то укрепляющее действие крышек или колец жесткости необходимо учитывать и оболочку рассчитывать как короткую. **Расчетной длиной оболочки** считают расстояние между ее концами, а при наличии колец жесткости, – наибольшее расстояние между ними.

Уравнение для расчета длинной оболочки:

$$\delta = 1,06 \frac{D}{100} \sqrt[3]{\frac{P}{E \cdot 10^{-6}}} + c, \quad (3.3)$$

область применения которого,

$$L/D > 7,68 \sqrt[6]{E \cdot 10^{-6}/P}.$$

Иначе оболочку рассчитывают как короткую:

$$\delta = 0,47 \frac{D}{100} \left(\frac{P}{E \cdot 10^{-6}} \frac{L}{D} \right)^{0,4} + c. \quad (3.4)$$

Так как толщина стенки значительно уменьшается при уменьшении расчетной длины оболочки, то одним из способов облегчения обечайки, нагруженной наружным давлением, является установка *колец жесткости*. Кольца устанавливают как снаружи обечайки, так и внутри нее. Установка колец внутри обечайки более надежна, так как в данном случае сварной шов не испытывает дополнительных нагрузок, но в случае необходимости (например, при наличии антикоррозионной защиты) кольца приваривают к наружной стенке обечайки. Кольца жесткости изготавливают из полосы или проката.

Когда расстояние между кольцами больше половины диаметра, необходимый момент инерции сечения кольца:

$$J_{тр} = \frac{L}{12} \left[1,18 \frac{PD^3}{E} - (\delta - c)^3 \right]. \quad (3.5)$$

Эффективный момент инерции поперечного сечения кольца жесткости (рис. 3.1):

$$J_{\text{эф}} = J_0 + ah(l_{\text{ц}} - l_c)^2 + \frac{l_{\text{эф}}^3(\delta - c)^3}{10,92} \left[1 + 12 \left(\frac{l_c}{\delta - c} \right)^2 \right], \quad (3.6)$$

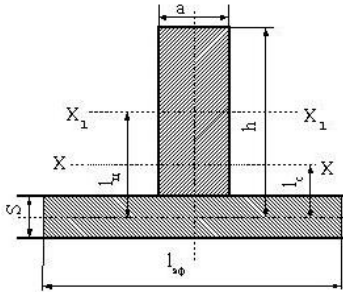


Рис. 3.1. Схема расчета кольца жесткости

где $J_0 = ah^3/12$ момент инерции сечения кольца жесткости относительно собственной оси X_1-X_1 , проходящей через центр тяжести; $l_{\text{ц}} = \frac{h}{2} + \frac{\delta}{2} - c$ – расстояние от оси центра тяжести поперечного сечения кольца жесткости до середины стенки обечайки; $l_c = \frac{l_{\text{эф}}\delta}{2a} - \frac{(h+\delta)}{2} - c$ – расстояние от оси, лежащей на середине стенки обечайки, до центра тяжести поперечного сечения, включающего на себя кольцо

жесткости и часть стенки обечайки длиной $l_{\text{эф}} = a + 1,1\sqrt{D(\delta - c)}$ – эффективная длина обечайки, включаемая в расчетное сечение кольца жесткости; a – ширина поперечного сечения кольца жесткости, находящаяся в контакте с поверхностью стенки обечайки. **Эффективный момент инерции должен быть больше требуемого.**

3.2.3. Крышки и днища, работающие под внутренним давлением

По форме различают днища полушаровые, эллиптические, конические, сферические неотбортованные.

Эллиптические днища (рис. 3.2) широко применяют в аппаратах, работающих под внутренним и внешним давлением. Толщину стенки днища с учетом прибавки на коррозию вычисляют по формуле:

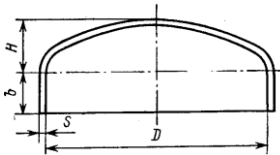


Рис. 3.2. Эллиптическое днище

$$\delta = \frac{PR}{2[\sigma]\varphi - 0,5P} - c. \quad (3.7)$$

Здесь R – радиус кривизны в вершине днища; H – внутренняя высота днища в его вершине. Высота стандартного эллиптического днища $H = 0,25 D$.

Конические днища и переходы (рис. 3.3) используют в случаях вязких и сыпучих сред и при переходе от большего диаметра к меньшему. Конические днища и переходы изготавливают с отбортовкой

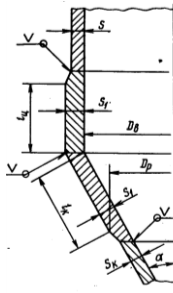


Рис. 3.3. Эллиптическое днище

и без нее. Толщину стенки конического элемента без отбортовки определяют по формуле:

$$\delta = \frac{PD}{(2[\sigma]\varphi - P)\cos\alpha} + c, \quad (3.8)$$

Здесь α – угол между осью и образующей конуса.

Сферические днища применяют в аппаратах с диаметром $D_B > 4$ м; толщину стенки рассчитывают по формуле (3.7).

Плоские днища и крышки используют в качестве люков, заглушек на вертикальных аппаратах. Толщину стенки определяют по формуле:

$$\delta = \frac{K}{K_0} D \sqrt{\frac{P}{[\sigma]}} + c, \quad (3.9)$$

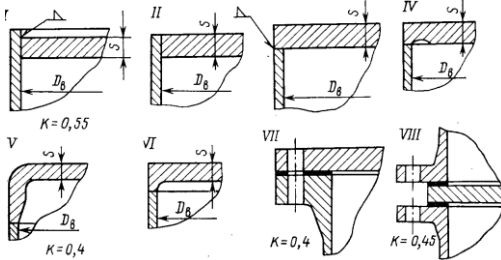


Рис. 3.4. Варианты присоединения плоских днищ к обечайке и значения коэффициента конструкции днища K

где K – конструктивный коэффициент, зависящий от типа днища (рис. 3.4); K_0 – коэффициент ослабления днища отверстиями.

Коэффициент ослабления днища отверстиями вычисляют по формуле:

$$K_0 = \sqrt{1 - \frac{\sum d_i}{D}}$$

3.2.4. Расчет днищ и крышек, работающих под внешним давлением

Толщину стенки эллиптического днища рассчитывают по формуле:

$$\delta = \frac{R}{0,3} \sqrt{\frac{P}{E}} + c. \quad (3.10)$$

Толщину стенки конического элемента принимают равной толщине стенки сопрягаемой с ним цилиндрической обечайки, рассчитанной по формулам для обечаяк, работающих под внешним давлением.

3.2.5. Расчет резервуаров на прочность

С учетом прочности сварного шва и прибавки на коррозию толщина стенки каждого пояса **вертикального цилиндрического резервуара**

$$\delta = \frac{(P_{\text{изб}} + \rho_{\text{ж}} g H)}{2[\sigma]\varphi} + c. \quad (3.11)$$

Толщина вертикальной стенки **прямоугольного резервуара**

$$\delta = a \sqrt{\frac{k\rho_{\text{ж}} g H}{2[\sigma]}} + c, \quad (3.12)$$

где a – короткая сторона стенки; k – коэффициент, зависящий от отношения a/b (где b – длинная сторона стенки):

$$k = \frac{0,7}{1 + 1,61(a/b)^2}. \quad (3.13)$$

Если резервуар имеет вертикальные ребра жесткости, то за ширину принимают расстояние между ребрами 800÷1000 мм.

Если толщина стенки выбрана предварительно, то минимальное расстояние между стойками:

$$L = (\delta - c) \sqrt{\frac{k[\sigma]}{2\rho_{\text{ж}} g H}}. \quad (3.14)$$

Толщину стенки **горизонтального цилиндрического аппарата** рассчитывают, как и для вертикальных аппаратов.

Поскольку цилиндрическая горизонтальная обечайка подвержена действию изгибающего момента, то необходим проверочный расчет на жесткость. Для этого рассчитывается коэффициент k :

$$k = \frac{P(D + \delta - c)}{2\varphi[\sigma](\delta - c)} - 1. \quad (3.15)$$

Если $k > 0$, то необходимо усиление кольцами жесткости. Расстояние между кольцами жесткости:

$$L \leq \sqrt{D(\delta - c) \left[\frac{2}{k} - \frac{\varphi}{\varphi_{\text{к}}} \left(1 - \frac{1}{k} \right) \right]}. \quad (3.16)$$

Площадь кольца жесткости

$$F \geq \frac{(\delta - c)L[\sigma]\varphi k}{[\sigma]_{\text{к}}\varphi_{\text{к}}}. \quad (3.17)$$

3.3. Фланцы

Фланцы – это наиболее распространенные разъемные соединения аппаратов и трубопроводов. Они служат для соединения крышек, цанг, люков, трубопроводов. Самой ответственной частью фланца является *узел уплотнения* (рис. 3.5). Различают уплотнения с *пластической* и *упругой* деформацией прокладок. Наиболее широко используют уплотнение с пластической деформацией. Это достигается размещением между поверхностями уплотнения более мягких прокладок, которые при затягивании соединения деформируются и заполняют все неровности на привалочной поверхности фланцев. Уплотнение с упругой деформацией применяют в основном при повышенных давлениях. Их недостаток – необходимость тщательной обработки поверхностей уплотнения.

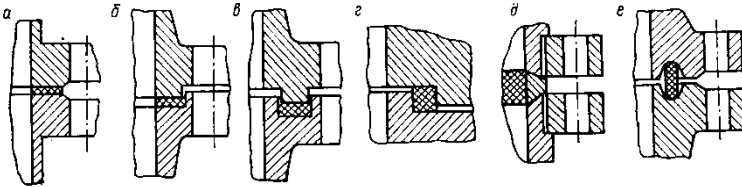


Рис. 3.5. Виды поверхностей уплотнения фланцевых соединений: а – плоская; б – выступ-впадина; в – "шип-паз"; г – "в замок"; д – коническая; е – овальная

По способу соединения (со штуцером или корпусом) и конструкции различают фланцы: *плоские приварные*; с *утолщением у основания* (с "шейкой"); свободные на *отбортовке* и *бурте* (рис. 3.6).

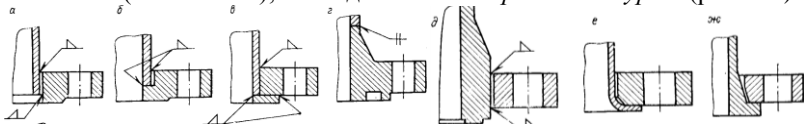


Рис. 3.6. Основные виды фланцев: а÷в – плоские приварные; г – типа "шип-паз"; д – с "шейкой"; е – с отбортовкой; ж – с буртом

Наиболее просты по конструкции плоские фланцы. Их применяют при давления до 20 МПа. Основной недостаток плоских фланцев – малая жесткость у основания. Эти фланцы имеют плоские привалочные поверхности, поверхности в виде "выступ-впадина" и "шип-паз". Наиболее широко распространены фланцы с "шейкой", приваренные встык. Их применяют и с металлическими прокладками. На аппаратах, изготовленных из цветных металлов, поддающихся

отбортовке, применяют стальные фланцы с отбортовкой. Для соединения аппаратов и труб, изготовленных из керамики, стекла и пластмасс и не поддающихся пластической деформации, а также при недопустимости сварки и с целью экономии легированных сталей и цветных металлов (например, патрубков из чугуна, высоколегированной и углеродистой стали) используют фланцы с буртом. Фланцы на резьбе применяют на трубопроводах высокого давления, где сварка нежелательна.

3.4. Штуцеры и бобышки

Штуцеры служат для присоединения фланцев и других устройств к аппаратам. Для аппаратов с изоляцией штуцеры делают удлиненными и при значительных длинах их укрепляют продольными ребрами жесткости. Приваривают штуцеры к аппаратам различным образом (рис. 3.7).

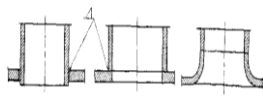


Рис. 3.7. Способ приварки штуцеров

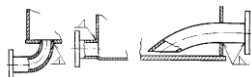


Рис. 3.8. Штуцеры для слива жидкости

При необходимости обогрева штуцеры снабжают рубашками.

Штуцеры для слива жидкости из аппарата в основном располагают в днище – для обеспечения полного удаления жидкости (рис. 3.8). Иногда используют изогнутый штуцер.

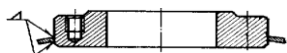


Рис. 3.9. Бобышка

Бобышки – это фланцы, приваренные непосредственно к корпусу аппарата (рис. 3.9). К бобышкам с помощью шпилек присоединяют трубопроводы. Бобышки применяют для установки контрольно-измерительных приборов и других устройств и в тех случаях, когда нельзя или нежелательно устанавливать штуцеры.

3.5. Смотровые окна

Смотровые окна (рис. 3.10) служат для наблюдения за ходом процесса, за засорением труб и т. д. Их диаметр обычно составляет от 5 до 150 мм. Устанавливают их в основном на бобышках на противоположных сторонах. На одном из них размещают светильник. Для наблюдения за уровнем жидкости в аппарате служат мерные стекла.



Рис. 3.10. Смотровое окно

3.6. Люки и лазы

Люки предназначены для осмотра аппарата, монтажа, демонтажа, ремонта устройств, расположенных внутри аппарата, для загрузки сырья и очистки аппарата (рис. 3.11). Они нормализованы. Имеется следующий ряд диаметров люка: 150, 250, 400, 500, 600, 800 мм.

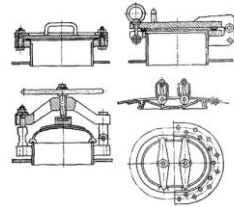


Рис. 3.11. Люки и лазы

3.7. Опоры

Опоры служат для установки аппаратов на фундаменты и несущие конструкции. Их выбирают в зависимости от конструкции оборудования, нагрузки и способа установки (рис. 3.12).

Для установки вертикальных аппаратов на полу или на фундаменте применяют *опорные лапы*, а при подвеске их между перекрытиями – *боковые опоры*.

Площадь (m^2), на которую опирается лапа, определяют, исходя из максимального удельного давления на опорную конструкцию:

$$F = \frac{G_{max}}{n P_{уд}}, \quad (3.18)$$

где G_{max} – максимальный вес аппарата, включая футеровку, термоизоляцию, трубопроводы и вес продукта, Н; n – число лап; $P_{уд}$ – удельное давление. $P_{уд}$ для кирпичной кладки 1,6 МПа, для бетона – 2÷4 МПа.

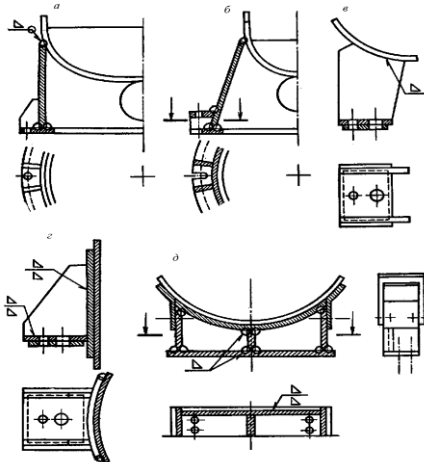


Рис. 3.12. Опоры вертикальных и горизонтальных аппаратов: *а* – цилиндрическая с местными косынками (тип I); *б* – коническая с кольцевым опорным поясом (тип IV); *в* – сварная стойка; *г* – сварная лапа; *д* – опора для горизонтальных аппаратов

3.8. Расчет элементов аппаратов высокого давления

К аппаратам высокого давления относят аппараты, работающие под давлением от 10 до 100 МПа. Эти аппараты применяют в производствах аммиака, карбамида, водорода, метанола. Проектирование и изготовление таких аппаратов имеет ряд специфических особенностей.

3.8.1. Расчет обечаек

Корпуса аппаратов высокого давления изготавливают в виде различных конструкций: *цельнокованые, кованосварные, штамповарные, многослойные, витые и рулонные.*

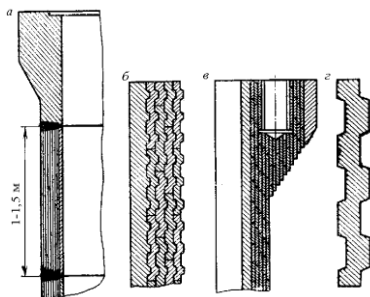


Рис. 3.13. Узлы многослойного (а), витого (б, в) корпусов и профиль ленты (г) для навивки

Цельнокованые корпуса изготавливают при помощи тяжелого ковального оборудования из цельной стальной отливки, в середине которой высверливают отверстие, а потом заготовку надевают на оправу, проковывают, после чего механически обрабатывают. Кованосварные корпуса состоят из нескольких кованных царг длиной 3÷4 м, сваренных встык; штампованосварные – из штампованных полукопыт; многослойные – из нескольких обечаек, насаженных друг на друга с натягом (рис. 3.13, а). Витые корпуса изготавливают наматыванием стальной ленты в несколько слоев в горячем виде на цилиндрическую гильзу. При остывании лента сжимает гильзу, что создает равномерное распределение (рис. 3.13, б, в, г).

Толщина стенки сплошной обечайки:

$$\delta = 0,5D(\beta - 1) + c, \quad (3.19)$$

Здесь $\beta = D_{вн}/D_{в}$ – коэффициент толстостенности, равный

$$\ln \beta = \frac{P}{[\sigma]\varphi}. \quad (3.20)$$

Для цельнокованых и многослойных аппаратов коэффициент прочности сварного шва $\varphi = 1$, для штамповарных аппаратов из

малоуглеродистых и низколегированных сталей (22К; 10Г2С) $\varphi = 0,95$, для среднелегированных сталей (25ХЗНМ; 20Х2МА; 12МХ) $\varphi = 0,85$.

3.8.2. Расчет днищ и крышек

Толщина стенки плоского и слабовыпуклого днища:

$$\delta = 0,45D \sqrt{\frac{P}{[\sigma]\psi}} + c, \quad (3.21)$$

где ψ – коэффициент ослабления днища отверстиями:

$$\psi = 1 - \frac{\sum d_i}{D}. \quad (3.22)$$

Толщина стенки выпуклого днища:

$$\delta = \frac{PR}{2[\sigma]\varphi - 0,5P} - c. \quad (3.23)$$

Радиус кривизны днища:

$$R = \frac{D^2}{4H}. \quad (3.24)$$

для эллиптических днищ с $H = 0,25D$; для полусферических днищ $R = 0,5D$, $H = 0,5D$.

3.8.3. Уплотнения

Для обеспечения герметичности разъемных соединений используют различные затворы с металлическими (медь, алюминий) обтюраторами. Чаще применяют затворы с *принудительным уплотнением* (за счет усилия, развиваемого болтами) и *самоуплотняющиеся* (за счет давления среды внутри аппарата).

По способу крепления крышки к корпусу затворы подразделяют на *болтовые* и *безболтовые*.

Болтовой затвор принудительного уплотнения пластичным плоским обтюратором используют в аппаратах небольшого диаметра, работающих при температуре ниже 200°C. Достоинством затвора является его простота, недостатками – его чувствительность к колебаниям температуры, значительное усилие затяжки шпилек.

Безболтовой затвор принудительного уплотнения с пластичным обтюратором трапецидального сечения (рис. 3.14) используют в аппаратах, работающих при температуре до 540°C и давлении 10÷100 МПа. Достоинство затвора – малая чувствительность к изменению температуры.

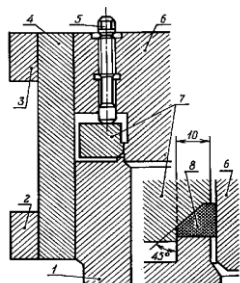


Рис. 3.14. Безболтовой затвор принудительного уплотнения с пластичным обтюратором трапецидального сечения

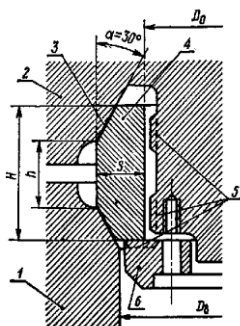


Рис. 3.15. Болтовой двухконусный радиально-самоуплотняющийся затвор с пластичным обтюратором

Корпус колонны без фланца 1 соединяется с крышкой 6 при помощи разъемной муфты 4, на поверхности касания которых выполнена кольцеобразная нарезка. Резьба упрощает и ускоряет сборку и разборку затвора. Полукольца муфты удерживаются в рабочем положении вспомогательными кольцами 2 и 3. Уплотнение между крышкой и корпусом обеспечивается трапецидальным пластичным обтюратором 8. Нажимные винты 5 и кольцо 7 служат для затяжки обтюратора и обеспечивают герметичность затвора.

Болтовой двухконусный радиально-самоуплотняющийся затвор с пластичным обтюратором (рис. 3.15) благодаря относительной простоте конструкции, высокой надежности и малой чувствительности к изменению температуры нашел широкое применение при температурах до 400°C и давлении до 100 МПа. Недостаток этой конструкции – необходимость тщательной обработки привалочных поверхностей.

В корпусе 1 и крышке 2 проточены уплотняемые поверхности, к которым прилегает кольцо 4 с коническими срезами на наружной поверхности. Между уплотняемыми поверхностями закладывается пластичный, чаще алюминиевый, обтюратор 3 толщиной 1÷1,5 мм. Кольцо крепится к крышке планкой 6, удерживаемой болтами. Предварительное уплотнение затвора достигается затяжкой шпилек. По мере повышения давления в аппарате кольцо расширяется и заклинивается между корпусом и крышкой, увеличивая сжатие прокладки. Таким образом, с ростом рабочего давления повышаются смятие обтюратора и герметичность затвора. Чтобы рабочая среда попадала в зазор между плоской поверхностью кольца и крышкой, на

поверхности планки и крышки фрезеруются специальные канавки 5 шириной 6÷8 мм.

3.9. Расчет толщины теплоизоляции

Количество тепла, передаваемое через изоляцию:

$$Q_1 = \frac{\lambda_{\text{из}}}{\delta_{\text{из}}} (t_{\text{из,вн}} - t_{\text{из,н}}), \quad (3.25)$$

где $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности изоляции; $\delta_{\text{из}}$ – толщина изоляции; $t_{\text{из,вн}}$ – температура внутренней поверхности изоляции; $t_{\text{из,н}}$ – температура наружной поверхности изоляции. Температуру наружной поверхности изоляции по условиям техники безопасности принимают не более 50 °С.

Количество тепла, передаваемое от изоляции в окружающую среду

$$Q_2 = \alpha_{\text{ос}} (t_{\text{из,н}} - t_{\text{ос}}), \quad (3.26)$$

где $\alpha_{\text{ос}}$ – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду; $t_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды. Коэффициент теплоотдачи можно рассчитать как, ккал/(м²·ч·град)

$$\alpha_{\text{ос}} = 8 + 0,005t_{\text{из,н}}. \quad (3.27)$$

Т.к. $Q_1 = Q_2$, то

$$\delta_{\text{из}} = \frac{\lambda_{\text{из}} (t_{\text{из,вн}} - t_{\text{из,н}})}{\alpha_{\text{ос}} (t_{\text{из,н}} - t_{\text{ос}})}. \quad (3.28)$$

Потери тепла в окружающую среду

$$Q_{\text{пот}} = S \frac{\lambda_{\text{из}}}{\delta_{\text{из}}} (t_{\text{из,вн}} - t_{\text{из,н}}), \quad (3.29)$$

где S – теплопроводящая поверхность принимается как среднее арифметическое внутренней и наружной поверхностей изоляции.

4. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ И УСТРОЙСТВА

Теплообменное оборудование занимает значительный удельный вес в химической технологии. Наряду с теплообменниками, представляющими собой самостоятельные аппараты, применяют теплообменные элементы, являющиеся составными частями различных аппаратов. Теплообменники работают с самыми различными средами: коррозионными, токсичными и высоковязкими продуктами. Их эксплуатируют при температурах до 1000°C и давлениях до 200 МПа.

Свойства среды и ее параметры предъявляют свои требования к конструкции теплообменных аппаратов. Необходимо учитывать технологическое назначение теплообменников: различают аппараты для процесса *теплообмена без изменения агрегатного состояния продуктов, конденсаторы, испарители и реакционные аппараты*, сопровождающиеся интенсивным теплообменом.

Характер процессов, протекающих в теплообменнике, определяет в значительной степени его конструкцию: например, в испарителях необходимо обеспечить хороший отвод образующихся паров; если теплообмен сопровождается конденсацией паров, то следует предусматривать хороший отвод конденсата от теплообменных поверхностей.

При выборе конструкции и решении вопроса, в какую полость направлять тот или иной теплоагент, руководствуются следующими общими соображениями:

1) при высоком давлении теплоносителей применяют трубчатые теплообменники и теплоноситель с более высоким давлением направляют по трубам, так как они имеют малый диаметр и могут выдержать большое давление;

2) корродирующий теплоноситель в трубчатых теплообменниках также целесообразно направлять по трубам;

3) загрязненные или дающие отложения теплоагенты необходимо направлять с той стороны поверхности теплообмена, где возможно производить очистку (в кожухотрубных теплообменниках более доступное для очистки трубное пространство, в змеевиковых теплообменниках – наружная сторона труб);

4) так как коэффициент теплоотдачи возрастает с увеличением скорости, для повышения эффективности теплообменников стремятся по возможности уменьшить сечение каналов для движения теплоагентов.

В теплообменниках необходимо по возможности обеспечить противоточное движение теплоносителей; Желательно, чтобы направление движения совпадало с направлением естественной циркуляции. При изменении агрегатного состояния одного из теплоносителей взаимное направление движения не имеет существенного значения.

4.1. Кожухотрубные теплообменники

Кожухотрубные теплообменники в настоящее время широко распространены и составляют до 80% от всей теплообменной аппаратуры. Основная их часть – пучок труб, закрепленный в трубных решетках. **Достоинство** кожухотрубных теплообменников – возможность получения значительной поверхности теплообмена при сравнительно небольших габаритах и хорошо освоенная технология изготовления, **недостаток** – высокий расход металла по сравнению со спиральными и пластинчатыми теплообменниками.

Кожухотрубные теплообменники применяют при давлении до 6,4 МПа (чаще – до 2,5 МПа) и температуре до 400÷500°С. При более высоких температурах применение их нежелательно. Размер поверхности кожухотрубных теплообменников достигает 4000 м², диаметр обычно не превышает 2000 мм, длина труб в крупных конструкциях достигает 9 м. Как правило, кожухотрубные теплообменники делают сравнительно малого диаметра и большой длины. Это объясняется стремлением увеличить скорости движения теплоагентов и конструктивными соображениями – целесообразно уменьшать диаметр трубной решетки и число соединения трубок с решеткой.

Наиболее прост **теплообменник жесткой конструкции**. Он состоит из трубного пучка и двух трубных решеток, накрыт крышками. Так как крышки трубных решеток открывают сравнительно часто при чистке и ремонте, их, как правило, делают съемными. Применение камерных крышек позволяет открывать и ремонтировать трубные решетки, не нарушая присоединения трубопроводов. Для увеличения скорости теплоагента в трубном пространстве теплообменники делают многоходовыми, для этого в крышках располагают перегородки, чтобы теплоагент последовательно проходил отдельные пучки труб. Применяют 2, 3, 4 и 6-ходовые теплообменники.

Теплообменники жесткой конструкции можно применять только при небольшой разности температур трубок и кожуха (обычно не

более 30÷40°C). В остальных случаях необходима компенсация температурных напряжений, возникающих из-за различного теплового расширения кожуха и трубок. В теплообменниках с линзовым компенсатором температурное перемещение кожуха частично воспринимается за счет упругой деформации компенсатора.

Теплообменники с U-образными трубками и с плавающей головкой применяют в тех случаях, когда требуется постоянная очистка межтрубного пространства или имеются значительные температурные расширения, а высокое давление в межтрубном пространстве не допускает установку компенсатора. В этих аппаратах трубный пучок имеет возможность свободно расширяться независимо от корпуса. Теплообменники данного типа делают горизонтальными, так как при вертикальном положении трубного пучка затрудняется его опорожнение от жидкости или конденсата. Кроме того, при горизонтальном расположении легче выдвигать трубный пучок.

В **теплообменнике с U-образными трубками** трубный пучок набирают из изогнутых трубок. По своей конструкции он двухходовой. Трубный пучок может быть сравнительно легко извлечен из аппарата. *Недостаток* такого теплообменника – трудность очистки изогнутых трубок и минимально допустимый радиус изгиба труб ($3\div 4 d$), не позволяющий заполнить трубками середину U-образного теплообменника.

В **теплообменниках с плавающей головкой** возможна очистка как трубок, так и межтрубного пространства. Один конец трубок связан с жестко закрепленной решеткой, а второй – со свободно перемещающейся. Для удобства извлечения тяжелого трубного пучка его опирают с помощью перегородок на тележку с роликами. Теплообменники с плавающей головкой имеют четное число ходов (обычно два или четыре).

Витые теплообменники состоят из пучков труб малого диаметра, спирально закрученных и соединенных с двумя трубными решетками. Они обеспечивают большую поверхность теплообмена и хороший коэффициент теплопередачи. Спирально намотанные трубы легко воспринимают температурные удлинения. Благодаря малому диаметру трубок эти аппараты могут работать при значительных давлениях в трубном пространстве. Витые теплообменники применяются в основном в криогенной технике.

4.1.1. Основные элементы кожухотрубных теплообменников

Основной элемент кожухотрубных теплообменников – **трубы**. Масса трубного пучка обычно составляет 60÷80% от массы аппарата. Чем меньше диаметр труб, тем теплообменник компактнее и меньше расход металла, но существенно повышается трудоемкость изготовления аппарата и затрудняется его очистка.

В настоящее время для стальных и титановых теплообменников широко применяют трубы размером 25×2, 20×2 мм. Трубки большего диаметра применяют только при выделении отложений из теплоагентов.

Когда коэффициенты теплоотдачи по обе стороны стенки существенно различаются, применяют оребренные трубы, что дает возможность развить поверхности с той стороны, где коэффициент теплоотдачи меньше. Например, в калориферах или воздушных холодильниках ребра располагают со стороны воздушного пространства. Применение оребрения позволяет значительно сократить расход металла на единицу теплообменной поверхности. Существует несколько способов выполнения оребрения (рис. 4.1).

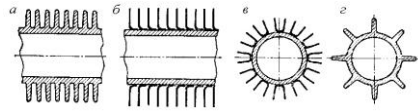


Рис. 4.1. Типы оребренных труб: *а* – с накатанными ребрами; *б* – с приварными ребрами; *в* – с продольными приварными ребрами; *г* – цельнотянутая с продольными ребрами

Крепление труб в трубной решетке должно быть прочным, плотным и вместе с тем обеспечивать легкую замену поврежденной трубы. Раньше основным способом крепления труб из пластичных материалов была *развальцовка* (рис. 4.2 *а,б*). При давлении в теплообменнике свыше 1,6 МПа для увеличения сопротивления вырыванию на поверхности гнезд протачивают канавки, а концы труб разбортовывают.

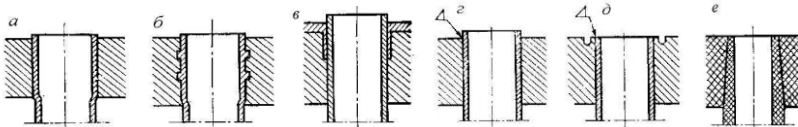


Рис. 4.2. Способы крепления труб в трубной решетке. *а, б* – развальцовка, *в* – пайка, *г, д* – сварка, *е* – склейка.

В последнее время развальцовку труб с успехом заменяют сваркой. *Сварное соединение* (рис. 4.2, з, д) позволяет уменьшить толщину трубной решетки и шаг труб. Оно более надежно по сравнению с развальцовкой, так как обеспечивает лучшую герметичность. С точки зрения технологии сварки наиболее совершенным следует признать соединение, показанное на рис. 4.2, д. Однако оно более трудоемко, так как требует дополнительной выточки кольцевых пазов в трубной решетке.

Трубы графитовых теплообменников приклеивают специальными полимерными материалами (рис. 4.2, е).

Трубы располагают в трубной решетке по вершинам квадрата (рис. 4.3, б), тогда трубный пучок более доступен для очистки снаружи или равносторонних треугольников (рис. 4.3, а). Эта схема компактна и чаще применяется. Ориентировочное число труб при расположении их по вершинам треугольника с шагом h в кожухе диаметром D будет:

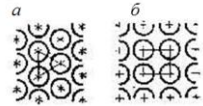


Рис. 4.3. Разбивка труб в трубной решетке

$$n = \frac{K\pi D^2}{3,47h^2} \quad (4.1)$$

где $K = 0,7 \div 0,85$ (меньшее значение K относится к теплообменникам с малым числом труб и к многоходовым теплообменникам). Окончательное число труб определяют по таблицам или путем вычерчивания трубного пучка в крупном масштабе.

Поперечные перегородки в межтрубном пространстве служат для сообщения необходимого направления потоку теплоагента и одновременно поддерживают трубный пучок. Для обеспечения зигзагообразного хода теплоагента обычно устанавливают перегородки в виде кругов с сегментным вырезом.

Линзовый компенсатор должен обладать большой гибкостью, поэтому его делают значительно тоньше кожуха теплообменника. Вследствие небольшой толщины и сложного характера нагрузки (наряду с напряжениями от давления на компенсатор действуют значительные усилия, возникающие от его сжатия или растяжения) компенсатор – весьма ответственный элемент аппарата.

4.1.2. Расчет основных элементов кожухотрубных теплообменников

Основные размеры теплообменника определяют по результатам теплового и гидравлического расчета. Механический (прочностной)

расчет начинают с определения усилий, действующих на теплообменник.

Температурные напряжения в теплообменниках жесткой конструкции возникают при различной температуре труб и кожуха, а также когда температура их одинакова, но трубы и кожух изготовлены из разных материалов, коэффициенты удлинения которых сильно отличаются.

На кожух и трубки действует *осевое усилие*

$$F = \frac{\alpha_T t_T - \alpha_K t_K}{1/(E_T S_T) + 1/(E_K S_K)}, \quad (4.2)$$

где α – коэффициент линейного термического расширения; индекс «Т» относится к трубам, индекс «К» – к кожуху.

В трубах и в кожухах температурные напряжения

$$\sigma_{Т,К} = F/S_{Т,К}. \quad (4.3)$$

В зависимости от распределения температур это усилие может быть *сжимающим* или *растягивающим*.

Температуры стенок труб и кожуха определяют тепловым расчетом. Необходимо иметь в виду, что они могут значительно отличаться от температуры теплоносителей. Например, при наличии в межтрубном пространстве конденсирующихся паров, имеющих высокий коэффициент теплоотдачи, а в трубном пространстве – холодной жидкости температура труб и кожуха практически одинакова, несмотря на значительную разность температур между теплоносителями.

В теплообменниках с плавающей головкой и с U-образными трубками температурные напряжения отсутствуют. В многоходовых теплообменниках при значительном перепаде температуры теплоносителя возможны также температурные напряжения вследствие разности температур труб в разных точках трубного пучка. Компенсировать эти напряжения невозможно.

Трубные решетки рассчитывают как перфорированные круглые пластины, нагруженные давлением. Влияние укрепляющего действия трубок и способы закрепления решетки учитываются введением соответствующих коэффициентов. Дополнительно проверяют толщину решетки по условиям надежности развальцовки. Толщину трубной решетки теплообменников жесткого типа можно рассчитывать и по упрощенной методике:

$$\delta = \frac{C_M D}{2} \sqrt{0,2P} \sqrt{[\sigma]\psi} + c, \quad (4.4)$$

где ψ – коэффициент ослабления решетки отверстиями: $\psi = (h - d)/h$;

$$C_M = \sqrt{1/(2\rho + 3)}; \quad \rho = \frac{E_T n(d_n - d_{вн})\pi}{4E_K D \delta_K} \quad \begin{array}{l} \text{отношение} \\ \text{труб к жесткости} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{жесткости} \\ \text{кожуха} \end{array}$$

Толщину трубной решетки теплообменника с плавающей головкой и U-образными трубами определяют по формуле:

$$\delta = 0,238 \sqrt{\frac{P}{[\sigma]\psi}} + c. \quad (4.5)$$

4.2. Змеевиковые, спиральные и блочные теплообменники

Змеевиковые теплообменники более громоздки и металлоемки по сравнению с кожухотрубными. Их используют при высоких температурах и давлениях и малом расходе одного из теплоагентов, когда применение кожухотрубных нежелательно или когда приняты конструкционные материалы, из которых невозможно или очень трудно изготовить кожухотрубный теплообменник. По форме различают *спиральные* и *петлевые (зигзагообразные)* змеевики. Простейшие змеевиковые теплообменники – *погружные*, представляющие собой змеевик, погруженный в какой-либо сосуд. Их широко применяют в качестве теплообменных элементов реакционных емкостных аппаратов. Использование погружных спиральных змеевиков как самостоятельных теплообменных аппаратов нецелесообразно из-за их громоздкости и плохой теплопередачи. В отличие от них *оросительные змеевиковые теплообменники* являются вполне современной конструкцией. Эти теплообменники (холодильники и конденсаторы) представляют собой петлевые змеевики с горизонтально расположенными трубами, над которыми устанавливают оросительные устройства.

Теплообменники "труба в трубе" используют как нагреватели, испарители и реакционные аппараты ("скоростные трубчатки"). Подбирая диаметр наружной трубы, в этих теплообменниках можно добиться высоких скоростей и коэффициентов теплоотдачи даже при малых расходах обоих теплоносителей. Наиболее просты по конструкции теплообменники с приварной наружной трубой, которые могут быть цельносварными или иметь съемные калачи для прочистки.

Спиральный теплообменник состоит из двух спиральных каналов, навитых вокруг центральной перегородки. Ширина кольцевой щели 5÷25 мм (постоянная ширина щели обеспечивается за счет приварки дистанционных штифтов). Спиральные теплообменные аппараты применяют в качестве теплообменников, конденсаторов и

испарителей. Одно из назначений спиральных теплообменников – нагревание и охлаждение высоковязких жидкостей; так как вязкая жидкость проходит по одному каналу, то устраняется проблема равномерного распределения жидкости по трубам.

Пластинчатые теплообменники состоят из ряда тонких параллельных пластин, между которыми движутся теплоагенты. Пластинчатые теплообменники обладают самыми высокими технико-экономическими характеристиками по сравнению с теплообменниками других типов. Они имеют самую большую удельную поверхность на единицу объема и массы. Большая поверхность теплообмена позволяет осуществить "мягкий" обогрев, т.е. нагрев жидкости в тонком слое при малой разности температур между теплоагентами (до $1,5 \div 2^\circ\text{C}$), поэтому они особенно удобны при работе с термонестойкими веществами. Возможность разборки пластин делает теплообменные поверхности доступными для осмотра, прочистки и промывки, что особенно удобно при работе с загрязненными, вязкими и застывающими жидкостями. Недостаток пластинчатых теплообменников – большой периметр уплотняемых соединений, что усложняет их герметизацию.

Наряду с разборными пластинчатыми теплообменниками применяют полуразборные и неразборные. Неразборные пластинчатые теплообменники (*ламельные*) состоят из пластин, соединенных сваркой. По компоновке ламельные теплообменники напоминают кожухотрубные.

Некоторое применение находят **блочные теплообменники** из графита, представляющие собой единый блок, внутри которого во взаимно-перпендикулярном направлении по каналам движутся теплоносители.

4.3. Теплообменные устройства аппаратов

Многие химические и физико-химические процессы сопровождаются теплообменом, поэтому в аппаратах часто устанавливают теплообменные устройства, которые можно подразделить на ***вставные теплообменные элементы и устройства для обогрева стенок***. В качестве вставных теплообменников применяют *U-образные теплообменные элементы*, ничем не отличающиеся от трубных пучков U-образных теплообменников, и *змеевики*.

Змеевики изготавливают обычно в виде цилиндрической спирали (рис. 4.4), реже – плоской, расположенной на дне сосуда, или петлевых

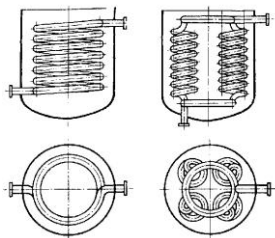


Рис. 4.4. Схемы теплообменных змеевиков

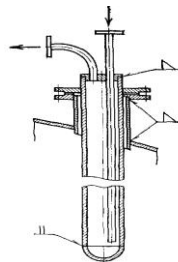


Рис. 4.5. Двойная теплообменная труба

змеевиков. Змеевики обеспечивают значительную поверхность теплообмена, однако затрудняют осмотр, ремонт и очистку аппарата. Применение змеевиков в сосудах с очень вязкими жидкостями или жидкостями, дающими осадки, крайне нежелательно. Вводят (и выводят) теплоагенты в змеевики через крышку аппарата. Наряду со змеевиками применяют **сварные теплообменные элементы**, выполненные из двух коллекторов, соединенных рядом параллельных труб. Их устанавливают как вертикально, так и горизонтально.

Иногда используют элементы в виде **двойных теплообменных труб** (трубки Фильда) (рис. 4.5). Трубки Фильда сложны по конструкции, т.к. требуют системы коллекторов для подвода и отвода теплоагента, поэтому их применяют редко, когда другие теплообменные конструкции осуществить не удастся.

Обогревают (или охлаждают) поверхность аппарата с помощью **рубашек** или **приварных теплообменных элементов**. При теплообмене через стенку поверхность теплопередачи не превышает 60÷70% от наружной поверхности аппарата, поэтому передать значительное количество тепла через рубашку не представляется возможным. Данные устройства применяют лишь в тех случаях, когда тепловые потоки, незначительны.

Рубашки приваривают к корпусу аппарата или делают съемными, когда приварка их невозможна или необходимы постоянная очистка и контроль теплообменной поверхности.

Зазор между стенками рубашки и корпуса стараются сделать минимальным, чтобы увеличить скорость движения теплоагента. Диаметр рубашки на 50÷100 мм больше диаметра аппарата (в аппаратах большой емкости – больше на 200 мм). Обычно рубашку приваривают на 80÷150 мм ниже соединения крышки с корпусом. Пар подают в рубашку через верхний штуцер; а конденсат отводят через

нижний. Жидкие теплоагенты вводят, как правило, через нижний штуцер, а выводят через верхний.

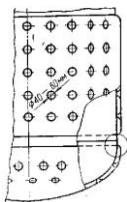


Рис. 4.6. Рубашка с "вмятинами"



Рис. 4.7. Установка с ребер в пространстве рубашки

давление. Чтобы уменьшить расход металла, при повышенном давлении в рубашке целесообразно применять конструкции, в которых стенка укреплена какими-либо элементами жесткости. К таким конструкциям относятся *рубашки с "вмятинами"* (рис. 4.6) и приварка *ребер жесткости* на корпусе аппарата (рис. 4.7).

Приварные теплообменные элементы изготовляют из труб, полутруб или профильного проката, т.е. швеллеров или уголков. Элементы из профильного проката можно применять только при низком давлении теплоагентов. Минимальное расстояние между приварными элементами определяют из условий удобного доступа к сварному шву. Для лучшей передачи тепла трубы необходимо приваривать двойным сплошным швом. Приварные элементы располагают на поверхности аппарата по-разному: в виде спирали, навитой на цилиндрический корпус аппарата; зигзагообразно по образующей цилиндра; с двумя приварными кольцевыми коллекторами, которые соединяются элементами, расположенными по образующей.

При увеличении диаметра и давления в рубашке толщина стенки аппарата становится недопустимо большой. Например, при диаметре аппарата 1800 мм и давлении в рубашке 0,6 МПа толщина стенки корпуса 14÷16 мм из расчета на наружное

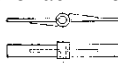
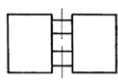
5. АППАРАТЫ С МЕШАЛКАМИ

Перемешивание – необходимый элемент в химической промышленности. Механическое перемешивание производят в аппаратах, носящих общее название аппаратов с мешалками. В частных случаях они носят названия, исходя из конкретного назначения аппарата (реактор, экстрактор, репульпатор, каустификатор и т.д.). Перемешивание производят с целью создания однородных растворов и суспензий и интенсификации процессов тепло- и массообмена (физического или в сочетании с химической реакцией).



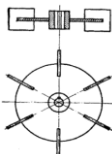


5.1. Выбор мешалок

При выборе типа мешалки и ее параметров учитывают требования процесса, свойства жидкости (вязкость, наличие осадков и др.), форму аппарата и другие факторы. В настоящее время отсутствуют единые критерии для выбора мешалки. Во многих случаях нельзя указать вполне определенно, какой именно тип мешалки наилучший для данного процесса. При выборе руководствуются производственным опытом или лабораторными исследованиями.

Таблица 5.1. Принципы выбора мешалок

Тип мешалки	Возможная область применения	Основные размеры	Вязкость среды, сПз
1	2	3	4
Тихоходные мешалки			
Лопастные 	Перемешивание. Растворение жидкостей, эмульгирование, медленное растворение твердых веществ, взмучивание легких осадков, выравнивание температуры среды. Создание окружной циркуляции	$\frac{d_M}{D_A} = 0,55 \div 0,7$ $b = (0,1 \div 0,3)d_M$	1÷3000
Листовые 	Перемешивание, растворение жидкостей малой вязкости, взвешивание твердого вещества, ин-	$\frac{d_M}{D_A} = 0,5$ $b = (0,1 \div 0,3)d_M$	1÷50

Окончание табл. 5.1

1	2	3	4
	тенсификация теплообмена. Создание окружающей циркуляции		
Якорные 	Перемешивание вязких и тяжёлых жидкостей, предотвращение выпадения осадка на стенках и днище, суспензирование в вязких средах. Создание окружающей циркуляции	$\frac{d_M}{D_A} = 0,85 \div 0,95$ $b = (0,01 \div 0,06)d_M$	$1 \div 10000$
Рамные 	В основном в тех же случаях, что и якорные	$\frac{d_M}{D_A} = 0,85 \div 0,95$ $b = (0,01 \div 0,06)d_M$	$1 \div 10000$
Быстроходные мешалки			
Турбинные (открытые) 	Перемешивание, растворение жидкостей, суспензирование, эмульгирование, выравнивание температур. Создание радиального потока	$\frac{d_M}{D_A} = 0,25 \div 0,33$ $b = (0,5 \div 1,0)d_M$	$1 \div 40000$
Турбинные (зарытые) 	Перемешивание, растворение жидкостей, суспензирование, перемешивание в процессах растворения газов, в процессах экстракции, перемешивание жидкостей различного удельного веса. Создание радиального потока	$\frac{d_M}{D_A} = 0,25 \div 0,33$ $b = (0,5 \div 1,0)d_M$	$1 \div 40000$
Пропеллерные 	Перемешивание, растворение, эмульгирование, взмучивание осадков, выравнивание температур. Создание радиально-осиального потока	$\frac{d_M}{D_A} = 0,25 \div 0,33$ $b = (0,5 \div 1,0)d_M$	$1 \div 40000$

5.1.1. Расчет мешалок

Он заключается в определении скорости вращения мешалки, потребляемой мощности, выборе двигателя, прочностном расчете мешалки и вала.

При растворении твердого тела в жидкости строгая равномерность концентрации взвеси во всем объеме аппарата существенного значения не имеет, но важно, чтобы все частицы твердого тела находились в жидкости во взвешенном состоянии и была создана достаточно большая турбулентность жидкости вокруг зерен в целях уменьшения толщины ламинарного слоя на границе жидкость – твердое тело. Для этой цели рекомендовано проектировать аппараты с мешалками на минимальную частоту вращения, необходимую только для создания суспензии, поскольку дальнейшее ее увеличение оказывает уже незначительное влияние на скорость растворения. Это будет понятно, если учесть, что мощность, расходуемая при турбулентном режиме на перемешивание, возрастает пропорционально третьей степени частоты вращения, а интенсивность массообмена – в степени $0,5 \div 1$.

Минимальную частоту вращения (n_0 , об/с) мешалки для создания взвеси можно определить по формуле:

$$n_0 = \frac{k d_s^{0,25} \Delta \rho^{0,6} X^{0,17} \mu^{0,1} h^{0,19} D_A}{d_M^{0,29} \rho^{0,7}}, \quad (5.1)$$

где k – коэффициент, равный для тихоходной мешалки 12,9, для быстроходной – 28,8; d_s – диаметр частиц, м; $\Delta \rho$ – разность плотностей твердой и жидкой фаз; X – массовое отношение содержания твердой фазы к содержанию жидкой; h – высота расположения мешалки, м.

Расчет мощности, потребляемой мешалкой, подробно изложен в курсе "Процессы и аппараты химической технологии", а также в специальной литературе. Здесь будут рассмотрены только отдельные вопросы, касающиеся определения мощности.

Номинальная мощность, потребляемая мешалкой, кВт:

$$N_0 = k_N \rho n^3 d_M^5, \quad (5.2)$$

где k_N – критерий мощности, величину которого выбирают по соответствующим таблицам и номограммам в зависимости от типа мешалки и центробежного числа Рейнольдса $Re = \rho n d^2 / \mu$. Для расчета k_N можно также использовать эмпирические уравнения:

для турбинной мешалки для аппаратов без перегородок

$$k_N = -4,99 - 1,68 \cdot 10^7 Re + 0,1785 \ln Re + \frac{43,97}{\ln Re} - 36,57 \frac{\ln Re}{Re};$$

для турбинной мешалки для аппаратов с перегородками

$$k_N = -0,525 - 2,43 \cdot 10^{-6} Re + 0,782 \ln Re + \frac{58}{Re} + \frac{27,79}{Re^2};$$

для лопастной мешалки для аппаратов без перегородок

$$k_N = -0,1 + \frac{3,55}{\ln Re} + \frac{2,91}{\sqrt{Re}} + 41,54 \frac{\ln Re}{Re^2};$$

для лопастной мешалки для аппаратов с перегородками

$$k_N = 0,54 + 4,73 \cdot 10^{-7} Re + \frac{0,806}{\ln Re} + \frac{25,26}{Re} - \frac{2,01}{Re^2};$$

для трехлопастной мешалки для аппаратов с перегородками

$$k_N = -0,05 + 2,37 \cdot 10^{-7} Re + \frac{4,13}{\ln Re} + \frac{35,719}{Re} - \frac{7,98}{Re^2};$$

для рамной мешалки

$$k_N = -1,84 - 3,15 \cdot 10^{-7} Re + 0,094 \ln Re + \frac{13,355}{\ln Re} + \frac{207,84}{Re}.$$

Из (5.2) следует, что даже незначительное увеличение числа оборотов или диаметра мешалки приводит к резкому повышению потребляемой мощности. Установка вертикальной трубы с диаметром 50 мм увеличивает мощность на 10÷20%. Установка отражательных перегородок в несколько раз увеличивает мощность турбинных и пропеллерных мешалок. Влияние внутренних устройств учитывается соответствующим выбором коэффициента k_N или введением дополнительных повышающих коэффициентов. Мощность двигателя:

$$N = k_1 \left[N_0 \left(1 + \sum k_i \right) \right] / \eta, \quad (5.3)$$

где k_1 – коэффициент перегрузки при пуске [для быстроходных мешалок $k_1 = 1,0$; для тихоходных (лопастных, рамных и якорных) мешалок $k_1 = 1,3$]; $\sum k_i$ – сумма повышающих коэффициентов, связанных с различными внутренними устройствами в аппарате (для змеевика $k = 1$; для трубы передавливания – 0,1; для второй пары лопастей – 0,5; для перегородки – 2).

Лопастни мешалки рассчитывают на изгиб. Для лопастей прямоугольной формы (рис. 5.1) равнодействующая сил сопротивления приложена в точке, расстояние которой от оси:

$$r_0 = \frac{3 R^4 - r^4}{4 R^3 - r^3}. \quad (5.4)$$

Величина равнодействующей:

$$P = M_{кр} / (r_0 z). \quad (5.5)$$

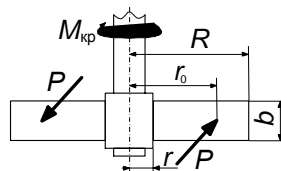


Рис. 5.1. Схема нагрузок на двухлопастную мешалку

Крутящий момент:

$$M_{кр} = N_0/\omega. \quad (5.6)$$

Изгибающий момент у основания лопасти:

$$M_{изг} = P(r_0 - r). \quad (5.7)$$

Из условия прочности определяют момент сопротивления лопасти:

$$w = M_{изг}/[\sigma]. \quad (5.8)$$

Для лопасти прямоугольного сечения момент сопротивления:

$$w = b\delta^2/6. \quad (5.9)$$

Отсюда толщина лопасти:

$$\delta = \sqrt{6w/b}. \quad (5.10)$$

Мешалки сложной формы разбивают на несколько участков, определяют усилия, действующие на них, и рассчитывают напряжения в опасных сечениях. Необходимо иметь в виду, что в некоторых мешалках на отдельных участках кроме изгибающих моментов могут действовать и крутящие моменты.

5.1.2. Расчет вала

Диаметр вала рассчитывают на кручение:

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_{кр}}{0,2[\tau]}}. \quad (5.11)$$

При расчете вала необходимо учитывать собственную частоту колебаний вала. Когда частота вращения вала равна собственной частоте колебаний вала наступает резонанс и, как следствие, разрушение вала. По этой причине **быстроходные валы** проверяются на критическое число оборотов (для **тихоходных валов** необходимость в этой проверке отпадает). Критическое число оборотов рассчитывают по формуле:

$$\omega_{кр} = \frac{\alpha^2}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m_v}}, \quad (5.12)$$

где L – длина вала, м; J – момент инерции вала (для сплошного вала $J = \pi d^4/64$); m_v – масса единицы длины вала, кг/м; α – коэффициент, который выбирается по диаграммам.

Допускаемая скорость вращения вала:

$$\omega_{доп} < 0,7\omega_{кр}. \quad (5.13)$$

5.2. Выбор аппарата

Сосуды для аппаратов имеют цилиндрическую форму и плоское, коническое либо эллиптическое днище. Обычно их устанавливают вертикально. В настоящее время химическое машиностроение изготавливает 10 типов стандартизированных сосудов для аппаратов с мешалками вместимостью от 0,01 до 100 м³ и диаметром от 273 до 3200 мм. Они могут работать под вакуумом и под давлением до 6,4 МПа.

Выбор и заказ стандартных аппаратов с мешалками производят по каталогам. Внутри корпуса аппарата могут быть смонтированы перегородки для предотвращения завихрения жидкости и образования воронки. Наличие отражательных перегородок в аппарате вызывает значительное увеличение потребляемой мешалкой мощности, но мало влияет на интенсивность массообмена. Поэтому размещение их в растворителях и кристаллизаторах считается нецелесообразным.

В зависимости от условий ведения технологического процесса аппараты изготавливают с теплообменной рубашкой или без нее. Если разбавление раствора не играет существенной роли, нагрев его можно производить острым паром, подаваемым через эжектор, введенный в раствор. Использовать аппараты со змеевиками в производстве кристаллических веществ нежелательно из-за быстрого их обрастания осадком и затруднения очистки.

При необходимости быстрого смешения двух растворов штуцеры ввода обоих растворов размещают в верхней части центральной трубы, охватывающей вал мешалки. Верхняя часть трубы выступает из раствора, а нижняя доходит к пропеллерной мешалке, толкающей раствор вниз. Такая конструкция аппарата позволяет быстро смешивать концентрированные растворы, не разбавляя их прореагировавшим раствором, что важно при проведении процесса с целью получения высокодисперсного осадка (например, в производствах сульфата и карбоната бария).

Быстрое снижение пересыщения (при получении крупнокристаллического осадка) достигается за счет разбавления исходных реагентов прореагировавшей смесью. Для этого растворы вводят в реактор через погружные штуцеры, опущенные до нижнего среза диффузора, в котором расположена пропеллерная мешалка, толкающая раствор вверх. Имеющаяся в реакторе твердая фаза может служить затравкой для вновь кристаллизующегося вещества.

Хотя конструкции аппаратов с мешалками и относятся к аппаратам идеального смешения, в непрерывных процессах полное смешение не

может быть достигнуто в одиночном аппарате. Кроме того, при ведении процессов массообмена (растворение, кристаллизация и т. д.) в нем трудно обеспечить необходимое время пребывания твердых частиц. Поэтому аппараты смешения объединяют в многоступенчатые системы, в которых раствор перетекает из одного аппарата в другой самотеком. Конструктивно многоступенчатые системы оформляют или в виде каскада последовательно соединенных аппаратов или в виде горизонтального аппарата, разделенного на секции перегородками.

В случаях, когда выравнивание концентрации раствора по всему объему аппарата не существенно, но необходимо продолжительное пребывание частиц (медленно оседающих) в аппарате, используют обычно сосуды с большим отношением H/D , снабженные рамными или лопастными мешалками, создающими интенсивную окружающую циркуляцию (например, смеситель известкового молока с фильтровой жидкостью содового производства или каустификатор первой ступени каустификации в производстве едкого натра известковым способом).

При абсорбции газов можно использовать аппараты, высота которых в несколько раз превосходит диаметр, а на валу расположены несколько турбинных мешалок на расстоянии $0,8D$ друг от друга. Такое решение дает возможность обеспечить интенсивное перемешивание во всем объеме, добиться большого и точно определенного времени контакта, что в итоге позволяет достичь большой движущей силы процесса. Расход энергии в этом случае ниже, чем в аппарате большего диаметра с одной мешалкой. При установке на одном валу нескольких мешалок расстояние между ними не должно быть менее d и обычно не превышает $3d$. Уровень жидкости над верхней мешалкой составляет $(1,5 \div 2,0)d$.

6. КОЛОННЫЕ И БАШЕННЫЕ АППАРАТЫ

К колонным и башенным аппаратам в химической технологии относят в основном оборудование для процессов взаимодействия между жидкостью и газом (ректификация, абсорбция и мокрая очистка газов), жидкостью и жидкостью (экстракция) и газом и твердым телом (адсорбция). Особое положение занимают реакторы колонного типа.

Классический тип колонных аппаратов – **тарельчатые** и **насадочные**. В тарельчатых – контакт между жидкостью и газовой фазой осуществляется за счет многократного барботажа газа (или пара) через слой жидкости, а в насадочных – за счет стекания жидкости по элементам насадки. В обоих случаях жидкость стекает вниз под действием силы тяжести, а газовая фаза движется навстречу снизу вверх.

Один из способов ускорения процесса массообмена – увеличение скорости взаимодействующих фаз, за счет чего увеличивается турбулентность двухфазного потока, однако с увеличением скорости резко возрастает пено- и брызгоунос, устранить который очень трудно. Поэтому, например, в барботажных колоннах скорость пара, рассчитанная на полное сечение колонны, не превышает $1 \div 1,5$ м/с.

Температурные пределы применения колонных аппаратов довольно велики: от -250°C в криогенной технике до $+400^\circ\text{C}$.

Кроме расчетов обечайки на прочность колонны рассчитывают на ветровую нагрузку (как консольную балку на изгиб) и на сжатие в нижней части колонны.

6.1. Тарельчатые колонны

Конструкции тарельчатых колонн весьма разнообразны. Это объясняется чрезвычайно большим ассортиментом перерабатываемого сырья, широким диапазоном производительности и различным гидравлическим режимом колонн.

В химической и нефтеперерабатывающей промышленности применяют тарельчатые колонны различных размеров: от небольших диаметром $300 \div 400$ мм до крупнотоннажных высокопроизводительных установок с колоннами диаметром $5 \div 12$ м. Высота колонны зависит от числа тарелок и расстояния между ними. Чем меньше расстояние, тем ниже колонна. Однако при уменьшении расстояния между тарелками увеличивается унос брызг и возникает опасность перескока жидкости с нижних тарелок на верхние, что существенно уменьшает КПД установки. Поэтому обычно расстояние между

тарелками 250÷300 мм. По соображениям конструктивного порядка и возможности ремонта и очистки тарелок в колоннах большого диаметра расстояния между ними увеличивают до 500÷600 мм.

6.1.1. Колпачковые тарелки

Колпачковые тарелки сложны и металлоемки по сравнению с тарелками других типов. Некоторые их показатели уступают более современным типам тарелок, но они хорошо освоены и находят в промышленности наиболее широкое применение. Колпачки изготавливают круглыми и продолговатыми (туннельными).

Колпачки располагают на тарелке по вершинам равносторонних треугольников или в шахматном порядке. Расстояние между краями колпачков 40÷60 мм. Если это расстояние велико, то ухудшается контакт между жидкостью и паром и образуется слой неспененной (светлой) жидкости. При очень малом расстоянии возрастает сопротивление движению жидкости по тарелке, тарелка начинает "захлебываться", и уровень жидкости в разных ее частях становится различным.

Тарелки больших диаметров при значительном расходе жидкости делают двухпоточными или четырехпоточными, чтобы предотвратить затопление тарелки жидкостью, т.е. устраивают на тарелке не один, а несколько сливных и наполняющих патрубков. При небольшом расходе жидкости на тарелке устраивают зигзагообразный ход.

6.1.2. Ситчатые тарелки

Ситчатая тарелка – это лист с пробитыми в нем *круглыми, щелевидными* или *просечными треугольными* отверстиями размером 2÷15 мм. Пар, проходящий в отверстия, барботирует через слой жидкости, которая стекает через переливные патрубки (*беспровальный режим*). Скорость пара в отверстиях 10÷12 м/с. Ситчатые тарелки работают также и в *провальном режиме*, тогда переливные устройства на тарелке отсутствуют, а жидкость стекает в отверстие навстречу пару. Отверстия в тарелках, работающих в провальном режиме, несколько крупнее, чем в переливных.

Ситчатые тарелки просты по конструкции и эффективны. Недостаток их – необходимость точного регулирования заданного режима (особенно по расходу газа) и чувствительность к осадкам и отложениям, забивающим отверстия.

Ситчатые тарелки применяют в основном для колонн малого размера, так как при диаметрах более 2,5 м распределение жидкости на тарелке становится неравномерным.

6.1.3. Клапанные тарелки

Основные элементы клапанной тарелки – подъемные клапаны круглой или прямоугольной формы, закрывающие отверстия в тарелке. Конструктивно клапан выполнен так, что подъем его возможен только на определенную величину. При определенной скорости паров в отверстиях клапаны уравниваются потоками пара и при дальнейшем увеличении нагрузки начинают подниматься таким образом, что скорость пара в сечении между клапаном и полотном тарелки остается примерно постоянной. Следствием этого является равномерное распределение пара по площади тарелки, уменьшение уноса жидкости и меньшее гидравлическое сопротивление. Широкий диапазон устойчивой работы, малый вес и простота конструкции делают применение клапанных тарелок перспективным.

6.1.4. Струйно-направленные тарелки

Их следует выделить в отдельную группу, в которой паровые струи имеют то же направление, что и текущая по тарелке жидкость.

Чешуйчатые тарелки представляют собой лист, на котором выдавлены плоские или полукруглые язычки, придающие пару направленное движение. Тарелка имеет ряд пластинчатых клапанов, открывающихся под напором пара. Жидкость, поступившая на тарелку, встречается с газом или паром, который с большой скоростью (20÷50 м/с) проходит через щели тарелки. Жидкость диспергируется потоком газа и в виде мелких капель проносится вдоль тарелки к сливному стакану.

6.2. Насадочные колонны

Насадочные колонны широко применяют для процессов абсорбции, очистки охлаждения и увлажнения газов, иногда ректификации. Насадочные колонны удовлетворительно работают только при обильном и равномерном орошении насадки жидкостью.

Различаются два основных режима работы насадочных аппаратов: *пленочный*, при котором жидкость, омываемая газом, стекает по элементам насадки, и *эмульгационный*, когда весь аппарат заполнен

жидкостью, а через слой ее между элементами насадки барботирует газ.

Основные элементы насадочных колонн – насадка, опорные колосники, устройства для орошения и распределения жидкости.

6.2.1. Насадки

По способу расположения насадки по высоте аппарата колонны подразделяют на *полностью насаженные, разделенные на секции и частично насаженные*.

Колонны с насадкой, загружаемой навалом, имеют обычно высоту слоя не более $(6\div 8)D$. Дальнейшее увеличение высоты слоя ограничивается тем обстоятельством, что жидкость, стекающая по беспорядочно загруженной насадке, перемещается к периферии и часть насадки остается несмоченной. Когда требуется высота слоя более $(6\div 8)D$, насадку в аппарате располагают отдельными слоями (секциями). После каждого слоя жидкость собирают и с помощью распределительных устройств равномерно орошают нижний слой насадки.

Различаются насадки **насыпные** (из отдельных элементов) и **хордовые** (из полос, пластин, решеток).

Насыпные насадки. *Кольца Рашига* диаметром 10÷150 мм применяют часто. Они просты по конструкции, дешевы в изготовлении и обеспечивают удовлетворительный контакт между жидкостью и газом. Лучше по своим показателям *кольца Палля*. Они в отличие от колец Рашига имеют язычки, отогнутые внутрь. *Седловидная насадка* предпочтительна при работе с продуктами, загрязняющими насадку.

Элементы насадки изготовляют из керамики, фарфора или тонколистового металла. В промышленных колоннах в основном применяют насадочные кольца диаметром 25 и 50 мм. Насадка должна быть засыпана ровным слоем. Образование пустот или щелей резко ухудшает работу колонны.

Насыпную насадку укладывают на *опорную решетку (колосник)*, которая должна иметь минимальное гидравлическое сопротивление и обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдержать вес насадки и удерживаемой ею жидкости.

Металлические решетки иногда изготовляют из вертикально поставленных полос между которыми устанавливают дистанционные втулки. Собранную решетку стягивают шпильками. Решетки больших размеров выполняют из нескольких секций, укладываемых на опорные

балки. Просвет между колосниками решетки должен быть не более $0,6 \div 0,7$ от наименьшего размера насадочного элемента.

Колосниками в футерованных башнях служат каменные брусья или кислотоупорный кирпич, на которые укладывают два ряда колец большого диаметра (100×100 или 150×150 мм), а затем загружают кольца меньших размеров.

Хордовые насадки. Насадки хордовые делают из крупных элементов: деревянных, пластмассовых или керамических брусьев, сеток и гофрированных листов. За последнее время освоены плоскопараллельные и сотовые насадки, состоящие из вертикально установленных пластин или сотовых элементов. Они обеспечивают хороший контакт между жидкостью и газом и в то же время имеют малое гидравлическое сопротивление.

6.2.2. Устройства для орошения

Оросители – ответственные элементы насадочных колонн, от которых зависит удовлетворительная работа всей колонны. Многочисленные конструкции оросителей подразделяются на *струйчатые* (точечные) и *разбрызгивающие*.

Струйчатые оросители. Из них жидкость вытекает на насадку отдельными струйками через отверстия или прорези. Такое орошение целесообразно при ограниченных расходах жидкости и когда унос брызг нежелателен или недопустим. Важная характеристика струйчатого оросителя – *число точек орошения на 1 м^2* , т.е. число струй, попадающих на 1 м^2 поперечного сечения насадки. Ориентировочно можно принимать для беспорядочно засыпанной насадки $20 \div 25$ точек на 1 м^2 и для насадки, уложенной рядами – 50 точек на 1 м^2 .

Для аппаратов диаметром до 3 м применяют струйчатые оросители в виде *сплошных распределительных плит*. При большем диаметре используют *распределительные желоба* или плиты в виде отдельных секторов. Распределительная плита представляет собой тарелку с патрубками, через которые перетекает жидкость. Для равномерного слива жидкости патрубки имеют прорези. Уровень тарелки регулируют с помощью установочных винтов. Диаметр тарелки равен $0,6 \div 0,7$ от диаметра аппарата. Периферийные участки насадки не орошаются, предполагается, что они будут заполняться жидкостью при ее растекании в слое насадки.

В аппаратах большого диаметра применяют *распределительные желоба*, состоящие из ряда параллельных и главного

распределительного желобов, расположенного над ними. Жидкость из желобов стекает через прямоугольные или треугольные прорези. Желоба являются громоздкими оросителями и требуют тщательной регулировки горизонтальности, которую осуществляют установочными винтами.

Разбрызгивающие оросители гораздо более компактны по сравнению со струйными. Они могут обеспечить орошение значительной площади из одной точки. Их основной недостаток – распыление части жидкости.

Простейший вид разбрызгивающего оросителя – перфорированный стакан, в который жидкость подают под напором 4÷6 м. Отверстия в стакане направлены в разные стороны, благодаря чему обеспечивается равномерное распределение орошения.

Разбрызгивающие вращающиеся звездочки применяют в основном при башенном способе производства серной кислоты. Звездочка имеет ряд наклонных лопастей различной длины, на которые подается жидкость. Благодаря разной длине лопастей жидкость поступает на различные точки насадки. Оросители с разбрызгивающей звездочкой применяют для аппаратов диаметром до 10 м. Они в отличие от оросителей других типов требуют механического привода.

Многоконусные (дефлекторные) оросители используют преимущественно в колоннах большого диаметра (до 8 м). Действие этих оросителей основано на обтекании жидкостью конусов, имеющих различные углы наклона, в результате чего возникает ряд струй, имеющих форму зонтов. Подбирая углы наклона зонтов, можно изменять распределение жидкости по поверхности насадки. Многоконусные оросители имеют высокую пропускную способность по жидкости, но чувствительны к колебанию расхода.

Значительное распространение получили *центробежные форсунки* с тангенциальным вводом жидкости. Жидкость входит в кольцевую камеру форсунки, где приобретает вращательное движение и за счет центробежной силы разбрызгивается из нижнего отверстия. Тангенциальные форсунки обеспечивают интенсивное и равномерное орошение в радиусе 2÷2,5 м. При орошении скрубберов большого диаметра устанавливают несколько форсунок.

7. РАСТВОРИТЕЛИ

Растворение и выщелачивание твердых веществ – технологические процессы, используемые во многих производствах химической и гидрометаллургической промышленности для получения раствора, извлечения в раствор определенного компонента твердой фазы или отделения растворимых веществ от инертных примесей.

В малотоннажных производствах в качестве растворителей часто используют один или каскад аппаратов с мешалками, которые работают периодически или непрерывно в режиме полного смешения.

Колонные и трубчатые растворители весьма просты по устройству, компактны и надежны в работе. В этих аппаратах растворяемый материал находится в псевдооживленном состоянии. В то же время в колонных аппаратах сохраняется противоток растворяемого вещества и растворителя, а трубчатые растворители работают при полном уносе твердой фазы. Режим их работы является промежуточным между полным вытеснением и полным смешением.

В *колонном растворителе* жидкость подают через патрубок в коническом днище под распределительную решетку. В колонне происходит растворение материала, подаваемого по штуцеру. Расширенная часть колонны, снабженная кольцевым желобом, служит для разделения твердой и жидкой фаз. Благодаря снижению скорости восходящего потока жидкости уменьшается унос мелких частиц.

Вертикальный трубчатый растворитель представляет собой ряд труб, через которые насосом прокачивают суспензию растворяемого вещества в жидкости. Паровая рубашка служит для подогрева суспензий до нужной температуры. Из растворителя суспензию сливают в сгуститель, где отделяют нерастворимый остаток от полученного раствора.

Для растворения и выщелачивания крупнокусковых материалов иногда используют *барабанные растворители*. Барабанные растворители работают как в непрерывном, так и периодическом режимах. За счет соударения кусков друг с другом и с корпусом аппарата происходит самоизмельчение твердого материала и интенсифицируется процесс растворения. Существенный недостаток таких аппаратов – высокий расход электроэнергии.

Для интенсификации растворения или выщелачивания полезно совместить процессы измельчения и растворения, используя в качестве растворителя *мельницу мокрого помола*.

8. КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ

8.1. Методы кристаллизации

Для осуществления процесса кристаллизации необходимо создать в растворе пересыщение. По способам его создания различают следующие методы кристаллизации:

1) изогидрическая, при которой содержание растворителя в системе не изменяется, а пересыщение создается за счет охлаждения раствора;

2) изотермическая – пересыщение создается вследствие удаления части растворителя испарением;

3) кристаллизация в результате химической реакции с образованием труднорастворимых веществ;

4) кристаллизация высаливанием, при котором пересыщение создается путем введения в раствор постороннего вещества, вызывающего понижение растворимости целевого продукта;

5) кристаллизация вымораживанием – пересыщение в растворе создается благодаря удалению части растворителя в виде льда.

По способу создания пересыщения кристаллизаторы можно условно подразделить на три группы:

1) аппараты изогидрической кристаллизации;

2) аппараты изотермической кристаллизации;

3) вакуум-кристаллизаторы, в которых пересыщение создается за счет охлаждения раствора при его самоиспарении под вакуумом. При этом удаляется до 10÷15 % растворителя.

8.1.1. Кристаллизаторы изогидрической кристаллизации

Эти кристаллизаторы используют как для периодического, так и для непрерывных процессов. Простейшим кристаллизатором этого вида является ***аппарат с мешалкой*** и рубашкой.

Для кристаллизации расплавов и сильно инкрустирующих кристаллогидратов солей, когда объем остающегося маточного раствора невелик по сравнению с выходом кристаллов, используют ***вальцовые кристаллизаторы***. Они представляют собой полый медленно вращающийся барабан, касающийся поверхности раствора (расплава) и охлаждаемый изнутри водой. Закристаллизовавшийся продукт с поверхности барабана срезается ножом. Вальцовые кристаллизаторы используют, например, для получения в виде чешуек кристаллов гидроксида натрия, $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и др. Но продукты в этом случае обычно загрязнены примесями, так как они

содержат в себе значительную часть, а иногда и весь маточный раствор.

Для непрерывной кристаллизации растворов и расплавов используют также *барабанные кристаллизаторы*. Для охлаждения раствора в барабан подают воздух, который движется противотоком.

8.1.2. Вакуум-кристаллизаторы

Благодаря своим достоинствам вакуум-кристаллизаторы все более вытесняют кристаллизаторы изогидрической кристаллизации из промышленности. Они в значительно меньшей степени подвержены инкрустациям. Это обусловлено тем, что вскипание, а следовательно, и охлаждение раствора происходят в объеме, а не у стенок аппарата. Стенки обрастают солью в основном на уровне поверхности раствора. Отсутствие теплопередающих поверхностей позволяет футеровать их любым коррозионно-стойким материалом, в том числе и с малой теплопроводностью. Выделяющаяся теплота кристаллизации полезно расходуется в них на испарение растворителя.

Использование многокорпусных (многоступенчатых) *вакуум-кристаллизационных установок* (ВКУ) позволяет снизить перепад температур между корпусами, что ведет к снижению пересыщения в каждом корпусе, а следовательно, и к увеличению размера кристаллов. При этом уменьшается также обрастание стенок аппарата солью.

Наиболее благоприятным считается охлаждение раствора в каждой ступени на $2\div 8^\circ\text{C}$. При перепаде менее 2°C размер кристаллов уже не увеличивается, а при перепаде более 8°C получатся очень мелкие кристаллы.

Чтобы установку сделать компактнее, иногда в одном корпусе размещают $2\div 4$ ступени. Например, в калийной промышленности используют двух-, трех- и четырехступенчатые горизонтальные

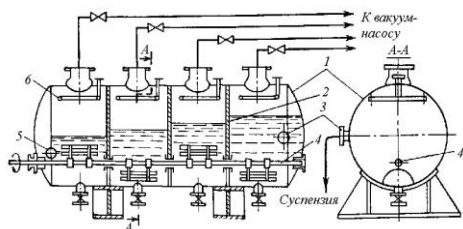


Рис. 8.1. Горизонтальный многоступенчатый вакуум-кристаллизатор

вакуум-кристаллизаторы (рис 8.1). Горизонтальный корпус 1 аппарата разделен на отдельные камеры перегородками 2 с полукруглыми отверстиями в нижней части для перетока суспензии. В каждой камере поддерживается свой постепенно повышаю-

щийся вакуум. Горячий раствор непрерывно поступает в первую ступень по штуцеру 5, а суспензия отводится по трубе 3. Для смыва инкрустаций стенки каждой ступени могут орошаться водой, подаваемой разбрызгивающим устройством 6. Лопастная мешалка 4, вращающаяся с частотой $0,25 \text{ с}^{-1}$, способствует выравниванию концентраций и температуры в объеме раствора и поддерживает кристаллы во взвешенном состоянии, что обеспечивает их более равномерный рост.

Недостатком этих аппаратов является малая высота парового пространства, что ведет к значительному брызгоуносу и быстрому зарастанию паровоздушных труб.

Вертикальные вакуум-кристаллизаторы лишены этих недостатков, а кроме того, занимают меньше производственной площади. За последнее время широкое распространение получили *циркуляционные вакуум-кристаллизаторы*. Они отличаются от аппаратов со взвешенным слоем высокой производительностью и позволяют получить более крупнокристаллический продукт, например, хлорид и нитрат натрия с размерами частиц до $0,7 \div 0,8 \text{ мм}$.

Благодаря интенсивной циркуляции суспензии горячий питающий раствор предварительно смешивается с уже охлажденным маточным раствором, в результате чего температура раствора становится всего лишь на несколько десятых градуса выше температуры кипения при данном вакууме, и при самоиспарении раствора в нем возникает сравнительно небольшое пересыщение. За счет циркуляции в зоне кипения поддерживается высокое содержание кристаллов, которые быстро снимают пересыщение, снижая тем самым скорость образования новых зародышей. Это позволяет также существенно уменьшить или даже устранить образование инкрустаций.

8.1.3. Кристаллизаторы изотермической кристаллизации

Кристаллизаторы представляют собой выпарные аппараты, обычно с выносной греющей камерой, а иногда и с принудительной циркуляцией. Эти аппараты используют для кристаллизации солей, растворимость которых с повышением температуры мало возрастает или даже несколько снижается (например, хлориды натрия и бария, сульфат лития). Удаление растворителя, естественно, приводит к повышению концентрации примесей в растворе, что снижает в последующем качество продукта.

9. АППАРАТЫ ДЛЯ КОНТАКТНО-КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

Реакционные аппараты – *основное оборудование* химических цехов. По сравнению с аппаратурой для физико-химических процессов они имеют ряд особенностей: химические реакции, как правило, сопровождаются значительным тепловым эффектом, следовательно, возникает проблема подвода или отвода тепла и регулирования температуры; большинство химических процессов протекает в присутствии катализаторов, что создает, в свою очередь, проблемы хорошего контакта реагирующих продуктов с катализатором, а также загрузки, выгрузки и регенерации контактной массы.

Расчет химических реакционных аппаратов представляет известную трудность. Применить в данном случае обобщения и аналогии, подобные тем, которые имеют место в процессах тепло- и массообмена, не всегда удается. Сложным характером взаимодействия различных факторов объясняется разнообразие конструкций реакционных аппаратов.

Контактные аппараты делят на аппараты с *неподвижным* и *движущимся* слоем катализатора. Аппараты с неподвижным слоем, в свою очередь, подразделяются на *адиабатические* и *аппараты с теплообменом*. Контактные аппараты работают при повышенных температурах 300÷800°С.

9.1. Контактные аппараты с неподвижным слоем катализатора

Аппараты с неподвижным слоем катализатора – наиболее старый и распространенный тип аппаратов для контактно-каталитических процессов. Конструкция аппаратов определяется температурным режимом, давлением, сроком службы катализатора и свойствами продуктов.

Различают *оптимальную температуру* процесса контактирования, которая постоянна по длине аппарата для эндотермических и необратимых экзотермических реакций и снижается по мере увеличения степени превращения для обратимых экзотермических процессов (реакции синтеза аммиака и окисления сернистого газа).

Наряду с оптимальной температурой выделяют *максимальную* и *минимальную*, между которыми находится допустимый температурный интервал процесса. Чем уже температурный интервал, тем точнее должна регулироваться температура в аппарате. Когда перепад температуры за счет теплового эффекта не превышает

допустимого температурного интервала, применяют *адиабатические аппараты*, работающие без теплообмена. В остальных случаях необходим теплообмен в аппарате.

Для регулирования температуры в контактных аппаратах применяют *промежуточный теплообмен, теплообмен в реакционной зоне* (внутренний теплообмен), *регулирование температуры путем промежуточного введения газа, теплообмен с помощью твердых теплоносителей*.

В системах с *промежуточным теплообменом* чередуются слои катализатора (зоны реакции) и теплообменники (зоны теплообмена) (рис. 9.1, а, б, в). Процесс в зоне реакции идет адиабатически, затем в теплообменнике происходит охлаждение (или нагрев), и температура снова приближается к оптимальной. Изменение температуры в такой системе ступенчатое. Причем, чем больше отдельных слоев катализатора и промежуточных теплообменников, тем больше температурный режим приближается к оптимальному. В начале процесса скорость реакции велика, и на первой ступени не требуется большого объема катализатора. На каждой последующей ступени объем катализатора увеличивается. Выделение (или поглощение) тепла в начале процесса очень велико, и поверхность первого теплообменника наибольшая. По мере замедления реакции уменьшаются тепловыделения и соответственно поверхность теплообмена. Реакционные зоны и теплообменные элементы могут быть размещены в отдельных аппаратах (рис. 9.1, б) или соединены в один (рис. 9.1, а, в). Принцип действия системы от этого не меняется.

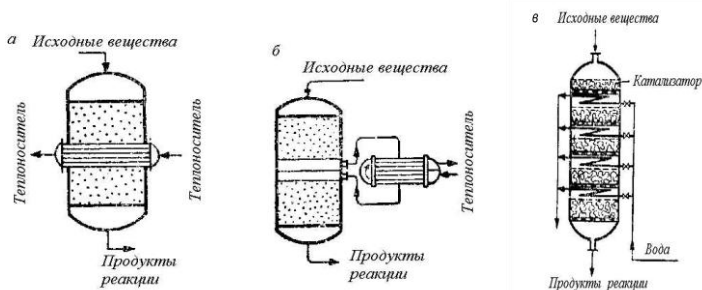


Рис. 9.1. Схемы с промежуточным теплообменом в аппаратах вытеснения

В аппаратах с *внутренним теплообменом* необходимый тепловой режим поддерживается теплообменными элементами, распо-

женными непосредственно в слое катализатора (рис. 9.2, а, б, в, г). Контактные аппараты с внутренним теплообменом делают в виде кожухотрубчатых теплообменников с размещением катализатора как в трубках (рис. 9.2, б), так и в межтрубном пространстве (рис. 9.2, а, в) или в виде пластинчатых теплообменников. Объем трубок значительно меньше межтрубного пространства. В качестве теплообменных элементов применяют также двойные теплообменные трубки Фильда (рис. 9.1, з).

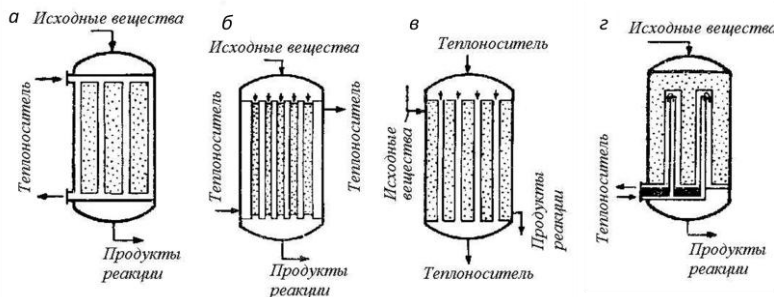


Рис. 9.2. Схемы с внутренним теплообменом в аппаратах вытеснения

При размещении катализатора в трубках уменьшается коэффициент использования объема аппарата, поэтому катализатор помещают в трубках только в тех случаях, когда требуется тонкое регулирование температуры. При конструировании аппаратов с внутренним теплообменом необходимо учитывать распределение температур как по длине аппарата, так и в поперечном сечении. Чем больше расстояние между теплообменными поверхностями, тем выше разность температур между участками, расположенными у стенок аппарата и в глубине слоя катализатора.

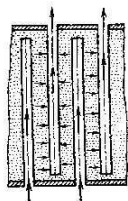


Рис. 9.3. Элемент аппарата с радиальным ходом газа

Аппараты адиабатического типа представляют собой обычно пустотелую камеру, заполненную катализатором. Аппараты имеют *осевой* или *радиальный* ход газа. При осевом ходе газа продукты подаются сверху или снизу, при радиальном ходе газ пронизывает слой катализатора по горизонтали. На рис. 9.3 показан элемент адиабатического аппарата с радиальным ходом газа. Аппарат представляет собой камеру, в которой закреплены два вида перфорированных труб: одни открыты в верхнюю

полость аппарата, а другие – в нижнюю. Между трубами засыпан катализатор. Сопротивление радиального аппарата в $5\div 10$ раз меньше аксиального.

Катализатор – один из важнейших элементов контактных аппаратов, которому уделяется большое внимание. Наряду с требованиями к химической активности, к нему предъявляют требования механического порядка: механическая прочность и стойкость к истиранию, размеры зерен катализатора должны быть одинаковы, не должно быть мелочи. При засыпке катализатора в полочные аппараты тщательно следят, чтобы слой был ровный, при загрузке катализатора в трубчатых аппаратах проверяют, чтобы гидравлическое сопротивление слоя в каждой трубке было одинаковым.

Как правило, газ в аппаратах направляют сверху вниз, чтобы поток газа прижимал слой катализатора. При противоположном направлении потока необходимы специальные меры по фиксации слоя.

К группе адиабатических аппаратов относится *шахтный конвертор парокислородной конверсии метана* (рис. 9.4, а).

Газ, подаваемый на конверсию, смешивается с воздухом в смесителе 9. В верхней части аппарата происходит сжигание части природного газа и водорода, в результате чего температура газа поднимается до $1000\div 1100^\circ\text{C}$. Развиваемая при горении температура обеспечивает протекание эндотермической реакции конверсии метана водяным паром. Такой режим работы реактора называют *авто-термическим*. В качестве верхнего (*лобового*) слоя используется никель-хромовый катализатор. Основная масса катализатора – никелевый катализатор 11. Для защиты корпуса

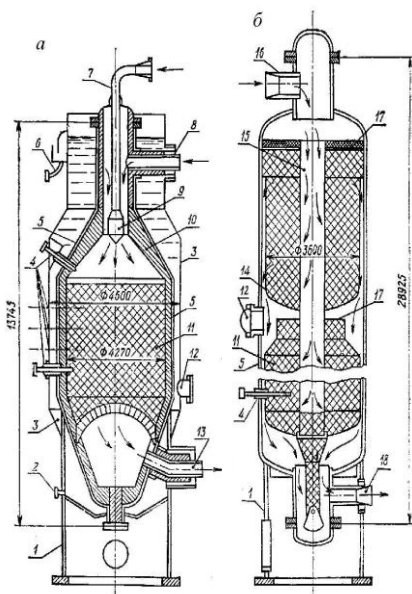


Рис. 9.4. Конверторы для получения водорода: а – шахтный; б – радиальный

аппарата от действия высоких температур изнутри аппарат футеруется высокоглиноземистым огнеупорным бетоном 10. Снаружи корпус снабжен водяной рубашкой 3.

Другим примером адиабатического реактора является **конвертор СО радиального типа** (рис. 9.4, б). Парогазовая смесь через штуцер 16 по центральной перфорированной трубе 15 подается на слой катализатора 11. Катализатор разделен на две секции. Через слой катализатора газ движется радиально. Затем по зазору между катализаторной корзиной 14 и корпусом 5 через штуцер 18 выводится из аппарата.

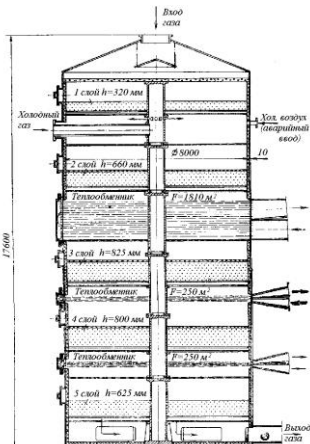


Рис. 9.5. Пятислойный контактный аппарат

Наиболее характерным примером **полочного контактного аппарата с промежуточным теплообменом** является аппарат для каталитического окисления сернистого газа в серный ангидрид, изображенный на рис. 9.5. Он имеет цельносварной кожух из листовой стали толщиной 10 мм, футерованный изнутри шамотным кирпичом. В аппарате есть пять полок с катализатором. Количество катализатора на полках последовательно увеличивается сверху вниз (на самой нижней полке слой катализатора больше, чем на предыдущей). Газ, предварительно нагретый в наружном и внутренних теплообменниках аппарата, поступает в верхний штуцер с температурой 440°C и попадает на первый слой катализатора, где реагирует около 70% всего сернистого газа. Для охлаждения смеси после первой ступени дополнительно вводится холодный газ. Конечная степень превращения составляет 98%. Газ с температурой 425°C покидает аппарат.

Примером реактора с катализатором, загруженным в трубки, служит **трубчатая печь первичного риформинга природного газа** (рис. 9.6). Применение загрузки катализатора в трубы обусловлено следующими факторами. При конверсии метана в случае понижения температуры образуется углерод, который откладывается на поверхности катализатора. Это приводит к локальному разогреву и, как следствие, разрушению катализаторных труб. Температура при протекании эндотермической реакции в радиальном направлении

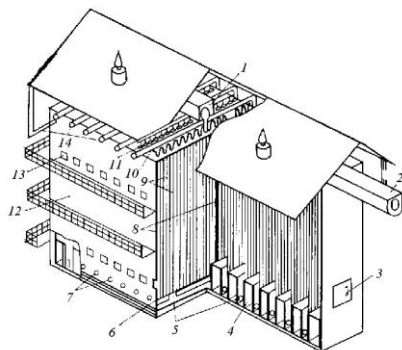


Рис. 9.6. Общий вид топочной (радиационной) камеры многотрубчатой печи

падает, а, с другой стороны, необходима ее точная регулировка, которая легче всего может быть обеспечена в реакторе с малым диаметром, поэтому применение загрузки катализатора в трубки оправдано.

Печь состоит из двух блоков: топочной (радиационной) камеры и блока использования тепла дымовых газов (камеры конвекции) со встроеным вспомогательным котлом. К основным преимуществам таких печей

относится их компактность и относительно небольшие тепловые потери. Основной недостаток печи данной конструкции – невозможность отключения одной или нескольких реакционных труб (при их аварийном состоянии) без остановки всего агрегата.

9.2. Контактные аппараты с псевдооживленным слоем катализатора

Аппараты с псевдооживленным слоем незаменимы для процессов, в которых катализатор требует постоянной регенерации, например, в процессе крекинга нефтепродуктов. Катализатор иногда теряет активность в течение нескольких минут вследствие забивания его пор коксом и смолистыми веществами. Применение системы с движущимся катализатором позволяет осуществить его циркуляцию через зону реакции и регенерации катализатора. Наряду с возможностью циркуляции катализатора, температура в псевдооживленном слое устанавливается практически одинаковой, и нет необходимости в сложных теплообменных устройствах. Подводить или отводить тепло можно в какой-либо одной точке аппарата и при больших разностях температур. В псевдооживленном слое имеет место *идеальное смешение* продуктов, что снижает конечную степень превращения – одну из важнейших характеристик процесса. Чтобы избежать этого недостатка и приблизиться к схеме идеального вытеснения, аппарат разбивают на секции или применяют заторможенный псевдооживленный слой, в котором камера

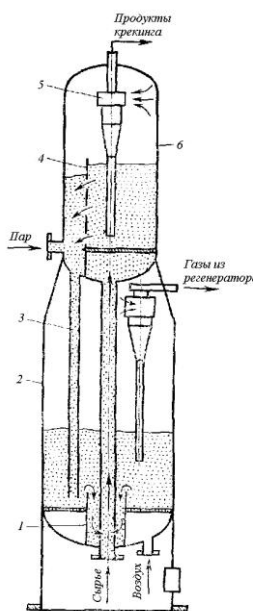


Рис. 9.7. Агрегат для крекинга нефти с циркулирующей катализатором

реакционной зоне. За счет разности плотностей обеспечивается переток катализатора через прорезы в перегородке 4. Отпаренный катализатор спускается по опускной трубе 3 в регенератор 2. Таким образом, отпарная секция служит затвором, разделяющим зону реакции и регенерации. Продукты крекинга в реакторе и отходящие газы в регенераторе отделяются от части катализатора в сепарационных зонах, а мелкие частицы, уносимые с газом, выделяются в циклонах 5, установленных внутри камер. Частицы из циклонов выгружаются по трубе, опущенной в слой катализатора, или с помощью автоматического затвора-мигалки, установленного под циклоном.

заполняется какими-либо элементами (например, спиралью), препятствующими продольному перемешиванию.

Установки с циркулирующим катализатором широко применяют для процессов каталитического крекинга. Крекинг всегда сопровождается образованием и отложением на поверхности катализатора кокса и смолообразных продуктов. Выжигают кокс воздухом в строго контролируемых условиях, так как процесс выжигания сопровождается значительным выделением тепла. Реактор и регенератор компонуют в один агрегат или отдельно стоящие аппараты. На рис. 9.7 приведен агрегат с нижним расположением регенератора. Сырье вводится в нижнюю часть агрегата и в эжекторе 1, захватывая регенерированный катализатор, по центральной трубе через распределительную решетку поступает в реактор 6. С помощью вертикальной перегородки 4 в реакторе выделена отпарная секция, в которую под решетку подается пар в таком количестве, чтобы псевдооживленный слой катализатора был в ней менее плотный, чем в

10. ПЕЧИ

Аппараты, предназначенные для проведения *высокотемпературных некаталитических процессов*, называются **печами**.

В печах осуществляются тепло- и массообменные процессы при температурах выше 700 К: прокалка карбонатов и гидроокисей в целях получения углекислого газа или окислов, окисление – обжиг хромовых руд для получения соединений Cr^{6+} , обжиг сульфидных руд или серы в целях получения сернистого газа или оксидов металлов; восстановление – нагревание природных фосфатов или сульфатов с восстановителем для получения соответственно элементарного фосфора или сульфидов; дегидратация – удаление кристаллизационной или конституционной воды при нагревании; спекание – термическая обработка смеси исходных веществ для получения новых соединений или композиций; синтез – получение соединений из элементов, например окислов азота из азота и кислорода.

Печи классифицируют по *теплотехническим особенностям, конструкции и технологическому назначению*.

Классификация по *теплотехническим особенностям* включает:

- 1) тепловые эффекты процесса, осуществляемого в печи:
 - а) экзотермические, в которых необходимая температура печи достигается за счет тепла химической реакции, без затраты топлива;
 - б) эндотермические, требующие затраты тепловой или электрической энергии для поддержания заданной температуры;
- 2) способ подвода тепла в печь с эндотермическим процессом:
 - а) печи с внутренним обогревом, в которых тепло вводится в реакционное пространство;
 - б) печи с наружным обогревом, в которых тепло подводят через стенку.

По *виду источника тепла* печи подразделяют

- 1) на реакционные, в которых тепло выделяется за счет химических реакций (взаимодействие хлора с водородом, окисление сульфидов и фосфора);
- 2) топливные, работающие на газообразном, жидком или твердом топливе;
- 3) электрические, подразделяемые, в свою очередь, на дуговые, сопротивления, индукционные и плазменные.

10.1. Виды печей

По конструктивным особенностям выделяют следующие виды печей.

Шахтные, реакционное пространство которых представляет собой вертикальную шахту. Обрабатываемый материал загружают сверху, и он опускается под действием силы тяжести. Разновидностью шахтной печи является *щелевая печь*, реакционное пространство которой представляет собой двенадцать щелей между боковыми стенками и кернами. По высоте камеры разделены на четыре зоны: 1) верхняя – зона подсушки и подогрева, где материал нагревается до 550°C за счет тепла дымовых газов, движущихся противотоком; 2) ниже – зона прокалики, где материал нагревается до 1000÷1050°C дымовыми газами, поступающими из топки через каналы в стенках и кернах; 3) зона выдержки, в которой заканчивается разложение материала и которая служит запорной зоной; 4) внизу печи – зона охлаждения, здесь прокаленный материал охлаждается до 130°C воздухом, движущимся поперечно движению материала. Печь снабжена двумя топками, рассчитанными на сжигание газа в горелках. Дымовые газы и воздух после очистки от пыли выбрасываются в атмосферу.

Общими признаками всех шахтных печей являются: *противоточное движение газов и материала* (газы идут по шахте через слой засыпки материала вверх, обжигаемый материал опускается вниз), превалирующее влияние на ход *процесса конвективного теплообмена* (по сравнению с влиянием излучения тепла) и резкая зависимость удельной производительности печей от размеров обжигаемого материала и скорости фильтрации газов через слой засыпки.

В **распылительных (аэрофонтанных)** печах сжигаемый твердый материал взвешен в потоке газа и движется вместе с ним. Цилиндрический корпус и коническое днище печи изнутри футерованы огнеупорным кирпичом, плоская крышка снабжена экраном, который охлаждается водой. Экран устраняет налипание колчедана на крышку. Основной поток воздуха со взвешенным пылевидным колчеданом поступает через сопло, в верхней части печи вводят вторичный воздух по радиальным или тангенциальным соплам. Доля вторичного воздуха составляет 41-55 % от его общего расхода. Процесс обжига флотационного колчедана ведут при температуре 700÷1000°C. Обжиговый газ содержит 8÷11% SO₂ и до 180 г/м³ пыли. Их *достоинства*: простота устройства и высокая интенсивность процесса. *Недостатки* распылительных печей заключаются в

следующем: пригодны только для обжига сухого тонкоразмолотого флотационного колчедана, вследствие чего необходима сушка колчедана, получаемый газ имеет большую запыленность, а огарок высокую температуру.

В печах с **кипящим слоем** обрабатываемый твердый материал образует на распределительной решетке псевдоожиженный слой. В кипящем слое достигается высокая скорость тепло- и массообмена. Избыток тепла отводят с помощью охлаждающих элементов. Они получили широкое распространение благодаря тому, что могут стабильно работать при изменении величины частиц и влажности колчедана, не требуют сушки колчедана; вследствие большого времени пребывания колчедана (до 30 мин) обладают значительной инерцией, что позволяет получать газ постоянного состава с высокой концентрацией SO_2 (13÷15%). *Недостатки* печей данного типа: большой унос огарка (до 90%) и высокое аэродинамическое сопротивление печи.

Реакционный объем **барабанных вращающихся** печей представляет собой горизонтальный или слабонаклоненный (до 7°) цилиндр, внутри которого перемещается обрабатываемый материал. В промышленности используют барабанные вращающиеся печи как с *внутренним*, так и с *наружным обогревом*. Последний вид печей применяют в производствах плавиковой кислоты, минеральных пигментов и кальцинированной соды.

Барабан печи для кальцинации бикарбоната диаметром 2,8 м, длиной 24,5 м и толщиной стенок 32 мм помещен в нагревательной камере и омывается дымовыми газами. Он опирается бандажми на ролики и приводится в движение от электродвигателя через редуктор и венцовую шестерню. Бикарбонат загружается в печь забрасывателем на слой готовой соды, что устраняет его схватывание. Внутри барабана размещена тяжелая цепь, снабженная ножами и предназначенная для устранения налипания соды на стенки барабана. Кальцинированная сода выгружается из барабана шнеком, а углекислый газ и водяные пары выходят из барабана через штуцер в головке печи.

По тепловой нагрузке и удельной производительности они уступают печам других типов. Как правило, у них большие тепловые потери и высокая металлоемкость. Широкая область использования барабанных печей объясняется следующими их достоинствами: надежностью в работе, возможностью использования любого вида топлива и обработки веществ любого гранулометрического состава от пылевидных до кусковых, обработки расплавов и смесей твердых веществ с расплавами при параллельном токе или противотоке

материала и греющих газов. Барабанные вращающиеся аппараты используют также в качестве сушилок, холодильников, грануляторов растворителей, кристаллизаторов и транспортных труб.

В **муфельных** печах реакционное пространство чечевицеобразной формы образовано сводом и подом муфеля, внутри которого расположено перемешивающее устройство. Это печи косвенного нагрева – муфель расположен в топке, их используют для получения сульфатов калия и натрия взаимодействием хлоридов с серной кислотой, окиси свинца из металла и ряда других веществ.

Достоинство муфельной печи – возможность получения хлорида водорода с концентрацией 30÷50 %. *Недостатки*: низкая производительность; плохое использование тепла, так как газы выходят из печи с температурой 800°C; значительное коррозионное разрушение пода печи и перемешивающего устройства.

Реакционные камерные печи представляют собой конический, цилиндрический или прямоугольный реакционный объем, обогреваемый за счет тепла химических реакций, протекающих в данном объеме. Эти печи используют для сжигания фосфора, серы, сероводорода и синтеза хлорида водорода из хлора и водорода. Камерные печи косвенного нагрева применяют редко.

Камерная вертикальная печь для сжигания фосфора имеет форму усеченного конуса, установленного основанием вверх. Фосфор распыляется с помощью пневматической форсунки. Для отвода тепла горения фосфора и защиты корпуса от воздействия горячих паров пятиоксида фосфора внутренние стенки печи орошают кислотой, которую подают в переливную чашу. Для поддержания необходимой концентрации кислоты в переливную чашу подают воду. Кроме того, часть кислоты подают в коллектор и распыляют с помощью форсунок в объеме печи. Таким образом, в печи горит фосфор и испаряется вода, частично идут процессы абсорбции пятиоксида фосфора и образования фосфорной кислоты. Кислота с температурой 80°C и концентрацией 75% отводится на охлаждение, а смесь газов, паров воды и пятиоксида фосфора поступает в башню гидратации на абсорбцию фосфорного ангидрида.

Камерная циклонная печь отличается от предыдущей организованным движением газа за счет ввода воздуха, необходимого для горения, по тангенциальным каналам. Газовый поток вращается вокруг продольной оси аппарата, что интенсифицирует смешение, диффузию и испарение, тем самым увеличивая скорость химических процессов. В последние годы циклонные печи получили широкое распространение. Их используют в котельных агрегатах для сжигания

газообразного и жидкого топлива, в химической промышленности для сжигания серы и отходов производства (сточные воды, шламы, газы). Печи данного типа испытаны в процессе сжигания фосфора и обесфторивания природных фосфатов. Достоинства циклонных печей: высокая интенсивность процесса и, следовательно, малая занимаемая площадь и объем, высокая полнота сжигания, возможность работы с малым избытком воздуха, низкое аэродинамическое сопротивление.

В **руднотермических (электродуговых сопротивления)** печах обрабатываемые вещества нагреваются и плавятся в ванне печи за счет пропускания электрического тока через шихту и расплав. Печи этого типа используют для производства элементарного фосфора и карбида кальция. Электродуговая печь для восстановления фосфора из фосфоритов состоит из вертикального цилиндрического корпуса (ванны), через крышку которого проходят три самоспекающихся электрода, десяти течек для загрузки шихты и двух патрубков для отвода газов. В обечайке корпуса размещено три летки: две – для слива шлака и одна для слива феррофосфора. Корпус, крышка и днище печи охлаждаются водой. Корпус печи изготовлен из листовой стали толщиной 25 мм и усилен двутаврами, на которые опирается металлическая крышка. Корпус печи выше угольных блоков футерован шамотным кирпичом. Свод печи выполнен из бетона, пространство между сводом и крышкой заполнено песком, Днище печи плоское (толщина 32 мм), к нему приварены швеллера, образующие каналы, по которым пропускают воду для охлаждения. Крышку изготавливают из нержавеющей стали, она состоит из трех секторов, соединяемых между собой фланцами. Сектора электрически изолированы друг от друга и корпуса печи. Электрический ток подводят к электродам с помощью электродержателей, а механизм перепуска служит для изменения положения электродов в печи.

Туннельные печи применяют для обжига штучных изделий. Изделия загружают на вагонетки и направляют в сквозной канал печи. Как и шахтных печах в туннельной печи выделяют зону нагрева, прокали и охлаждения. По технико-экономическим показателям туннельные печи уступают шахтным, однако благодаря тому, что в процессе обжига изделия не подвергаются нагрузке вышележащих слоев, как в шахтных, не происходит их разрушения.

10.2. Расчет шахтных печей

Конструктивный расчет шахтных печей заключается в определении времени пребывания материала в зонах нагрева, обжига и охлаждения:

$$\tau = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{об}} + \tau_{\text{охл}}, \quad (10.1)$$

где индексы "н", "об" и "охл" относятся к зонам нагрева, обжига и охлаждения соответственно.

Коэффициент теплопередачи от газов к материалу определится как

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{г} \rightarrow \text{кус}}} + \frac{r_{\text{кус}}}{\lambda_{\text{кус}}}}, \quad (10.2)$$

где $\alpha_{\text{г} \rightarrow \text{кус}}$ – коэффициент теплоотдачи от газа к твердому (кусковому) материалу; $r_{\text{кус}}$ – радиус кусков; $\lambda_{\text{кус}}$ – коэффициент теплопроводности кусков твердого материала. Все эти величины будут изменяться в зависимости от зоны, т.к. средняя температура, радиус и коэффициент теплопроводности (в первую очередь влияет изменение состава твердого материала в процессе обжига) будут различны для разных зон.

Распределение температур газа и материала по зонам представлены на рис. 10.1.

Расчет зоны нагрева.

Количество тепла, необходимого для нагрева материала до температуры обжига:

$$Q_1 = m_{\text{кус}} c_{\text{кус}} (t_{\text{раб}} - t_{\text{н}}), \quad (10.3)$$

где $m_{\text{кус}}$ и $c_{\text{кус}}$ – масса и теплоемкость куска.

Количество тепла, подводимое с газами:

$$Q_2 = K_{\text{н}} S_{\text{кус}} \Delta t_{\text{н}} \tau_{\text{н}}, \quad (10.4)$$

где $K_{\text{н}}$ – коэффициент теплопередачи в зоне нагрева; $S_{\text{кус}}$ – поверхность куска; $\Delta t_{\text{н}}$ – средняя температура в зоне нагрева:

$$\Delta t_{\text{н}} = \frac{(t_{\text{г,раб}} - t_{\text{раб}}) + (t_{\text{г,вых}} - t_{\text{н}})}{2}. \quad (10.5)$$

Из условия равенства $Q_1 = Q_2$ можно определить время пребывания в зоне нагрева.

Расчет зоны обжига. Количество тепла, необходимого для обжига:

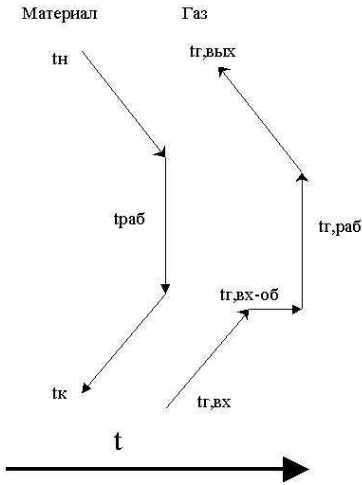


Рис. 10.1. Распределение температур материала и газа в шахтной печи

$$Q_3 = m_{\text{куч}} \Delta H, \quad (10.6)$$

где ΔH – тепловой эффект процессов, происходящих при обжиге (термическое разложение, фазовые переходы, образование новых соединений и т.п.).

Количество тепла, подводимое с газами:

$$Q_4 = K_{\text{об}} S_{\text{куч}} \Delta t_{\text{об}} \tau_{\text{об}}, \quad (10.7)$$

где $K_{\text{об}}$ – коэффициент теплопередачи в зоне обжига; $\Delta t_{\text{об}}$ – средняя температура в зоне обжига:

$$\tau_{\text{об}} = t_{\text{г,раб}} - t_{\text{раб}}. \quad (10.8)$$

Из условия равенства $Q_3 = Q_4$ можно определить время пребывания в зоне обжига.

Расчет зоны охлаждения. Количество тепла, отводимое от материала:

$$Q_5 = m_{\text{куч}} c_{\text{куч}} (t_{\text{раб}} - t_{\text{к}}). \quad (10.9)$$

Температура материала на выходе из соображений техники безопасности не должна превышать 50°C .

Количество тепла, отводимое с газами:

$$Q_6 = K_{\text{охл}} S_{\text{куч}} \Delta t_{\text{охл}} \tau_{\text{охл}}, \quad (10.10)$$

где $K_{\text{охл}}$ – коэффициент теплопередачи в зоне охлаждения; $\Delta t_{\text{охл}}$ – средняя температура в зоне охлаждения:

$$\Delta t_{\text{охл}} = \frac{(t_{\text{раб}} - t_{\text{г,вх-об}}) - (t_{\text{к}} - t_{\text{г,вх}})}{\ln \frac{(t_{\text{раб}} - t_{\text{г,вх-об}})}{(t_{\text{к}} - t_{\text{г,вх}})}}. \quad (10.11)$$

Из условия равенства $Q_5 = Q_6$ можно определить время пребывания в зоне охлаждения.

10.3. Расчет барабанных печей

При выборе барабанных печей рассчитывают скорость вращения барабана n (рад/с, об/мин) и мощность привода $N_{\text{дв}}$, (кВт). Механический проверочный расчет сводится к определению напряжения в корпусе, бандажах, опорных и упорных роликах.

Скорость вращения барабана зависит от необходимого времени пребывания материала в печи τ (с) и рассчитывается по формуле:

$$n = \frac{2\pi KL}{\tau D_6 \text{tg}\alpha'}, \quad (10.12)$$

где K – коэффициент, зависящий от характера движения материала: при параллельном токе K равно 0,7 для тяжелых материалов и 0,2 для

легких, при противотоке $K = 0,5$ для тяжелых и $2,0$ для легких материалов; L – длина барабана, м; D_6 – внутренний диаметр барабана по футеровке, м; α – угол наклона барабана, град.

Диаметр барабана по футеровке рассчитывают по допустимой скорости газов при средней температуре в печи:

$$D_6 = \sqrt{\frac{4w_{\Gamma}}{\pi v_{\text{д}}}}, \quad (10.13)$$

где w_{Γ} – расход дымовых газов, м³/с., $v_{\text{д}}$ – допустимая скорость газа, м/с (при параллельном токе принимается до 1,5 м/с и при противотоке до 2,5 м/с).

Крутящий момент барабана $M_{\text{кр}}$ (Н·м) без насадки находят по формуле:

$$M_{\text{кр}} = 9,81L(G_6 + G_{\Phi})A + 7,69D_6^2\varphi\rho_{\text{н}}(X + A)L, \quad (10.14)$$

где G_6 – погонная масса ненагруженного барабана, кг/м; G_{Φ} – погонная масса футеровки, кг/м; A – приведенный коэффициент трения, м; φ – коэффициент заполнения барабана материалом; $\rho_{\text{н}}$ – насыпная масса материала, кг/м³; X – расстояние от центра тяжести материала до вертикальной оси барабана, м.

По заводским данным значения погонной массы барабана, толщины стенки, приведенного коэффициента трения приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1. Масса погонного метра барабана G_6 и приведенного коэффициента трения A в зависимости от диаметра барабана D_6

D_6 , мм	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2800
δ , мм	8	10	12	12	14	16	16	20
G_6 , кг/м	1100	1300	1550	1900	2100	2500	2750	3850
A , м	0,004	0,0042	0,0044	0,0045	0,0046	0,0048	0,005	0,0055

Расстояние от центра тяжести материала до вертикальной оси барабана:

$$X = D_6(1 - \varphi) \sin \vartheta, \quad (10.15)$$

где ϑ – угол естественного откоса материала.

Погонную массу футеровки G_{Φ} (кг/м) можно рассчитать по уравнению:

$$G_{\Phi} = \frac{\pi(D_{\text{в}}^2 - D_6^2)\rho_{\Phi}}{4}, \quad (10.16)$$

где D_b – внутренний диаметр стального барабана, м; ρ_ϕ – плотность футеровки, кг/м³.

Мощность двигателя $N_{дв}$ (кВт) определяем по формуле:

$$N_{дв} = \frac{M_{кр} n}{1000 \eta} \beta. \quad (10.17)$$

Проверочный расчет барабана на прочность можно выполнить по упрощенной методике, рассматривая его как свободно лежащую на двух опорах (бандажах) балку, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой от массы собственно барабана, футеровки и материала, а также сосредоточенной нагрузкой от венцовой шестерни.

Суммарный изгибающий момент:

$$M_{изг} = \frac{PL}{47} + \frac{P_b l_b}{4}, \quad (10.18)$$

где P – вес барабана, футеровки и материала, Н; P_b – вес венцовой шестерни, Н; l_b – расстояние между бандажами, м.

Расчетный приведенный момент:

$$M_p = 0,35 M_{изг} + 0,65 \sqrt{M_{изг}^2 + M_{кр}^2}. \quad (10.19)$$

Условие прочности барабана:

$$\sigma = \frac{M_p}{W} \leq [\sigma], \quad (10.20)$$

где $W = 0,785(D_b + \delta)^2 \delta$ – собственный момент инерции барабана.

Для нормальной, работы барабана необходимо, чтобы прогиб, отнесенный к 1 м длины, не превышал 0,3 мм. Суммарный прогиб от действия распределенной и сосредоточенной нагрузки f (м) найдем по формуле:

$$f = \frac{5PL^3}{384EI} + \frac{P_b l_b^3}{48EI'} \quad (10.21)$$

где I – момент инерции барабана, м:

$$I = \frac{\pi D_b^3 \delta}{8}. \quad (10.22)$$

11. СУШИЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Процессы производства многих неорганических веществ связаны с удалением влаги из различных сырьевых и готовых продуктов (сушка флотационного колчедана, суперфосфата, аммиачной селитры и других различных солей).

Сушка является одним из наиболее распространенных технологических процессов химической технологии. *Сушка – это удаление влаги из твердого материала за счет ее испарения.* В процессе сушки удаляется влага, связанная с материалом благодаря физико-химическим и физико-механическим силам, химически связанная влага во избежание разрушения материала не удаляется. С помощью физико-механических сил влага удерживается материалом в неопределенных соотношениях.

В химической технологии наиболее распространенными являются *конвективный* и *контактный* методы сушки. Другие методы сушки, такие как радиационная и сушка электрическим током, применяются сравнительно редко.

При *конвективной сушке* тепло теплоносителя передается к поверхности высушиваемого материала. В качестве теплоносителя применяются нагретый воздух, инертные и топочные газы, а иногда перегретый водяной пар. Однако перегретый водяной пар широкого распространения не получил из-за сложности осуществления непрерывного процесса.

При конвективной сушке физическая сущность процесса заключается в удалении влаги за счет разности парциальных давлений паров над материалом $p_{\text{пм}}$ и в окружающей среде $p_{\text{пс}}$. При равенстве $p_{\text{пм}} = p_{\text{пс}}$ процесс сушки прекращается, а материал приобретает влажность, равную равновесной влажности $p_{\text{р}}$. При высушивании материала до влажности менее равновесной материал из окружающей среды будет сорбировать влагу. Равновесная влажность тем выше, чем больше относительная влажность окружающего воздуха.

При *контактной сушке* тепло к высушиваемому материалу передается через стенку; соприкасающуюся с высушиваемым материалом.

По конструктивным признакам сушилки подразделяются на *камерные, ленточные, барабанные, распылительные, сушилки со взвешенным слоем* и др.

Наибольшее распространение получили сушилки барабанные, со взвешенным слоем и распылительные.

Сушилки, использующие в качестве теплоносителя дымовые газы, являются более производительными и экономичными, чем сушилки, использующие нагретый воздух. Расход топлива в газовой сушилке примерно в два раза меньше, чем в воздушной при равных параметрах теплоносителя.

К недостаткам сушилок, применяющих в качестве теплоносителя дымовые газы, относится огнеопасность, трудность регулирования процесса; возможность засорения продукта сажей или золой. В связи с этим топки должны работать с таким избытком воздуха, чтобы обеспечить полное сгорание топлива.

Наиболее экономичными сушилками по затрате тепла являются установки, работающие по принципу противотока.

Прямоточные сушилки применяются в тех случаях, когда высушиваемый материал не выдерживает высокой температуры в конце сушки (например, аммиачная селитра, суперфосфат и др.).

11.1. Барабанные сушилки

Барабанные сушилки являются наиболее надежными и широко распространенными установками для сушки сыпучих материалов. В них сушат уголь, шлак, глину, гипсовый камень, удобрения и другие сыпучие и кусковые материалы. Их используют также для низкотемпературного обжига при изготовлении полуводного гипса.

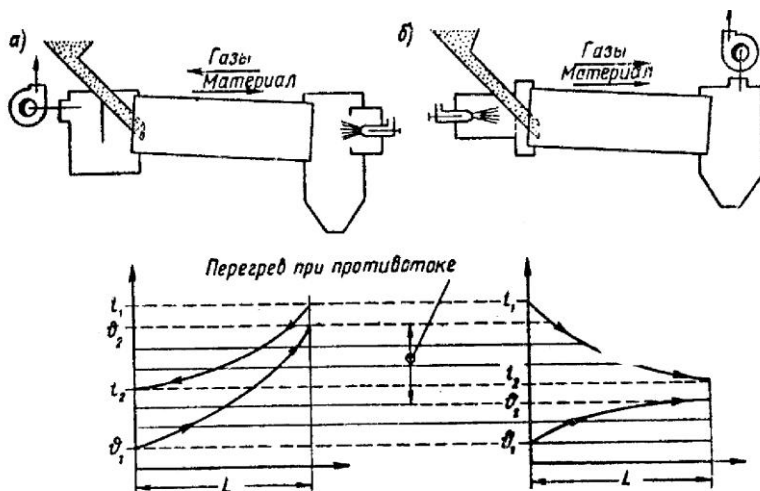


Рис. 11.1. Схемы движения теплоносителей и перепады температур в барабанных сушилках: а – противоточных; б – прямоточных

Различают барабанные сушилки противоточные (рис. 11.1, а), когда газы и материал движутся навстречу друг другу, и прямоточные (рис. 11.1, б), в которых движение газов и материала осуществляется в одном направлении. В противоточных сушилках температура выгружаемого материала ϑ_2 при прочих равных условиях выше, чем в прямоточных. Это объясняется тем, что в первом случае материал в конце процесса сушки соприкасается с более нагретыми газами (с начальной температурой t_2), тогда как во втором случае подсушенный материал омывается менее нагретыми газами (с конечной температурой t_2).

Исходя из указанных особенностей, противоточные барабанные сушилки выгодно применять при сушке материалов, подлежащих дальнейшему обжигу (керамзитовые гранулы) или тонкому помолу (гранулированный шлак). Конечная влажность таких материалов должна быть минимальной или равна нулю. Прямоточные сушилки наиболее приемлемы для сушки материалов, перегрев которых нежелателен, например глины для керамического производства, теряющей при высоких температурах ценные пластические свойства, бурого угля, перегрев которого приводит к потере горючих летучих, а также материалов, при пересушке которых наблюдается большое пылеобразование (мел, трепел, мелкий песок и т.п.).

11.2. Сушилки со взвешенным слоем

В настоящее время сушилки со взвешенным слоем, относящиеся к конвективному типу, получили широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом. Они могут быть использованы для сушки самых разнообразных продуктов: высоковлажных комкующихся и мелкодисперсных. Производительность их колеблется от 2÷3 до 100 т/ч различных материалов с дисперсностью от 0,1 до 5 мм. Сушилки со взвешенным слоем могут быть как *круглого*, так и *прямоугольного* сечения. Сушилки со взвешенным слоем характеризуются надежностью и малым временем сушки.

В сушилке со взвешенным слоем теплоноситель подается под распределительную решетку, на которую поступает высушиваемый материал, в качестве теплоносителей применяется воздух или дымовые газы.

Устойчивый взвешенный слой при сушке существует в пределах между *критической скоростью*, характеризующей начало псевдооживления, и *скоростью витания*, при которой начинается унос материала. В состоянии псевдооживления достигается наибольшая

поверхность взаимодействующих фаз, температура выравнивается, скорость сушки возрастает и достигает высокой интенсивности.

Сушилки с кипящим слоем обладают следующими достоинствами:

- а) простотой конструкции и компактностью;
- б) высоким влагосъемом с 1 м^2 составляющим $60 \div 3000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
- в) высокой степенью использования тепла сушильного агента: объемный коэффициент теплообмена, отнесенный к слою материала, равен $5000 \div 10000 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$, или $5800 \div 11630 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$, в то время как для барабанных сушилок он составляет на весь объем не более $500 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot \text{град})$, или $580 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$;
- г) возможностью автоматического регулирования технологических параметров сушки.

К числу недостатков сушилок со взвешенным слоем относятся:

- а) высокое гидравлическое сопротивление;
- б) низкая интенсивность при сушке малодисперсных материалов;
- в) истирание и большой унос твердых материалов.

11.3. Распылительные сушилки

Распылительные сушилки применяются для сушки жидких, пастообразных материалов, суспензий и эмульсий. Распыление высушиваемого материала может осуществляться как с помощью *механических* и *пневматических форсунок*, так и с помощью *центробежных дисков*.

Распыление *механическими форсунками* проводят при давлении $(290 \div 1960) 10^4$ Па. Турбулизация струи увеличивается, если ей придать вращательное движение. Механические форсунки характеризуются высокой экономичностью (расход электроэнергии на распыление составляет от 2 до 10 кВт·ч на тонну раствора), компактностью и равномерностью распыления. Механические форсунки пригодны для истинных или коллоидных растворов. При распылении суспензий происходит засорение выходных отверстий форсунок.

В *пневматических форсунках* для распыления применяют сжатый воздух или водяной пар под давлением $(14,7 \div 58,8) 10^4$ Па. При распылении паром необходимо, чтобы не происходила конденсация паров воды. С помощью пневматических форсунок можно распылять жидкости любой вязкости. Они надежны и позволяют регулировать производительность. К недостаткам пневматических форсунок относится повышенный расход электроэнергии (до 60 кВт·ч на тонну раствора).

Наибольшее распространение получило распыление с помощью центробежных дисков, позволяющих распылять грубые суспензии и вязкие растворы. Центробежный метод распыления позволяет регулировать производительность сушилки. Распыление по данному методу осуществляется благодаря центробежной силе. Раствор, подлежащий распылению, подается на быстро вращающийся диск (скорость вращения от 4000 до 20 000 об/мин), откуда под действием центробежной силы движется к периферии диска и при помощи лопаток и сопел выталкивается в камеру сушилки. Окружная скорость диска выбирается равной до 200 м/с.

Дисперсность распыления зависит от окружной скорости диска, производительности форсунок и свойств распыляемого раствора.

Сушку в распылительных сушилках можно осуществлять по принципу *прямотока*, *противотока* и при *смешанном токе* материала и сушильного агента.

Большинство сушилок работает по принципу прямотока (или параллельного тока), что обеспечивает высокую интенсивность и получение продукта высокого качества.

Основным преимуществом параллельного тока является возможность применения для сушки газов с высокой температурой, без перегрева высушиваемого материала. Температура сухого продукта определяется главным образом температурой сушильного агента на выходе из сушилки.

При противотоке эффективность сушки понижается, так как увеличивается время контакта высушиваемого материала с теплоносителем. Кроме того, температура теплоносителя должна быть понижена.

Способ ввода газов и отвод их обусловлен двумя причинами: 1) производительностью диска, 2) физико-химическими свойствами высушиваемого раствора или суспензии. Наиболее рационально подавать сушильные газы к корню факела распыла, а отводить газы из центра камеры.

Распылительные сушилки имеют и ряд недостатков:

1) сложное и дорогое оборудование для распыления высушиваемого материала и для очистки газов, выходящих из сушилки;

2) повышенный расход электроэнергии;

3) налипание продукта на стенки камеры распылительной сушилки, что приводит к остановке процесса сушки;

4) большие удельные габариты сушильной установки;

5) высокая стоимость сушки.

12. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Одна из характеристик измельчителей – *степень измельчения*, показывающая, во сколько раз уменьшается средний размер кусков (зерен) твердого материала в результате измельчения. На практике часто дробят сырье с размерами кусков от 1 м и более до порошкообразного состояния ($d < 1$ мм). Такая высокая степень измельчения не может быть достигнута на одной машине, требуется измельчение проводить в несколько стадий. С этой целью разработаны измельчители разных конструкций, которые условно делят на *дробилки крупного, среднего и мелкого дробления, мельницы тонкого и коллоидного помола*.

В неорганической технологии используют в основном измельчители:

- 1) раздавливающего действия;
- 2) раскалывающего и разламывающего действия;
- 3) ударного действия.

В некоторых случаях применяют измельчители *истирающе-раздавливающего* и *ударно-истирающего* действия.

В измельчителях *раздавливающего* действия тело под действием нагрузки деформируется по всему объему, и когда внутреннее напряжение в нем превысит предел прочности сжатию, оно разрушается. К таким измельчителям относят гладковалковые дробилки и ролико-кольцевые мельницы.

Измельчение материала *раскалыванием* и *разламыванием* осуществляют действием на тело сосредоточенных нагрузок, вызывающих местные разрушающие напряжения.

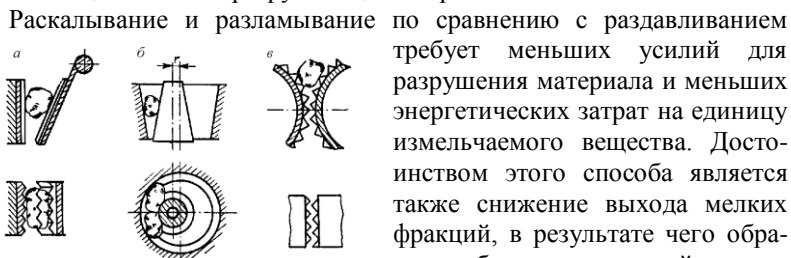


Рис. 12.1. Схемы измельчителей раскалывающего и разламывающего действия: а – щековая дробилка; б – конусная дробилка; в – зубчато-валковая дробилка

Раскалывание и разламывание по сравнению с раздавливанием требует меньших усилий для разрушения материала и меньших энергетических затрат на единицу измельчаемого вещества. Достоинством этого способа является также снижение выхода мелких фракций, в результате чего образуется более однородный по размерам продукт. К измельчителям раскалывающего и раздавливающего действия относят щековые, конусные и зубчато-валковые дробилки (рис. 12.1).

В измельчителях **ударного действия** разрушение материала происходит вследствие динамических нагрузок. Они возникают при падении измельчающих тел на материал, при столкновениях измельчающего тела с материалом в полете, летящего материала с неподвижной поверхностью и при столкновении в полете самих измельчаемых частиц друг с другом. К измельчителям ударного действия относят молотковые дробилки, а также шаровые, стержневые и струйные мельницы.

При дроблении куски твердого материала подвергаются сначала объемной деформации, а затем разрушаются по ослабленным макро- и микротрещинами сечениям с образованием новых поверхностей. Куски продукта дробления ослаблены трещинами значительно меньше исходных. Поэтому с увеличением степени измельчения возрастает удельный расход энергии на измельчение. Например, при измельчении частиц до размера -20 ; $-0,1$; $-0,01$ мм расход электроэнергии составляет соответственно 1; 25 и 150 кВт·ч/т. На практике, руководствуясь принципом **“не измельчать ничего лишнего”**, из материала предварительно удаляют частицы с размером, до которого материал будет доведен на данной стадии.

12.1. Дробилки

Щековые дробилки применяют для крупного дробления колчедана, известняка, пластов хлорида бария, цианамиды кальция и т. д. Они получили широкое распространение благодаря компактности, легкости обслуживания, простоте и надежности конструкции. Плиты дробилки, являющиеся рабочим органом, изготавливают из закаленного чугуна или износостойкой стали. Размер кусков дробленого материала определяется шириной зазора между плитами станины и подвижной щеки, который регулируется с помощью регулировочного клина.

Недостатком щековых дробилок является динамическая неуравновешенность, создающая вибрацию, а также забивание рабочего пространства материалом при неравномерной его подаче.

Конусные дробилки по своему назначению делят на дробилки крупного, среднего и мелкого дробления. Рабочим элементом дробилок являются поверхности конусов, футерованные плитами из марганцовистой стали. Внешний конус связан со станиной дробилки, а внутренний установлен на оси. При вращении внутренний конус в одной части окружности приближается к неподвижному внешнему конусу, разрушая материал, а в противоположной части окружности

удаляется от внешнего конуса. Измельченный материал при этом высыпается через выходную щель.

В отличие от щековых дробилок в конусных дробилках процессы разрушения материала и удаления его из зоны дробления протекают непрерывно. Поэтому они динамически более уравновешены и имеют большую производительность на единицу собственной массы.

Крупность дробленого материала определяется шириной выходной щели, которую изменяют в дробилках крупного дробления, опуская или поднимая внутренний конус, а в дробилках среднего и мелкого дробления – внешний конус.

Конусные дробилки используют для измельчения колчедана, фосфатного сырья, силвинита и других твердых материалов.

Недостатки конусных дробилок: сложная и дорогая конструкция, большая высота и сложное обслуживание.

В **зубовалковой дробилке** материал попадает между зубьями вращающихся навстречу друг другу валков и раскалывается. Один из валков посажен на подвижные подшипники с амортизирующими пружинами, чтобы защитить дробилку от поломки при попадании между валками металлических предметов.

Для повышения степени измельчения изготавливают дробилки с двумя парами валков, которые устанавливают друг над другом на общей раме. В зубовалковых дробилках нижняя пара валков имеет зубья меньших размеров с большей частотой их расположения. Такие дробилки дают степень измельчения от 8 и выше. Ширина выходной щели у верхней пары валков больше, чем у нижней, поэтому для обеспечения одинаковой производительности частота вращения нижних валков должна быть больше, чем верхних.

Молотковые дробилки предназначены для среднего и мелкого дробления волокнистых и хрупких материалов умеренной твердости, таких как асбест, смерзшийся колчедан, калийная руда, гипс, кокс, известняк и т. д. Размер частиц измельченного материала определяется размером отверстий в колосниковой решетке, которую при необходимости можно заменять. Во избежание образования продукта с повышенным содержанием пыли и мелочи частота вращения ротора с молотками не должна превышать расчетного для данного материала значения.

Молотковые дробилки отличаются; 1) высокой производительностью на единицу собственной массы; 2) пониженным расходом энергии и высокой степенью измельчения по сравнению с конусными дробилками.

Недостатками являются: 1) быстрый износ молотков и плит; 2) сложность балансировки ротора.

12.2. Мельницы

Барабанные мельницы используют для сухого и мокрого помола. Мокрый помол применяют во всех случаях, когда измельченный материал подвергают в дальнейшем переработке в виде суспензии.

Создано большое число типов барабанных мельниц: *шаровые* и *стержневые*, *одно-* и *многокамерные* (две, три, четыре), *мокрого* и *сухого* помола.

Использование мокрого помола приводит к уменьшению рабочего объема и повышению массы мельницы (за счет диафрагмы и лифтеров), а также к несколько более быстрому износу мелющих деталей из-за повышенной коррозии металла в растворах.

Создание многокамерных мельниц объясняется стремлением привести размер мелющих тел (размер и форма которых сильно влияют на экономичность мельницы) в соответствие с крупностью измельчаемого материала. Энергия мелющих тел должна быть достаточной для разрушения наибольших кусков сырья, иначе они в мельнице не разрушаются, а шлифуются. Если эта энергия превышает необходимое значение, то избыток ее расходуется на переизмельчение материала и частично превращается в тепловую энергию. Для разрушения крупнокускового сырья требуются мелющие тела большей массы. Это уменьшает число ударов по материалу и снижает производительность мельниц. Поэтому считается, что крупность частиц загружаемого сырья должна быть не более 6÷8 мм. В многокамерной мельнице крупность материала уменьшается по мере его продвижения к выходу. В соответствии с этим первая камера загружается крупными мелющими телами, а каждая последующая – более мелкими (в соответствии с расчетом и опытными данными).

Барабанные мельницы обладают: 1) высокой надежностью; 2) безопасностью и простотой обслуживания.

Недостатки: 1) громоздкость; 2) шум и загрязнение продукта металлом из-за износа измельчителей.

Вибрационные мельницы применяются для сухого помола. Принципиальное отличие от шаровых мельниц заключается в том, что соударение частиц и мелющих тел происходит под действием центробежных сил, которые в несколько раз больше, чем гравитационные силы, за счет которых работают шаровые мельницы.

Струйные мельницы. Измельчение материала в таких мельницах происходит в результате соударения частиц в струях воздуха или перегретого пара, вытекающих из сопел или разгонных труб со скоростью более 90 м/с и направленных под углом (например, плоская размольная камера типа СПВ) или навстречу друг другу (противоточная камера типа СП). Давление подаваемого в измельчители воздуха (пара) составляет $0,68 \div 0,98$ МПа, а расход его $4 \div 12$ м³ на 1 кг размальваемого вещества. Крупность исходного сырья находится в пределах $0,1 \div 0,5$ мм, но иногда доходит до $8 \div 10$ мм. Конечный продукт имеет соответственно крупность от $-50 \div 80$ до -20 мкм. При работе в замкнутом цикле с сепаратором и многократной циркуляцией размер частиц в продукте может составлять $1 \div 5$ мкм.

В струйных мельницах могут измельчаться сера, известняк, уголь, барит, асбест и другие материалы. Производительность установок составляет от нескольких килограммов до 30 т/ч и более.

12.3. Организация измельчения

В значительной мере организация измельчения определяет эргономичность технологического процесса в целом. Подбор типа и размера измельчителя производят с учетом его технических характеристик; размеров загружаемых и выгружаемых кусков (частиц), производительности, потребляемой мощности, сложности обслуживания и т. д. Например, конусные дробилки имеют большую равномерность в работе и производительность на единицу собственной массы и расходуют меньше энергии, чем щековые. Однако это не значит, что во всех случаях нужно использовать конусную дробилку. Может также оказаться, что для измельчения данных кусков сырья потребуются крупногабаритная конусная дробилка, производительность которой будет значительно превышать требуемую. В этом случае дробилка будет недогружена и ее коэффициент полезного действия останется низким. Поэтому без экономического анализа схемы измельчения нельзя однозначно выбирать тип измельчителя.

Измельчение сырья (руды) проводят обычно в три ступени (рис. 12.2): *крупное*, *среднее* и *тонкое*. Руду вагонами 3 подают в бункер 2 с колосковой решеткой, задерживающей куски с размерами больше ширины пасти дробилки. Из бункера сырье питателем 1 и транспортером 4 подают на грохот 6. Мелкая фракция по желобу 7 попадает на транспортер 8, а крупная – на дробилку крупного (среднего) измельчения 6. Раздробленный материал также поступает на транспортер 8, который подает сырье на грохот 9, где оно делится

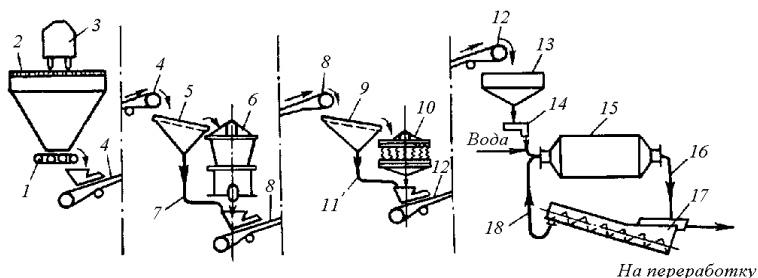


Рис. 12.2. Принципиальная технологическая схема измельчения

на две фракции. Нижняя (мелкая) поступает по желобу 11 на транспортер 12, а верхняя – в дробилку среднего (мелкого) дробления 10. Из дробилки материал подается транспортером 12 в бункер 13, а из него питателем 14 в барабанную мельницу 15, в которую по трубопроводу поступает вода (раствор). Отношение Ж/Т составляет обычно 2÷3.

Суспензия из мельницы мокрого помола направляется по желобу 16 в спиральный классификатор 17, где крупные частицы оседают на дно и шнеком по желобу 18 возвращаются в мельницу, а мелкие вместе с жидкостью подаются на дальнейшую переработку.

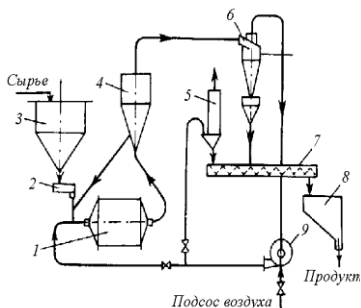


Рис. 12.3. Схема сухого измельчения

При необходимости получения сухого порошка (рис. 12.3) сырье из бункера 3 питателем 2 подают в мельницу сухого помола 1, в которую газодувкой 9 нагнетается газ (воздух). Он подхватывает в мельнице мелкие частицы и поступает в сепаратор 4. Здесь твердая фаза разделяется на две фракции. Крупная возвращается в мельницу, а мелкая отделяется от воздуха в циклоне (батарея циклонов) 6, откуда шнеком 7 доставляется в бункер 8. Воздух, освобожденный в циклоне от основной массы твердых частиц, возвращается газодувкой частично в цикл. Основная часть газа выпускается в атмосферу через рукавный фильтр 5.

13. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ

Гранулирование – это процесс получения гранул, частиц примерно одинакового размера, из порошкообразных материалов, растворов и расплавов. Гранулированные удобрения легче транспортировать, хранить и вносить в почву, они лучше усваиваются растениями. При работе с гранулированной шихтой повышается производительность и уменьшается пылеунос в шахтных и барабанных печах и печах КС, поэтому такие порошкообразные материалы, как фосфоритная мука, апатитовый концентрат, барит и сульфат натрия гранулируют перед термообработкой в печах.

По количеству ретура (возврата) материала, поступающего в гранулятор со стадий дробления и отсева, методы гранулирования подразделяют на *ретурные* и *безретурные*.

В *ретурных* установках часть готового продукта возвращается на стадию гранулирования. Кратность ретура — отношение количества возврата к количеству выводимого готового продукта — может изменяться в широких пределах (от 0,5 до 15); она зависит от содержания влаги в суспензии или растворе и от оптимальной влажности смеси при гранулировании, а также от выхода мелких фракций. Увеличение кратности ретура приводит к росту энергетических затрат на транспорт и сушку, повышает нагрузку на все аппараты отделения грануляции.

Безретурные установки используют при гранулировании расплавов путем охлаждения капель в воздухе или масле. Они проще по аппаратному оформлению и требуют меньших энергетических затрат.

13.1. Гранулирование порошкообразных материалов

В барабанных и тарельчатых грануляторах при смачивании за счет капиллярно-адсорбционных сил происходит упрочнение гранул. В качестве смачивателя и связующего можно использовать воду, растворы силиката натрия, а также солей, которые являются одним из компонентов гранул, сульфат-спиртовую барду и т. д.

Барабанные грануляторы по конструкции основных узлов схожи с другими аппаратами с вращающимся барабаном. Для увеличения времени пребывания материала на концах барабана установлены подпорные кольца, обеспечивающие степень заполнения барабана от 0,2 до 0,3. Чтобы уменьшить налипание гранулируемого материала на

стенки барабана, его внутреннюю поверхность покрывают резиной, прикрепляемой с шагом $0,2 \div 0,5$ м. В верхней точке барабана резина прогибается под тяжестью налипшего материала или специального груза, и налипший слой обрушивается. Грануляторы с гладкой поверхностью снабжены ножом для очистки стенок. Воду (или раствор), необходимую для увлажнения гранулируемого материала, подают в барабан по трубопроводу, где она разбрызгивается форсунками.

Барабанный гранулятор может работать без ретура, но в результате низкого выхода товарной фракции ($50 \div 80$ %) кратность ретура составляет $0,2 \div 1,0$. По удельной производительности аппараты барабанные грануляторы не уступают аммонизаторам-грануляторам.

Барабанные грануляторы-сушилки используют в производстве аммофоса, нитрофоски, нитроаммофоски и других удобрений. Совмещение в одном аппарате гранулятора и сушилки упрощает технологическую схему, уменьшает количество ретура и расходы на транспортировку, позволяет работать на растворах или суспензиях с различным содержанием воды и получать гранулы заданного размера. К недостаткам аппаратов БГС относятся налипание продукта на стенки и трудности гранулирования веществ с высокими температурами плавления и разложения (выше 300°C).

По удельной производительности грануляторы-сушилки уступают аппаратам других типов, так как их объем рассчитывают на процесс сушки. Однако совмещение двух процессов позволяет уменьшить капитальные затраты и занимаемую площадь по сравнению с раздельным гранулированием и сушкой.

Шнековые грануляторы используют в производствах аммофоса и сложно-смешанных удобрений. По конструкции шнеки-грануляторы мало чем отличаются от шнеков-реакторов.

Гранулирование в шнеках осуществляют *методом наслоения* или *методом агломерации* (сминания). Первый метод позволяет получать гранулы хорошего качества, по форме приближающиеся к шаровой. Мелкие гранулы, являющиеся центрами гранулообразования, многократно проходят через шнек и последовательно покрываются тонкими слоями пульпы до образования частиц нужного размера. Этот способ требует большой кратности ретура ($8 \div 12$), а содержание растворимых компонентов в пульпе должно составлять $68 \div 70$ %. Недостаток способа наслоения – большие затраты на транспорт ретура и сушку продукта.

Метод агломерации относится к малоретурным, кратность ретура равна $5 \div 8$, а концентрация растворимых веществ в суспензии обычно

больше 70 %, чем заметно снижает затраты на транспортировку и сушку.

Достоинства шнеков-грануляторов сводятся к следующему:

- 1) высокая удельная производительность и, следовательно, малая занимаемая площадь;
- 2) герметичность;
- 3) надежность в работе;
- 4) простота устройства и эксплуатации.

К *недостаткам* относятся низкий выход товарной фракции (до 50%) и повышенный расход электроэнергии.

Тарельчатый гранулятор представляет собой чашу с плоским или сферическим дном диаметром 1÷6 м и высотой борта до 0,6 м, укрепленную на наклонном валу и приводимую в движение электродвигателем через клиноременную передачу и редуктор. Чаша с приводом смонтированы на станине, угол наклона которой можно регулировать устройством. Гранулируемый материал подают по трубе, а жидкость для гранулирования по трубопроводу. Жидкость подают под слой материала или распыляют форсунками.

Порошкообразный материал поступает на тарелку в верхней точке и смешивается с мелкими частицами, поднимающимися благодаря вращению чаши. Разбрызгивание жидкости способствует слипанию мелких частиц и закатыванию гранул. Крупные частицы скатываются к периферии и переваливаются через борт чаши, где наблюдается наибольшая глубина слоя. Мелкие частицы остаются в слое и поднимаются вместе с тарелкой в область малой глубины слоя. В тарельчатом грануляторе одновременно с закатыванием гранул происходит их классификация, что увеличивает выход товарной фракции до 70÷90 %. Как правило, грануляторы данного типа используют в малоретурных схемах.

Тарельчатые грануляторы применяются для гранулирования суперфосфата, сложно-смешанных удобрений, фосфоритной муки, апатитового концентрата и ряда других руд и концентратов.

Отличительная особенность процесса в **грануляторах с кипящим слоем** в том, что в кипящем слое одновременно протекает гранулирование, сушка или охлаждение. Кипящий слой создается за счет подачи теплоносителя либо хладагента под газораспределительную решетку. Он состоит из частиц гранулируемого продукта или предварительно полученных гранул, которые покрываются одним или несколькими слоями гранулируемого вещества и увеличиваются в размере.

Раствор, суспензию или расплав вводят в слой разными методами: *впрыскиванием непосредственно в кипящий слой с помощью форсунок или распылением над кипящим слоем.* Одновременно с

распределением жидкость может упариваться в факеле распыления за счет подачи теплоносителя.

Аппараты КС чаще работают по малоретурной схеме, когда на грануляцию возвращают только мелкую фракцию и пыль из циклонов.

Достоинства грануляторов КС: 1) высокая удельная производительность; 2) малые габариты аппаратуры; 3) возможность получения правильных сферических гранул необходимой величины; 4) возможность гранулирования различных по составу растворов, суспензий и расплавов; 5) высокая интенсивность тепло- и массообмена в слое.

Недостатки грануляторов данного типа характерны для любых аппаратов с псевдооживленным слоем: 1) повышенный пылеунос; 2) необходимость очистки от пыли больших объемов газа; 3) различное время пребывания гранул в слое; 4) возможность замыкания газораспределительной решетки, что приводит к остановкам на чистку.

Методом прессования гранулируют простые и сложносмешанные удобрения. В настоящее время это единственный промышленный способ гранулирования калийных удобрений. Эффективность данного метода заключается в следующем: 1) малый удельный расход энергии ($10 \div 12$ кВт·ч/т); 2) отсутствие расхода тепла; 3) малые габаритные размеры установки; 4) возможность гранулирования удобрений разного состава; 5) простота перехода с одной марки удобрения на другую.

Недостатком метода прессования является низкий выход товарной фракции, составляющей $30 \div 50$ %.

При достаточно высоком давлении, зависящем от свойств прессуемого материала, частицы уплотняются, деформируются и образуют плитку за счет сил молекулярного притяжения и контактного сплавления отдельных частиц. Воздух, поступающий вместе с материалом, вытесняется при прессовании вниз, в зазор между валками и вверх. Движение воздуха вниз приводит к уменьшению выхода плитки, а поднимающийся поток воздуха разрыхляет поступающий порошок и затрудняет подачу материала между валками. Вследствие этого выход плитки составляет $40 \div 70$, иногда 90%. При измельчении плитки образуется мелкая фракция, которая и возвращается на прессование в качестве ретура.

Порошкообразные материалы можно гранулировать также на **таблеточных машинах**. Их используют для получения гранул катализаторов. Таблетки могут иметь форму дисков, цилиндров и колец диаметрами 6, 9, 10 и 12 мм.

13.2. Гранулирование паст

Гранулирование паст осуществляют в экструдерах – машинах, рабочим органом которых служит вращающийся червяк (шнек) или валки. Экструдеры имеют разнообразную конструкцию. Паста через перфорированную матрицу продавливается валками либо шнеком. Вытекающий из отверстий матрицы материал срезается неподвижными или вращающимися ножами либо отрывается под действием собственной тяжести.

Экструдеры используют для получения гранул катализаторов, керамзита и некоторых других материалов. Шнековые экструдеры применяют иногда для питания пастой сушилок КС.

13.3. Гранулирование расплавов

Гранулирование расплавов путем охлаждения капель воздухом – самый распространенный способ производства аммиачной, известково-аммиачной и кальциевой селитры, карбамида и сложных удобрений. Гранулирование осуществляют в башнях высотой 21÷140 м и диаметром 8÷30 м. Расплав разбрызгивают с помощью специального устройства, и за время падения капель происходит кристаллизация плава и охлаждение гранул. В оптимальных условиях образуются частицы примерно одинакового размера, процесс является практически безрeturным.

Достоинства гранулирования в башнях заключаются в простоте оборудования, малых энергетических затратах и незначительном выделении пыли. *Недостатки* его сводятся к следующему: малая интенсивность и, следовательно, большой объем аппаратуры; необходимость очистки больших количеств воздуха; высокая температура гранул до их охлаждения в аппарате КС.

Разбрызгиватель плава (гранулятор) – наиболее ответственный узел грануляционной башни. От его устройства зависит величина и гранулометрический состав гранул, равномерность распределения нагрузки по сечению башни.

В отечественной промышленности широко применяют *грануляторы центробежного типа*, представляющие собой конус с диаметром основания 300÷350 мм и высотой 350÷475 мм. Конус закреплен на валу основанием вверх и вращается со скоростью 400÷450 об/мин. На поверхности конуса расположены отверстия диаметром 0,25÷2,5 мм, величина отверстий уменьшается к вершине конуса. Секционирующие перегородки в них служат для придания

жидкости вращательного движения. Разбрызгиваемый ими плав падает в башне по кольцевому сечению. Центральная часть сечения башни (диаметром 6÷8 м) практически не используется. Кроме того, часто забиваются отверстия конуса гранулятора.

Усовершенствованный **центробежный вибрационный гранулятор** аммиачной селитры состоит из перфорированного днища и цилиндрического корпуса. Они укреплены на полом валу, приводимом в движение электродвигателем через шкив с угловой скоростью 67 об/мин. Плав аммиачной селитры подают по штуцерам, укрепленным в неподвижной крышке. По насадке плав стекает в зазор между корпусом и обечайкой; перфорированная плита обеспечивает равномерное распределение плава по корзине. Для образования одинаковых капель плава днище колеблется пневматическим вибратором, который соединен с днищем штоками. Полюс вал, вращающийся в подшипниках, соединен с корпусом шестью радиальными перегородками, благодаря которым плав вращается с той же угловой скоростью, что и перфорированное днище.

Воздействие на плав вибраций позволяет улучшить гранулометрический состав гранулята, увеличить выход крупных гранул величиной 2÷3 мм и уменьшить количество мелочи.

В последние годы получили распространение **статические грануляторы** как без наложения, так и с наложением вибраций.

Статические (лечебные) грануляторы применяют для гранулирования карбамида и аммиачной селитры. Статические грануляторы обеспечивают любое, в том числе и равномерное, орошение сечения башни, за счет этого достигаются увеличение производительности, равные скорости истечения расплава из всех отверстий, герметичность конструкции и возможность наложения на плав внешних вибраций, что улучшает однородность величины гранул.

14. ТРАНСПОРТ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

На многих предприятиях основной химии транспортируется большое количество твердых сыпучих материалов: сырье (колчедан, фосфориты, апатитовый концентрат, известняк и др.), продукция (суперфосфат, нитрат аммония, хлорид калия, сода и т. д.) и отходы производства (огарок, галитовый отвал, фосфогипс). Вследствие непрерывной работы большинства химических предприятий используются, как правило, машины непрерывного транспорта.

По способу передачи усилия перемещаемому материалу транспортирующие устройства подразделяются:

- 1) на машины, которые передвигают материал под действием механической силы, передаваемой от привода (чаще электродвигателя);
- 2) гравитационные устройства, в которых груз перемещается под действием силы тяжести;
- 3) пневматические и гидравлические установки, соответственно транспортирующие материалы с помощью потока воздуха и воды.

По особенностям конструкции различают машины **непрерывного транспорта с гибким тяговым органом** и **без него**. Для машин первого типа характерно общее, параллельное движение груза и тягового органа на его рабочей грузонесущей ветви (ленточные, скребковые, пластинчатые конвейеры, элеваторы).

При всем разнообразии конструкции конвейеров с тяговым органом для них характерно наличие следующих частей: 1) *приводной станции*, обеспечивающей движение тягового органа; 2) *натяжной станции*, предназначенной для натяжения тягового органа; 3) *каркаса*, на котором крепятся элементы конструкции, поддерживающие тяговый орган и транспортируемый материал; 4) *загрузочного и разгрузочного устройства*; 5) *тягового органа* (лента, цепь и т. д.), движение которого обеспечивает перемещение транспортируемого материала.

Транспортирующие машины с гибким тяговым органом отличаются сложным устройством, наличием большого количества шарнирных соединений или узлов трения. В связи с этим в промышленности нашли применение устройства, лишенные недостатков. Это вибрационные и винтовые конвейеры, а также установки пневмотранспорта, не содержащие каких-либо движущихся частей в зоне транспорта материалов. В машинах без тягового органа транспортируемый материал и рабочие элементы транспортно-

устройства движутся отдельно, причем последние совершают вращательное или возвратно-поступательное движение, а груз перемещается прямолинейно (винтовые и качающиеся конвейеры, транспортные трубы).

По направлению перемещения транспортируемого материала различают:

1) машины, способные перемещать материалы по прямому горизонтальному или слегка наклонному к горизонту пути (подъем до 30°); это ленточные, пластинчатые, скребковые конвейеры;

2) машины, перемещающие грузы по криволинейному горизонтальному или наклонному пути (скребковые конвейеры); машины, транспортирующие материалы прямолинейно под большим углом к горизонту – элеваторы и винтовые конвейеры специального исполнения;

3) устройства, способные перемещать материалы только по наклонному пути с отрицательным углом наклона к горизонту – гравитационные установки, пневматические желоба, качающиеся конвейеры и транспортные трубы;

4) установки, транспортирующие материал в любом горизонтальном или вертикальном направлении (пневматические и гидравлические).

14.1. Конвейеры и элеваторы

Ленточные конвейеры – машины непрерывного транспорта, перемещающие груз на бесконечной ленте, которая является тяговым и рабочим органом.

Конвейеры данного типа получили широкое применение в различных отраслях народного хозяйства для транспортировки разнообразных материалов – от пылевидных (флотационный колчедан, апатитовый концентрат) до крупнокусковых (известняк) и штучных грузов (мешки, ящики).

Достоинства ленточных конвейеров: 1) простота конструкции; 2) высокая надежность в работе; 3) широкий диапазон производительности ($2,77 \div 560$ кг/с); 4) значительная длина (до 3500 м); 5) низкий расход электроэнергии.

В то же время они имеют ряд *недостатков*: 1) непригодны для транспортировки пылящих, горячих ($t > 90^\circ\text{C}$) и сильно налипающих материалов; 2) могут работать лишь при незначительном угле подъема (до $15 \div 18^\circ$) и прямолинейном перемещении.

Конвейерная лента – это тяговый и грузонесущий элемент. Она состоит из каркаса (прокладок), который обеспечивает ей необходимую прочность, и резиновых защитных обкладок. *Скорость движения ленты* зависит от вида транспортируемого материала и может быть равна 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3 м/с. Например, для колчеданного огарка и соды рекомендуемая скорость ленты составляет $0,5 \div 1,0$ м/с, для флотационного колчедана, фосфоритной муки, апатитового концентрата, суперфосфата и сульфата аммония $0,8 \div 1,6$; для кокса и фосфорита $1,0 \div 1,6$; для сильвинитовой руды и каменной соли $1,0 \div 2,5$ и для крупнокусковых материалов (например, известняка с величиной кусков до 200 мм) $1,25 \div 2,0$ м/с.

Технологический расчет конвейера заключается в определении ширины ленты по заданной производительности и мощности привода. Исходные данные: производительность конвейера G_p (т/ч или кг/с); вид транспортируемого материала и его насыпная масса ρ_H (т/м³ или кг/м³); расстояние транспортировки L (м); угол подъема конвейера β или разность уровней в точках загрузки и выгрузки H (м).

Производительность конвейера по массе находим по формуле:

$$G_p = S v \rho_H, \quad (14.1)$$

где S – площадь поперечного сечения материала на ленте, м² (она зависит от ширины B (м), формы ленты и угла естественного откоса материала ϑ , град (или рад); v – линейная скорость движения ленты, м/с.

Для предотвращения ссыпания материала груз на ленте располагают слоем шириной $B = 0,9 \cdot B - 0,05$ м. Необходимую ширину ленты B (м) можно рассчитать по заданной производительности:

$$B = 1,1 \left(\sqrt{\frac{G_p}{CKv\rho_H}} + 0,05 \right), \quad (14.2)$$

где G_p – производительность, кг/с; C – коэффициент, зависящий от формы ленты и угла наклона роликов (табл. 14.1); K – коэффициент, отражающий зависимость производительности конвейера с гладкой лентой от угла подъема конвейера (табл. 14.2).

При транспортировке кусковых материалов должно соблюдаться соотношение $B \geq (2,7 \div 4,0) a_{max}$, где a_{max} – максимальный размер кусков.

Мощность двигателя ленточного конвейера N определяют по формуле, кВт:

$$N = \frac{K_1 L f}{367 \eta} [3,6(2q_l + q'_p + q''_p) + G_p] \pm \frac{G_p H}{367 \eta}, \quad (14.3)$$

Таблица 14.1. Значения коэффициента C для ленточных конвейеров

Характеристика конвейера и материала	Форма ленты							
	плоская		желобчатая на трехроlikовой опоре					
Угол наклона боковых роликов $\beta, ^\circ$	–	–	20		30		36	
Угол естественного откоса $\vartheta, ^\circ$	30	40	30	40	30	40	30	40
Коэффициент C	240	325	470	550	550	625	585	655

Таблица 14.2. Значения коэффициента K для ленточных конвейеров

Угол подъема $\beta, ^\circ$	до 10	12	14	16	18	20
Коэффициент K	1,0	0,97	0,95	0,92	0,89	0,85

где K_1 – коэффициент, учитывающий сопротивление на головном и концевом барабанах (табл. 14.3); f – коэффициент сопротивления движению ленты по роlikоопорам, зависящий от условий работы конвейера ($f = 0,018 \div 0,04$); $q_{л}$ – погонная масса ленты, кг/м (приближенно ее можно определить по выражению $q_{л} = (25 \div 35)B$; q'_p , q''_p – погонная масса вращающихся частей роlikов на рабочей и обратной ветвях ленты, кг/м; находят по выражению $q_p = G_0/l_p$, где G_0 – масса вращающихся частей роlikоопор, кг; l_p – расстояние между роlikоопорами, м.

Таблица 14.3. Значения коэффициента K_1 для ленточных конвейеров

$L, м$	10	20	32	50	80	100	125	160	200	250
K_1	4,5	3,2	2,65	2,2	1,85	1,74	1,64	1,53	1,45	1,37

Пластинчатый конвейер по устройству аналогичен ленточному, только вместо гибких лент используют металлические пластины, закрепленные на роlikовых цепях. При перемещении сыпучих грузов пластины снабжают бортами. Применяют конвейеры для перемещения крупнокусковых, горячих (жженая известь) материалов на расстояние до 150 м под углом до $45 \div 60^\circ$ при скорости движения ленты $0,05 \div 1,25$ м/с. Иногда при транспортировке грузов на конвейере одновременно осуществляют сушку, обжиг материалов и т.д.

Скребокoвые конвейеры сплошного волочения – это машины для непрерывного транспорта сыпучих материалов с помощью скребков,

укрепленных на одной или двух тяговых цепях, движущихся по желобу высотой $h_{ж}$ (м) или по трубе.

Основным признаком классификации скребковых конвейеров является форма и высота скребков h_c (м): различают конвейеры со *сплошными* (высокие и низкие) и *фигурными* (контурные) скребками. У высоких скребков $h_c \sim h_{ж}$, а у низких она примерно равна высоте тяговой цепи и составляет $h_c = h_{ж}/(3 \div 6)$.

Трубчатые скребковые конвейеры со сплошными круглыми или прямоугольными скребками снабжены, как правило, одной тяговой цепью, и их выделяют в отдельную конструктивную разновидность.

Скребковые конвейеры находят широкое применение в основной химической промышленности для транспортировки разнообразных пылевидных, зернистых и мелкокусковых материалов: колчедана, колчеданного огарка и пыли, суперфосфата, аммофоса, хлорида калия, извести и других продуктов. Весьма часто их применяют для перемещения и охлаждения грузов с повышенной температурой.

Достоинства конвейеров такого типа: 1) простота конструкции; 2) возможность загрузки и выгрузки в любой точке (кроме вертикальных участков); 3) герметичность конвейера; 4) значительный угол подъема (до 90°); 5) возможность одновременно с перемещением груза выполнять технологические операции (охлаждение, нагрев, промывка и др.).

Недостатки: 1) повышенный расход энергии; 2) повышенный износ цепи, скребков и желоба, особенно при транспортировке абразивных грузов; 3) измельчение хрупких материалов; 4) малая длина перемещения (до $60 \div 100$ м).

Основными параметрами скребковых конвейеров являются размеры скребков ($B_c \times h_c$), скорость движения цепи ($0,16 \div 0,4$ м/с), длина транспортирования L и производительность G_p , которая обычно достигает $50 \div 350$ т/ч, в отдельных случаях до 700 т/ч.

Объемную производительность скребкового конвейера W_k рассчитывают по уравнению, $м^3/с$:

$$W_p = Sv\varphi C_2, \quad (14.4)$$

где S – площадь поперечного сечения желоба (трубы), $м^2$, v – скорость движения скребков, м/с; φ – коэффициент заполнения желоба материалом, который для высоких скребков равен $0,5 \div 0,6$ (при хорошо сыпучих грузах) и $0,7 \div 0,8$ (при плохо сыпучих и кусковых грузах), а для конвейеров с низкими скребками $0,8 \div 0,85$; C_2 – коэффициент, учитывающий изменение производительности с увеличением угла подъема конвейера (табл. 14.4).

Таблица 14.4. Средние значения коэффициента C_2
для скребковых конвейеров

Транспортируемый материал	Угол подъема конвейера $b, ^\circ$					
	0	10	20	30	35	40
Легкосыпучий	1	0,85	0,65	0,5	–	–
Плохосыпучий, кусковой	1	1	1	0,75	0,6	0,5

Площадь для прямоугольного желоба, m^2 :

$$S = B_{ж} h_{ж} = K h_{ж}^2, \quad (14.5)$$

где $B_{ж}$ – ширина желоба, м; $h_{ж}$ – высота желоба, м; K – отношение ширины к высоте ($K = B_{ж}/h_{ж}$), для конвейеров с высокими скребками принимается в пределах $2,4 \div 4$.

Для горизонтальных конвейеров с низкими скребками высота транспортируемого материала $h = (0,3 \div 0,6) B_c$, где B_c – ширина скребка (м), а для наклонных высота слоя материала равна высоте скребка h_c .

Производительность по массе G_p вычисляются по выражению, кг/с:

$$G_p = W_n \gamma_n, \quad (14.6)$$

где φ_n – насыпная масса груза, kg/m^3 .

Мощность привода $N_{дв}$ можно рассчитать по формуле, кВт:

$$N_{дв} = \frac{F_T v}{102 \eta} \beta, \quad (14.7)$$

где F_T – тяговое усилие, Н; v – скорость движения, м/с.

Элеваторы – машины, предназначенные для транспортирования сыпучих грузов по вертикальному или крутонаклонному (более 60° к горизонту) направлениям. Ковшовые элеваторы используют для транспорта разнообразных сыпучих материалов: колчедана, огарка, солей, апатитового концентрата, различных удобрений. Наклонные элеваторы, снабженные дырчатыми ковшами, служат для отделения твердой силвинитовой руды от раствора и перегрузки ее из одного растворителя в другой. Широкое применение в промышленности получили более простые по конструкции вертикальные элеваторы, наклонные используются реже.

Ковшовой элеватор состоит из вертикальнозамкнутого тягового органа ленты (или цепи) с закрепленными на нем ковшами. Лента огибает нижний натяжкой барабан (или звездочку) и верхний приводной барабан. Тяговый и грузонесущий элементы размещены в закрытом металлическом кожухе, который состоит из нижней части (башмака), средних секций и верхней части (головки). Внутри кожуха

установлено направляющее устройство. Сыпучий материал подается через загрузочный патрубок (носок) в ковши, поднимается и разгружается на верхнем барабане (звездочке) в верхний разгрузочный патрубок. Звездочки обеспечивают отклонение цепи при самотечной разгрузке. Привод элеватора осуществляют от электродвигателя через редуктор. Привод снабжен остановом – устройством, препятствующим обратному движению ленты (цепи) при выключении двигателя.

Достоинства ковшовых элеваторов: 1) малые габаритные размеры в плане; 2) широкий диапазон производительности ($5 \div 600 \text{ м}^3/\text{ч}$); 3) значительная высота подъема (до 60 м).

Недостатки: 1) возможность остановки при перегрузке; 2) необходимость равномерной подачи груза.

Элеваторы ковшовые вертикальные выпускают двух типов: *ленточные* (Л) и *цепные* (Ц) с ковшами четырех видов (глубокие – Г, мелкие – М, остроугольные – О и скругленные – С), ширина которых изменяется в пределах 100÷1000 мм. Скорость движения ковшей может изменяться от 0,4 до 2,5 м/с. В качестве тягового органа используются прорезиненная лента и одна или две цепи.

Выбор типа элеватора, типа ковшей, вида и скорости тягового органа, способа загрузки и разгрузки определяется свойствами транспортируемого материала. Так, для пылевидных сухих грузов (фосфоритная мука, сода, угольная пыль) рационально использовать быстроходные ленточные элеваторы ($v = 1,25 \div 1,8 \text{ м/с}$) с глубокими расставленными ковшами; загрузка – зачерпыванием, разгрузка – центробежная. Для плохосыпучих, влажных, зернистых и пылевидных материалов (песок, соли, порошкообразный мел) применяют быстроходные ленточные и цепные элеваторы ($v = 0,8 \div 2,0 \text{ м/с}$) с мелкими расставленными ковшами. Для абразивных материалов (колчедан, огарок, кварцит, апатитовый концентрат) рекомендуются тихоходные ленточные и цепные элеваторы ($v = 0,4 \div 0,8 \text{ м/с}$) с сомкнутыми остроугольными ковшами, загрузка – засыпанием, разгрузка – самотечная направленная.

Для расчета ковшовых элеваторов необходимо определить емкость ковша $V_k \text{ (м}^3\text{)}$ и мощность привода. Емкость ковша находим по формуле:

$$V_k = \frac{G_p h_k}{3,6 v \rho_n \varphi}, \quad (14.8)$$

где G_p – производительность элеватора, т/ч; h_k – шаг ковшей, м; v – скорость движения ковшей, м/с; φ – коэффициент заполнения ковшей, зависящий от свойств груза: порошкообразные сухие 0,8÷0,85;

порошкообразные и зернистые плохосыпучие 0,6; мелкокусковые (20÷50 мм) 0,6÷0,8; средние и крупнокусковые (50÷150 мм) 0,5÷0,6.

Мощность электродвигателя $N_{дв}$ можно рассчитать по приближенной формуле, кВт:

$$N_{дв} = \frac{G_p H}{367 \eta} \left(1,15 + \frac{K}{\rho_n} \right) \beta, \quad (14.9)$$

где H – высота подъема, м; K – коэффициент, зависящий от производительности элеватора (табл. 14.5).

Таблица 14.5. Значения коэффициента K для ковшовых элеваторов

Тип элеватора	Производительность W_k , м ³ /ч			
	до 20	20÷40	40÷80	80÷150
Ленточный	1500	1150	950	750
Цепной	1050	750	650	550

Винтовые конвейеры (шнеки) – машины, предназначенные для прямолинейного перемещения сыпучих грузов с помощью винта.

В корытообразном желобе с цилиндрическим днищем размещается вал с винтом. Транспортируемый материал загружается через патрубок и выгружается через окно с затвором. Загрузка и выгрузка могут осуществляться в любой точке по длине конвейера.

В зависимости от свойств груза и назначения шнека применяют винты различных типов. Так, для хорошо сыпучих порошкообразных, зернистых и мелкокусковых материалов используют сплошные винты, при транспортировке влажных налипающих материалов, а также при необходимости перемешивания транспортируемой массы – ленточные, лопастные или фигурные винты. Кроме того, ленточные винты часто применяют в растворителях и кристаллизаторах, а лопастные – в смесителях и сушилках.

Достоинства винтовых конвейеров: 1) герметичность; 2) возможность проведения технологических операций (растворение, кристаллизация, сушка, охлаждение и др.) одновременно с транспортированием; 3) большой угол подъема – до 90°; 4) простота конструкции и надежность; 5) возможность загрузки и разгрузки в любой точке.

К недостаткам винтовых конвейеров относятся: 1) повышенный расход энергии; 2) малая длина транспортирования (до 40 м); 3) повышенный износ винта и желоба; 4) истирание и дробление транспортируемого материала; 5) чувствительность к перегрузкам.

Винтовые конвейеры широко применяются в основной химической промышленности для транспортирования разнообразных пылевидных, зернистых и мелкокусковых материалов (апатитовый концентрат, фосфоритная мука, мел, сода и многие соли). Двухвальные лопастные шнеки используются для смешения твердых веществ (например, суперфосфата с нейтрализующими добавками), а также в качестве реакторов при высоком содержании твердой фазы в продукте. Винтовые конвейеры с рубашкой находят применение для охлаждения солей после сушки и прокатки.

Производительность винтовых конвейеров рассчитывают по следующей формуле:

$$G_p = Shn\varphi C_2 \rho_n, \quad (14.10)$$

где S – площадь поперечного сечения винта, m^2 (для сплошного винта $S = 0,785D_{\text{шн}}^2$, где $D_{\text{шн}}$ – диаметр шнека, м; h – шаг винта, м; n – частота вращения вала, s^{-1} ; φ – коэффициент заполнения конвейера; C_2 – коэффициент, учитывающий снижение производительности с увеличением угла наклона.

Шаг винта зависит от свойств транспортируемого материала и принимается в пределах $(0,8 \div 1,3)D_{\text{шн}}$. Чаще всего для хорошо сыпучих грузов $S = D_{\text{шн}}$, для плохосыпучих и влажных $S = 0,8D_{\text{шн}}$.

Производительность наклонных винтовых конвейеров зависит от угла подъема и коэффициента C_2 (табл. 14.6).

Таблица 14.6. Значения коэффициентов C_2 для винтовых конвейеров

Угол подъема $b, ^\circ$	0	5	10	15	20
Коэффициент C_2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

Винтовые конвейеры для вертикального транспортирования имеют специальную конструкцию: винт вращается в трубчатом желобе с большей скоростью, чем в горизонтальных шнеках. Скорость вращения винта n зависит от свойств транспортируемого материала и диаметра винта, s^{-1} :

$$n = A / \sqrt{D_{\text{шн}}}. \quad (14.11)$$

Рекомендуемые значения коэффициентов A и φ приведены в табл. 14.7.

Мощность привода винтового конвейера $N_{\text{дв}}$, (Вт) можно рассчитать по приближенной формуле:

$$N_{\text{дв}} = \frac{9,8G_p}{\eta} (L_{\text{г}}f + H)\beta, \quad (14.12)$$

где L_{Γ} – горизонтальная проекция пути перемещаемого материала, м;
 f – коэффициент сопротивления (табл. 14.7); H – высота подъема груза, м.

Таблица 14.7. Значения коэффициентов φ , A , f
 для винтовых конвейеров

Грузы	Коэффициенты		
	φ	A	f
Легкие и неабразивные (древесная мука и опилки)	0,4	1,08	1,2
Легкие и малоабразивные (мел, асбест, сода, угольная пыль, порошкообразная известь)	0,32	0,83	1,6
Тяжелые малоабразивные (соль, мелкий уголь, гипс, кусковая известь, суперфосфат)	0,25	0,75	2,5
Тяжелые и абразивные (колчедан, огарок, апатитовый концентрат, фосфоритная мука)	0,125	0,50	4,0

14.2. Установки пневмотранспорта

Системы пневмотранспорта используют для перемещения различных пылевидных и мелкозернистых материалов: апатитового концентрата, фосфоритной муки, молотых мела и известняка, флотационного колчедана, огарка, соды и многих солей. В установках пневмотранспорта пылевидный или зернистый материал перемещается по трубам струей воздуха.

К *достоинствам* таких установок относятся: 1) полная герметичность; 2) надежность в работе; 3) пригодность для транспортировки пылевидных, гигроскопичных и пожароопасных материалов; 4) незначительные потери транспортируемого материала; 5) простота устройства и компактность; 6) высокая скорость транспортирования; 7) возможность выполнения технологических операций (нагрев, сушка, охлаждение) одновременно с перемещением; 8) значительная длина транспортирования (до 1800 м).

Недостатки систем пневмотранспорта: 1) непригодны для транспортирования влажных, налипающих, высокоабразивных и кусковых материалов; 2) наблюдается значительный износ труб при перемещении абразивных грузов; 3) повышенный расход электроэнергии.

Пневматические установки делятся:

1) на *всасывающие*, или установки пневмотранспорта в разреженной фазе; в них груз перемещается по трубе при давлении воздуха меньше атмосферного (до 0,01 МПа);

2) *нагнетательные*, или установки пневмотранспорта в плотной фазе; транспортируемый материал перемещается сжатым воздухом с давлением до 0,8 МПа;

3) *смешанные*, или всасывающе-нагнетательные, в которых часть трубопровода работает под разрежением, а часть под давлением;

4) *гравитационный транспорт*, где материал перемещается под уклон под действием силы тяжести, а воздух подают только для псевдооживления слоя в целях уменьшения сил трения.

Любая установка пневмотранспорта состоит: из *загрузочного устройства, трубопровода, разгрузочного устройства, аппаратов для очистки транспортирующего воздуха, воздуходувной машины* – вакуум-насоса, воздуходувки или компрессора.

В установке всасывающего типа транспортируемый материал через загрузочное сопло вместе с воздухом засасывается в трубопровод. Основное количество материала отделяется в разгрузителе и через шлюзовой затвор выгружается из системы. Циклон и рукавный фильтр служат для очистки транспортирующего воздуха от пыли, а вакуум-насос засасывает воздух из атмосферы через сопло и выбрасывает его в атмосферу. Такие установки удобно использовать для разгрузки вагонов и сбора материала из 2÷4 точек в одно место. Расстояние транспортирования обычно составляет 15÷20 м, реже 40÷60 м.

Недостатки установок всасывающего типа: 1) высокий расход энергии на транспорт вследствие низкой концентрации материала в воздухе (не более 10 кг/кг) и высокой скорости воздуха (20÷30 м/с); 2) попадание пыли в воздуходувную машину.

Установки нагнетательного типа более экономичны, чем всасывающие. Благодаря большей плотности воздуха в них допускается концентрация твердого материала до 100 кг/кг и выше. Транспортируемый материал из бункера через питатель подают в трубопровод, в который поступает воздух из компрессора (возхоудувки). После отделения материала в разгрузителе и очистке от пыли в фильтре воздух выбрасывают в атмосферу. В данном случае компрессор работает на чистом незапыленном воздухе. Перепад давления между концами транспортирующей сети может составлять 0,5÷1,3 МПа, а расстояние перемещения груза достигает 1800 м. Нагнетательные установки могут подавать материал из одной точки

(склада) в несколько адресов, например транспортировать апатитовый концентрат в несколько цехов.

Экономичность и надежность работы устройств пневмотранспорта зависит от концентрации транспортируемого материала в воздухе и скорости воздуха в трубопроводе. Допустимая концентрация материала χ (кг/кг воздуха) зависит от плотности и размера частиц, а также от системы пневмотранспорта (табл. 14.8). Необходимая скорость транспортирующего воздуха принимается на основании практических данных.

Таблица 14.8. Концентрация пыли и скорость воздуха для пневмотранспорта различных материалов

Транспортируемый материал	Истинная плотность, кг/м ³	Наибольшая величина частиц, мкм	Скорость воздуха, v , м/с	Концентрация пыли, χ , кг/кг
Апатитовый концентрат	3100	250	20÷30	20÷30
Кальцинированная сода	2500	400	18÷24	15÷30
Колчеданный огарок	до 5000	500	15÷18	11÷25
Песок	2600	1000	20	5
Угольная пыль	до 2100	250	8÷15	120
Флотационный колчедан	4600÷5200	1000	20÷25	1
Фосфоритная мука	3000	250	14÷25	30÷50

Техническая производительность установки пневмотранспорта G_T вычисляется по формуле, кг/с:

$$G_T = G_p K_1 K_2, \quad (14.13)$$

где G_p – заданная средняя производительность по транспортируемому материалу, кг/с; K_1 – коэффициент запаса производительности, принимается в пределах 1,10÷1,25 в зависимости от производительности установки; K_2 – коэффициент, учитывающий неравномерность подачи (для установок непрерывного действия с винтовыми или шлюзовыми питателями принимается равным 1, для однокамерных насосов и подъемников 1,35÷2,0, для двухкамерных насосов и подъемников 1,05÷1,10).

Расход воздуха w_B в транспортном трубопроводе при стандартных условиях ($P = 0,098$ МПа, $\rho = 1,2$ кг/м³), м³/с:

$$w_B = \frac{G_T}{\chi \rho_B}, \quad (14.14)$$

Внутренний диаметр трубопровода $d_{вн}$ определяют по формуле, м:

$$d_{вн} = \sqrt{\frac{4w_B}{\pi v}}. \quad (14.15)$$

По расходу воздуха и разности давления в системе подбирают воздуходувную машину.

15. ТРУБЫ И ТРУБОПРОВОДНАЯ АРАМАТУРА

Трубопроводы имеют важное значение для химических предприятий, так как по ним осуществляется транспортировка жидкостей, газов, водяного пара, воды, конденсата и т. д. Стоимость трубопроводов и арматуры составляет в среднем 15% затрат на оборудование химического предприятия, в отдельных случаях она достигает 40% стоимости оборудования.

По назначению трубопроводы подразделяются на *материальные*, предназначенные для транспорта исходных, промежуточных и конечных веществ химического производства, на *паропроводы*, *конденсаторопроводы*, *водопроводы*, *трубопроводы сжатого воздуха*, *вакуумные системы* и *производственную канализацию*.

Основными частями трубопроводных систем являются *трубы*, *соединительные детали трубопроводов* (фланцы, муфты), *фасонные части* (отводы, тройники, переходы и др.) и *арматура* (краны, вентили, задвижки, клапаны и т.д.).

15.1. Трубы и фасонные части трубопроводов

Материал труб выбирают, учитывая коррозионную активность среды, ее давление и температуру.

Стальные трубы. Их делают *сварными* и *бесшовными*. *Сварные трубы* (водогазопроводные (газовые) и электросварные) имеют продольный или спиральный сварной шов, поэтому они менее надежны в работе. Водогазопроводные трубы применяют для воды, сжатого воздуха, газа, пара низкого давления и других нейтральных и невзрывоопасных сред. *Бесшовные трубы* не имеют сварного шва, поэтому более надежны. Их применяют для самых различных целей в весьма широком интервале температур и давлений. Эти трубы широко используют для изготовления частей аппаратуры: штуцеров, трубных пучков теплообменников и др.

Чугунные трубы. Чугунные канализационные трубы не рассчитаны для работы под давлением, они предназначены для передачи жидкости самотеком. Чугунные трубы применяют главным образом для укладки в землю.

Медные и латунные трубы. Их выпускают диаметром до 360 мм. Медные применяют в технике глубокого холода, в промышленности органического синтеза и пищевой промышленности.

Алюминиевые трубы. Их широко применяют для транспортировки азотной, уксусной кислоты и некоторых других агрессивных продуктов.

Неметаллические трубы. Во многих случаях при транспортировке агрессивных веществ их с успехом применяют вместо труб из цветных металлов и кислотостойких сталей. Керамиковые канализационные (безнапорные) трубы изготовляют внутренним диаметром от 125 до 600 мм. Их применяют для уличных сетей канализации, а также для внутрицеховой канализации, предназначенной для удаления агрессивных жидкостей.

Стекланные трубы. Их широко применяют в пищевой и фармацевтической промышленности, в настоящее время – в отдельных отраслях химической промышленности. Их устанавливают там, где требуется особая чистота продуктов и оптический контроль за перемещаемыми веществами.

Фарфоровые трубы. В химической промышленности их применяют мало и используют лишь в тех случаях, когда требуется особая чистота продуктов.

Из пластмассовых труб наиболее распространены трубы из *винилпласта, фаолита, полиэтилена.*

Винилпластовые трубы. Их изготовляют с внутренним диаметром до 150 мм. Температурные пределы их применения до 40 °С. Винилпластовый трубопровод применяют для транспортирования различных кислот и щелочей, за исключением окислителей и концентрированной серной кислоты, вакуумных линий и воздушников в условиях агрессивной среды.

Трубы из полиэтилена. По своим свойствам и применению они близки к винилпластовым. Полиэтилен по сравнению с винилпластом обладает более высокой ударной прочностью.

Трубы из фаолита. Они рассчитаны на максимальное давление до 1 МПа и рабочую температуру до 100÷110 °С. Эти трубы применяют для транспортирования продуктов как внутри цеха, так и для межцеховых коммуникаций.

Гуммированные трубы. Они хорошо освоены. Их применяют при температурах до 60÷65 °С.

Наряду с гуммировкой трубы защищают пленками из пластмасс и антикоррозионной краской. Находят применение трубы, плакированные изнутри свинцом или медью. В настоящее время осваиваются трубы, эмалированные изнутри.

Длина труб, число поворотов, патрубков, вентиляей или задвижек зависит от размещения соединяемых аппаратов. Внутренний диаметр трубы, D_v находят по формуле, м:

$$D_v = \sqrt{\frac{4w}{\pi v}}, \quad (15.1)$$

где v – линейная скорость жидкости (газа) в трубопроводе, м/с, w – расход жидкости (газа), м³/с.

Увеличение линейной скорости позволяет уменьшить диаметр трубопровода и снизить расход металла, но одновременно с этим возрастают гидравлическое сопротивление и расход энергии на транспортировку. На основании практических данных рекомендуются следующие линейные скорости. Для газовых систем, работающих при давлении, которое близко к атмосферному и создается вентиляторами или дымососами, скорость газа должна составлять 12÷15 м/с; в нагнетательных трубопроводах после газодувок и компрессоров 15÷25; в вакуумных линиях 40÷90; при движении жидкости самотеком 0,1÷0,5; во всасывающих трубопроводах 0,8÷2 и в нагнетательных 1,5÷10, м/с.

По расчетному диаметру подбирают ближайший стандартный диаметр большей величины. Для бесшовных труб базовым является наружный диаметр, а внутренний зависит от толщины стенки.

Толщину стенок труб принимают по рекомендациям ГОСТов на сортамент труб, в которых указывается предельное допустимое давление, либо по уравнению:

$$\delta = \frac{PD_{\text{внеш}}}{2,3[\sigma]\varphi + P} + c. \quad (15.2)$$

Для бесшовных труб $\varphi = 1$, для сварных $\varphi = 0,8$.

Максимальное расстояние между опорами:

$$L = \sqrt{\frac{12[\sigma_{\text{изг}}]J}{q}}, \quad (15.3)$$

где q – удельная нагрузка (вес трубы, жидкости, теплоизоляции), Н/м. Для стальных труб $[\sigma_{\text{изг}}] < 50$ МПа. J – момент сопротивления трубы:

$$J = \frac{\pi D_{\text{ср}}(\delta - c)^3}{8}. \quad (15.4)$$

Фасонные части трубопроводов (отводы, колена, двойники или калачи, тройники, крестовины и переходы) предназначены для изменения направления или диаметра труб, а также для разветвления трубопровода. Фасонные части для трубопроводов подбирают по каталогам с учетом диаметра, давления и температуры.

15.2. Компенсаторы

Практически все трубопроводы снабжаются компенсаторами, которые предназначены возмещать изменение длины труб при их нагревании или охлаждении без нарушения герметичности трубопровода.

По принципу работы компенсаторы делятся на *гибкие* и *скользящие* (сальникового типа). Однако вследствие более сложной конструкции и меньшей герметичности сальниковые компенсаторы применяются реже, чем гибкие.

Гибкие компенсаторы по конструктивным особенностям подразделяются на *радиальные* (Π-образные, S-образные и т.д.) и *осевого типа* (линзовые и волнистые).

15.3. Опоры трубопроводов

Для крепления трубопроводов используют *неподвижные* (мертвые) и *подвижные* (скользящие, катковые, направляющие, подвесные, пружинные и др.) опоры.

Неподвижные опоры служат для жесткого крепления трубопровода, чтобы исключить возможность его перемещения и вращения. Они воспринимают вертикальную нагрузку от массы трубопровода и транспортируемой среды, а также горизонтальную – от температурного расширения труб, гидравлических ударов и вибраций.

Подвижные опоры воспринимают вертикальную нагрузку от массы трубопровода и не препятствуют осевому перемещению его под действием температурных деформаций.

При прокладке трубопроводов в цехах и на эстакадах нередко используют **подвесные опоры** и **направляющие хомуты**.

15.4. Арматура

Арматура – устройство, предназначенное для управления и контроля транспортируемой среды. Она подразделяется на *запорную* (краны, вентили, задвижки), *регулирующую* (вентили, клапаны, регуляторы уровня и конденсатоотводчики), *предохранительную* (предохранительные и обратные клапаны) и *контрольную* (пробно-спускные краны и указатели уровня).

По устройству привода все классы арматуры делятся на несколько видов: *с ручным, механическим, электрическим, пневматическими* и другими типами привода.

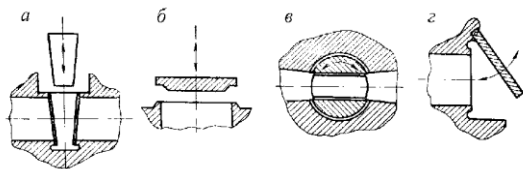


Рис. 15.1. Схемы уплотняющих устройств запорной арматуры: *а* – в задвижке; *б* – в вентиле; *в* – в пробковом кране; *г* – в поворотном клапане

Поворотом конической или шаровой пробки со сквозным отверстием (рис. 15.1, *в*). Пробка расположена внутри корпуса.

Вентили – запорная и регулирующая арматура (рис. 15.1, *б*), в которой открытие и закрытие прохода для среды осуществляется перемещением золотника, насаженного на шпindel. Шпindel снабжен резьбой, которой он ввернут в неподвижную резьбовую втулку, закрепленную в скобе; при вращении шпинделя он поднимается или опускается вместе с золотником.

Задвижки – запорная и регулирующая арматура, в которой проход для среды открывается при подъеме шиберов или диска (рис. 15.5, *а*).

Клапаны – арматура с запорным или регулирующим органом, перемещающимся возвратно-поступательно вдоль оси уплотнительной поверхности корпуса или поворачивающимся вокруг оси, перпендикулярной оси потока среды (рис. 15.5, *з*).

По назначению их подразделяют на *регулирующие*, *обратные* и *предохранительные*.

Регулирующие клапаны предназначены для регулирования расхода, давления или уровня газов или жидкостей. **Обратные клапаны** – устройства, перекрывающие проход при обратном движении среды. **Предохранительные клапаны** – это устройства, автоматически открывающиеся при увеличении давления среды выше заданного. Их используют для защиты трубопроводов и аппаратуры от разрушения в результате повышения давления сверх допустимого.

По способу соединения с трубопроводом или аппаратом различают *фланцевую*, *приварную*, *муфтовую* и *цапковую* арматуру.

Краны – запорная арматура, открывание и закрытие которой осуществляется поворотом

16. ОБОРУДОВАНИЕ СКЛАДОВ

16.1. Склады для хранения твердых материалов

Основное назначение склада сырых материалов – обеспечить необходимый для бесперебойной работы предприятия запас сырья. Склады могут быть открытого, полужакрытого и закрытого типов, в том числе утепленные. В них хранится до отправки потребителям также и готовая продукция.

Склады открытого типа представляют собой специально оборудованную под открытым небом площадку.

Полужакрытые склады имеют навес, предохраняющий материалы от прямого воздействия атмосферных осадков. На указанных складах могут храниться продукты в герметичной таре и насыпные материалы, качество которых под действием атмосферных осадков мало ухудшается (уголь, известняк).

Сыпучие материалы, пылящие и гигроскопичные следует хранить в **закрытых складах**. Склад должен быть организован с учетом удобства разгрузки и погрузки вагонов. Подача сырья на технологический поток и готовой продукции в вагоны должна быть механизирована.

Наиболее рациональными для сыпучих материалов являются **заглубленные склады**, в которых железнодорожный путь проходит по середине помещения. Они имеют большую вместимость, чем незаглубленные.

Обычно на завод поступает сырье натуральной крупности и влажности, т. е. в том виде, в каком его получают из забоя или карьера. Склад в этом случае служит не только местом приема и хранения сырья, но обеспечивает также его предварительное дробление. Такой склад представляет обычно длинное однопролетное здание, внутри которого проложен приемный железнодорожный путь. Склад оборудован мостовыми кранами с грейферными ковшами, которые в основном применяют для штабелирования материала и подачи его в производство и лишь частично – для разгрузки вагонов (открытых платформ).

В последнее время для хранения порошкообразных, мелко- и среднекусковых материалов используют бункерные и силосные склады.

Бункерные склады представляют собой ряд металлических или железобетонных емкостей, расположенных на определенной высоте. Вместимость отдельных бункеров превышает 100 т, а общая вместимость склада доходит до 1000 т и более.

Силосные склады представляют собой стальные или железобетонные башни значительных размеров с коническим днищем (например, вместимость башни для хранения соды достигает 5000 т). Для предотвращения слеживания материала в башни подают периодически сжатый воздух либо производят пересыпку материала из одной башни в другую.

Бункерные и силосные склады занимают малую площадь, легко поддаются механизации и автоматизации.

Помимо указанного выше оборудования, склады оснащают устройствами для дозирования, измельчения, смешения и подачи сырья, вспомогательных материалов и реагентов.

16.2. Склады для хранения жидких продуктов

Условия хранения и организация складов жидких продуктов определяются физико-химическими и биологическими свойствами продуктов.

По пожаро- и взрывобезопасности условно различают четыре группы жидкостей:

I – *горючие и легковоспламеняющиеся* (углеводороды, расплавленный фосфор и т. д.);

II – *негорючие* (жидкие удобрения, рассолы, кислоты и др.);

III – *сжиженные газы взрывоопасные* (аммиак и т. д.);

IV – *сжиженные газы невзрывоопасные* (хлор, диоксид серы и т. д.).

Продукты каждой группы хранят на отдельных складах. Оборудование складов должно отвечать требованиям, изложенным в нормативных документах.

На складах осуществляют *основные* и *вспомогательные операции*. К основным относят (условно): прием продуктов с железной дороги или с производства; хранение; отгрузку в цистернах или перекачку продуктов потребителям; замер и учет продуктов; оформление товарно-транспортной документации. Вспомогательными операциями являются: нагрев или охлаждение продукта; корректировка концентрации; улавливание и утилизация продуктов газовой фазы.

Резервуарный парк складов располагают на *поддоне*, изготовленном из коррозионно-стойких материалов. Свободный объем поддона принимают равным одной трети вместимости склада, но не менее вместимости наибольшего резервуара.

Резервуары являются основным оборудованием складов.

По форме их изготавливают *цилиндрическими* (вертикальными и горизонтальными) и *шаровыми*.

По способу установки резервуары могут быть наземными, полуподземными и подземными. В неорганической технологии используют в основном металлические наземные резервуары.

Вертикальные цилиндрические резервуары применяют в основном для хранения больших объемов жидкости. Их изготавливают вместимостью от 50 до 10000 м³ и более.

Горизонтальные цилиндрические резервуары изготавливают обычно в заводских условиях (в соответствии с нормами на емкостную аппаратуру) и транспортируют на место монтажа. Они имеют вместимость до 200 м³.

Шаровые резервуары используют для хранения легколетучих жидкостей, сжиженных углеводородных газов и жидкого аммиака. Их изготавливают вместимостью от 600 до 4000 м³. Резервуары объемом 600 и 900 м³ рассчитаны на давление 1,76 МПа (18 ат).

16.3. Оборудование для хранения газов

Для хранения газов используют **газгольдеры**. Они могут быть *низкого давления*, избыточное давление газа в которых не превышает атмосферного, и *высокого давления* с избыточным давлением выше атмосферного. Первые делятся на *сухие* и *мокрые*.

Газгольдеры мокрого типа представляют собой металлический колокол, погруженный своей открытой частью в бассейн с водой. Под колокол проведены трубы для подачи и расходования газа. В начальный момент колокол целиком погружен в воду, а при нагнетании газа выдвигается из воды и свободно плавает в бассейне, скользя на направляющих. Газгольдеры устанавливают как в специальных зданиях, так и на открытой площадке.

Газгольдеры сухого типа представляют собой вертикальный стальной резервуар, изготовленный в виде цилиндра или призмы и снабженный крышей. Внутри резервуара расположена свободно передвигающаяся по вертикали шайба. Она плотно прижата к стенке корпуса, которая смазывается смазкой с помощью сальниковых уплотнителей.

Эти газгольдеры взрывоопасны в эксплуатации, так как при проникновении газа в пространство перед шайбой возможно образование взрывчатой смеси. В них нельзя хранить загрязненные газы. Трущиеся поверхности требуют тщательной обработки. Объем газгольдеров может достигать 0,5 млн м³. Это оборудование не требует нагрева. Используется для хранения водорода и углеводородов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Плотность и коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Асбест	600	0,151
Бетон	2300	1,28
Винипласт	1380	0,163
Войлок шерстяной	300	0,047
Кладка из обыкновенного кирпича	1700	0,698÷0,814
Кладка из огнеупорного кирпича	1840	1,05
Кладка из изоляционного кирпича	600	0,116÷0,209
Литье каменное	3000	0,698
Опилки древесные	230	0,070÷0,093
Пенопласт	30	0,047
Совелит	450	0,098
Стекло	2500	0,698÷0,814
Стеклянная вата	200	0,035÷0,070
Текстолит	1380	0,244
Фаолит	1730	0,419
Шлаковая вата	250	0,076
Алюминий	2700	203,5
Бронза	8000	64,0
Латунь	8500	93,0
Сталь	7850	46,5
Сталь нержавеющая	7900	17,5
Чугун	7500	46,5÷93,0

Прокат листовой. Сортамент (ГОСТ 19903–74), мм:

3,0; 3,2; 3,5; 3,8; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9; 9,5; 10; 10,5; 11; 11,5; 12; 12,5; 13; 13,5; 14; 14,5; 15; 15,5; 16; 16,5; 17; 17,5; 18; 18,5; 19; 19,5; 20; 20,5; 21; 21,5; 22; 22,5; 23; 23,5; 24; 24,5; 25; 25,5; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 34; 36; 38; 40; 42; 45; 48; 50; 52; 55; 58; 60; 62; 65; 68; 70; 72; 75; 78; 80; 82; 85; 87; 90; 92; 95; 100; 105; 110; 115; 120; 125; 130

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гельперин, Н.И.* Основные процессы и аппараты химической технологии / *Н.И. Гельперин.* – М.: Химия, 1981. – 610 с.
2. *Генкин, А.Э.* Оборудование химических заводов / *А.Э. Генкин.* – М.: Высш. шк., 1978. – 272 с.
3. *Дытнерский, Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. В 2 ч. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / *Ю.И. Дытнерский.* – М.: Химия, 1995. – 400 с.
4. *Дытнерский, Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. В 2 ч. Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты / *Ю.И. Дытнерский.* – М.: Химия, 1995. – 368 с.
5. *Лащинский, А.А.* Конструирование сварных химических аппаратов: каталог / *А.А. Лащинский.* – М.: Машиностроение, 1981. – 428 с.
6. Основы проектирования химических производств: учебник для вузов / *под ред. А. И. Михайличенко.* – М.: ИКЦ "Академкнига", 2010. – 371 с.
7. Основы проектирования химических производств и оборудования: учебник / *под ред. А. И. Михайличенко.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 397 с.
8. *Павлов, К.Ф.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / *К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков.* – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
9. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи / *под ред. М.Ф. Михалева.* – Л.: Машиностроение, 1984. – 301 с.
10. *Хисматулин, Е.Р.* Сосуды и трубопроводы высокого давления: справочник / *Е.Р. Хисматулин, Е.М. Королев, В.И. Лифшиц.* – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
11. *Тетеревков, А.И.* Оборудование заводов неорганических веществ и основы проектирования / *А.И. Тетеревков, В.В. Печковский.* – Минск.: Выща шк., 1981. – 335 с.
12. *Тетеревков, А.И.* Оборудование заводов неорганических веществ / *А.И. Тетеревков, В.В. Печковский, Л.В. Новосельская.* – Минск.: Выща шк., 1984. – 196 с.
13. *Ульянин, Е.А.* Коррозионностойкие стали и сплавы: справочник / *Е.А. Ульянин.* – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
14. *Хуснутдинов, В.А.* Оборудование производств неорганических веществ / *В.А. Хуснутдинов, Р.С. Сайфуллин, И.Г. Хабибуллин.* – Л.: Химия, 1987. – 248 с.

Учебное издание

ПРОКОФЬЕВ Валерий Юрьевич

**ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ**
Учебное пособие

Редактор О.А. Соловьева

Подписано в печать 16.02.2015. Формат 60×84 1/16. Бумага писчая.
Усл.печ.л. 6,74. Тираж 100 экз. Заказ _____

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
кафедры экономики и финансов ФГБОУ ВПО «ИГХТУ»
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 7