

Федеральный комплект учебников



Профессиональное
образование

Нефтегазовая
промышленность

А. В. Сугак
В. К. Леонтьев
В. В. Туркин

Процессы и аппараты химической технологии

Учебное пособие

ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

А. В. СУГАК, В. К. ЛЕОНТЬЕВ, В. В. ТУРКИН

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

*Допущено
Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебного пособия для образовательных учреждений
начального профессионального образования*

УДК 66(075.32)
ББК 35я722
С89

Рецензенты:

преподаватель Ярославского химико-механического техникума *Ж. В. Гончарова*;
зав. лабораторией «Внедрение научно-методических разработок» ИРПО,
канд. пед. наук *Н. Я. Драчёва*

Сугак А. В.

С89 Процессы и аппараты химической технологии: Учеб. пособие для нач. проф. образования / А. В. Сугак, В. К. Леонтьев, В. В. Туркин. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 224 с.

ISBN 5-7695-2033-7

Рассмотрены основные процессы химической технологии: механические, гидромеханические, тепловые, массообменные и химические. Приведена классификация методов их осуществления. Представлено описание конструкций и принципа действия аппаратов химической технологии.

Для учащихся образовательных учреждений начального профессионального образования, приобретающих профессии аппаратчика-оператора, машиниста технологических насосов и компрессоров, оператора нефтепереработки. Может быть также использовано студентами колледжей, техникумов, учащимися учебных центров и комбинатов.

УДК 66(075.32)
ББК 35я722

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Сугак А. В., Леонтьев В. К., Туркин В. В., 2005
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2005
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2005

ISBN 5-7695-2033-7

ПРЕДИСЛОВИЕ

Интенсивное развитие нефте- и газодобывающей, нефтехимической, химической и других отраслей промышленности, постоянное совершенствование технологического оборудования для проведения процессов нефте- и газопереработки, транспортирования сырья и продуктов требуют подготовки высококвалифицированных кадров, способных решать важные практические задачи. При этом актуальным представляется знание сущности и физических основ процессов химической технологии, методов их проведения, умение разобраться в устройстве и принципе действия технологического оборудования, способность к постоянному самообразованию и повышению квалификации.

Предлагаемое учебное пособие полностью соответствует новому образовательному стандарту и учебной программе по курсу «Процессы и аппараты химической технологии», содержание которого отвечает возросшим требованиям к профессиональному уровню аппаратчика-оператора, машиниста технологических насосов и компрессоров и оператора нефтепереработки в плане совершенствования теоретической подготовки и расширения практического кругозора.

В настоящем учебном пособии содержатся сведения о классификации основных процессов и аппаратов химической технологии, конструкционных материалах, используемых для изготовления корпусных элементов аппаратов, основных узлов и деталей. Рассмотрены теоретические основы механических, гидродинамических, тепловых, массообменных и химических процессов химической технологии, оборудование для их проведения с описанием особенностей его устройства, принципа действия и правил безопасной эксплуатации.

Предлагаемое учебное пособие отражает передовые взгляды на сущность описываемых процессов. В качестве примеров в нем приведены современные виды технологического оборудования, которое уже нашло широкое применение на отечественных и зарубежных установках для нефтепереработки, транспортирования сырья и продуктов и отличается высокими эксплуатационными и экологическими характеристиками.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного производства профессиональные обязанности аппаратчика и оператора нефтепереработки включают в себя локальный контроль и управление производством, поддержание на должном уровне технологических и технических параметров процесса, участие в подготовке документации для проведения необходимых ремонтных операций, что требует определенных знаний в области техники и технологии, а также владения методами расчета основного технологического оборудования.

Эти вопросы отражены в курсе «Процессы и аппараты химической технологии», базирующемся на законах естествознания. Его можно считать одним из основных при получении начального профессионального образования соответствующего профиля.

История возникновения этого курса восходит к 1909 г., когда профессор Петербургского технологического института А. К. Крупский опубликовал трактат, посвященный «проектированию химической технологии», в котором сформулированы наиболее важные направления в данной области. В качестве самостоятельной дисциплины указанный курс был прочитан в 1912 г. профессором И. А. Тищенко, а основные методологические направления его развития в дальнейшем были сформулированы Д. П. Коноваловым, К. П. Павловым и другими учеными.

В настоящее время курс «Процессы и аппараты химической технологии» позволяет проанализировать технологический процесс, опираясь на законы физики и химии, найти его оптимальные параметры, провести технически грамотный подбор и обоснованный расчет аппаратуры.

РАЗДЕЛ I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

О ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Глава 1

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Химико-технологический процесс представляет собой совокупность ряда операций, в результате выполнения которых исходное вещество превращается в конечный продукт. Такой процесс является сложной цепочкой взаимосвязанных технологических операций, каждая из которых важна и необходима.

Процессы химической технологии в зависимости от закономерностей их протекания можно условно разделить на пять групп.

К первой группе относятся *механические процессы*: измельчение, транспортирование, сортировка и смешивание твердых материалов.

Вторая группа — *гидромеханические процессы*, интенсивность которых определяется законами гидродинамики — законами о движении жидкостей и газов. Это процессы перемещения жидкостей; сжатия и перемещения газов; осаждения частиц в поле силы тяжести, электрическом поле и под действием центробежной силы; фильтрования за счет разности давлений; псевдоожижения частиц твердого материала.

Третья группа — *тепловые процессы*, скорость протекания которых зависит от скорости теплопередачи. В данную группу входят процессы нагревания, выпаривания, конденсации, охлаждения, в том числе до температуры более низкой, чем температура окружающей среды (холодильные процессы).

Четвертая группа включает в себя *массообменные процессы*, скорость протекания которых зависит от скорости массопередачи. Это процессы абсорбции, адсорбции, перегонки, ректификации, экстракции, кристаллизации, сушки и др.

И наконец, пятая группа — *химические процессы*, при осуществлении которых происходит превращение веществ с изменением их свойств. Скорость протекания этих процессов зависит от характерных для них кинетических закономерностей.

Для каждой группы процессов существует определенный класс аппаратов, все многообразие которых можно представить следующим образом:

1) машины для измельчения, классификации, дозирования и перемещения материалов;

- 2) аппараты для проведения гидромеханических процессов;
- 3) аппараты для осуществления тепловых процессов;
- 4) массообменные аппараты;
- 5) химические реакторы.

Для выполнения технологического процесса аппараты объединяют в технологическую цепочку, причем в ее состав могут быть включены аппараты, принадлежащие разным классам.

Технологический процесс может быть организован в периодическом или непрерывном режиме.

При *периодическом процессе* все его стадии осуществляются в одном аппарате, но в разное время. Например, сначала загружают исходное сырье, затем перемешивают и нагревают смесь и по окончании процесса опорожняют реактор. В таком режиме последовательно проводят все технологические операции, каждая из которых требует строгого соблюдения временных параметров процесса и применения большого числа реагентов. Как правило, производительность периодических процессов невелика.

При *непрерывном процессе* загрузка сырья, протекание процесса и выгрузка продукта происходят одновременно, но в разных аппаратах.

Осуществление процесса в непрерывном режиме обеспечивает ряд преимуществ: появляется возможность использовать специальную аппаратуру для каждой стадии процесса, добиться его стабилизации во времени/улучшить качество продукта и предусмотреть автоматизированное управление процессом.

Основной целью *расчета химико-технологического процесса* является определение массовых потоков перерабатываемых сред, энергетических затрат на проведение процесса, а также основных размеров применяемых машин и аппаратов. Конечная цель расчета — нахождение оптимальных условий осуществления процесса и минимизация необходимых для этого затрат.

Существует определенный подход к анализу процесса. На основании закона сохранения массы выводят *уравнение материального баланса*

$$\sum G_{\text{исх}} = \sum G_{\text{кон}},$$

где $\sum G_{\text{исх}}$ — количество исходного вещества, поступающего на переработку; $\sum G_{\text{кон}}$ — количество конечного продукта. Материальный баланс может быть составлен для всего процесса в целом или его отдельных стадий.

Для нахождения тепловых характеристик процесса выводят *уравнение теплового баланса*

$$\sum Q_{\text{исх}} + Q_p = \sum Q_{\text{кон}} + Q_{\text{тн}} + Q_{\text{п}}, \quad (1.1)$$

где $\sum Q_{\text{исх}}$ — количество теплоты, поступающей в аппарат с исходным веществом; Q_p — количество теплоты, выделяющейся при

протекании химической реакции; $\sum Q_{\text{кон}}$ — количество теплоты, выходящей из аппарата с конечным продуктом; $Q_{\text{тн}}$ — количество теплоты, отдаваемой теплоносителю; $Q_{\text{п}}$ — потери теплоты в окружающую среду.

Уравнение (1.1) составлено в общем виде для процесса, основанного на экзотермической реакции. Вид уравнения изменится в зависимости от особенностей конкретного теплового режима процесса. С помощью уравнения теплового баланса проводят тепловой расчет процесса и определяют количество отводимой или подводимой теплоты, необходимую площадь поверхности теплопередачи и расход теплоносителя.

Производительность аппаратов и машин определяется количеством готовой продукции, получаемой в единицу времени. Для сравнения однотипных аппаратов производительность относят к параметру, характеризующему данный аппарат (площадь рабочей поверхности, рабочий объем). Для нахождения объема жидкой фазы, м^3 , в аппарате можно воспользоваться уравнением

$$V_{\text{ж}} = \tau_{\text{пр}} Q_{\text{V}}$$

где $\tau_{\text{пр}}$ — среднее время, необходимое для проведения процесса, с; Q_{V} — объемный расход исходного вещества, $\text{м}^3/\text{с}$.

При разработке новых производственных процессов важное значение имеет выбор оптимальных условий их проведения, обеспечивающих получение наиболее высококачественных продуктов при наименьших затратах сырья, энергии и труда. Определение экономически наиболее выгодных условий проведения процесса называется его *оптимизацией*.

При выборе аппарата следует учитывать основные требования, предъявляемые к его конструкции, при этом необходимо, чтобы каждый аппарат был прочным, удобным и безопасным в эксплуатации, обладал высокой производительностью и экономичностью.

Главным условием длительной и бесперебойной работы аппарата является его *механическая надежность* (прочность, жесткость, устойчивость, долговечность, герметичность конструкции).

Аппарат должен обладать *конструктивным совершенством*, под которым понимают простоту конструкции, небольшую массу, малые габариты, минимально необходимое количество дорогостоящих материалов, используемых при его изготовлении, и высокий коэффициент полезного действия.

К *эксплуатационным достоинствам* аппарата можно отнести удобство, простоту и дешевизну сборки, монтажа и эксплуатации.

Основными критериями, определяющими выбор конструкции аппарата, являются особенности технологического процесса, силы, действующие на аппарат, простота его изготовления и эксплуатационные требования.

К особенностям технологического процесса можно отнести его характер (тепловой, диффузионный или массообменный процесс и т.д.) и способ проведения (периодический, непрерывный). Кроме этого необходимо иметь данные об агрегатном состоянии обрабатываемых веществ, термодинамических условиях проведения процесса (давление, температура) и агрессивности сред.

Следует изучить силы и динамические нагрузки, действующие на аппарат.

Простота изготовления аппарата определяется доступностью технологии его производства и легкостью обработки материала деталей, входящих в его конструкцию.

Эксплуатационные требования включают в себя оснащенность конструкции необходимыми узлами и устройствами (люки, крышки, смотровые окна и др.).

Выполнение указанных требований позволит провести обоснованный выбор конструкции аппарата.

Контрольные вопросы

1. На какие группы можно разделить процессы химической технологии?
2. Каковы принципиальные отличия периодического и непрерывного процессов?
3. В чем заключается расчет химико-технологического процесса?
4. Перечислите основные требования, предъявляемые к химическому оборудованию.

Глава 2

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Требования к конструкционным материалам

Химические и нефтеперерабатывающие заводы выпускают разнообразную продукцию, для производства которой используют определенные технологические процессы и соответствующие наборы основных аппаратов и вспомогательного оборудования. Каждый аппарат и каждая его деталь имеют свое назначение и при этом должны противостоять воздействию неблагоприятных условий в процессе работы.

К внешним условиям разрушительного характера относятся механические нагрузки, высокая или низкая температура проведения технологического процесса и химическое воздействие обрабатываемых веществ на детали аппарата (коррозия).

Материал, из которого изготовлена деталь, подвергающаяся воздействию механических нагрузок, должен обладать высокой

прочностью. Характерным механическим воздействием для химического оборудования является повышенное или, наоборот, пониженное давление внутри аппарата. Так, в процессе разделения воздуха при получении жидкого азота и жидкого кислорода давление в некоторых аппаратах в двести раз превышает атмосферное. При проектировании такого аппарата подбирают прочный материал и рассчитывают толщину его стенки. Другой пример механической нагрузки — крутящий момент, передаваемый валом мешалки химического реактора. Прочность этой детали аппарата также обеспечивают подбором конструкционного материала и расчетом диаметра вала.

Температура проведения разных технологических процессов неодинакова. Так, при разделении воздуха она может понижаться до -180°C , в других процессах — повышаться до 1000°C . Под воздействием высокой или, наоборот, низкой температуры изменяются теплофизические свойства конструкционного материала, что приводит, в частности, к снижению его прочностных характеристик. При высокой температуре, кроме того, снижается химическая стойкость материалов.

Разрушение конструкционного материала в результате химического воздействия агрессивной среды (например, кислоты) называется *коррозией*. При таком воздействии может уменьшиться толщина стенки аппарата, что приведет к снижению его прочности и разрушению. Чтобы противостоять этому явлению, конструкционный материал должен быть *коррозионно-стойким*.

Каждый аппарат, несмотря на разрушительное воздействие перечисленных факторов, должен надежно работать в течение проектного срока службы. Для обеспечения соответствующей *долговечности* аппарата инженер-конструктор при его проектировании подбирает необходимые конструкционные материалы для изготовления деталей с учетом всех неблагоприятных воздействий в процессе эксплуатации аппарата. Например, к полученной при расчете на прочность толщине стенки он добавляет запас толщины на коррозию, чтобы вызванное ею утончение стенки не послужило причиной разрушения аппарата от механической нагрузки до окончания проектного срока службы.

Правильно подобранные конструкционные материалы, способные противостоять перечисленным отрицательным воздействиям, должны быть еще и *экономичными*, т.е. дешевыми. Известно, что золото обладает почти идеальной коррозионной стойкостью. Его разрушает лишь смесь концентрированных азотной и серной кислот (так называемая царская водка). Но кто станет делать аппарат из золота?

При изготовлении деталей аппарата в зависимости от их формы используют различные промышленные методы обработки материалов: литье, штамповку, резание, сварку и др. Способность

материала поддаваться подобной обработке — *технологичность* — также учитывают при его выборе.

2.2. Материалы для изготовления аппаратуры

Разнообразие условий эксплуатации химического оборудования и, следовательно, требований, предъявляемых к конструкционным материалам, в том числе носящих экономический и технологический характер, обуславливает необходимость применения большого числа разных по своей природе и свойствам материалов. Классификацию конструкционных материалов, применяемых в химическом машиностроении, иллюстрирует схема, приведенная на рис. 2.1.

Железо и его сплавы называются черными металлами, все остальные металлы и их сплавы — цветными. Следует отметить, что на рис. 2.1 указаны общие наименования материалов. В действительности под каждым наименованием скрыто многообразие сочетаний материалов, составленных с целью получения требуемых свойств для различных условий их применения. Например, различные марки стали, изначально представляющей собой железоуглеродистый сплав, могут содержать добавки тех или иных цветных металлов и химических элементов-неметаллов. Цветные металлы обычно используют в виде сплавов с другими элементами и лишь как исключение — в чистом виде. Очень широк круг материалов, называемых пластмассами.

Стали. Сталь представляет собой сплав железа (Fe) с углеродом (C), причем содержание углерода в ней невелико (0,05...2,14 %).



Рис. 2.1. Классификация конструкционных материалов, применяемых в химическом машиностроении

Изменение содержания углерода даже в этом небольшом диапазоне приводит к перестройке кристаллической структуры стали, что отражается на ее физических свойствах: прочности, твердости и пластичности.

В состав стали в качестве примесей входят химические элементы, неизбежно попадающие в нее из железной руды и других материалов, применяемых при ее выплавке. Среди них кремний, марганец, сера, фосфор, а также случайные примеси (медь, мышьяк и др.).

Для направленного воздействия на свойства сталей при их выплавке вводят специальные примеси — легирующие элементы. Сталь со специальными примесями называют *легированной*. Для повышения прочности в сталь добавляют хром, кремний, ванадий, молибден, вольфрам и никель.

В технике распространены стали, легированные одновременно двумя или более элементами, причем, как правило, в сочетании с хромом (хромоникелевые и хромомолибденовые стали). Коррозионная стойкость сталей возрастает, если вместе с хромом ввести никель, кремний, молибден, алюминий и титан.

Каждый тип стали имеет свою марку. Машиностроительная сталь общего назначения может быть просто углеродистой, причем с различным содержанием углерода, составляющим, например, в стали марки Ст10 0,07...0,14 %, а в стали Ст40 — 0,37...0,45 %. К сталям общего назначения относятся также сплавы с повышенным содержанием марганца. В обозначении марки такой стали кроме цифры, отражающей количество присутствующего в ней углерода, представляют букву Г, указывающую на наличие марганца. Например, в состав стали марки 40Г входят 0,37...0,45 % углерода и 0,7...1,0 % марганца.

Машиностроительные стали специального назначения — это легированные, в частности коррозионно- и жаростойкие, стали. Например, сталь марки 0Х13 содержит до 0,08 % углерода и 11...13 % хрома. Ее используют в слабоагрессивных средах — водных растворах солей и азотной кислоты. Значительно более дорогостоящую сталь марки 0Х18Н10Т, которая кроме углерода (до 0,08 %) содержит хром (17...19 %), никель (9...11 %) и некоторое количество титана, применяют для изготовления сварных изделий, эксплуатируемых в агрессивных средах. Для работы в сильноагрессивных средах (серная и фосфорная кислоты и другие вещества) используют сталь еще более сложного состава, например марки 0Х23Н28МЗДЗТ, содержащую, %, углерод (до 0,06), хром (22...25), никель (26...29), медь (2,5...3,5), молибден (2,5...3,0) и титан (0,4...0,7).

Сталь выпускают в виде проката различного профиля (круглый, квадратный, угловой, швеллерный и т.д.), листов и труб. Бесшовные холоднотянутые и холоднокатаные трубы из стали

общего назначения имеют диаметр 1...200 мм и толщину стенок (зависящую от диаметра) 0,1...12 мм. Диаметр горячекатаных труб из коррозионно-стойкой стали составляет 76...325 мм при толщине стенок 4,5...32 мм.

Для удешевления аппаратов, подверженных коррозионному воздействию со стороны перерабатываемой среды, их изготавливают из биметалла — листового двуслойного материала. Механическую прочность аппарата обеспечивает толстый (основной) слой углеродистой машиностроительной стали, а защиту от коррозии — тонкий слой более дорогостоящей коррозионно-стойкой стали. Такой слой называют *плакирующим*.

Чугуны. Чугун представляет собой железоуглеродистый сплав с содержанием углерода свыше 1,7 %. Наличие некоторых примесей приводит к изменению свойств чугунов. По химическому составу чугуны могут быть нелегированными (они содержат кремний, марганец, фосфор и серу) и легированными (легирующими элементами служат никель, хром и молибден).

Чугуны обладают хорошими литейными свойствами, поэтому из них изготавливают тонкостенные детали сложной формы, в частности, трубопроводной арматуры (краны, вентили, задвижки, предназначенные для использования при невысоком давлении), оборудование печей, некоторые детали насосов.

Наиболее широко распространен серый чугун (обозначения его марок начинаются буквами СЧ). Из него выполняют изделия, применяемые при давлении ниже 1 МПа и температуре $-15...+250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Присадки, вводимые в чугун в процессе литья, повышают его механическую прочность. Такой чугун называется модифицированным. Из него изготавливают ответственные детали: корпуса насосов и арматуру, способные противостоять высокому давлению. Отливки из жаропрочного чугуна, получаемого также легированием, можно использовать при температуре, характерной для газов дымовых печей и достигающей $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для применения в условиях абразивного изнашивания предназначены чугуны с большой твердостью, получаемые легированием хромом, никелем и молибденом. Из них изготавливают насосы, которые перекачивают жидкости с высоким содержанием твердых частиц (шлама), мелющие тела (шары) дробильно-размольных машин и другие изделия.

Цветные металлы. В зависимости от плотности цветные металлы условно разделяют на две категории: легкие и тяжелые. К легким относятся алюминий, титан, магний, имеющие плотность менее 5000 кг/м^3 , а к тяжелым — кадмий, кобальт, медь, никель, олово, цинк, свинец. Плотность алюминия составляет 2700 кг/м^3 , а свинца — $11\,340\text{ кг/м}^3$.

Использование цветных металлов для изготовления химического оборудования ограничено в количественном отношении, по-

скольку они, как правило, дороже черных. Тем не менее благодаря специфическим свойствам, которые проявляются в определенных условиях эксплуатации, их применение оправданно и экономически целесообразно. Рассмотрим наиболее распространенные цветные металлы, как технически чистые, так и сплавы на их основе.

Технический алюминий обладает довольно высокой коррозионной стойкостью благодаря очень плотной оксидной пленке, образующейся на поверхности и предохраняющей основной металл от дальнейшего окисления. Металл хорошо сваривается, но плохо обрабатывается резанием. По прочности алюминий в несколько раз уступает стали. Его применяют для изготовления деталей, которые испытывают небольшие нагрузки и должны обладать высокой коррозионной стойкостью и значительной теплопроводностью.

Сплавы алюминия с повышенным содержанием магния (АМгб) и добавлением ванадия (АМг5В) хорошо обрабатываются резанием, а их прочность примерно вдвое выше, чем у технического алюминия. Для изготовления деталей литьем используют силумины — сплавы алюминия с 6... 12 % кремния, медно- и магниевовольфрамовые сплавы.

Технический титан и его сплавы имеют высокую коррозионную стойкость в определенных средах. В частности, органические кислоты (уксусная, лимонная) не оказывают разрушающего действия на титан даже при нагревании. Однако разбавленные соляная, серная и азотная кислоты при нагревании растворяют титан. По прочности он не уступает сталям многих марок, а некоторые его сплавы заметно превосходят их. При этом титан более чем в 1,5 раза легче стали.

Основным легирующим элементом для титановых сплавов является алюминий, который повышает жаропрочность металла. Сплавы титана общего назначения применяют при температуре до 400 °С, а жаропрочные — до 600 °С.

Технически чистая медь отличается высокой электро- и теплопроводностью и коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, пресной воде, растворах некоторых солей, органических кислотах, спиртах и других средах. Она используется в электро- и теплотехнике, а также химическом машиностроении. Однако более широкое применение находят ее сплавы: медно-никелевые, а также латуни и бронзы.

Латунь — сплав меди с цинком — наиболее дешевый медный сплав. Из этого материала изготавливают трубы, листы и прутки. Из латуни выполняют, например, манометрические и капиллярные трубки, а также трубы радиаторов. Дополнительные легирующие добавки (алюминий, кремний, олово, никель, марганец и железо в разных сочетаниях) повышают коррозионную стойкость и механическую прочность сплавов, а добавка свинца улучшает

их обрабатываемость резанием. Литейные латуни применяют для изготовления червячных винтов и иных деталей, работающих в неблагоприятных условиях, втулок и вкладышей подшипников, деталей трубопроводной арматуры.

Бронзы по химическому составу могут быть оловянными и безоловянными. Основными легирующими компонентами этих сплавов являются олово, цинк и свинец — для оловянных бронз и алюминий, железо, марганец, никель и свинец — для безоловянных. Литейные оловянные бронзы используют для изготовления трубопроводной арматуры, а оловянные бронзы, обрабатываемые давлением, — в качестве материалов для пружин, вкладышей подшипников и сеток. Безоловянные бронзы по свойствам близки к оловянным.

Свинец и *олово* отличаются низкой температурой плавления и малой прочностью. Они очень пластичны, имеют высокую коррозионную стойкость. Эти металлы и сплавы на их основе используют для изготовления припоев. Свинец, обладающий высокой кислотостойкостью, служит для облицовки изнутри (футеровки) химических аппаратов, изготовления кислотостойких труб и герметизации соединений труб путем зачеканки. Олово широко применяют для лужения жести. На основе свинца, с добавкой олова или без него, получают антифрикционные сплавы — баббиты, употребляемые для заливки подшипников скольжения.

Хром, *никель*, *кадмий* и *цинк* используют для легирования различных сплавов и создания коррозионно-стойких покрытий на деталях, изготовленных из относительно дешевых и прочных машиностроительных сталей. Благодаря тонкому защитному слою этих металлов значительно увеличивается срок службы деталей. Так, например, оцинкованное железо при наличии на нем такого покрытия может противостоять воздействию атмосферы в течение 10 лет без покраски; оцинкованные водопроводные трубы значительно более долговечны, чем незащищенные стальные.

Пластмассы. Пластмассы — это материалы, основой которых являются высокомолекулярные соединения — *полимеры*, представляющие собой длинные молекулярные цепи, составленные из отдельных химических звеньев — *мономеров*.

Пластмасса может содержать только полимер. Например, всем известный полиэтилен состоит из длинных линейных цепей, образованных из простых молекул этилена (химическая формула — C_2H_4). К пластмассам аналогичного вида относятся винипласт, фторопласт (тефлон), полистирол и смолы на основе различных химических соединений. Пластмассы другого вида представляют собой сочетания полимера с дополнительными компонентами: связующими, отвердителями, наполнителями или красителями.

Наполнители вводят в виде порошков, волокон, тканей или слоистых материалов. Они улучшают те или иные свойства пласт-

массы. Например, прессовочные порошки, применяемые для получения различных бытовых и технических изделий методом горячего прессования, могут содержать каолин, повышающий прочность, асбест, увеличивающий теплостойкость, и графит, улучшающий антифрикционные характеристики.

Волокнистые наполнители используют для повышения прочности изделий. Широко распространены стеклопластики, которые являются сочетанием отверждаемых смол со стеклянными волокнами. При введении стекловолокна прочность материала возрастает в 3—4 раза.

В случае применения в качестве наполнителя уложенной слоями хлопчатобумажной ткани, пропитанной отверждающейся синтетической смолой, получают текстолит. Так же, но с использованием слоев крафт-бумаги изготавливают гетинакс.

В зависимости от характера изменения свойств полимеров при нагревании их подразделяют на термореактивные и термопластичные. *Термореактивные* полимеры сначала переходят в текучее состояние (при котором можно формировать изделие), а затем в результате химических процессов — в твердое. При последующих изменениях температуры форма полученной детали сохраняется.

Термопластичные полимеры при нагревании становятся пластичными, а при охлаждении возвращаются в твердое состояние и вновь приобретают упругость. При последующем нагревании детали из такой пластмассы ее форму можно изменять. Процесс перехода из твердого состояния в пластичное является обратимым.

Изделия из пластмассы получают литьем термореактивных смол (фенопласта и карболита — без отвердителя, эпоксидных смол — с отвердителем), применяя различные приемы формования и прессования, сваривание, склеивание, а также механическую обработку резцами и абразивами.

Резина. Резину получают посредством вулканизации — специальной обработки в присутствии серы — каучука. При этом в состав резиновой смеси вводят дополнительные вещества (наполнители, пластификаторы, стабилизаторы и др.), улучшающие свойства резины. По сравнению с исходным каучуком резина имеет повышенную прочность, эластичность, твердость и теплостойкость. Эластичная резина способна выдерживать очень большие по величине многократные деформации.

Комбинируя составы резиновых смесей, получают резины разного назначения. Если резину общего назначения используют при температуре от -30 до $+50$ °С, то группу теплостойких резин можно применять при температуре от -80 до $+90$ °С, а в среде водяного пара — до 140 °С. Резина способна противостоять воздействию многих агрессивных сред (соляная, уксусная, плавиковая и лимонная кислоты; едкий натр и едкое кали; этиловый и метиловый спирты любой концентрации, а также серная и фосфорная кислоты с

концентрацией соответственно до 50 и 75 %). Существуют бензостойкие резины, предназначенные для использования в керосине, бензине и дизельном топливе, а также маслостойкие резины.

На основе резины выпускают различные технические изделия: шины, плоские и клиновые приводные ремни, транспортные ленты, резинотканевые напорные рукава (в том числе армированные металлической сеткой) для разных сред и давлений, уплотнительные детали как для неподвижных, так и подвижных соединений.

Керамические материалы. Материалы этого вида производят из минерального сырья — оксидов различного химического состава. На их основе изготавливают огне- и кислотоупорные изделия. Например, из динаса и шамотного кирпича кладут печи, ими обмуровывают топки. В зависимости от состава огнеупорные материалы выдерживают воздействие температуры, достигающей 2000 °С.

Для кислотоупорных изделий характерны высокая прочность, газонепроницаемость, износостойкость и стойкость к действию кислот (кроме плавиковой) различной концентрации. Эти изделия обычно покрывают глазурью. Их выпускают в виде кирпича, плиток и насадочных колец для колонных аппаратов. С использованием кислотоупорной керамики изготавливают насосы, мешалки, вакуумные аппараты и другое оборудование. Кислотоупорным кирпичом или плиткой футеруют технологические аппараты и емкости с агрессивными средами.

Металлокерамические материалы. Изделия из металлокерамических материалов получают прессованием порошков в детали требуемой формы с последующим спеканием полученных изделий при нагревании. Среди таких материалов можно выделить антифрикционные, предназначенные для узлов трения различных машин (сплавы на медной или железной основе с добавлением графита), и, наоборот, фрикционные — для тормозных накладок (сплавы железа или меди с неметаллическими добавками, повышающими коэффициент трения, например с асбестом).

С точки зрения химического производства представляют интерес пористые материалы, получаемые спеканием железной, никелевой или другой дроби в форме колец, цилиндров или пластин. Их применяют в качестве фильтровальных перегородок, например, в нутч-фильтрах (см. гл. 10). Фильтрующие материалы изготавливают также из металловолокна.

Стекло. Это аморфный материал, получаемый из расплавов оксидов различных химических элементов (кремний, бор, фосфор, кальций, натрий и др.).

В зависимости от состава стекло может приобретать определенные свойства. Различают две группы стекол: простые и технические. К простым относятся строительные, тарные и сортовые стекла, а к техническим — оптические, термостойкие и защитные.

Основными исходными материалами для производства простых стекол являются кремнезем, известняк, кальцинированная сода и сульфат натрия. В состав оконного стекла дополнительно включают оксиды магния и алюминия. Технические типы стекол содержат различные примеси. Например, в состав термостойких стекол входят боросиликатные компоненты, а улучшенные оптические свойства стеклу придают оксиды свинца и редких элементов — лантана, тория, церия и др. Для получения цветных стекол вводят разные металлы и их соединения. Например, красное стекло содержит медь, а фиолетовое — оксид марганца.

Большинство технических стекол стойки к воде и кислотам (за исключением плавиковой и фосфорной), но разрушаются под действием щелочей. Для повышения химической стойкости в стекло добавляют один или несколько оксидов таких элементов, как бор, алюминий, цинк, цирконий и титан. В химическом машиностроении часто применяют кварцевое стекло, которое обладает не только повышенной химической стойкостью, но и очень высокой термостойкостью.

Для получения высокопрочного стекла используют различные технологические приемы: закалку, химическую обработку поверхности, термохимическую и комбинированную обработку.

Кроме «массивного» стекла выпускают стеклянное волокно, из которого получают тканевые материалы, применяемые в качестве фильтровальных перегородок в фильтрах (см. гл. 10).

Ситалл. Этот специфический кристаллический материал получают методом каталитической кристаллизации аморфного стекла, предварительно сформированного в изделия. Ситалл отличается повышенными механическими и тепловыми характеристиками. Его используют в качестве конструкционного материала в машиностроении и приборостроении для изготовления труб, подшипников, химических аппаратов, изоляторов и других изделий.

Асбест. Это природный минерал из группы силикатов, имеющий тонковолокнистую структуру. Характерными свойствами асбеста являются высокая термостойкость, прочность и эластичность волокон, низкая теплопроводность и стойкость к агрессивным средам.

Для технических целей асбест выпускают в виде нитей, шнуров, тканей и листового материала (бумага, картон). Асбест применяют в качестве теплоизоляционного и уплотнительного материала.

Паронит. Для уплотнения неподвижных фланцевых соединений трубопроводов, крышек и люков аппаратов часто используют паронит — материал, в состав которого входят волокна асбеста и каучук в качестве связующего. Для уплотнения подвижных соединений (штоки задвижек, валы насосов и др.) применяют сальниковые асбестовые набивки. Их выпускают в форме шнуров обычно

квадратного сечения, сплетенных из асбестовых нитей, с антифрикционной пропиткой и наполнителем (тальк, графит). Асбестовые набивки некоторых марок используют при температуре до 600 °С в средах, находящихся под давлением до 30 МПа.

Технический фарфор. В химическом производстве применяют технический фарфор, который обладает высокой механической прочностью, термостойкостью, а также коррозионной стойкостью и способен противостоять резким перепадам температуры от 20 до 200 °С. Из этого материала изготавливают вакуумные аппараты, аппараты для выпаривания нейтральных, кислых и щелочных растворов при атмосферном или повышенном давлении, а также сосуды для травильных работ.

Пример использования разных видов конструкционных материалов для изготовления химического оборудования. На рис. 2.2 приведена схема аппарата с механическим перемешивающим устройством.

Корпус 1 и крышка 7 аппарата изготовлены из биметалла. Наружная часть корпуса выполнена из машиностроительной стали, изнутри материал плакирован слоем коррозионно-стойкой стали. Вал 15 мешалки, который передает крутящий момент, изготовлен из конструкционной стали и помещен в рубашку 16 — трубу из коррозионно-стойкой стали. Целиком из коррозионно-стойкой стали выполнены труба-стояк 3, технологические штуцеры 8

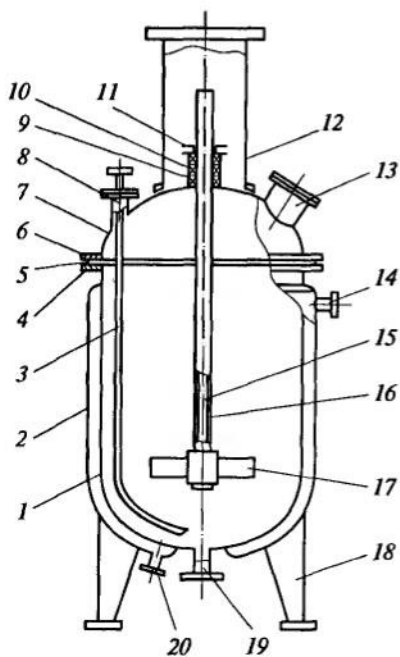


Рис. 2.2. Схема аппарата с механическим перемешивающим устройством (привод и узел крепления вала не показаны):

1 — корпус аппарата; 2 — рубашка аппарата; 3 — труба-стояк; 4 — фланец корпуса; 5 — прокладка; 6 — фланец крышки; 7 — крышка; 8, 19 — технологические штуцеры; 9 — корпус сальника; 10 — набивка сальника; 11 — нажимная втулка сальникового уплотнения; 12 — стойка привода; 13 — люк-лаз; 14, 20 — штуцеры для теплоносителя; 15 — вал мешалки; 16 — рубашка вала; 17 — мешалка; 18 — опора аппарата

и 19, люк-лаз 13 и мешалка 17. Из машиностроительной стали изготовлены рубашка 2 аппарата, заполняемая теплоносителем, фланцы 4 и 6, корпус 9 сальника, стойка 12 привода, штуцеры 14 и 20 для теплоносителя и нажимная втулка 11 сальникового уплотнения. Прокладка 5 фланцевого соединения корпуса с крышкой аппарата и аналогичные прокладки в штуцерах 8 и 19, а также люке-лазе изготовлены из листового паронита. Набивка 10 сальника набрана из колец, нарезанных из пропитанного и графитизированного асбестового шнура квадратного сечения. Опоры 18 аппарата выполнены из листовой машиностроительной стали.

Контрольные вопросы

1. Какие условия эксплуатации химического оборудования учитывают при выборе конструкционных материалов?
2. Какими свойствами должны обладать конструкционные материалы, чтобы противостоять внешним разрушающим воздействиям?
3. С какой целью проводят легирование сталей?
4. Какие химические элементы служат легирующими добавками при выплавке коррозионно-стойких сталей?
5. Что представляет собой биметалл? В каких случаях его применяют?
6. В чем состоит принципиальное различие чугунов и сталей?
7. С какой целью и каким образом модифицируют чугуны?
8. Какие химические элементы и их сплавы называют цветными металлами?
9. Какими свойствами обладают наиболее распространенные цветные металлы и как их используют в химическом оборудовании?
10. Какие неметаллические материалы применяют при изготовлении деталей химического оборудования? Приведите примеры их функционального назначения.

РАЗДЕЛ II

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 3

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

По характеру внешнего воздействия на твердый материал механические процессы подразделяют на перемещение (транспортирование), измельчение, классификацию (разделение на фракции по размеру частиц), смешивание и дозирование сыпучих материалов.

Необходимость перемещения материала возникает на разных стадиях производственного процесса: при доставке со склада сырья в цех, перемещении между технологическими машинами и аппаратами, а также доставке продукта на склад готовой продукции.

В производственных условиях твердые материалы могут находиться в штучном виде или сыпучем состоянии. Для перемещения штучных грузов используют грузоподъемные механизмы и транспортные средства: электрокары, мостовые краны, тельферы и другие устройства (их изучают в дисциплине «Подъемно-транс-

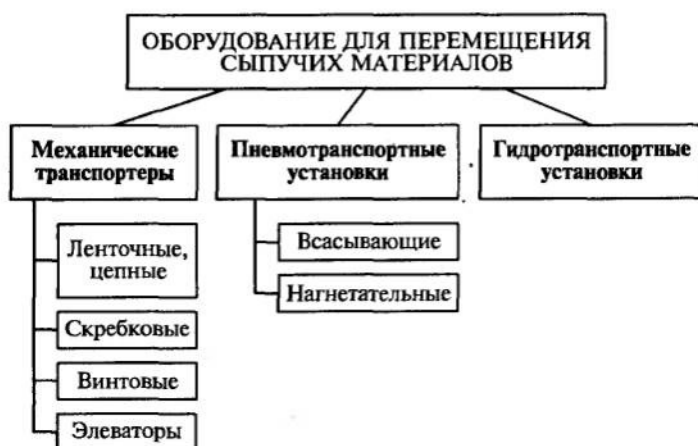


Рис. 3.1. Классификация оборудования для перемещения сыпучих материалов

портные машины»). Для перемещения сыпучих материалов в химическом производстве применяют транспортеры и установки различных конструкций. Классификация этого оборудования представлена в виде схемы на рис. 3.1.

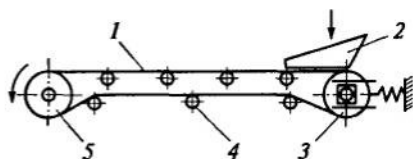
Ленточные транспортеры. Благодаря простоте конструкции, удобству обслуживания и ремонта ленточные транспортеры (рис. 3.2) получили наибольшее распространение в химической промышленности. Гибкая транспортерная лента 1, выполненная из резиноканевого материала, огибает два барабана. При вращении приводного барабана 5 движение передается ленте. Для обеспечения необходимого усилия трения ее прижимают к приводному барабану посредством перемещения натяжного барабана 3. Материал загружают на движущуюся ленту из лотка 2, а выгрузку обычно проводят в конце верхней несущей ветви при огибании ею приводного барабана. Для предотвращения прогиба ленты под действием груза ее поддерживают ролики 4, вращающиеся на своих осях. Ролики верхней ветви часто устанавливают под небольшим углом к плоскости горизонта так, чтобы транспортерная лента приняла форму желоба.

Цепные транспортеры. Для перемещения сыпучего материала, нагретого до высокой температуры, или крупнокускового материала применяют цепные (пластинчатые) транспортеры. Их несущую поверхность образуют металлические пластины, концы которых закреплены на параллельных шарнирных цепях, перемещаемых с помощью звездочек (подобно велосипедным цепям). Шарниры цепей снабжены роликами, которые катятся по направляющим.

Скребокковые транспортеры. У транспортеров этого типа на бесконечной (обычно одиночной) цепи закреплены поперечные пластины — скребки. При движении цепи скребки перемещаются в неподвижном желобе, захватывая и передвигая перед собой сыпучий материал. Скребокковые транспортеры могут работать при угле наклона к горизонту до 45° .

Винтовые транспортеры. Если на производстве необходимо обеспечить герметичность транспортируемого материала (например, при перемещении пылящего материала или подаче сыпучего компонента в аппарат (реактор), давление в котором отличается от атмосферного), то используют винтовые транспортеры (рис. 3.3).

Рис. 3.2. Ленточный транспортер:
1 — транспортерная лента; 2 — лоток;
3 — натяжной барабан; 4 — ролик; 5 —
приводной барабан



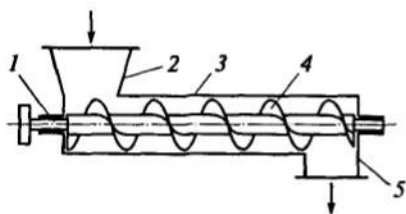
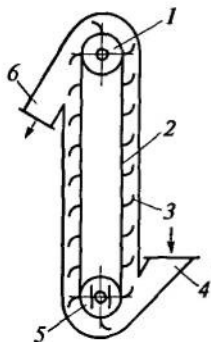


Рис. 3.3. Винтовой транспортер:
1 — вал; 2 — загрузочный люк; 3 — корпус;
4 — шнек; 5 — разгрузочный люк

В цилиндрическом корпусе 3 такого транспортера вращается шнек 4, свернутый из плоской ленты. Вращение передается через вал 1. Под действием усилия со стороны шнека сыпучий материал перемещается от загрузочного люка 2 к разгрузочному 5. Материал удерживается от вращения вследствие его трения о стенки корпуса и действия силы тяжести. Винтовой транспортер может быть установлен под углом к горизонту, не превышающим 20° . Если герметизации материала не требуется, то корпус 3 может быть выполнен в форме желоба, что упрощает его обслуживание и ремонт.

К недостаткам винтовых транспортеров можно отнести изнашивание стенок корпуса и винта, а также истирание перемещаемого материала из-за интенсивного трения. Эти особенности работы транспортеров требуют значительных энергетических затрат.

Элеваторы. Для вертикального перемещения сыпучих материалов применяют элеваторы (рис. 3.4). По принципу перемещения непрерывного транспортного элемента (лента 2 или цепь) они аналогичны ленточным и цепным транспортерам: элеваторы имеют приводной 1 и натяжной 5 барабаны. К ленте или цепям прикреплены ковши 3, которые захватывают снизу материал, засыпаемый в приемный бункер (воронку) 4. При огибании верхнего, приводного барабана материал высыпается из ковша и сбрасывается через выходной патрубок.



Пневмотранспортные установки. В производственных условиях сыпучие материалы можно перемещать по трубопроводам в пневмотранспортных установках. Действие этого оборудования для перемещения сыпучих материалов основано на тех же явлениях, которые наблюдаются в природе: переносе ветром песка в пус-

Рис. 3.4. Элеватор:

1 — приводной барабан; 2 — лента; 3 — ковш; 4 — приемный бункер; 5 — натяжной барабан; 6 — выходной патрубок

тыне и образовании песчаных кос на реках. Воздух или вода воздействуют на частицу за счет трения при ее обгоне, а также разности давлений перед частицей и за ней.

Достоинством этого способа перемещения материалов является возможность удобного пространственного размещения трассы трубопровода. Поток воздуха создается вакуум-насосом (иногда вентилятором) или компрессором (воздуходувкой).

В первом случае вся транспортная система действует при пониженном давлении — разрежении. Это особенно важно при перемещении пылящих материалов, поскольку пыль не проникает наружу через негерметичные соединения трубопровода. Однако вследствие того, что разность давлений, создаваемая вакуум-насосом, не превышает 50 кПа, длина воздушной трассы ограничена.

Для перемещения материала на большое расстояние (до 300 м) применяют нагнетательные установки с перепадом давления в транспортном трубопроводе 300...400 кПа, обеспечиваемым компрессором. На рис. 3.5 и 3.6 приведены схемы всасывающей и нагнетательной пневмотранспортных установок.

Во *всасывающей* установке (см. рис. 3.5), работающей при разрежении, сыпучий материал захватывается воздухом в приемное сопло 1. Твердые компоненты отделяются в циклоне 2 и накапливаются в бункере 5. Мелкие пылевые частицы, не уловленные в

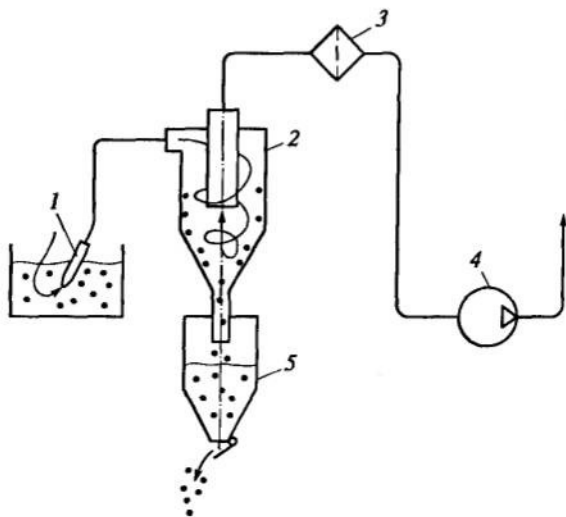


Рис. 3.5. Всасывающая пневмотранспортная установка:

1 — приемное сопло; 2 — циклон; 3 — фильтр; 4 — вакуум-насос; 5 — бункер

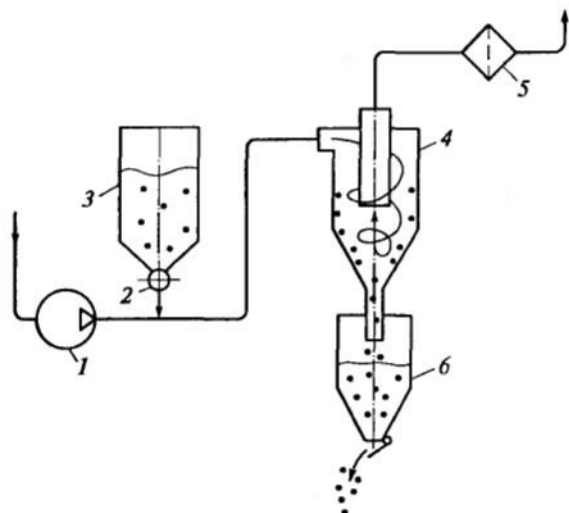


Рис. 3.6. Нагнетательная пневмотранспортная установка:

1 — компрессор; 2 — питатель; 3 — бункер для накопления материала; 4 — циклон; 5 — фильтр; 6 — бункер циклона

циклоне, задерживаются фильтром 3. Вакуум-насос (или вентилятор) 4 смонтирован в конце транспортной системы.

В *нагнетательной* пневмотранспортной установке (см. рис. 3.6) воздух подается в систему компрессором (или воздуходувкой) 1 под давлением. Материал, направляемый в поток, выгружается из бункера 3 с помощью питателя 2. Отделение твердой фазы происходит так же, как и в предыдущей установке: в циклоне 4 с бункером 6 и при прохождении фильтра 5.

Гидротранспортные установки. По природе воздействия на перемещаемые твердые частицы гидротранспортная установка аналогична пневмотранспортной, но в качестве рабочего тела вместо воздуха применяется вода. В пневмотранспортных установках возможно перемещение более крупных (тяжелых) твердых частиц и даже кускового материала.

Этот способ перемещения материалов используют, например, в горнодобывающей промышленности при транспортировании угля или руды от места добычи к месту хранения. В химическом производстве транспортируют суспензии по трубам с отделением твердой фазы от жидкой в отстойниках, фильтрах или центрифугах (см. гл. 10). В качестве источника энергии для перемещения суспензии обычно применяют шламовые или песковые насосы, устанавливаемые в начале трассы.

Контрольные вопросы

1. Какие транспортные средства применяют для перемещения сыпучих материалов по горизонтали и под малым углом к горизонту?
2. Для перемещения каких сыпучих материалов используют цепные транспортеры?
3. Назовите основные элементы ленточного транспортера. Каково назначение каждого из них?
4. Как устроен винтовой транспортер? В каких случаях его применяют?
5. Какие транспортные средства используют для вертикального перемещения сыпучих материалов? Как они устроены?
6. В чем заключается механизм воздействия сплошной среды на твердую частицу при пневмо- и гидротранспортировании сыпучего материала?
7. Перечислите основные элементы пневмо- и гидротранспортных установок. В чем состоят достоинства этих установок?

Глава 4

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Известно, что сахарный песок растворяется в воде быстрее, чем кусочек сахара. Так и в технологическом процессе: чем мельче твердые частицы, участвующие в нем, тем быстрее он протекает. Это происходит потому, что суммарная площадь поверхности мелких частиц во много раз больше площади поверхности крупных кусков той же массы. Многие процессы происходят именно на поверхности твердой фазы, поэтому перед проведением основного процесса важно измельчить твердый материал.

Измельчением получают материал с требуемым размером сыпучих частиц. По *крупности образующихся частиц* измельчение условно подразделяют на дробление и размол. При *дроблении* получают мелкие куски материала, а при *размол*е — порошок, причем граница между этими категориями весьма расплывчата. Оба процесса характеризуются одним и тем же параметром — *степенью измельчения* — отношением размеров зерен (частиц) до и после измельчения.

Однако частицы твердого материала, за редким исключением, не имеют правильной формы, и их размеры невозможно однозначно измерить и сопоставить. Для проведения сравнения используют так называемый *ситовый анализ*: материал просеивают через несколько сит с разными размерами ячеек и таким образом разделяют его на фракции. В каждой фракции содержатся частицы неодинаковых размеров, но находящиеся в достаточно узких пределах: не более одной и не менее другой величины. В итоге сравнивают диапазоны размеров частиц, содержащихся в разных фракциях, а не размеры отдельных частиц.

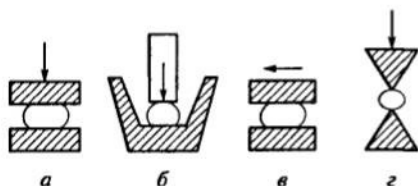


Рис. 4.1. Способы измельчения материала:

a — раздавливание; *b* — удар; *v* — истирание; *z* — раскалывание

В зависимости от *конечного результата* различают следующие категории измельчения: крупное дробление — с размером получаемых кусков до 40 мм; среднее дробление — до 6 мм; мелкое дробление — до 1 мм; тонкое измельчение (размол) — примерно до 0,1 мм; сверхтонкое измельчение (размол) — до 0,01 мм.

По *характеру механического воздействия* различают несколько способов измельчения кусков, зерен и частиц твердого материала: раздавливание, удар, истирание и раскалывание. Суть этих механических воздействий на материал иллюстрирует рис. 4.1. Раздавливание обычно применяют при крупном и среднем дроблении, а истирание — при тонком измельчении.

В зависимости от того, *добавляют воду* при проведении процесса или нет, различают мокрый и сухой способы измельчения. Крупное и среднее дробление проводят, как правило, сухим способом. Более тонкие виды измельчения могут быть осуществлены как сухим, так и мокрым способами.

В реальных производственных условиях перечисленные способы разрушения чаще всего комбинируют. Например, для хрупких материалов средней твердости может быть использовано сочетание удара, раскалывания и истирания.

По *числу проходов материала через измельчающие машины* различают открытую или замкнутую схему проведения процесса. В случае применения *открытой схемы* материал проходит через дробилку или мельницу однократно. При использовании *замкнутой схемы* материал с размерами частиц, превышающими требуемые, возвращают на повторную процедуру измельчения. Перед возвращением измельченный материал разделяют на фракции — проводят классификацию (см. гл. 5). Мелкие фракции выводят из установки, следуя принципу «не дробить ничего лишнего».

В соответствии с *категориями измельчения* материала машины для измельчения разделяют на *дробилки*, предназначенные для крупного, среднего и мелкого дробления, и *мельницы*, служащие для тонкого и сверхтонкого измельчения. И те и другие машины классифицируют по *конструктивному исполнению измельчающих элементов* (рис. 4.2).

В конструкциях задействован либо один способ измельчения, либо сочетание разных способов. Например, в щековой дробилке происходит раздавливание, а в маятниковой мельнице — раздавливание и истирание.



Рис. 4.2. Классификация машин для измельчения твердых материалов

Щековые дробилки. Дробилки этого типа (рис. 4.3) предназначены для измельчения крупнокускового материала методом раздавливания.

Неподвижная плита (щека) 1 закреплена на массивной станине. Подвижная щека 2 подвешена на оси 3, относительно которой она качается. Движение в одну сторону происходит под действием кривошипно-шатунного механизма (на рисунке не показан), который передает рабочее усилие на разрушаемый материал, а в обратную сторону (холостой ход) — под действием тяги 4 с пружиной. На куски исходного материала, засыпаемые сверху через широкий зазор между щеками, действует сила раздавливания F . Раздробленный материал выпадает из рабочей зоны при отводе подвижной щеки.

Щековые дробилки отличаются компактностью, простотой устройства и обслуживания. Однако из-за неуравновешенности движущихся частей их работа сопровождается ударами и сотрясениями. Для предохранения зданий, в которых устанавливаются подобные машины, щековые дробилки монтируют на тяжелых фундаментах.

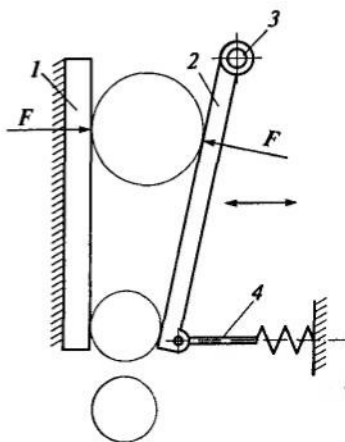


Рис. 4.3. Щековая дробилка:

1 — неподвижная плита (щека); 2 — подвижная щека; 3 — ось; 4 — тяга с пружиной; F — сила раздавливания

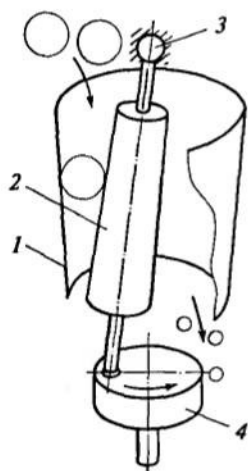


Рис. 4.4. Конусная дробилка:

1 — корпус; 2 — дробящая головка; 3 — шаровая опора; 4 — эксцентрик

Конусные дробилки. В этих машинах (рис. 4.4) материал разрушается также посредством раздавливания при его попадании в зазор между конической дробящей головкой 2 и корпусом 1. Верхняя часть оси дробящей головки закреплена в шаровой опоре 3, а нижняя свободно проходит через отверстие эксцентрика 4.

При вращении эксцентрика нижняя часть оси дробящей головки вращается вокруг вертикальной оси корпуса. В случае отсутствия материала в рабочем зазоре коническая поверхность головки неподвижна относительно своей оси. При попадании материала в зазор поверхность головки за счет трения о материал вращается в обратную сторону по отношению к направлению вращения эксцентрика.

Таким образом, между дробящей головкой и корпусом образуется зазор переменной ширины. При его уменьшении материал раздавливается, при увеличении — высыпается из рабочей полости дробилки.

Конусные дробилки имеют довольно высокую производительность ввиду возможности проведения процесса в непрерывном режиме, но конструктивно они более сложны, чем щековые дробилки.

Валковые дробилки. Такие машины измельчают кусковой материал при попадании его в зазор между вращающимися навстречу друг другу валками (рис. 4.5). Рабочие поверхности валков 1 и 2 могут быть гладкими, при этом материал раздавливается. Для хрупких материалов поверхность делают зубчатой. В этом случае разрушение материала происходит в результате раскалывания и раздавливания. Валковые дробилки обычно используют для измельчения материалов средней твердости (известняк, соли, мел и др.).

Опоры одного валка неподвижны, он вращается в подшипниках, закрепленных на станине. Другой валок подвижен, его опоры могут

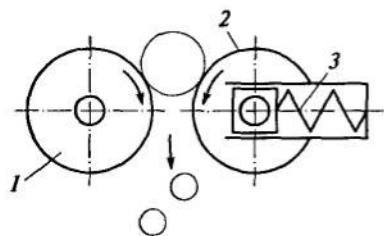


Рис. 4.5. Валковая дробилка:

1 — неподвижный валок; 2 — подвижный валок; 3 — пружина

перемещаться по горизонтали при сжатии или растяжении пружины 3, что предотвращает разрушение валков или подшипников. При попадании в дробилку чрезмерно прочного материала зазор между валками увеличивается, и «опасный» кусок проваливается, не причиняя вреда машине.

Валковые дробилки просты по устройству, компактны и надежны в работе, но непригодны для дробления высокопрочных материалов.

Молотковые дробилки. В молотковой дробилке (рис. 4.6) на роторе 1 подвижно, на шарнирах, подвешены молотки 2. По периферии ротора, на верхней части корпуса 4, закреплены стальные плиты 5, а в нижней части, под ротором, смонтирована колосниковая решетка 6.

Исходный материал проваливается в рабочую полость машины через воронку 3. Молотки, которые движутся с большой скоростью, ударяют по падающим кускам материала, частично разрушают их и отбрасывают на плиты. При ударе о плиты дробление продолжается. Таким образом, в этой части дробилки действует «ударный» метод измельчения. Раздробленные куски материала попадают на колосниковую решетку, где под действием молотка дополнительно измельчаются истиранием. Измельченный материал высыпается через решетку.

Дезинтеграторы. В дезинтеграторе (рис. 4.7) роторы 1 и 2, установленные параллельно друг другу, вращаются в противоположных направлениях. На каждом из них по окружностям закреплены пальцы 4

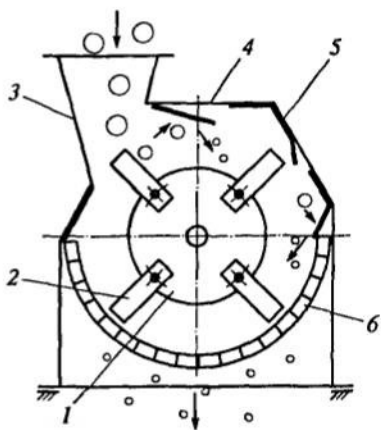


Рис. 4.6. Молотковая дробилка:
1 — ротор; 2 — молоток; 3 — воронка; 4 — корпус; 5 — плита; 6 — колосниковая решетка

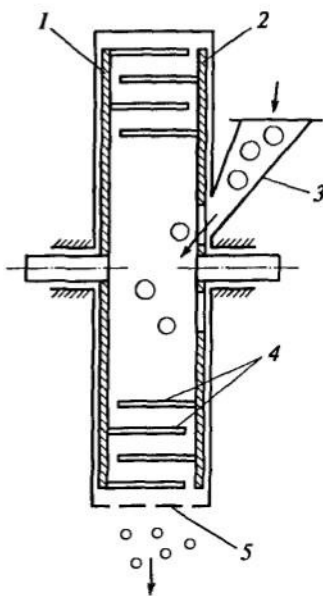


Рис. 4.7. Дезинтегратор:
1, 2 — роторы; 3 — воронка; 4 — пальцы;
5 — решетка

так, что ряды пальцев одного ротора входят в пространство между рядами пальцев другого.

Материал, подаваемый в центральную часть дробилки через воронку 3, проваливается в рабочую зону, где движутся пальцы. Под их ударами он измельчается и проваливается через решетку 5. Куски материала, размер которых больше заданного, остаются в рабочей зоне, и их разрушение продолжается.

Дисмембраторы. В конструкции дисмембратора предусмотрено вращение одного ротора. Кроме того, пальцам дисмембратора придают форму ножей. Такие машины, предназначенные для измельчения волокнистых материалов, одновременно срезают и разрушают волокна.

Барабанные мельницы. В этих машинах (рис. 4.8) вращается барабан 4, заполненный дробящими телами 5. Барабан может быть цилиндрической или цилиндроконической формы, коротким или длинным (трубная мельница). Измельчаемый материал загружают в барабан через полую цапфу 1, расположенную на его торцевой стенке. Измельченный материал выгружают либо через полую цапфу 2 на противоположной торцевой стенке, либо через диафрагму — поперечную решетчатую перегородку, размещенную внутри барабана (на рисунке этот вариант конструкции не показан). Привод барабана осуществляется с помощью шестерни 3.

При вращении барабана дробящие тела в виде шаров или стержней поднимаются на некоторую высоту за счет трения о стенку, а затем падают. Вместе с ними движется измельченный материал. При падении шары или стержни ударяют по кускам материала. Кроме ударов при взаимном движении материала и дробящих тел происходит процесс истирания. В барабанных мельницах исполь-

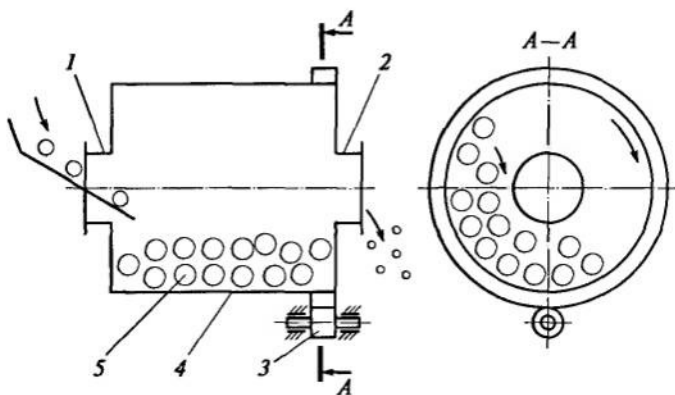


Рис. 4.8. Барабанная мельница:

1 — загрузочная полая цапфа; 2 — разгрузочная полая цапфа; 3 — приводная шестерня; 4 — барабан; 5 — дробящее тело

зуют как сухой, так и мокрый (в присутствии воды) методы измельчения.

Маятниковые мельницы. В шаровых мельницах некоторые материалы (пигменты, тальк, мел и др.) могут налипать на дробящие шары, что затрудняет обработку таких материалов. Этому недостатка лишены маятниковые мельницы, применяемые для тонкого измельчения. На рис. 4.9 показана маятниковая роликотельная мельница.

В корпусе 4 на вертикальном валу закреплена крестовина 5. На ней свободно подвешены маятники 3, на нижних концах которых вращаются ролики 2. При вращении крестовины ролики под действием центробежных сил опираются на кольцо 1 и, вращаясь на маятнике, обегают кольцо. Материал подается питателем 6 на периферию кольца и поступает в зазор между роликами и кольцом, где измельчается раздавливанием и истиранием. Измельченные частицы засасываются воздухом в пневмотранспортную трубу 7.

Вибрационные мельницы. При вибрационном воздействии сила мала по величине, но действует многократно и безостановочно. Разрушение происходит из-за так называемой усталости материала, когда образующиеся внутри него микротрещины не успевают смыкаться, а постепенно разрастаются вплоть до разлома.

В вибрационной мельнице инерционного типа (рис. 4.10) цилиндрический корпус 1 установлен на пружинной опоре 4. Через подшипники корпус связан с валом, на котором эксцентрически закреплен груз-дебаланс 3. При вращении вала его колебательные движения (вибрация) передаются корпусу. Колебательные движения корпуса носят отчасти круговой характер и имеют небольшую амплитуду.

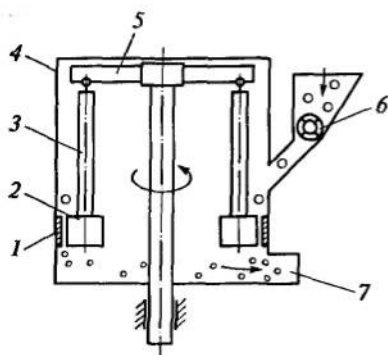


Рис. 4.9. Маятниковая мельница:

1 — кольцо; 2 — ролик; 3 — маятник; 4 — корпус; 5 — крестовина; 6 — питатель; 7 — пневмотранспортная труба

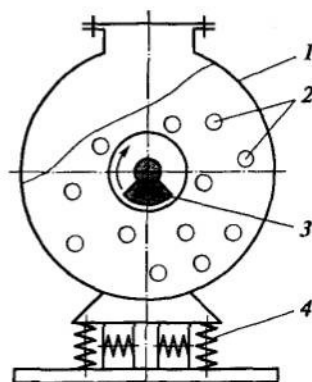


Рис. 4.10. Вибрационная мельница:

1 — корпус; 2 — мелющие тела; 3 — груз-дебаланс; 4 — пружинная опора

В корпус загружают мелющие тела (шары) 2, которые перекачаются в сторону обратную направлению вращения вала, перекатываясь и сталкиваясь друг с другом, в результате чего загруженный вместе с ними материал подвергается истиранию и достигает категории тонкого или сверхтонкого измельчения. Измельченные частицы выносятся из корпуса воздухом в пневмотранспортном режиме.

Струйно-вибрационные мельницы. Измельчение происходит при многократном взаимном столкновении частиц, которые движутся с большой скоростью под воздействием воздушных струй.

Контрольные вопросы

1. С какой целью измельчают твердые материалы в технологических процессах химического производства?
2. Как классифицируют измельчение по крупности частиц получаемого материала?
3. Какие способы разрушения материала используют в процессах измельчения?
4. В чем состоит особенность измельчения по замкнутой схеме?
5. Приведите примеры конструкций дробилок и мельниц. Опишите их устройство и принцип действия.

Глава 5

КЛАССИФИКАЦИЯ, СМЕШИВАНИЕ И ДОЗИРОВАНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Классификация сыпучих материалов — это разделение их на фракции (классы). Под *фракцией* понимают набор кусочков, зерен и частиц вещества, размеры которых заключены в определенном диапазоне.

Классификация может быть как самостоятельной, так и вспомогательной операцией. Самостоятельную операцию называют *сортировкой*. Цель сортировки — получение продукта с заданным зернистым составом. Классификация является вспомогательной операцией, когда крупные фракции отделяют для возврата на повторное дробление. Классификацию применяют и для определения зернистого состава материала. Тогда ее называют *ситовым анализом*.

Как можно разделить мелкие и крупные частицы? Первый способ основан на том, что перегородка с отверстиями (ячейками) определенного размера задерживает крупные частицы, а мелкие проходят через нее. Этот процесс называют *грохочением*, а соответствующее оборудование — *грохотом*.



Рис. 5.1. Схема распределения видов оборудования для классификации сыпучих материалов по способам ее осуществления

Второй способ разделения твердых частиц, называемый *гидравлической классификацией*, основан на разной скорости их оседания в жидкости: крупные частицы оседают быстрее, чем мелкие. Движущей силой процесса оседания является сила тяжести или центробежная сила.

На рис. 5.1 представлена схема распределения видов оборудования, предназначенного для классификации сыпучих материалов, по способам ее осуществления.

Грохоты. В процессе грохочения сыпучий материал проходит через сита — сетки с определенным размером ячеек — либо через решета — листы с выштампованными отверстиями. Для крупнокусковых материалов используют колосники — решетки с определенным расстоянием между стержнями. В результате грохочения получают *просев* — нижний продукт и *отсев* — верхний продукт, задерживаемый на сите.

Наглядное представление о грохочении можно получить на примере простейшего *плоского*

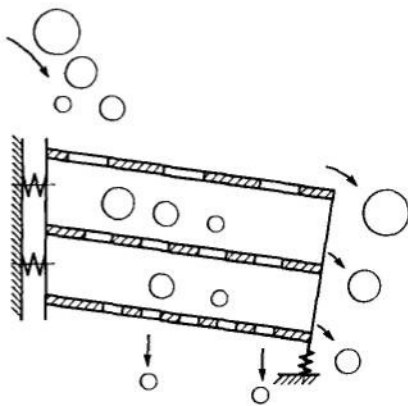


Рис. 5.2. Схема действия плоского качающегося грохота (механический привод не показан)

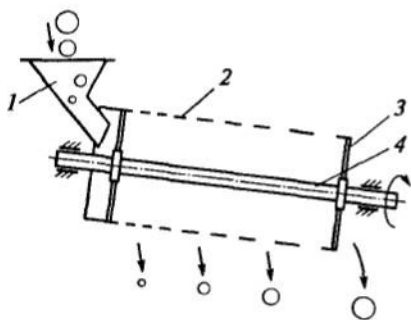


Рис. 5.3. Барабанный грохот:
1 — воронка; 2 — барабан; 3 — спица;
4 — приводной вал

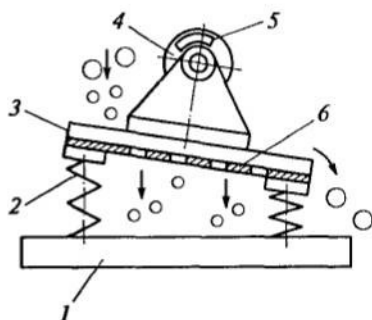


Рис. 5.4. Вибрационный грохот:
1 — станина; 2 — стойка-пружина;
3 — короб; 4 — шкив; 5 — груз-дебаланс;
6 — сито

качающегося грохота (рис. 5.2). Материал движется по колеблющимся наклонным ситам с разным размером ячеек. Размер ячеек от сита к сити может изменяться от меньшего к большему или наоборот. На приведенной схеме представлен второй вариант: сначала происходит отсев крупных фракций, а затем (последовательно) все более мелких.

В *барабанном грохоте* (рис. 5.3) реализован вариант изменения размера ячеек от меньшего к большему. Через воронку 1 материал поступает в полость вращающегося наклонного барабана 2, в стенке которого выполнены отверстия. Барабан приводится во вращение от вала 4, на котором он закреплен посредством спиц 3 и ступиц. Просев фракций происходит по длине барабана, причем самая крупная фракция ссыпается через его кромку.

На рис. 5.4 представлена схема *вибрационного грохота*. Вибрация сита происходит с частотой, в несколько раз большей, чем частота колебаний плоских качающихся грохотов, но малой амплитудой колебаний. При высокой частоте колебаний сит ячейки почти не забиваются материалом в отличие от качающихся грохотов.

На станине 1, на стойках-пружинах 2, закреплен короб 3 грохота. Короб совершает сложные колебания (вибрации), возникающие при вращении неуравновешенного шкива 4, на котором несимметрично закреплен груз-дебаланс 5. Исходный материал загружают на вибрирующее сито 6. Сначала в просев попадает мелкая фракция, а в конечный отсев — крупная (использован вариант «от меньшего размера ячеек к большему»).

Спиральные классификаторы. Исходный материал под действием силы тяжести разделяется на две фракции — крупную и мелкую. Классификатор (рис. 5.5) включает в себя наклонный короб 3 и спиральный шнек 4, а также снабжен окном 2 для выгрузки круп-

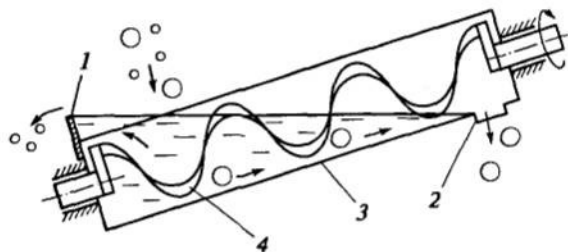


Рис. 5.5. Спиральный классификатор:

1 — переливной порог; 2 — окно для выгрузки крупной фракции; 3 — наклонный короб; 4 — спиральный шнек

ной фракции и переливным порогом 1. Когда водная суспензия поступает в короб, крупные частицы оседают на дно, вдоль которого они перемещаются шнеком и удаляются через окно для выгрузки. Мелкие частицы, не осевшие за время пребывания в коробе, вместе с большей долей воды перетекают через переливной порог 1 в режиме гидротранспорта.

Спиральный классификатор часто используют в мельницах, действующих по замкнутой схеме: крупную фракцию возвращают на повторный помол, а мелкая фракция представляет собой готовый продукт процесса измельчения.

Гидроциклоны. Классификация под действием центробежных сил осуществляется в гидроциклонах (рис. 5.6). Исходная суспензия нагнетается насосом в гидроциклон через входной патрубок 1, расположенный тангенциально по отношению к цилиндрической части корпуса 3. В пространстве между корпусом и патрубком 2 для выведения мелкой фракции поток закручивается. Под действием возникающих центробежных сил крупные частицы прижимаются к стенкам корпуса и, опускаясь вниз по конической части, попадают в патрубок 4 для выгрузки осадка в виде сгущенной суспензии.

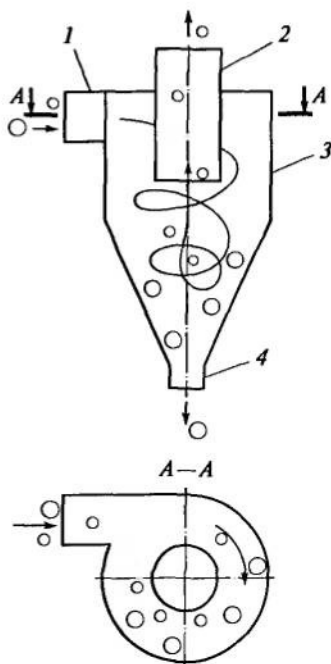


Рис. 5.6. Гидроциклон:

1 — входной патрубок; 2 — патрубок для выведения мелкой фракции; 3 — корпус; 4 — патрубок для выгрузки осадка

Основная часть воды и взвешенные в ней мелкие частицы изменяют направление движения и покидают полость циклона через патрубок 2 в режиме гидротранспорта. Поскольку корпус подвержен абразивному изнашиванию, его покрывают изнутри износостойким материалом.

Достоинствами гидроциклонов являются их высокая производительность, малые габариты и отсутствие движущихся частей.

Смешивание сыпучих материалов — это процесс обратный классификации. Смешиванием, например, получают комплексное минеральное удобрение, составленное из отдельных компонентов.

Смешивание сухих сыпучих материалов проводят либо как предварительную операцию перед основным технологическим процессом (например, при получении бетона сначала готовят песчано-цементную смесь), либо как основной процесс изготовления конечного продукта с заданными свойствами.

На рис. 5.7 схематично показана конструкция *шнекового смесителя*. В корытообразном корпусе 5 вращается вал 6, на котором закреплены лопатки двух форм. Одни из них (лопатки 2) являются транспортирующими и выполнены с наклоном. Они перемещают смешиваемые компоненты от бункера 1 к выпускному окну 4. Между этими лопатками размещены перемешивающие лопатки 3 с продольными плоскостями. Эти лопатки перемешивают материал в направлении поперечном направлению движения потока. Совершаемое сложное движение обеспечивает эффективное смешивание компонентов.

Для смешивания густых и вязких масс применяют аппараты периодического действия с лопастными валками сложной формы.

Дозирование сыпучих материалов предусматривает равномерное поступление в аппарат исходных компонентов с

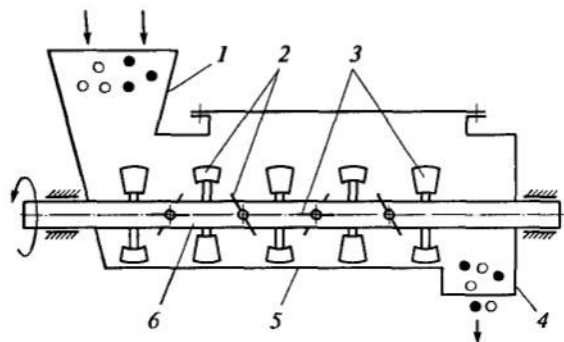


Рис. 5.7. Шнековый смеситель:

1 — бункер; 2 — транспортирующие лопатки; 3 — перемешивающие лопатки; 4 — выпускное окно; 5 — корпус; 6 — вал

заданным расходом. Выполнение этого условия обеспечивает получение высококачественного продукта.

Бункеры. Для бесперебойной подачи сыпучего материала требуется его накопление в бункере — емкости прямоугольной или цилиндрической формы, нижняя часть которой имеет форму соответственно усеченной пирамиды или усеченного конуса. Наклонные стенки обеспечивают ссыпание материала в выпускное отверстие (выпускной патрубков) бункера. Угол их наклона должен быть больше угла естественного откоса сыпучего материала. При плохой сыпучести (слеживаемости) материала возможно его за зависание или сводообразование. В этом случае бункеры оборудуют устройствами для ручного рыхления и механическими устройствами вибрационного действия. Возможна также подача сжатого воздуха под слежавшийся слой.

Выпускные патрубки бункеров снабжены плоскими или секторными *затворами* с ручным или электромеханическим приводом. Данные устройства позволяют выпускать материал из бункера порциями или грубо регулировать его непрерывную подачу.

Питатели. Это устройства, обеспечивающие непрерывную и равномерную выгрузку сыпучего материала из бункеров. Подача материала с заданным расходом называется *дозированием*, а соответствующие питатели — *дозаторами*. В дозаторах предусмотрена возможность регулирования расхода материала.

Если из бункера выгружают легкосыпучий материал, то возможно применение *ленточного питателя*, аналогичного ленточному транспортеру (см. гл. 3). При неподвижной ленте питателя на ней образуется конус из сыпучего материала. В таком состоянии сам материал служит «пробкой» для выпускного отверстия бункера, выполняя тем самым функции затвора.

При движении ленты высыпавшийся материал отводится («пробка» открывается), и на освободившееся место поступает материал из бункера. Пока лента движется, этот процесс происходит непрерывно. Расход материала из бункера можно регулировать величиной зазора между лентой и выходным патрубком.

Винтовые питатели, по принципу действия аналогичные винтовым транспортерам (см. гл. 3), используют для дозирования мелкозернистых неабразивных материалов и в том случае, если необходима герметизация аппарата.

В *тарельчатом питателе* (рис. 5.8) вращающийся горизонтальный диск (тарелка) 2 установлен с зазором по отношению к выпускному отверстию бункера 1. При выгрузке материала на неподвижную тарелку образуется коническая «пробка», а при вращении тарелки материал срезается ножом 3, углубленным в конический слой. На освобождающееся место из бункера непрерывно выгружается новая порция материала. Его расход можно регулировать величиной зазора или степенью углубления ножа в слой.

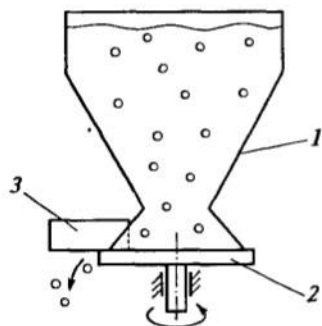


Рис. 5.8. Тарельчатый питатель:
1 — бункер; 2 — тарелка; 3 — нож

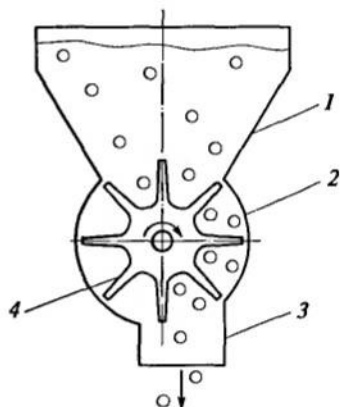


Рис. 5.9. Секторный питатель:
1 — загрузочная воронка; 2 — корпус; 3 — разгрузочное окно; 4 — лопастной барабан

В состав *секторного питателя* (рис. 5.9) входит цилиндрический корпус 2 с загрузочной воронкой 1 и разгрузочным окном (патрубком) 3. Внутри корпуса расположен барабан 4 с радиальными лопастями.

При неподвижном барабане питатель препятствует выходу материала и служит затвором. При вращении барабана (повороте сектора) материал, заполнивший сектор из воронки, высыпается в окно. Загрузка секторов происходит под действием собственного веса материала. Его расход регулируется частотой вращения барабана.

Секторные питатели применяют в тех процессах, при проведении которых необходимо герметизировать аппарат.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой классификация сыпучих материалов? С какой целью ее проводят?
2. Какой процесс называется грохочением? Каковы особенности и принцип действия известных вам конструкций грохотов?
3. На каком физическом явлении основан процесс гидравлической классификации? Какова природа действующих сил?
4. Как устроены и как действуют механические смесители сыпучих материалов?
5. В чем состоят особенности конструкций и принцип действия спирального классификатора и гидроциклона?
6. Как устроены и как действуют питатели сыпучих материалов?
7. В чем заключается задача дозирования сыпучих материалов? Какими средствами ее решают?

РАЗДЕЛ III
ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 6
ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ

6.1. Предмет гидравлики. Физические свойства жидкости

Гидравлика изучает законы равновесия и движения жидкостей и рассматривает их практическое приложение к производственным процессам.

Гидравлика зародилась в III в. до н.э., когда греческий ученый Архимед в «Трактате о плавающих телах» определил подъемную силу, действующую на тело, погруженное в жидкость.

Вплоть до XVIII в. гидравлика развивалась как прикладная наука. Великий ученый Леонардо да Винчи в XV в. проводил лабораторные опыты, изучая движение воды в каналах, через отверстия и водосливы. В XVII в. над вопросами гидростатики работали Г. Галилей и Б. Паскаль. Тогда же Э. Торричелли получил формулу, позволяющую рассчитать скорость истечения жидкости из отверстия, а И. Ньютон высказал гипотезу о наличии внутреннего трения в жидкости.

В конце XVIII в. в связи с потребностями развивающегося промышленного производства прикладной гидравликой занимались А. Шези, А. Дарси, Ю. Вейсбах и другие ученые и инженеры. Прикладная гидравлика давала решение частных задач движения жидкости в виде эмпирических (опытных) формул, применимых в условиях, аналогичных тем, при которых проводились опыты.

В середине XVIII в. трудами ученых — членов Петербургской академии наук Даниила Бернулли и Леонарда Эйлера было положено начало сугубо теоретической науке о равновесии и движении жидкости — *гидромеханике*. Основоположники гидромеханики в своих исследованиях использовали упрощенное представление о жидкости, пренебрегая ее вязкостью. Они ввели понятие *идеальной жидкости*. В гидромеханике выведены общие законы равновесия и движения идеальной жидкости.

Современная гидравлика — это наука, сочетающая методы теоретической гидромеханики и прикладной гидравлики. Решение общих уравнений гидромеханики корректируется результатами

опытов, которые получены при более тонком и углубленном экспериментальном изучении структуры движущейся жидкости. В XIX—XX вв. сближению параллельных ветвей гидравлики способствовали труды Н. П. Петрова, Н. Е. Жуковского, О. Рейнольдса, Л. Прандтля и других ученых.

Жидкость — это физическое тело со слабой связью между отдельными частицами. В жидкости частицы свободно перемещаются относительно друг друга, т. е. она обладает *текучестью*. В гидравлике жидкость представляют как сплошную среду, а под частицей понимают бесконечно малый элемент этой среды со всеми ее свойствами, но не рассматривают ее молекулярное строение. Из-за текучести жидкость не имеет собственной формы: она принимает форму сосуда, в который помещена.

В отличие от газов жидкости *малосжимаемы*: их объем почти не изменяется под действием внешних сил. Например, при повышении давления на одну атмосферу (100 кПа) объем воды уменьшается лишь на 1/20 000 долю.

В гидравлике жидкости различают по физическим свойствам — плотности и вязкости. *Плотность* ρ представляет собой отношение массы вещества m к объему V :

$$\rho = m/V.$$

Вода при температуре 4 °С имеет плотность 1000 кг/м³, керосин — 800 кг/м³ (15 °С), а ртуть — 13 560 кг/м³ (0 °С).

Вязкость — свойство жидкости оказывать сопротивление относительному скольжению (сдвигу) ее частиц или слоев. При относительному движению слоев жидкости возникают касательные механические напряжения. Согласно закону Ньютона значение касательного напряжения прямо пропорционально относительной скорости движущихся слоев и зависит от рода жидкости. Коэффициент пропорциональности называется *динамической вязкостью* μ и имеет единицу измерения Па · с. Динамическая вязкость зависит от рода жидкости, изменяется с температурой и практически не зависит от давления.

Существует также понятие *кинематической вязкости* ν , которая представляет собой отношение динамической вязкости к плотности данной жидкости:

$$\nu = \mu/\rho.$$

Единица измерения кинематической вязкости — м²/с.

6.2. Гидростатика. Основное уравнение гидростатики

В состоянии равновесия на жидкость действуют внешние силы двух видов: поверхностные и массовые.

Поверхностные силы пропорциональны площади той поверхности, по отношению к которой рассматривают их действие. Такая поверхность может находиться на границе раздела жидкости и газа или жидкости и твердого тела. Например, сила действия столба атмосферного воздуха на поверхность воды в пруду во много раз больше, чем на поверхность воды в стакане.

Массовые силы, по определению, пропорциональны массе жидкости. Их природа может быть различной. В гидравлике в качестве массовых сил рассматривают силы тяжести и инерции (в том числе центробежные силы). Например, железнодорожная цистерна начинает движение с территории завода с ускорением. При этом залитая в нее жидкость испытывает действие массовых сил: собственного веса и сил инерции, вызванных ускорением.

Суммарную внешнюю силу, являющуюся результатом действия поверхностных и массовых сил на единицу площади поверхности, называют *гидростатическим давлением* p :

$$p = F/S,$$

где S — площадь поверхности, m^2 , на которую действует сила F , H .

Единица измерения давления — H/m^2 , или Па (паскаль).

Гидростатическое давление обладает следующими свойствами. Во-первых, оно всегда действует перпендикулярно поверхности раздела и направлено внутрь объема жидкости. Это означает, что давление является сжимающим. Каждую частицу жидкости сжимают со всех сторон окружающие ее частицы. Во-вторых, гидростатическое давление в каждой данной точке жидкости одинаково по всем направлениям (независимо от ориентации площадки, на которую оно действует).

Давление может быть измерено относительно нулевого значения — абсолютного вакуума. В этом случае его называют *абсолютным*. В производственной практике понятие абсолютного давления применяют редко, например при расчете допустимой высоты всасывания насоса (см. гл. 7).

В большинстве других случаев давление удобно отсчитывать от атмосферного, представляющего собой реальную физическую величину в земных условиях. Атмосферное давление принимают за нулевое. Если давление больше атмосферного, то его называют *избыточным*. Состояние газа при давлении ниже атмосферного называют *вакуумом*. Можно считать, что вакуум

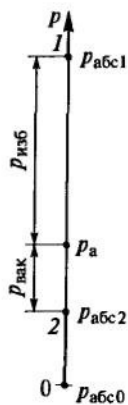


Рис. 6.1. Измерение давлений:

$P_{абс0}$ — уровень абсолютного вакуума; P_a — атмосферное давление (абсолютное); $P_{абс1}$, $P_{абс2}$ — значения абсолютного давления в точках 1 и 2; $P_{изб}$ — избыточное давление в точке 1; $P_{вак}$ — вакуумметрическое давление в точке 2

характеризуется отрицательным давлением по отношению к атмосферному. Понятия вакуума, абсолютного и избыточного давления проиллюстрированы на рис. 6.1.

Основное уравнение гидростатики. Это уравнение, позволяющее определить давление p в любой точке покоящейся жидкости. Его записывают в следующем виде:

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (6.1)$$

где p_0 — давление на поверхности жидкости (это может быть давление газа или поршня); g — ускорение свободного падения; h — расстояние от рассматриваемой точки до поверхности. Согласно *закону Паскаля* давление p_0 , создаваемое внешними силами на поверхности жидкости в замкнутом сосуде, передается одинаково во все точки жидкости. В соответствии с этим законом давление, действующее на поверхности жидкости, будет добавляться к давлению в каждой точке объема независимо от ее положения по глубине.

Действие закона Паскаля можно проследить на примере работы гидравлического пресса (рис. 6.2), предназначенного для получения больших усилий при прессовании материалов. Этот пресс включает в себя два цилиндра разного диаметра, соединенные трубой. В цилиндры помещены поршни. При воздействии силы F_1 на поршень меньшего диаметра с площадью сечения S_1 на жидкость будет оказано давление

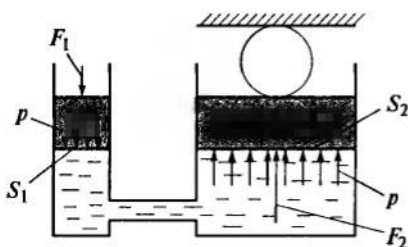
$$p = F_1/S_1.$$

По закону Паскаля это давление передается во все точки жидкости в замкнутом пространстве, в том числе на поверхность поршня сечением S_2 . Тогда сила воздействия на этот поршень

$$F_2 = pS_2.$$

Выразив p через силу F_1 , получим

$$F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1}.$$



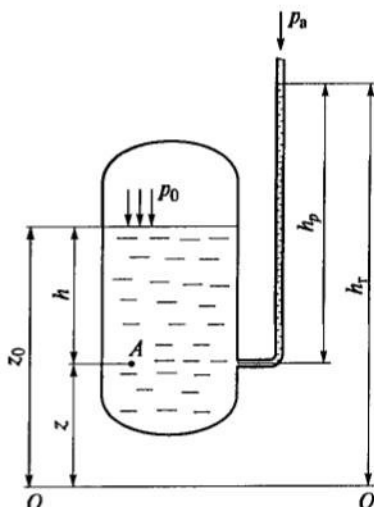
Таким образом, сила F_2 больше первоначально приложенной силы F_1 во столько раз, во сколько площадь S_2 превышает площадь S_1 .

Действие закона Паскаля используют и при проведении гидравлических испытаний технологических аппаратов, работающих под давлением. Небольшим усилием, приложенным вручную к

Рис. 6.2. Гидравлический пресс:
 S_1, S_2 — площади сечений поршней;
 F_1, F_2 — силы, действующие на поршни; p — давление

Рис. 6.3. Геометрическое изображение напоров:

$O-O$ — плоскость сравнения; p_a — атмосферное давление; p_0 — давление на поверхности жидкости; A — произвольная точка жидкости, расположенная на глубине h ; z — геометрический напор в точке A ; z_0 — геометрический напор на поверхности жидкости; h_p — пьезометрический напор; h_r — гидростатический напор



цилиндру с сечением малой площади, создают необходимое для испытаний значительное давление, которое по закону Паскаля передается через соединительные трубки и воздействует на все стенки корпуса испытываемого аппарата.

Если в практических расчетах оперировать избыточным давлением, полагая, что в открытом сосуде давление на поверхности жидкости равно нулю ($p_0 = 0$), то согласно формуле (6.1) давление на глубине h

$$p = \rho gh.$$

Горизонтальную плоскость, проведенную на произвольной высоте (там, где удобно), в гидравлике называют *плоскостью сравнения*.

Если от плоскости сравнения провести вертикаль до некоторой точки жидкости, например точки A на рис. 6.3, то ее высоту в гидравлике называют *геометрическим напором* z в точке A .

Если к сосуду на некоторой глубине (на уровне точки A) присоединить открытую сверху вертикальную трубку (ее называют *пьезометрической*), то жидкость поднимется в ней до определенной высоты. Эту высоту называют *пьезометрическим напором* h_p .

В сумме геометрический напор z и пьезометрический напор h_p образуют *гидростатический напор* h_r .

Приборы для измерения давления. По способу измерения давления приборы разделяют на жидкостные и механические. Простейшим *жидкостным прибором* является пьезометр — пьезометрическая трубка, снабженная шкалой (его конструкция соответствует схеме, приведенной на рис. 6.3). При известной глубине h точки присоединения пьезометра можно определить давление на поверхности p_0 :

$$p_0 = \rho g(h_p - h).$$

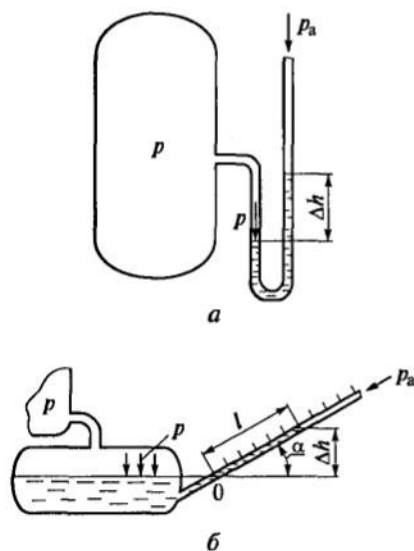


Рис. 6.4. Жидкостные приборы для измерения давления:

a — манометр; *b* — микроманометр; *p* — давление газа в сосуде; p_a — атмосферное давление; Δh — разность уровней жидкости; *l* — длина трубки, соответствующая Δh ; α — угол наклона трубки

Давление газа *p* в сосуде (рис. 6.4, *a*) можно определить с помощью U-образного жидкостного манометра:

$$p = \rho g \Delta h,$$

где Δh — разность уровней жидкости в манометре.

Для определения малых значений давления в сосуде используют микроманометр (рис. 6.4, *b*), который имеет наклонную трубку со шкалой. Вместо разности уровней Δh измеряют длину трубки *l*, соответствующую Δh , а давление находят по формуле

$$p = \rho g \Delta h = \rho g l \sin \alpha,$$

где α — угол наклона трубки.

В производственных условиях для измерения больших значений давления применяют компактные и прочные *механические манометры*. Эти приборы снабжены упругими механическими элементами — полыми изогнутыми пружинами или мембранами, которые деформируются при изменении давления. Перемещение упругих элементов передается стрелке, снабженной шкалой. Схемы таких механических манометров представлены на рис. 6.5.

Приборы для измерения вакуумметрического давления называют *вакуумметрами*. По конструкции и принципу действия они аналогичны описанным выше приборам. На шкалу вакуумметра нанесен знак минус, и прибор показывает отрицательное давление по отношению к атмосферному.

Пример. Какой силе должны противостоять болты крепления крышки люка-лаза в аппарате,

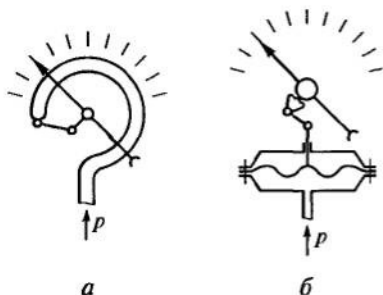
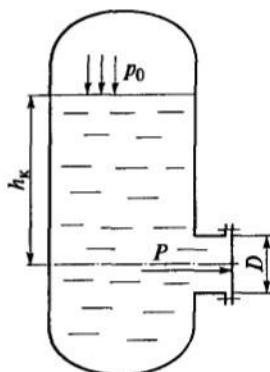


Рис. 6.5. Механические манометры: *a* — пружинный; *b* — мембранный; *p* — давление

Рис. 6.6. Схема аппарата с люком-лазом, работающего под давлением:

p_0 — давление на поверхности жидкости; P — сила, действующая на крышку; D — диаметр люка-лаза; h_k — расстояние от центра тяжести крышки до поверхности жидкости



работающем под давлением (рис. 6.6)? Сила P , действующая на плоскую крышку, равна произведению давления p_k в центре ее тяжести на площадь крышки S . С учетом формулы (6.1)

$$P = p_k S = (p_0 + \rho g h_k) S, \quad (6.2)$$

где h_k — расстояние от центра тяжести крышки до поверхности жидкости.

Общая формула (6.2) упрощается в двух частных случаях:

1) если аппарат открытый, то атмосферное давление p_0 действует на крышку как со стороны жидкости, так и снаружи. Соответствующие силы уравниваются друг друга, поэтому расчет выполняют без учета давления p_0 :

$$P = \rho g h_k S;$$

2) если давление p_0 на поверхности жидкости многократно превышает давление, создаваемое столбом жидкости (что имеет место в поршневых насосах, гидроцилиндрах объемного гидропривода, аппаратах, работающих при высоком давлении), то силу P определяют по формуле

$$P = p_0 S.$$

6.3. Кинематика и динамика жидкости

Движение жидкости в разных точках потока характеризуют двумя параметрами — скоростью и давлением. Если эти параметры в каждой точке потока не меняются во времени, то такое движение называют *установившимся*. В противном случае движение будет *неустановившимся*. Если при установившемся движении скорость жидкости постоянна по длине потока, то это движение *равномерное*, если же скорость меняется по длине потока, то движение *неравномерное*.

Во время открывания водопроводного вентиля движение воды неустановившееся: увеличиваются ее расход и скорость потока в трубе. Когда вентиль открыт, движение установившееся. При установившемся движении в цилиндрической водопроводной трубе

постоянного сечения движение равномерное. На расширяющемся участке трубы скорость жидкости уменьшается и движение становится неравномерным.

Если поток со всех сторон ограничен стенками и при этом не имеет свободной поверхности, то такое движение называется *напорным*; если свободная поверхность существует — то *безнапорным*. В водопроводных трубах движение напорное, а в оросительных каналах и реках — безнапорное.

Уравнение расхода. *Расход* — это количество жидкости, проходящей через данное сечение потока в единицу времени. Жидкости, сжимаемостью которых в гидравлике пренебрегают, характеризуют *объемным расходом* Q_V , м³/с (для газов, объем которых меняется с изменением давления, удобно использовать *массовый расход* G , кг/с).

В разных точках сечения трубы скорость частиц жидкости различна. Для удобства расчетов вводят понятие *средней скорости* v потока. Этот параметр отражает некоторое фиктивное — одинаковое во всех точках данного сечения — значение скорости.

Связь между расходом и средней скоростью потока устанавливает *уравнение расхода*:

$$Q_V = vS,$$

где S — площадь сечения потока.

Если по ходу движения потока изменяется площадь сечения канала (поток расширяется или сужается), то при неизменном расходе для двух различных сечений S_1 и S_2 выполняется следующее соотношение:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2. \quad (6.3)$$

Это уравнение называют *уравнением неразрывности* или уравнением постоянства расхода. Оно справедливо для установившегося движения. Неизменность расхода в разных сечениях в этом случае обусловлена несжимаемостью жидкости, непроницаемостью стенок трубы и неразрывностью (сплошностью) потока.

Из уравнения (6.3) следует, что средние скорости потока в разных сечениях обратно пропорциональны значениям площади сечений: $v_1/v_2 = S_2/S_1$. При расширении потока его средняя скорость уменьшается, и наоборот. Именно поэтому малое сечение насадки на конце гибкого рукава позволяет пожарным создать большую скорость струи и тем самым увеличить дальность ее выброса.

Режимы течения жидкостей. В 1882 г. английский ученый О. Рейнольдс проделал опыты, которые показали, что движущаяся жидкость характеризуется двумя режимами течения. Суть опытов состояла в том, что в поток жидкости в прозрачной трубе Рейнольдс добавлял тонкую струйку подкрашенной жидкости. Поведение этой

струи в разных опытах было неодинаковым. При малой скорости потока жидкости структура и форма струйки сохранялись неизменными вдоль потока; частицы в разных слоях двигались параллельно друг другу. Такой режим течения называют *ламинарным*. Увеличение скорости жидкости приводило к тому, что в потоке появлялись вихри, и подкрашенная струйка размывалась. Такой режим течения жидкости был назван *турбулентным*.

Рейнольдс установил, что на состояние движущейся жидкости влияют такие физические величины, как скорость потока v , диаметр трубы d , плотность ρ и вязкость μ жидкости. Комплекс этих величин образует число Рейнольдса:

$$Re = vdp/\mu.$$

Это безразмерный показатель, по значению которого можно судить о режиме течения жидкости в том или ином случае. Если число Рейнольдса меньше 2320, то режим течения ламинарный; если оно больше этого критического значения, то режим турбулентный.

Уравнение Бернулли. Рассмотрим частицу жидкости, находящуюся в некотором сечении потока. Ее полная энергия представляет собой сумму потенциальной и кинетической энергии. Первая составляющая потенциальной энергии соответствует работе, затраченной на подъем частицы весом mg , находящейся в поле сил тяжести, на высоту z над плоскостью сравнения $O-O$. Это потенциальная энергия положения.

Вторая составляющая потенциальной энергии связана с гидростатическим давлением, создающим напряжение сжатия в рассматриваемой частице. Если в жидкость поместить пьезометрическую трубку, то данная частица под действием сжимающего усилия будет вытеснена на высоту h_p (пьезометрическую высоту). При этом она получит потенциальную энергию, эквивалентную работе в поле сил тяжести. Это потенциальная энергия давления.

Полная потенциальная энергия частицы весом mg может быть представлена в виде

$$E_n = mgz + mgh_p = mg(z + h_p) = mg[z + p/(\rho g)].$$

Кинетическая энергия частицы массой m

$$E_k = mv^2/2.$$

Суммарная энергия частицы жидкости в некотором сечении потока

$$E = E_n + E_k = mg[z + p/(\rho g)] + mv^2/2. \quad (6.4)$$

Энергия потока в этом сечении в целом будет суммой энергий всех частиц жидкости, протекающих через данное сечение. Для

сравнения составных частей энергии, входящих в уравнение (6.4), в разных сечениях потока используют понятие *удельной энергии* — энергии, отнесенной к единице веса жидкости. Для получения удельной энергии частицы массой m разделим ее полную энергию E на вес:

$$E/(mg) = z + p/(\rho g) + v^2/(2g),$$

где z — удельная потенциальная энергия положения; $p/(\rho g)$ — удельная потенциальная энергия давления; $v^2/(2g)$ — удельная кинетическая энергия (скоростной напор).

Эта формула справедлива и для всего потока.

Из закона сохранения энергии следует, что удельная энергия по длине потока не меняется:

$$z + p/(\rho g) + v^2/(2g) = \text{const.} \quad (6.5)$$

Уравнение (6.5) называют *уравнением Бернулли*. При его выводе использовано представление об идеальной (не имеющей вязкости) жидкости. Кроме того, это уравнение справедливо при следующих допущениях: жидкость однородна и несжимаема, ее движение установившееся, из всех массовых сил на нее действует только сила тяжести (жидкость движется в поле сил тяжести). Именно такие условия характерны для большинства производственных технологических процессов.

Обычно уравнение Бернулли записывают для двух сечений (1—1 и 2—2) данного потока в следующем виде:

$$z_1 + p_1/(\rho g) + v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/(\rho g) + v_2^2/(2g).$$

На рис. 6.7 приведена геометрическая интерпретация уравнения Бернулли.

Значения высоты частицы жидкости над плоскостью сравнения $O—O$ — это *геометрические напоры* z_1 и z_2 . Существуют технические средства для наблюдения и измерения величин, представленных и другими слагаемыми уравнения Бернулли.

Пьезометрические напоры $p_1/(\rho g)$ и $p_2/(\rho g)$ можно измерить с помощью пьезометрических трубок: их встраивают в поток жидкости, причем открытый конец такой трубки, воспринимающей давление в потоке, должен быть направлен перпендикулярно направлению движения жидкости.

Если же в сечения потока жидкости ввести вертикальные трубки, один конец которых изогнут навстречу потоку, то кинетическая энергия частиц, набегающих на открытые концы трубок, преобразуется в потенциальную энергию давления, под действием которого жидкость в этих трубках поднимется выше, чем в пьезометрических. Это повышение высоты жидкости называют *скоростным напором*. Наблюдаемая разница уровней жидкости соответствует удельной кинетической энергии $v_1^2/(2g)$ и $v_2^2/(2g)$. Такая

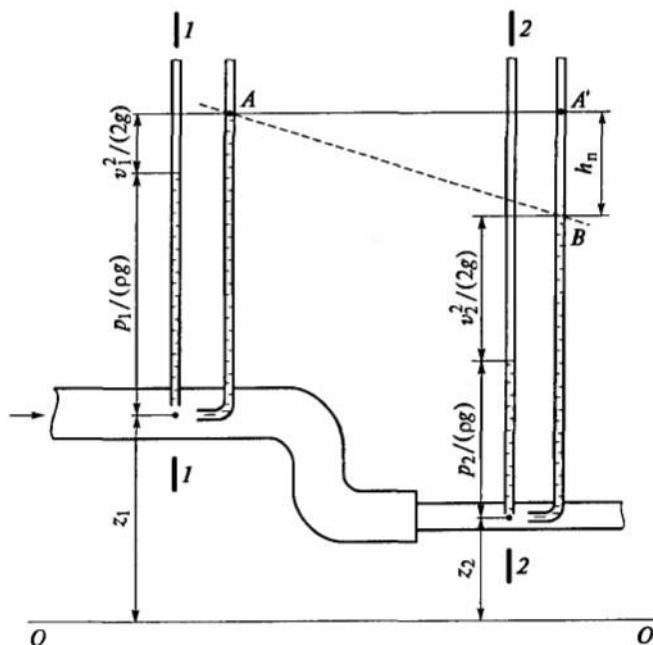


Рис. 6.7. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли:

$O-O$ — плоскость сравнения; $1-1$, $2-2$ — сечения потока жидкости; z_1 , z_2 — геометрические напоры; $p_1/(\rho g)$, $p_2/(\rho g)$ — пьезометрические напоры; $v_1^2/(2g)$, $v_2^2/(2g)$ — скоростные напоры; h_n — потерянный напор; AA' , BB' — линии полного напора соответственно для идеальной и реальной жидкостей

Г-образная трубка называется трубкой Пито или трубкой полного напора (в XVIII в. французский инженер А. Пито применил ее для измерения скорости воды в канале).

Для идеальной жидкости сумма трех отрезков в обоих сечениях одинакова. В этом случае линия полного напора AA' горизонтальна.

В реальной, вязкой жидкости при ее движении от сечения $1-1$ до сечения $2-2$ часть энергии потока затрачивается на преодоление сил трения, тормозящих движение. Удельная энергия в сечении $2-2$ станет меньше на величину *потерь удельной энергии*. В действительности энергия не пропала и закон сохранения энергии не нарушен: часть механической энергии преобразовалась во внутреннюю энергию жидкости — тепловую энергию. Другими словами, жидкость нагрелась за счет трения. Потерянную часть удельной энергии — *потерянный напор* — обозначают символом h_n .

Уравнение Бернулли для потока реальной жидкости имеет вид

$$z_1 + p_1/(\rho g) + v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/(\rho g) + v_2^2/(2g) + h_n. \quad (6.6)$$

Для реальной жидкости линия полного напора с учетом его потерь будет наклонной — это линия AB на рис. 6.7. Уравнение (6.6) находит широкое практическое применение при расчетах реальных потоков жидкости в трубопроводах.

6.4. Движение жидкостей по трубам

Как следует из уравнения Бернулли, для компенсации потерь энергии (потерь напора) энергия в начале потока должна быть больше, чем в конце.

Источники энергии потока жидкости. Начальную энергию создают в форме удельной потенциальной энергии положения (геометрического напора) либо удельной потенциальной энергии давления (пьезометрического напора).

Потенциальную энергию положения запасают в напорных баках (рис. 6.8, *а*), поднимая жидкость в поле сил тяжести на некоторую высоту z_0 , которая и является начальным геометрическим напором.

Если на поверхности жидкости в замкнутом аппарате создать давление газа p_0 (рис. 6.8, *б*), то удельная потенциальная энергия давления $p_0/(\rho g)$ также обеспечит движение жидкости в трубопроводе. Такие аппараты называют *монтежю*.

Наиболее часто энергию в начале трубопровода создают насосом (рис. 6.8, *в*). *Насос* — это гидравлическая машина, предназначенная для передачи энергии потоку жидкости. Основная доля этой энергии — потенциальная энергия давления и частично — кинетическая.

Потери напора по длине потока. Когда передвигают книгу по столу, то затрачивают энергию на преодоление силы трения о стол. При движении жидкости энергия будет затрачиваться на пре-

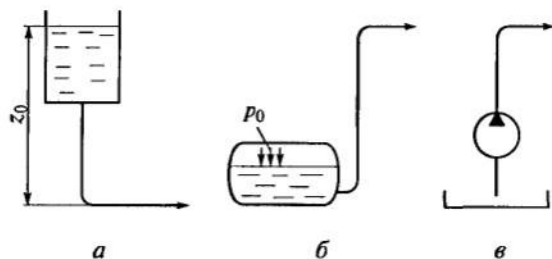


Рис. 6.8. Источники энергии, обеспечивающие движение жидкости по трубам:

а — напорный бак; *б* — монтежю; *в* — насос; z_0 — геометрический напор; p_0 — давление на поверхности жидкости

одоление сил трения в жидкости. Экспериментально доказано, что при движении жидкости на стенке трубы образуется тончайший неподвижный слой этой жидкости. Поэтому даже на стенке трубы сохраняется жидкостное трение.

Потери напора $h_{\text{дл}}$ на трение по длине трубы определяют по формуле

$$h_{\text{дл}} = \lambda_{\text{т}} \frac{l v^2}{d 2g},$$

где $\lambda_{\text{т}}$ — коэффициент трения; l — длина трубы; d — ее диаметр; $v^2/(2g)$ — скоростной напор.

Очевидно, что чем больше длина трубы l , тем значительнее затраты энергии (напора) на преодоление трения. И наоборот, с увеличением диаметра трубы d затраты энергии уменьшаются, так как поверхность трения становится относительно меньше.

Значения коэффициента трения $\lambda_{\text{т}}$, приводимые в справочниках, зависят от режима течения жидкости, определяемого числом Рейнольдса, а в случае развитого турбулентного течения — и от степени шероховатости трубы.

Влияние шероховатости на величину потерь напора обусловлено образованием вихрей на выступах неровностей трубы, что требует затрат некоторой доли энергии потока. Различают абсолютную и относительную шероховатость.

Абсолютная шероховатость (e) — это высота выступов неровностей на стенках трубы. Она зависит от материала и способа изготовления трубы. Значения абсолютной шероховатости приводятся в справочниках.

Относительная шероховатость — это отношение абсолютной шероховатости к диаметру трубы (e/d). При определении коэффициента трения обычно используют обратную величину — *характеристику шероховатости* (d/e).

При увеличении шероховатости возрастает число вихрей и повышаются потери напора. Например, потери напора в чугунной трубе больше, чем в стеклянной, при прочих равных условиях.

Потери напора на местных сопротивлениях. В трубопроводе скорость жидкости может изменяться по величине и направлению из-за наличия поворотов канала, сужений, установки различных регулирующих устройств и т. д. На таких участках, называемых *местными гидравлическими сопротивлениями*, вследствие инерции жидкость отрывается от стенок и образуются вихревые зоны. На формирование вихрей затрачивается часть энергии потока. Примерами местных сопротивлений могут служить внезапное расширение потока и плавный поворот (отвод) трубы, показанные на рис. 6.9. В первом случае изменяется значение скорости, во втором — ее направление.

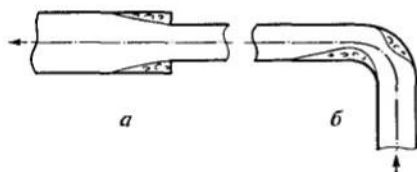


Рис. 6.9. Примеры местных гидравлических сопротивлений:

a — внезапное расширение потока;
б — плавный поворот (отвод) трубы

Потери напора $h_{м.с}$ на отдельном местном сопротивлении определяют по формуле

$$h_{м.с} = \xi v^2 / (2g),$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления. Величина ξ зависит от вида местного гидравлического сопротивления (ее значения опубликованы в справочной литературе).

Полные потери напора в трубопроводе. Производственные трубопроводы разнообразны как по расположению в пространстве, так и по оснащению их устройствами управления и вспомогательным оборудованием.

Устройства управления служат для регулирования расхода жидкости или полного перекрытия потока (кран, вентиль, задвижка), ограничения давления в трубопроводе (предохранительный клапан), пропускания жидкости лишь в одном направлении (обратный клапан) и других целей.

К *вспомогательным устройствам*, устанавливаемым на трубопроводах, относятся очистители жидкости (фильтры), гидроаккумуляторы (устройства для погашения гидравлического удара) и др.

Все элементы трубопроводов на гидравлических схемах имеют условные стандартные изображения. Саму трубу изображают сплошной линией.

На рис. 6.10 представлен пример схемы простого трубопровода. Его начало помечено цифрой 1, а конец — цифрой 2. Высота подъема жидкости обозначена H_r . Движение жидкости по трубопроводу сопровождается потерями напора одновременно по длине и на

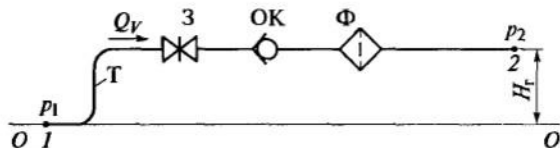


Рис. 6.10. Пример схемы простого трубопровода:

1, 2 — соответственно начало и конец трубопровода; p_1, p_2 — давления; Т — трубопровод (гидролиния); 3 — задвижка; ОК — обратный клапан; Ф — фильтр; H_r — высота подъема жидкости; Q_v — объемный расход жидкости

местных сопротивлений. Их суммирование позволяет определить полные потери напора h_n в трубопроводе. Для приведенной схемы

$$h_n = h_{дл} + 2h_{от} + h_3 + h_{ок} + h_{\phi} + h_{вых},$$

где $h_{дл}$ — потери напора по длине (на трение); $h_{от}$ — потери на одном отводе — плавном повороте (всего их два); h_3 , $h_{ок}$, h_{ϕ} — на преодоление сопротивления трубопроводной арматуры — задвижки, обратного клапана и фильтра; $h_{вых}$ — потери напора на выходе из трубы в резервуар. Заметим, что место выхода из трубы является частным случаем внезапного расширения, когда скорость жидкости падает до нуля (в резервуаре).

Потребный напор. Пьезометрический напор в начале трубопровода ($h_{p1} = p_1/(\rho g)$), необходимый для пропускания по нему жидкости с заданным расходом, называют *потребным напором* ($H_{потр}$). Исходя из его значения подбирают марку насоса.

Обеспечение потребного напора (удельной энергии) в трубопроводе сопряжено с подъемом жидкости на высоту H_r , созданием необходимого пьезометрического напора в конце трубопровода ($h_{p2} = p_2/(\rho g)$) и преодолением общих потерь напора h_n в трубопроводе. Эти затраты удельной энергии можно представить в следующем виде:

$$H_{потр} = H_r + p_2/(\rho g) + h_n. \quad (6.7)$$

Трубопровод, схема которого приведена на рис. 6.10, называют *простым*, так как он не имеет ответвлений. Трубопроводы с ответвлениями называют *сложными*.

В производственной практике применяют два основных вида сложных трубопроводов: с параллельным соединением труб и сложный тупиковый трубопровод.

Пример схемы *параллельного соединения труб* представлен на рис. 6.11. Здесь общий магистральный поток жидкости с расходом Q_V разделяется в точке M на параллельные потоки с расходами в ветвях, равными Q_{V1} и Q_{V2} . В точке N потоки сливаются. Очевидно, что расход в магистрали равен сумме расходов в ветвях:

$$Q_V = Q_{V1} + Q_{V2}.$$

Потери напора в ветвях одинаковы, так как они представляют собой разность напоров в точках M и N , общих для обеих ветвей:

$$h_{n1} = h_{n2} = H_M - H_N.$$

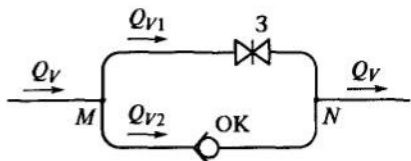


Рис. 6.11. Пример схемы параллельного соединения труб:

M , N — точки разделения и соединения потока жидкости; Q_V , Q_{V1} , Q_{V2} — расходы жидкости в общем магистральном потоке и ветвях; 3 — задвижка; ОК — обратный клапан

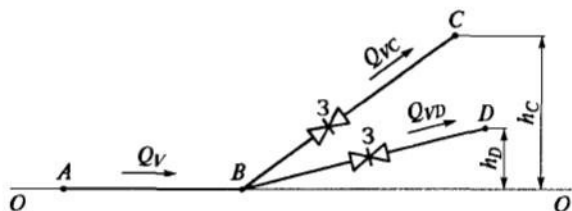


Рис. 6.12. Пример схемы сложного тупикового трубопровода:

AB — магистраль; BC, CD — ветви; Q_V — расход жидкости в магистрали; Q_{VC}, Q_{VD} — расходы жидкости в ветвях; h_C, h_D — высота конечных точек ветвей; 3 — задвижка

Это равенство справедливо, даже если ветви имеют неодинаковую длину и диаметр, а также разные местные гидравлические сопротивления. При этом значения расходов Q_{V1} и Q_{V2} устанавливаются автоматически.

В сложном тупиковом трубопроводе (рис. 6.12) магистральный поток (участок AB) разделяется на два потока (ветви BC и BD). Очевидно, что сумма расходов в ветвях трубопровода равна расходу в магистрали:

$$Q_V = Q_{VC} + Q_{VD}.$$

При решении практических задач обычно известны расходы в ветвях, напоры в конечных точках (H_C и H_D) и пространственное размещение трубопровода, включая высоты конечных точек (h_C и h_D). Кроме того, известны геометрические параметры (длина и диаметр) труб, коэффициенты местных сопротивлений и свойства жидкости (плотность и вязкость). Общая задача, как правило, сводится к определению потребного напора $H_{\text{потр}A}$ в точке A . Его значение, а также расход Q_V нужно знать для подбора насоса.

При определении потребного напора $H_{\text{потр}A}$ весь сложный трубопровод разбивают на простые участки (AB, BC и BD) и находят необходимые параметры в отдельных точках схемы, начиная рассмотрение с конечных точек (C и D) и двигаясь навстречу потоку.

На приведенной схеме (см. рис. 6.12) напор в точке B одинаков для простых участков BC и BD . При разных расходах и иных параметрах ветвей расчетные значения потребного напора $H_{\text{потр}B}$ (см. формулу (6.7)) для ветвей неодинаковы. Для проведения дальнейших расчетов выбирают наибольшее из полученных значений $H_{\text{потр}B}$.

При определении потребного напора в начале магистрали $H_{\text{потр}A}$ из схемы условно отбрасывают ветви BC и BD . Далее расчет проводят, как для простого трубопровода AB при известном напоре в конце его, равном $H_{\text{потр}B}$.

Для достижения требуемых расходов Q_{VC} и Q_{VD} в ветвях или получения необходимого соотношения этих расходов используют задвижки 3, встроенные в ветви.

Устройства для измерения расхода. На производственных установках расход жидкости измеряют с помощью сужающих устройств — дроссельных расходомеров. Наиболее простое по конструкции и широко распространенное устройство — *диафрагма*. Схема измерения расхода с помощью диафрагмы приведена на рис. 6.13.

Диафрагма представляет собой диск с отверстием определенной формы. Ее зажимают между усреднительными камерами, которые необходимы для повышения точности измерения. К этим камерам подсоединяют дифференциальный манометр для измерения разности давлений до и после диафрагмы.

В сечении 1—1, до сужения потока, его скорость равна v_1 , а давление в этом сечении — p_1 . При сужении потока в сечении 2—2 его скорость возрастает до величины v_2 . Другими словами, увеличивается скоростной напор, или удельная кинетическая энергия. Согласно уравнению Бернулли давление в сечении 2—2 становится меньше, чем в сечении 1—1. Появляется разность давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ и соответствующая ей разность уровней жидкости Δh , измеряемая манометром.

Зависимость разности давлений от расхода жидкости представляют графически в форме градуировочной кривой, прилагаемой

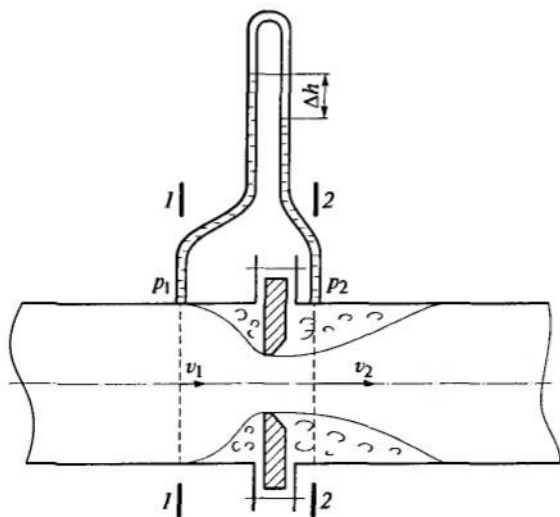


Рис. 6.13. Схема измерения расхода с помощью диафрагмы:

1—1, 2—2 — сечения потока; p_1 , p_2 и v_1 , v_2 — соответственно давления в жидкости и скорости потоков в указанных сечениях; Δh — разность уровней жидкости в дифференциальном манометре

к каждой конкретной диафрагме. С помощью такой кривой по показаниям прибора можно определить расход жидкости.

Гидравлический удар. Явление гидравлического удара возникает в трубопроводах при резкой остановке потока жидкости. До сих пор мы пренебрегали ее сжимаемостью, считая, что при изменении давления объем жидкости не меняется. Но при гидравлическом ударе пренебрегать этим свойством жидкости нельзя.

Как возникает гидравлический удар? Рассмотрим простейшую трубопроводную схему (рис. 6.14). В горизонтальной трубе 2 жидкость движется под действием постоянного геометрического напора z_0 , создаваемого в водонапорной башне 1. При этом давление на входе в трубу также постоянно и равно $p = \rho g z_0$. На трубопроводе установлен кран К, с помощью которого можно перекрыть поток.

При резком закрывании крана внезапно остановится та часть жидкости, которая находится в слое толщиной Δl , прилегающем к крану. Остальная часть жидкости по инерции продолжает движение, сжимая остановившийся слой. При сжатии в слое возрастает давление. Останавливается следующий слой и т.д. Происходит сжатие слоев и повышение давления в направлении от крана ко входу в трубу — распространяется «положительная» волна давления. Ее скорость соответствует скорости звука — скорости распространения упругих колебаний в данной жидкости.

Наконец, вся жидкость в трубе остановилась. Давление в ней повысилось и стало больше начального значения на входе в трубу. Возникла разность давлений, под действием которой жидкость потекла обратно, начиная со слоя, примыкающего ко входу в трубу. При оттоке жидкости в трубе понижается давление. Образуется «отрицательная» волна давления, распространяющаяся со скоростью звука. Смена давлений в трубе происходит как колебательный процесс с постепенным затуханием до полной остановки жидкости.

Давление, возникающее в трубе при полной остановке потока, определяют по формуле Жуковского

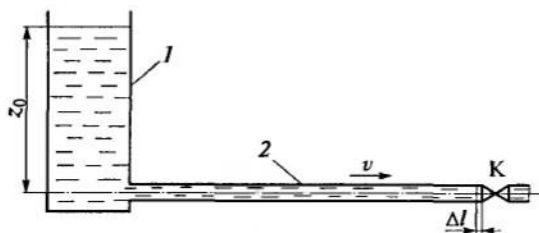


Рис. 6.14. Схема возникновения гидравлического удара в трубе:

1 — водонапорная башня; 2 — труба; К — кран; z_0 — геометрический напор; v — скорость потока; Δl — толщина остановившегося слоя жидкости

$$p = \rho v c,$$

где v — начальная скорость потока; c — скорость звука в данной жидкости.

В качестве примера определим давление, возникающее в трубе в результате гидравлического удара, если жидкость (вода) имеет плотность $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ и начальную скорость движения $v = 2 \text{ м/с}$. Скорость звука в воде примем равной $c = 1500 \text{ м/с}$. Тогда давление составит $p = \rho v c = 1000 \cdot 2 \cdot 1500 = 3\,000\,000 \text{ Па}$ (3 МПа). Если предположить, что труба рассчитана на работу при давлении 0,6 МПа, то, естественно, при гидравлическом ударе она будет разрушена.

Как можно предотвратить возникновение гидравлического удара? Одним из способов его предупреждения является установка вместо крана, резко перекрывающего поток, вентиля или задвижки. Конструктивно они выполнены так, что останавливают поток плавно, уменьшая скорость жидкости постепенно. В этом случае может возникнуть лишь так называемый непрямой гидравлический удар с незначительным повышением давления.

Если по требованиям технологии производства или техники безопасности резкая остановка потока жидкости необходима, то на трубопроводе можно установить специальное устройство — гидроаккумулятор (воздушный колпак). При внезапном повышении давления газ в полости гидроаккумулятора сжимается, и жидкость поступает в эту полость, что предотвращает ее сжатие в трубе.

Контрольные вопросы

1. Что изучает гидравлика?
2. В чем состоит особенность жидкости как физического тела?
3. Какие физические свойства жидкости учитывают в гидравлике?
4. Что такое гидростатическое давление? В каких единицах его измеряют? Каковы его свойства?
5. Какой параметр рассчитывают с помощью основного уравнения гидростатики? Как изменяется давление в жидкости с увеличением глубины? В чем заключается закон Паскаля?
6. От чего зависит сила давления жидкости на плоскую стенку?
7. Что такое расход жидкости? Как он зависит от скорости потока и площади его поперечного сечения?
8. Чем отличается ламинарный режим течения жидкости от турбулентного? От каких физических параметров зависит возникновение того или иного режима?
9. В чем заключается физическое (энергетическое) толкование уравнения Бернулли?
10. С помощью каких устройств можно на практике измерять величины, входящие в уравнение Бернулли?

11. В чем состоит различие уравнений Бернулли для реальной и идеальной жидкостей?

12. Назовите возможные источники энергии для перемещения жидкости по трубам.

13. От чего зависят потери напора (удельной энергии) по длине потока?

14. Какие участки трубопровода называют местными гидравлическими сопротивлениями? От чего зависят потери напора (удельной энергии) на преодоление этих сопротивлений?

15. В чем состоит принцип сложения потерь напора?

16. Что такое потребный напор? От чего он зависит?

17. Какие устройства используют для измерения расхода жидкости в трубопроводе?

18. Какова причина возникновения гидравлического удара в трубах? Как его предотвращают?

Глава 7

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

7.1. Классификация и параметры работы насосов.

Насосная установка

В химическом производстве большинство технологических процессов происходит с участием жидких веществ. Это и сырье, которое подают со склада на технологическую установку, и промежуточные продукты, перемещаемые между аппаратами, установками и цехами завода, а также конечные продукты, доставляемые в емкости склада готовой продукции. На все перемещения жидкостей как по горизонтали, так и по вертикали необходимо затратить энергию. Наиболее распространенным источником энергии является насос, создающий напорный поток жидкости.

Классификация насосов, применяемых в химическом производстве, приведена на рис. 7.1.

Лопастные и объемные насосы принципиально различаются по *виду энергии, сообщаемой жидкости* в момент ее передачи.

Лопастные насосы — это устройства кинетического действия: жидкость в рабочей части насоса приобретает большую скорость. В дальнейшем кинетическая энергия преобразуется в потенциальную — энергию давления на выходе из насоса.

В *объемных* насосах жидкость сразу получает потенциальную энергию в форме давления. Во всех насосах этого типа образуются замкнутые полости переменного объема. Жидкость в замкнутом пространстве подвержена действию силы, исходящей от рабочего органа той или иной конструкции.



Рис. 7.1. Классификация насосов, применяемых в химическом производстве

Насосы также классифицируют по *роду перекачиваемой жидкости* (насосы общего назначения для горячих нефтепродуктов, конденсатные, химические и др.).

Работу любого насоса характеризуют следующие основные параметры.

Подача насоса Q_V , м³/с, — это объем жидкости, подаваемой в напорный (выходной) трубопровод в единицу времени.

Напор насоса H_n , м, — это удельная энергия, сообщенная жидкости в насосе. Термин «удельная» здесь означает, что энергия отнесена к единице веса жидкости. Иногда вместо напора насоса (например, в объемном гидроприводе) удобнее использовать величину, называемую *давлением насоса* p_n , Па.

Применительно к насосу различают два понятия мощности, Вт: *полезная* N_n — мощность, сообщенная жидкости в насосе, и *потребляемая* N — мощность, подведенная к насосу от двигателя.

Потребляемая мощность насоса больше полезной, так как часть ее теряется внутри насоса. Долю полезной мощности по отношению к потребляемой характеризует безразмерная величина, называемая *коэффициентом полезного действия (КПД)* η :

$$\eta = N_n/N.$$

Мощность, потребляемая насосом, с учетом его КПД составляет

$$N = \rho g Q_V H_n / \eta.$$

Существует три вида потерь энергии в насосе:

- *объемные* потери — возникают вследствие разности напоров в полости нагнетания и полости всасывания насоса (часть жидкости возвращается в полость всасывания через негерметичные участки соединений между подвижными и неподвижными деталями насоса, на что бесполезно расходуется подводимая к нему энергия);
- *гидравлические* потери — связаны с движением жидкости внутри насоса (аналогичны потерям энергии при движении жидкости по трубам);

• *потери на трение* — возникают между подвижными и неподвижными деталями насоса (например, трение в подшипниках вала, сальниковом уплотнении вала, трение поршня о цилиндр в поршневом насосе и т. п.).

Чтобы обеспечить перемещение жидкости, насос монтируют совместно с другим оборудованием по определенной схеме, создавая *насосную установку*. В схему также входят резервуары (сосуды, емкости), всасывающий и напорный трубопроводы, запорно-регулирующая арматура и другие гидроаппараты. Различают исходные и напорные резервуары. Пример такой схемы приведен на рис. 7.2.

Насос 4 выкачивает жидкость из исходного резервуара 1 (в данном примере это открытый аппарат) по всасывающей трубе 2 и подает ее по напорной трубе 6 в резервуар 8 (здесь это аппарат, работающий при избыточном давлении). Задвижка 7 служит для регулирования подачи насоса, приборы 5 (манометр) и 3 (вакуумметр) служат для определения напора, создаваемого насосом.

Напор насоса H_n в насосной установке затрачивается на подъем жидкости на высоту H_r , которая является суммой высоты всасы-

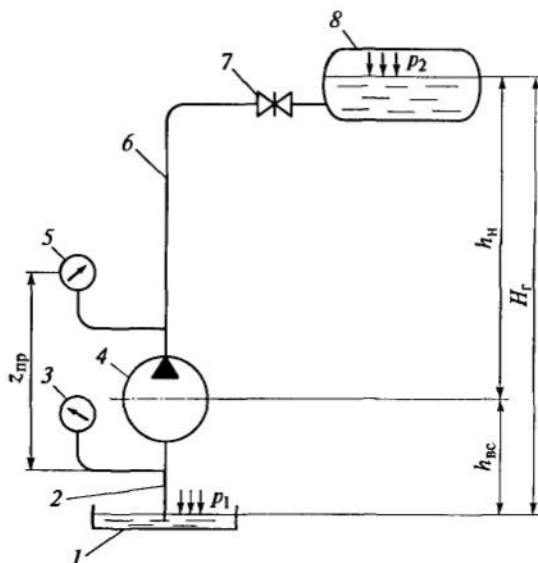


Рис. 7.2. Схема насосной установки:

1 — исходный резервуар с жидкостью; 2 — всасывающая труба; 3 — вакуумметр; 4 — насос; 5 — манометр; 6 — напорная труба; 7 — задвижка; 8 — напорный резервуар; $z_{пр}$ — расстояние между приборами; p_1 и p_2 — давления в исходном и напорном сосудах; $h_{вс}$ — высота всасывания; $h_{н}$ — высота нагнетания; H_r — высота подъема жидкости

вания h_{nc} и высоты нагнетания $h_{нн}$, обеспечение разности напоров $(p_2 - p_1)/(\rho g)$ в сосудах и составляющей $h_{пн}$ общего напора, необходимой для преодоления гидравлического сопротивления во всасывающей и напорной трубах. Таким образом, напор насоса можно выразить через параметры насосной установки с помощью следующей формулы:

$$H_{нн} = H_r + (p_2 - p_1)/(\rho g) + h_{пн}.$$

Напор насоса $H_{нн}$ определяют по показаниям манометра p_m и вакуумметра p_v , обычно пренебрегая разностью скоростных напоров в напорной и всасывающей линиях ввиду их малости:

$$H_{нн} = (p_m + p_v)/(\rho g) + z_{пр},$$

где $z_{пр}$ — расстояние между приборами по вертикали, которое выпадает из измерений. В некоторых конкретных схемах эта величина может быть пренебрежимо малой.

7.2. Центробежные насосы

Центробежные насосы наиболее широко распространены в химическом производстве благодаря простоте конструкции и обслуживанию. Они работают при высокой частоте вращения вала, поэтому промежуточная передача (ременная или редуктор) между валом двигателя и валом насоса отсутствует. Кроме того, у центробежных насосов довольно высокий КПД.

Недостатком центробежных насосов является наличие зависимости развиваемого напора от подачи, что затрудняет регулирование их параметров.

Устройство и принцип действия. На рис. 7.3 представлена схема центробежного консольного насоса типа К. Указанное название насоса обусловлено тем, что его рабочее колесо закреплено на свободном конце вала b — консоли. Крепление вала в подшипниках выполнено с другой его стороны (на схеме узел подшипников не показан).

Рабочее колесо состоит из двух дисков: переднего 2 и заднего 3 , между которыми находятся рабочие лопасти 4 криволинейной формы. В переднем диске имеется всасывающее окно 1 для ввода жидкости в рабочее колесо. Задний диск переходит в ступицу 5 для установки колеса на вал. Крепление ступицы на валу осуществляют с помощью гайки-обтекателя 8 , которая также участвует в формировании плавного, без завихрений, потока на входе в рабочий канал колеса.

Насос работает следующим образом. Рабочее колесо, закрепленное на валу, вращается с большой угловой скоростью. Жидкость, залитая в корпус 7 насоса перед пуском, под воздействием

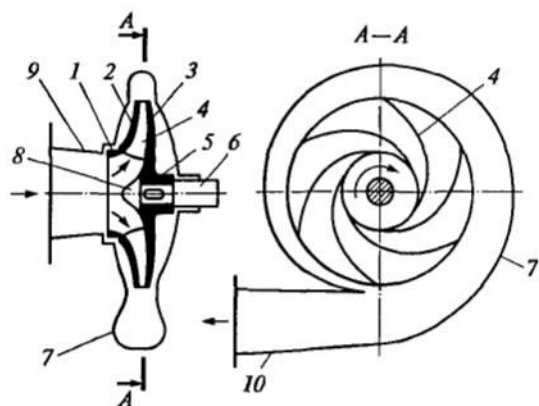


Рис. 7.3. Центробежный консольный насос:

1 — всасывающее окно; 2 — передний диск; 3 — задний диск; 4 — лопасть; 5 — ступица; 6 — вал; 7 — корпус; 8 — гайка-обтекатель; 9 — всасывающий патрубок; 10 — выходной патрубок

лопастей увлекается во вращательное движение. Центробежные силы заставляют ее двигаться по межлопастным рабочим каналам от центра колеса к его периферии.

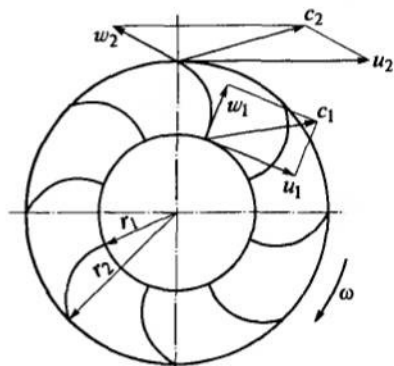
Покинув рабочее колесо, жидкость продолжает движение по каналу в корпусе к выходному патрубку 10. При ее оттоке в центральной (присоединительной) части насоса понижается давление. Образуется разность давлений на поверхности жидкости в исходном резервуаре и в центре насоса. За счет этой разности давлений жидкость поднимается по всасывающей трубе и через всасывающий патрубок 9 поступает в полость насоса, занимая место жидкости, покидающей колесо. Этот процесс происходит непрерывно без нарушения сплошности потока.

Кинетическая энергия жидкости в рабочем колесе увеличивается, поскольку возрастает ее скорость в рабочем канале (рис. 7.4). Жидкость, находящаяся в рабочем канале, движется по окружности с линейной скоростью u и одновременно относительно стенок лопастей вдоль канала со скоростью w . Векторная сумма этих двух составляющих представляет собой абсолютную скорость c жидкости. На рис. 7.4 эти скорости показаны на входе в рабочий канал с индексом 1 и на выходе из него — с индексом 2.

Рабочее колесо выполнено таким образом, чтобы значение относительной скорости w не изменялось при движении жидкости от входа к выходу. Линейная же скорость ($u = \omega/r$, где ω — угловая скорость колеса) с увеличением радиуса от r_1 до r_2 возрастает ($u_2 > u_1$). При увеличении линейной скорости возрастает и абсолютная скорость ($c_2 > c_1$).

Рис. 7.4. Схема движения жидкости в рабочем колесе центробежного насоса:

r_1, r_2 — радиусы соответственно входа в рабочий канал и выхода из него; u_1, u_2 — линейные скорости жидкости на входе в рабочий канал и выходе из него; w_1, w_2 — скорости движения жидкости относительно стенки лопасти на входе в рабочий канал и выходе из него; c_1, c_2 — абсолютные скорости движения жидкости на входе в рабочий канал и выходе из него; ω — угловая скорость колеса



Однако на выходе из насоса большая кинетическая энергия не нужна, так как при значительной скорости были бы неприемлемо велики гидравлические потери в трубопроводе. На выходе из насоса должна быть высокой потенциальная энергия давления. Преобразование кинетической энергии в потенциальную происходит в самом насосе. Для этого канал (отвод) в корпусе насоса сделан расширяющимся (корпус насоса имеет форму улитки). Согласно уравнению неразрывности (6.3) при расширении потока его скорость уменьшается, а давление согласно уравнению Бернулли (при $z_1 = z_2$), наоборот, повышается. Дополнительное уменьшение скорости происходит в выходном патрубке, который для этой цели выполняют в форме диффузора.

На рис. 7.3 и 7.4 рабочие лопасти насоса загнуты назад по отношению к направлению вращения. Если их загнуть вперед (есть и такие насосы), то скорость потока на выходе из колеса при тех же значениях r_1, r_2 и частоты вращения будет больше. Это значит, что без увеличения диаметра колеса может быть создан больший напор. Однако рабочие колеса такого исполнения применяют редко. Причина состоит в том, что при наличии лопастей, загнутых вперед, увеличиваются гидравлические потери, а значит, снижается КПД насоса. Поэтому обычно предпочитают увеличить габариты насоса, но при более экономичной его работе, т.е. создают лопасти, загнутые назад.

Предположим, что действующий насос обеспечивает необходимую в данных условиях подачу жидкости. В связи с реконструкцией установки потребовалось другое значение подачи. Возникает необходимость заказать новый насос другого типоразмера. Но возможно, что для новых условий работы подойдет тот же самый насос. Потребуется замена только электродвигателя. Дело в том, что центробежный насос может работать при разной частоте вращения n вала, но не превышающей допустимого значения с точки зрения прочностных характеристик конструкции.

Законы пропорциональности. При изменении частоты вращения вала изменяются значения основных параметров насоса, которые подчиняются следующим законам пропорциональности.

Изменение подачи происходит в соответствии с соотношением

$$Q_{V2}/Q_{V1} = n_2/n_1,$$

изменение напора —

$$H_{n2}/H_{n1} = (n_2/n_1)^2,$$

а полезной мощности —

$$N_{n2}/N_{n1} = (n_2/n_1)^3.$$

Например, при увеличении частоты вращения вала вдвое подача насоса увеличится в два раза, напор возрастет вчетверо, а мощность — в восемь раз.

Следует отметить, что при значительном изменении частоты вращения (в частности, при таком, как в приведенном примере) указанные соотношения будут иметь скорее оценочный характер. Это связано с тем, что вследствие существования зависимости КПД насоса от n в расчетах по приведенным формулам будут содержаться погрешности.

Характеристики насоса. Характеристиками насоса являются зависимости его напора, потребляемой мощности и КПД от подачи. Эти зависимости получают экспериментально при испытаниях насосов того или иного типоразмера. Их приводят в форме таблиц или графиков в паспорте насоса и соответствующих справочниках.

Кривые $H_n = f_1(Q_V)$, $N = f_2(Q_V)$ и $\eta = f_3(Q_V)$, полученные при постоянной частоте вращения n , приведены на рис. 7.5.

Для центробежных насосов характерно следующее. Кривая напора имеет плоский максимум при малых значениях подачи, при дальнейшем увеличении подачи развиваемый насосом напор уменьшается. Мощность, потребляемая насосом, с увеличением подачи растет. КПД равен нулю при нулевой подаче и при увеличении подачи сначала растет, а затем снижается. Максимум КПД приходится на падающую ветвь главной характеристики $H_n = f_1(Q_V)$.

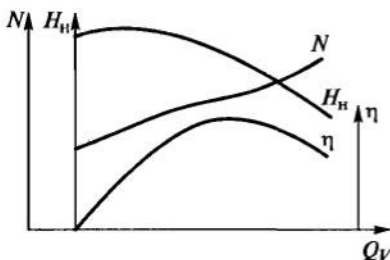
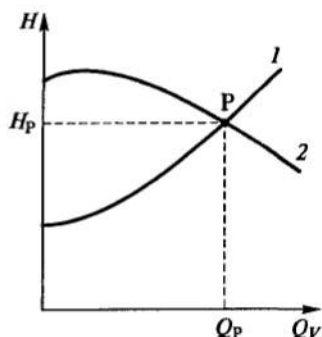


Рис. 7.5. Характеристики центробежного насоса:

Q_V — подача; N — потребляемая мощность; H_n — напор; η — КПД

Рис. 7.6. Схема определения рабочей точки P центробежного насоса:

1 — кривая потребного напора; 2 — характеристика насоса; H_p , Q_p — значения напора и подачи (расхода) в рабочей точке



Работа насоса в сочетании с трубопроводом. Для обеспечения движения жидкости по трубопроводу с требуемым расходом необходима определенная энергия — *потребный напор*, значение которого растет при повышении расхода жидкости. В то же время напор насоса с увеличением его подачи уменьшается (см. рис. 7.5).

Если кривые потребного напора 1 и напора насоса 2 построить на одном графике (рис. 7.6), то они пересекутся в некоторой точке P , которую называют *рабочей точкой насоса*. Соответствующие значения подачи Q_p и напора H_p будут автоматически обеспечиваться при работе данного насоса в сочетании с данным трубопроводом.

Если кривые потребного напора 1 и напора насоса 2 построить на одном графике (рис. 7.6), то они пересекутся в некоторой точке P , которую называют *рабочей точкой насоса*. Соответствующие значения подачи Q_p и напора H_p будут автоматически обеспечиваться при работе данного насоса в сочетании с данным трубопроводом.

При изменении режима работы технологической установки возникает необходимость в изменении расходов компонентов процесса. Для соответствующего насоса это означает изменение его подачи. Применительно к графику, представленному на рис. 7.6, регулирование подачи предполагает изменение положения рабочей точки насоса (рис. 7.7).

Существует несколько способов регулирования подачи. Вспомним законы пропорциональности для центробежного насоса. Если изменить частоту вращения n вала насоса (рис. 7.7, а), то характеристика насоса будет расположена либо выше (кривая 2' при частоте n'), либо ниже (кривая 2'' при частоте n'') первоначальной. Соответственно рабочая точка насоса переместится либо вправо, либо влево, что будет означать увеличение или уменьшение подачи (Q_p' или Q_p'') относительно Q_p . Этот способ регулирования подачи можно считать экономичным, но у него есть один недостаток. Дело в том, что обычно используемые асинхронные двигатели имеют ступенчатый набор значений частоты вращения. Поэтому данный способ можно назвать ступенчатым.

Еще один прием изменения положения характеристики насоса — обточка рабочего колеса, т. е. уменьшение его диаметра. В этом случае новая характеристика насоса пойдет ниже, аналогично кривой 2'' на рис. 7.7, а. Подача насоса может быть только уменьшена. Этот способ экономичен, но при ограниченном уменьшении диаметра колеса. Однако данный способ необратим: его используют в том случае, когда заведомо не потребуются работать при больших подачах.

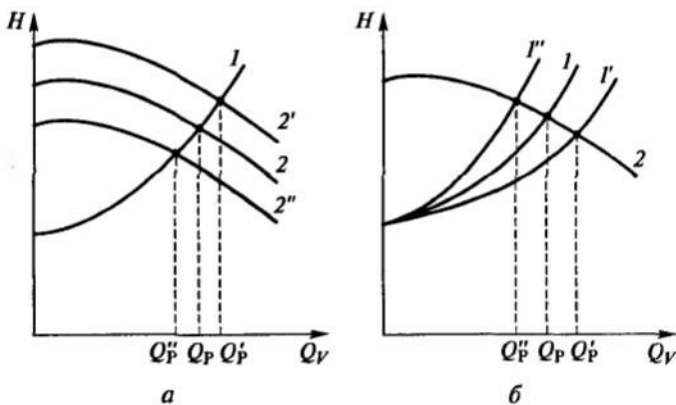


Рис. 7.7. Регулирование подачи центробежного насоса:

a — изменением частоты вращения вала; *б* — изменением степени закрытия задвижки; *1, 1', 1''* — характеристики сети; *2, 2', 2''* — характеристики насоса; Q_P — подача, соответствующая начальной рабочей точке; Q'_P, Q''_P — значения подачи после регулирования

Очень просто регулировать подачу центробежного насоса изменением положения кривой потребного напора. Для этого на напорном трубопроводе монтируют задвижку (или вентиль) 7 (см. рис. 7.2). Открывая или частично закрывая задвижку, увеличивают или уменьшают подачу насоса (рис. 7.7, б). Это происходит потому, что уменьшаются или увеличиваются потери напора в трубопроводе, и кривая потребного напора становится более пологой ($1'$) или, наоборот, более крутой ($1''$). Соответственно изменяются положение рабочей точки и подача насоса (Q'_P или Q''_P).

Регулировать подачу насоса можно путем возврата части жидкости, движущейся по напорному трубопроводу, во всасывающий трубопровод по *байпасной линии* с установленной на ней задвижкой. Этот способ простой, но неэкономичный. В данном случае насос обслуживает две линии, причем одна из них заведомо бесполезна: часть жидкости постоянно циркулирует через насос, что требует дополнительных затрат энергии.

Для увеличения подачи можно подключить к действующему насосу параллельно или последовательно еще один насос аналогичного типоразмера. Этот способ, заведомо неэкономичный, можно считать вынужденным. К нему прибегают в том случае, когда нет в наличии одного насоса с соответствующей большей подачей.

На производственных установках монтируют два одинаковых насоса с возможностью подключения каждого из них к одному и тому же трубопроводу. Однако они предназначены не для совместной работы: всегда действует лишь один насос, а другой является

резервным (в случае ремонта одного из них подача жидкости не прекращается).

В производственной практике применяют сочетание нескольких способов регулирования подачи насоса. Сначала по справочникам или каталогам подбирают такой типоразмер насоса, который обеспечит определенную подачу Q_V и потребный напор $H_{\text{потр}}$. При необходимости рассматривают экономичные варианты максимального приближения к проектным параметрам: подбирают частоту вращения или рассчитывают диаметр рабочего колеса после его обточки. Более тонкое регулирование осуществляют, как правило, с помощью задвижки, устанавливаемой на напорной линии.

Высота всасывания насоса. Высота всасывания $h_{\text{вс}}$ — это расстояние по вертикали от уровня жидкости в исходном резервуаре до оси насоса (рис. 7.8, а). Насос 1 нельзя устанавливать на произвольной высоте над уровнем жидкости в резервуаре 2. Чем больше высота всасывания, тем меньше давление на входе в насос. При его понижении до давления насыщенных паров жидкости возникает явление *кавитации*. Применительно к насосу оно состоит в следующем.

На входе в рабочее колесо жидкость закипает, и образуются пузырьки пара. Поток жидкости пузырьки выносятся в область высокого давления на выходе из рабочего колеса (в канал корпуса насоса). Здесь при конденсации пара они «схлопываются», и в области каждого из них возникает местный гидравлический удар, сопровождающийся локальным повышением давления, шумом и треском. Если этот процесс происходит на поверхности какой-либо детали насоса, у которой есть микротрещины, то под действием ударов они станут расширяться, что может привести к разрушению детали. В любом случае работа насоса становится неустойчивой, а подача — неопределенной.

Чтобы избежать появления кавитации, нельзя допускать понижения давления на входе в насос до давления насыщенных паров

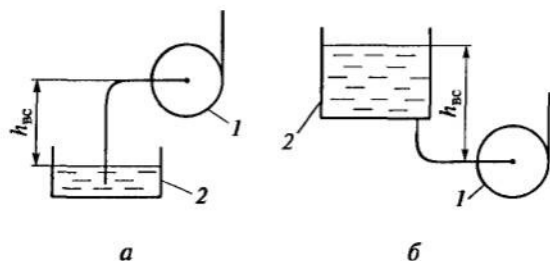


Рис. 7.8. Высота всасывания насоса:

а — образование вакуума в насосе; б — установка насоса с «подпором»; 1 — насос; 2 — резервуар

жидкости. Этот параметр, зависящий от рода жидкости и ее температуры, определяют по справочникам. Известно, что вода при атмосферном давлении закипает при температуре 100 °С. Таким образом, кавитация начнется уже при нулевой высоте всасывания. В этом случае насос нельзя поднять над уровнем воды ни на миллиметр, ибо давление на входе в насос еще более понизится, инициируя кавитацию.

Понижение давления на входе в насос также связано с гидравлическими потерями во всасывающей линии. Чтобы уменьшить вероятность возникновения кавитации, всасывающая труба должна иметь минимально возможную длину и большой диаметр (по отношению к напорной трубе), без излишних местных сопротивлений (например, следует до предела сократить число поворотов в этой линии). Все это уменьшает гидравлические потери, а значит, повышает давление на входе в насос.

В некоторых случаях для предотвращения кавитации высоту всасывания делают отрицательной (рис. 7.8, б). Это означает, что насос устанавливают ниже уровня жидкости — ставят «под уровень». Тогда столб жидкости создает «подпор», который и повышает давление на входе в насос. Иногда насос приходится помещать в углубленное место — приямок.

В маркировке каждого центробежного насоса содержатся сведения о возможностях его применения. Она включает в себя буквенные обозначения и числа. Например, насос, схематично изображенный на рис. 7.3, может иметь маркировку К-8/18. Здесь буквой К обозначена конструкция насоса (консольный). Число 8 — это подача насоса, м³/ч; число 18 — напор насоса, м. Численные значения этих параметров насоса отвечают максимальному значению КПД.

В марках насосов используют и другие буквы. Вот некоторые примеры: если добавлена буква Х, то насос химический, т.е. изготовлен из материала, стойкого к агрессивным средам; Кс — конденсатный насос (работает при высокой температуре жидкости); Д — насос с двусторонним всасыванием.

7.3. Поршневые насосы

Поршневые насосы относятся к насосам объемного действия. В них создаются замкнутые объемы жидкости, на которые оказывает силовое воздействие рабочий орган — вытеснитель той или иной конструкции. В поршневых насосах таким может быть поршень (тогда это собственно поршневой насос) или плунжер (плунжерный насос).

При силовом воздействии поршня или плунжера на жидкость в ней создается давление. Поэтому в поршневых насосах, как и во

всех других насосах объемного действия, нет необходимости в преобразовании вида энергии. Несомненные достоинства объемных насосов состоят также в том, что их напор почти не зависит от подачи; насос может создать практически любой напор (давление), если обеспечена соответствующая механическая прочность его деталей и к нему подведена определенная мощность.

При упомянутых достоинствах поршневые насосы имеют недостатки, среди которых можно отметить большую массу и значительные габариты. Это связано с его тихоходностью — малой скоростью вращения приводного вала, для движения которого необходима громоздкая механическая передача. Кроме того, насосы имеют сложную конструкцию и требуют систематического обслуживания, что связано, в частности, с наличием «капризных» деталей — клапанов.

Существенным недостатком является также неравномерность подачи жидкости, что приводит к дополнительным затратам энергии: при переменной скорости движения жидкости в трубопроводе возникают так называемые инерционные потери.

Поршневые насосы могут быть простого (одностороннего) и двойного (двустороннего) действия. Во втором случае обе стороны поршня рабочие. По числу поршней (плунжеров) различают насосы одно-, двух-, трех- и многопоршневые.

Поршневой насос простого действия. На рис. 7.9 показана схема поршневого насоса одностороннего действия с приводом от кривошипно-шатунного механизма (возможен также привод от ку-

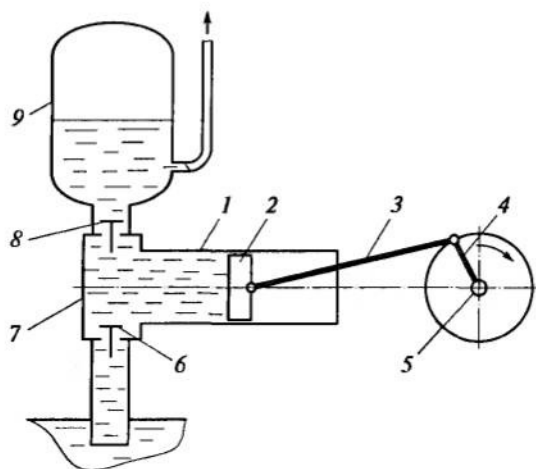


Рис. 7.9. Поршневой насос простого (одностороннего) действия:

1 — цилиндр; 2 — поршень; 3 — шатун; 4 — кривошип; 5 — вал; 6 — всасывающий клапан; 7 — клапанная коробка; 8 — напорный клапан; 9 — воздушный колпак

лачкового механизма). Поршень 2, установленный в цилиндре 1, совершает возвратно-поступательное движение между крайними положениями. Такое движение обеспечивает кривошипно-шатунный механизм: при вращении вала 5 насоса и закрепленного на нем кривошипа 4 шатун 3 приводит в движение поршень. К цилиндру примыкает клапанная коробка 7 со всасывающим 6 и напорным 8 клапанами.

При движении поршня слева направо (по рисунку) в цилиндре и клапанной коробке понижается давление. За счет разности давлений на поверхности жидкости в исходном сосуде и внутри насоса открывается всасывающий клапан, и жидкость по всасывающей трубе поступает в камеру насоса, безотрывно следуя за поршнем. Происходит процесс всасывания, который завершается по достижении поршнем крайнего правого положения. Цилиндр заполнен жидкостью.

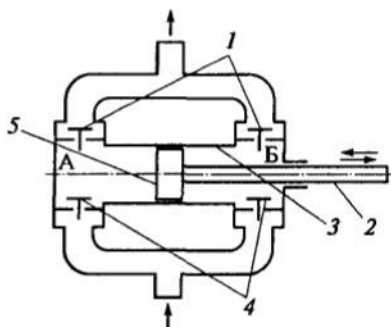
При обратном движении поршня вследствие его воздействия на жидкость в цилиндре и клапанной коробке повышается давление. Под действием давления всасывающий клапан закрывается, а напорный клапан, наоборот, открывается, и жидкость вытесняется из камеры насоса в напорный трубопровод (на данной схеме — через воздушный колпак 9). По достижении поршнем крайнего левого положения процесс вытеснения прекращается. Далее вновь следует процесс всасывания и т. д.

Неравномерность подачи жидкости, отмеченная выше как недостаток поршневых насосов, возникает из-за переменной скорости движения поршня. В случае приведения насоса в действие с помощью кривошипно-шатунного механизма скорость изменяется по синусоиде. Она снижается до нулевого значения при крайних положениях поршня и имеет максимум в середине хода. В насосе простого действия подача жидкости из цилиндра в напорный патрубок происходит лишь за половину оборота кривошипа. В течение второй половины оборота жидкость только всасывается в цилиндр. Указанный недостаток можно устранить двумя способами.

Один из них — установка воздушного колпака (см. рис. 7.9) на выходном (напорном) патрубке насоса. Воздушный колпак представляет собой герметичный сосуд, в верхней части которого содержится газ (обычно воздух). Газ в отличие от жидкости может сжиматься. При подаче жидкости в большем количестве по сравнению со средним значением лишь часть ее поступает в напорный трубопровод. Другая часть накапливается в воздушном колпаке. Газ при этом сжимается, и его давление возрастает. При уменьшенной подаче, в том числе при ее полном прекращении, жидкость, накопленная в воздушном колпаке, выдавливается в напорный трубопровод сжатым газом. Таким образом, движение в напорном трубопроводе не прекращается. При необходимости воздушный колпак может быть установлен и на всасывающей линии.

Рис. 7.10. Поршневой насос двойного действия:

1 — напорные клапаны; 2 — шток; 3 — цилиндр; 4 — всасывающие клапаны; 5 — поршень; А, Б — камеры



Другой способ устранения неравномерной подачи — изменение конструкции насоса: увеличение числа его рабочих камер.

Поршневые насосы двойного действия. На рис. 7.10 приведена схема поршневого насоса двойного действия. В этой конструкции насоса обе стороны поршня рабочие. В насосе предусмотрены две рабочие камеры: поршневая А и штоковая Б, каждая со своей клапанной коробкой. При движении поршня слева направо в камере А происходит процесс всасывания (как в насосе однократного действия). В это же время жидкость, накопленная ранее в камере Б, вытесняется в напорный трубопровод.

При обратном ходе поршня (справа налево) роль рабочих камер меняется: в камере Б происходит всасывание, а из камеры А жидкость вытесняется в напорный трубопровод. Таким образом, в отличие от насоса простого действия подача жидкости в напорный трубопровод происходит в течение каждой половины оборота кривошипа. Однако и для этого насоса характерна полная остановка движения жидкости при смене направления движения поршня — в его крайних положениях.

Трехпоршневые насосы. Наиболее равномерную подачу обеспечивают трехпоршневые насосы. Они содержат три элемента «цилиндр—поршень» одностороннего действия, каждый со своей клапанной коробкой. Подача жидкости из всех элементов происходит в единый напорный трубопровод. Кривошипы элементов трехпоршневого насоса приводятся в движение от одного вала, со смещением кривошипов относительно друг друга на треть окружности. В этих насосах в отдельные периоды вращения вала жидкость подается в трубопровод одновременно из двух цилиндров. В целом ее подача в напорный трубопровод не прекращается; колебания подачи незначительны настолько, что не требуется установки воздушного колпака.

Поршневые насосы выпускают для перемещения различных жидкостей, в том числе химически агрессивных. Возможности применения того или иного насоса можно предварительно оценить, исходя из его марки. Трехпоршневой насос марки Т-1/20 (с достаточно равномерной подачей) имеет следующие параметры: подача 1,0 м³/ч и развиваемое давление 20 МПа. Дополнительно в

справочнике указан род перекачиваемой жидкости — вода с температурой до 35 °С.

Насосы типа ХТР — это химические (Х) трехпоршневые (Т) регулируемые (Р) насосы, предназначенные для перемещения агрессивных жидкостей. В зависимости от типоразмера их максимальная подача изменяется в диапазоне 0,8...30 м³/ч, а развиваемое давление — в пределах 2...33 МПа. В регулируемых насосах этого типа можно изменять рабочий объем, а следовательно, и подачу насоса, не меняя частоту вращения вала. Рабочий объем регулируют посредством изменения хода поршня, точнее, радиуса кривошипа.

7.4. Роторные насосы

Как и поршневые, роторные насосы действуют по принципу вытеснения жидкости из замкнутого объема, т. е. являются насосами объемного действия.

Различают несколько конструкций роторных насосов, но в любой из них можно выделить три основных элемента: статор, ротор и вытеснители. Конструкцией вытеснителя определяется название насоса.

Роторные насосы имеют ряд достоинств по сравнению с поршневыми. В них нет массивных деталей, движущихся с ускорением, таких, как поршень в поршневом насосе. Поэтому скорости перемещения подвижных частей могут быть большими, а значит, не требуется громоздкой механической передачи между валом двигателя и валом насоса.

В этих насосах есть несколько рабочих камер. Благодаря этому, а также высокой скорости перемещения подвижных частей обеспечиваются условия для практически равномерной подачи жидкости. Это означает, что в них отсутствуют инерционные потери энергии.

К недостаткам роторных насосов следует отнести склонность к износу деталей, движущихся с большой скоростью относительно неподвижных частей насоса. Именно поэтому роторные насосы нельзя использовать для передачи загрязненных жидкостей, а сами жидкости должны обладать смазывающими свойствами.

Роторные насосы различных конструкций (шестеренные, пластинчатые, винтовые, радиальные и аксиальные роторно-поршневые) обычно применяют в объемных гидроприводах, в которых в качестве рабочих жидкостей используют минеральные масла. Для большинства жидкостей в химическом производстве роторные насосы, как правило, малопригодны. Однако в нефтеперерабатывающей промышленности для перекачивания нефтепродуктов используют шестеренные насосы с буквенной маркировкой ЭН,

РЗ и ШФ, а также ШГ — для перекачивания парафина и минеральных масел. Поэтому работу насосов данной категории рассмотрим на примере именно шестеренного насоса.

На рис. 7.11 схематически изображена конструкция шестеренного насоса. Две шестерни одинакового диаметра, одна — ведущая 1, другая — ведомая 2, помещены в корпус 3 — статор с малым зазором относительно его стенок. Полость насоса закрыта боковыми крышками.

При вращении шестерен жидкость заполняет впадины между зубьями и переносится из камеры всасывания А в камеру нагнетания Б. Вытеснение жидкости происходит под действием зуба смежной шестерни, проникающего во впадину, заполненную жидкостью. Таким образом, зуб выполняет функции вытеснителя. Именно при выдавливании из впадины жидкость приобретает потенциальную энергию давления.

Лишь незначительный объем жидкости между вершиной зуба и впадиной смежной шестерни возвращается во всасывающую камеру насоса, образуя объемные потери. Другая часть объемных потерь обусловлена тем, что жидкость проходит через зазор между боковой поверхностью шестерен и боковыми крышками из-за наличия разности давлений (большого — в камере Б и малого — в камере А). В целом объемный КПД шестеренных насосов довольно высок: для некоторых типоразмеров он достигает значений более 0,9.

Рабочий объем шестеренных насосов не регулируется, поэтому они относятся к нерегулируемым насосам. Изменить подачу можно, лишь варьируя частоту вращения вала или перепуская жидкость через байпасную линию (что неэкономично).

Подача шестеренных насосов для нефтепродуктов (типа ЭН) может быть очень большой (до $120 \text{ м}^3/\text{ч}$), а создаваемое давление, наоборот, сравнительно малым (не более 1,6 МПа).

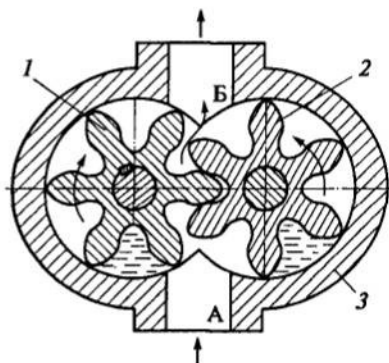


Рис. 7.11. Шестеренный насос:
1 — ведущая шестерня; 2 — ведомая шестерня; 3 — корпус; А, Б — камеры

7.5. Насосы других типов

В химической и нефтехимической промышленности широко используют насосы и других типов. Из всего их многообразия наиболее широко распространены осевые, вихревые и струйные насосы.

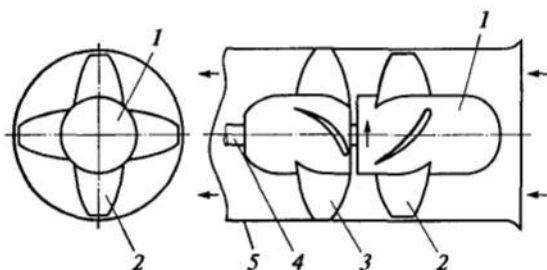


Рис. 7.12. Осевой насос:

1 — втулка-ступица; 2 — рабочая лопасть; 3 — направляющий аппарат; 4 — вал; 5 — корпус

Осевые насосы. В насосе этого типа способ передачи энергии потоку жидкости принципиально не отличается от способа передачи энергии в центробежном насосе. Различие состоит в том, что если в центробежном насосе жидкость входит в рабочее колесо вдоль оси насоса, а выходит по радиусу, то в осевом насосе вход и выход жидкости организованы вдоль оси.

Схема осевого насоса приведена на рис. 7.12. Рабочее колесо состоит из втулки-ступицы 1 большого диаметра и рабочих лопастей 2 изогнутой формы. Колесо посажено на вал 4 и вращается с высокой частотой. Под воздействием лопастей жидкость движется с большой линейной скоростью, т. е. получает значительную кинетическую энергию. Одновременно она перемещается вдоль оси насоса и после прохождения рабочего колеса поступает в неподвижный направляющий аппарат 3. Здесь при прохождении через профилированные неподвижные лопатки поток жидкости «выпрямляется», и линейная скорость уменьшается. При этом кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию давления.

Рабочее колесо и направляющий аппарат установлены соосно в корпусе 5, который образует проточную полость насоса. Отметим, что вал насоса проходит внутри втулки неподвижного направляющего аппарата.

Для осевых насосов характерны большие значения подачи при относительно малом напоре. В отличие от центробежных насосов мощность осевых насосов уменьшается с увеличением подачи, что вызвано происходящим при этом быстрым падением напора.

Вихревые насосы. Характерными особенностями вихревого насоса являются, с одной стороны, простота конструкции, что обеспечивает его относительную дешевизну и удобство обслуживания, а с другой — низкий КПД и, следовательно, неэкономичность при эксплуатации.

Эти насосы развивают большой напор при малой подаче. Из-за низкого КПД вихревые насосы не применяют при высокой мощности во избежание больших потерь энергии.

Схема вихревого насоса представлена на рис. 7.13. В корпусе 6 соосно размещено рабочее колесо 5, имеющее форму диска, на наружной кромке которого расположены радиальные лопатки 4. Между лопатками и наружной поверхностью диска образуются полости, заполняемые жидкостью. Часто применяют колеса с двумя самостоятельными кольцевыми рядами межлопаточных полостей и перегородкой между ними.

Между рабочим колесом и корпусом остается зазор — проточный канал для жидкости. Входной 3 и выходной 1 патрубки отделены друг от друга перегородкой 2.

При вращении рабочего колеса жидкость под действием лопаток приобретает большую линейную скорость (т. е. значительную кинетическую энергию). Под действием центробежных сил происходит выброс жидкости из рабочей полости в радиальном направлении. В проточном канале корпуса она пронизывает движущуюся с относительно малой скоростью жидкость. За счет жидкостного трения покинувшая колесо жидкость тормозится, и ее кинетическая энергия преобразуется в потенциальную энергию давления.

В пространство между лопатками на место ушедшей жидкости подсасывается жидкость из проточного канала корпуса. На нее вновь воздействуют лопатки рабочего колеса. Этот процесс при повороте колеса происходит многократно, и жидкость движется по спирали. Ее энергия по ходу движения возрастает.

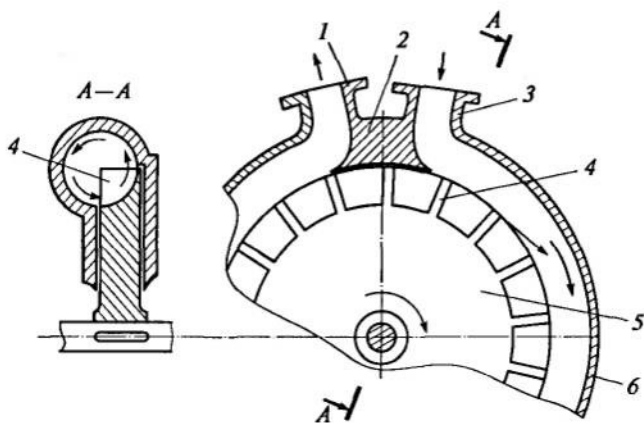


Рис. 7.13. Вихревой насос:

1 — выходной патрубок; 2 — перегородка; 3 — входной патрубок; 4 — лопатка рабочего колеса; 5 — рабочее колесо; 6 — корпус

Низкие значения КПД такого насоса обусловлены его конструкцией и принципом действия. Следует обратить внимание на то, что часть жидкости, получившей энергию в рабочем колесе, вместо того чтобы поступить в напорный трубопровод, вновь возвращается во всасывающую полость. Это та жидкость, которая находится в межлопаточном пространстве рабочего колеса и проходит под перемычкой между патрубками. Таким образом, часть жидкости циркулирует внутри насоса, создавая объемные потери. Сложное движение жидкости по спиральной траектории с изменением скорости и жидкостным трением предопределяет большие гидравлические потери. В целом КПД вихревого насоса, как правило, не превышает 0,4.

Особенностью характеристик вихревых насосов является то, что с увеличением подачи напор насоса быстро уменьшается. При этом снижается и мощность насоса, а максимальные значения КПД приходится на довольно узкий диапазон значений подачи.

Вихревые насосы склонны к такому явлению, как кавитация. Она возникает на входе в насос, где резко возрастает скорость жидкости и соответственно понижается давление. Для предотвращения этого явления выпускают центробежно-вихревые насосы. Они имеют две ступени. В первой, центробежной ступени жидкость приобретает повышенное давление, заведомо превышающее давление насыщенных паров, поэтому при ее поступлении в вихревую ступень появление кавитации исключено.

Струйные насосы. В струйных насосах энергию в поток перекачиваемой жидкости вносит поток рабочей жидкости, имеющий заведомо бóльшую скорость. Схема струйного насоса приведена на рис. 7.14.

Рабочая жидкость по трубе 1 через сопло 2, в котором приобретает большую скорость, поступает в камеру смешения 3. На входе в нее при увеличении скорости рабочего потока давление понижается. За счет этого перекачиваемая жидкость подсасывается в камеру смешения через входной патрубок 6 и камеру подвода жидкости 5.

В камере смешения оба потока, взаимодействуя за счет жидкостного трения, приобретают некоторую усредненную скорость, образуя общий поток. При этом кинетическая энергия перекачиваемого потока возрастает вследствие уменьшения таковой в ра-

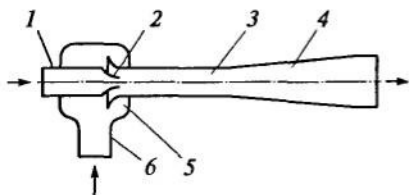


Рис. 7.14. Струйный насос:

1 — труба для рабочей жидкости; 2 — сопло; 3 — камера смешения; 4 — диффузор; 5 — камера подвода жидкости; 6 — входной патрубок

бочем потоке. В диффузоре 4 при понижении скорости общего потока его кинетическая энергия преобразуется в потенциальную — энергию давления.

Рабочая жидкость может быть аналогична перекачиваемой. Иногда используют другую жидкость, в частности воду, водяной пар или газ (водо-, паро- или газоструйные насосы).

Достоинством струйных насосов является отсутствие подвижных частей. Энергию для обеспечения перемещения поток получает не в самом насосе, а за его пределами. Это позволяет устанавливать насос во взрывоопасном помещении, где использование электродвигателя сопряжено с определенными проблемами. Струйные насосы могут перекачивать загрязненные жидкости.

Простота конструкции (отсутствие подвижных частей) сочетается с существенным недостатком струйных насосов — низким КПД (до 0,3). Потери энергии в таком насосе связаны с вихреобразованием, происходящим при большой скорости потока, и значительным трением в камере смешения и диффузоре.

Контрольные вопросы

1. Какие изменения происходят в потоке жидкости при попадании в насос? Каково назначение насосов?
2. Как воздействуют на жидкость насосы кинетического и объемного действия?
3. Какие параметры характеризуют работу насоса?
4. Какие потери энергии имеют место внутри насосов?
5. Какое оборудование обычно входит в состав насосной установки?
6. С какой целью в насосной установке применяют манометр и вакуумметр?
7. Каковы устройство и принцип действия центробежного насоса? Что происходит с жидкостью внутри него?
8. Как меняются параметры центробежного насоса при изменении частоты вращения вала?
9. Каковы основные характеристики работы центробежного насоса? Какой вид они имеют на графике?
10. Что такое рабочая точка насоса? Какие параметры насоса можно определить по расположению рабочей точки на графике?
11. Назовите способы изменения подачи центробежного насоса.
12. Почему ограничена высота установки насоса над уровнем жидкости в исходном резервуаре?
13. Что такое кавитация в насосе и как уменьшить вероятность ее возникновения?
14. Опишите устройство и принцип действия осевого насоса. Каковы особенности траекторий движения жидкости в осевом и центробежном насосах?
15. Как устроен и действует вихревой насос? Почему вихревые насосы имеют низкий КПД?

16. Каковы устройство и принцип действия струйного насоса? Перечислите его достоинства и недостатки.

17. Изобразите схему устройства поршневого насоса простого действия. Каким образом происходит передача энергии жидкости? Каковы достоинства и недостатки поршневых насосов?

18. Почему неравномерность подачи жидкости в поршневом насосе является его недостатком? Назовите способы устранения неравномерной подачи.

19. Изобразите схему поршневого насоса двойного действия. Сравните работу насосов простого и двойного действия.

20. Какими средствами можно изменить подачу поршневого насоса?

21. Назовите основные элементы роторных насосов. Изобразите схему шестеренного насоса и опишите его действие.

22. Каковы достоинства и недостатки роторных насосов?

Глава 8

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ, СЖАТИЕ И РАЗРЕЖЕНИЕ ГАЗОВ

8.1. Классификация компрессорных машин. Вентиляторы и газодувки

Большинство химико-технологических процессов нуждается в решении вопросов транспортирования газа или изменения давления в нем. К таковым относятся, например, процессы абсорбции, конвективной сушки, каталитические и холодильные процессы.

Аналогичные вопросы необходимо решать и при осуществлении процессов, связанных с обработкой твердых материалов, в системах пневмотранспорта (гл. 3), аппаратах для измельчения и классификации сыпучих материалов (гл. 4 и 5). Энергию газа используют для перемещения жидкостей газоструйными насосами (гл. 7). Наконец, без организации газовых потоков, например, в вентиляционных установках производственных помещений и средствах аспирации рабочих мест не обходится решение вопросов охраны труда и техники безопасности на промышленных предприятиях.

Машины для транспортирования газа, создания в нем повышенного давления или, наоборот, понижения давления относят к категории *компрессорных*. Параметр, который характеризует отношение давления на выходе из компрессорной машины p_2 к давлению на входе в нее p_1 , называют *степенью сжатия* i :

$$i = p_2/p_1.$$

По *степени сжатия* компрессорные машины подразделяют на несколько групп.

Вентиляторы обеспечивают повышение давления до $i = 1, 10 \dots 1, 15$. Это означает, что по отношению к атмосферному давлению они создают избыточное давление до 15 кПа.

Газодувки обеспечивают степень сжатия на выходе из агрегата в диапазоне $i = 1, 15 \dots 3, 0$ (повышают давление на 15...300 кПа).

Более высокие значения степени сжатия ($i > 3, 0$) создают *компрессоры* (избыточное давление свыше 300 кПа).

Что касается вакуума, то *вентиляторы* обеспечивают небольшое разрежение, а *вакуум-насосы* — глубокий вакуум.

Компрессорные машины различают также по *принципу действия* и соответственно *конструктивному исполнению*.

Существуют машины кинетического действия (центробежные, осевые, струйные) и объемного (поршневые и роторные). Вентиляторы могут быть центробежными и осевыми, газодувки — центробежными и роторными, компрессоры — центробежными, роторными и поршневыми.

Центробежные вентиляторы. По принципу действия центробежные (радиальные) вентиляторы аналогичны центробежным насосам. В рабочем колесе вентилятора (рис. 8.1) при вращении лопаток рабочего колеса 1 увеличивается скорость газа и возрастает его кинетическая энергия. В спиральном кожухе (корпусе) 2 при увеличении сечения канала часть кинетической энергии преобразуется в потенциальную. Это приводит к росту давления газа.

Размеры вентилятора определяют подачу и развиваемое давление. Размеры, характеризующие спиралевидность корпуса, геометрические параметры всасывающего и выходного патрубков, ширину рабочего колеса и диаметр его входного отверстия, указывают в долях определяющего размера — диаметра рабочего ко-

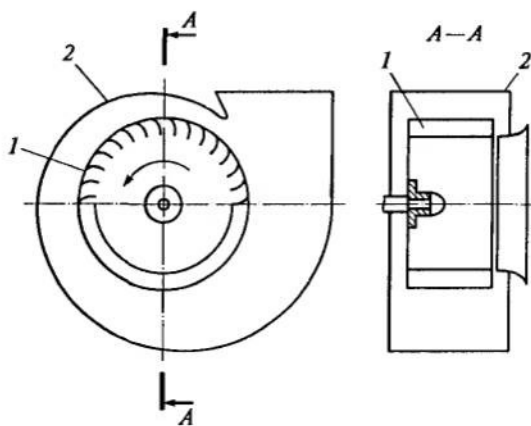


Рис. 8.1. Центробежный вентилятор:

1 — рабочее колесо; 2 — спиральный кожух (корпус)

леса. Этот размер, выраженный в дециметрах, отмечают в марке вентилятора и называют его *номером*.

Отметим многообразие конструкций рабочих колес вентиляторов. Число рабочих лопаток в вентиляторах различных типоразмеров колеблется от единиц до десятков (в пылевых вентиляторах типа ЦП их всего шесть). Лопатки изготавливают прямо- или криволинейной формы, они могут быть загнуты вперед (в направлении вращения) или назад. Рабочие колеса бывают закрытыми (с передним и задним дисками) или открытыми (без переднего диска), а у некоторых из пылевых вентиляторов — с полностью открытыми лопатками.

По *развиваемому давлению* центробежные вентиляторы разделяют на вентиляторы *низкого* — до 1 кПа, *среднего* — до 3 кПа и *высокого давления* — 3... 10 кПа.

Основными параметрами, характеризующими работу вентилятора, являются подача Q_V , давление p , потребляемая мощность N и КПД η . Зависимости параметров работы вентилятора от подачи Q_V представляют графически или в виде таблиц. Эти зависимости называют *характеристиками вентилятора*, их приводят в паспорте машины и справочной литературе. На рис. 8.2 представлен примерный вид характеристик центробежного вентилятора.

Давление газа, создаваемое вентилятором, частично расходуется на компенсацию разности давлений между выходом из вентиляционной сети и входом в нее. Эту составляющую давления называют *статическим давлением* $p_{ст}$. Оно не зависит от расхода газа. Другая часть давления затрачивается на преодоление гидравлического сопротивления сети Δp — это потери энергии на трение и местные сопротивления (см. гл. 6).

Потери давления в сети выражают через подачу газа Q_V :

$$\Delta p = A Q_V^2,$$

где A — коэффициент сопротивления сети.

Тогда затраты давления в целом составят

$$p = p_{ст} + A Q_V^2.$$

Эту зависимость называют *характеристикой сети*. Она может быть изображена на том же графике, что и характеристика вентилятора (рис. 8.3). Точку пересечения характеристики сети 2 и характеристики вентилятора 1 называют *рабочей точкой вентилятора* (точка Р). По рабочей точке определяют действительные параметры вентилятора: подачу Q_V и давление p при его работе в данной вентиляционной сети.

Подачу вентилятора можно регулировать изменением частоты вращения вала, положения заслонки, влияющего на характеристику сети, или сочетанием этих способов.

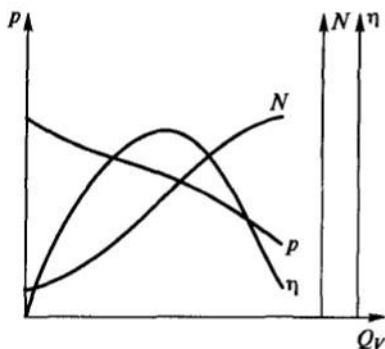


Рис. 8.2. Характеристики центробежного вентилятора:

p — давление; N — потребляемая мощность; η — КПД; Q_v — подача

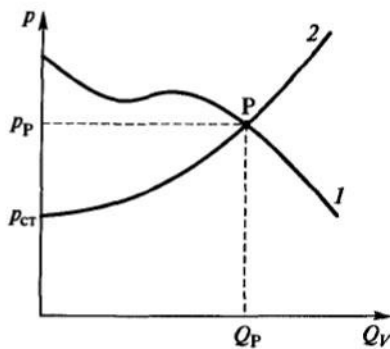


Рис. 8.3. Схема определения рабочей точки P вентилятора:

1 — характеристика вентилятора; 2 — характеристика сети; p — давление; Q_v — подача; p_p , Q_p — параметры рабочей точки P ; $p_{ст}$ — статическое давление

Осевые вентиляторы. По конструкции и принципу действия осевые вентиляторы аналогичны осевым насосам. Их используют для передачи относительно больших объемов газа при невысоком развиваемом давлении.

Если осевой вентилятор создает разрежение (например, при вентилировании производственного помещения), то он имеет только рабочее колесо, установленное в корпусе. Если вентилятор должен создать некоторое давление, за колесом устанавливают спрямляющий аппарат 3 (рис. 8.4). При вращении рабочего колеса 1 , которое состоит из профилированных лопаток, закрепленных на ступице, газ приобретает вращательное движение, перемещаясь с большой угловой скоростью, и одновременно движется вдоль корпуса 2 в направлении выпускного отверстия. При прохождении через каналы между лопатками спрямляющего аппарата вращение потока прекращается, при этом кинетическая энергия уменьшается, переходя в потенциальную энергию давления.

Газодувки. По развиваемому давлению газодувки занимают промежуточное положение между вентиляторами и компрессорами, однако обеспечивают большую подачу.

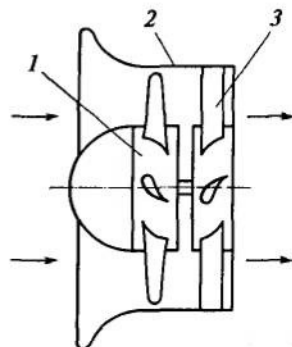


Рис. 8.4. Осевой вентилятор:

1 — рабочее колесо; 2 — корпус; 3 — спрямляющий аппарат

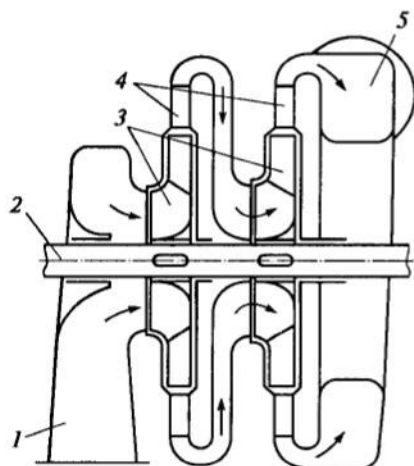


Рис. 8.5. Двухступенчатая турбогазодувка:

1 — всасывающий патрубок; 2 — вал; 3 — рабочие колеса; 4 — направляющие аппараты; 5 — нагнетательный патрубок

По особенностям конструкции эти машины могут быть *центробежными* (их называют турбогазодувками) и *роторными*. По принципу действия они аналогичны соответствующим конструкциям насосов.

Конструкции одноступенчатых турбогазодувок напоминают конструкции центробежных вентиляторов высокого давления, при этом создаваемое ими давление не превышает 30 кПа. Для получения более высоких значений давления устанавливают несколько рабочих колес, причем на каждой ступени сжатия энергия перемещаемого газа возрастает.

Например, двухступенчатая турбогазодувка (рис. 8.5) имеет два рабочих колеса 3, закрепленных на общем валу 2. Через всасывающий патрубок 1 газ поступает на вход рабочего колеса первой ступени, а затем через один из направляющих аппаратов 4 (лопаточный диффузор) — на рабочее колесо второй ступени. На выходе из последнего колеса также установлен направляющий аппарат, после прохождения которого газ покидает газодувку через нагнетательный патрубок 5.

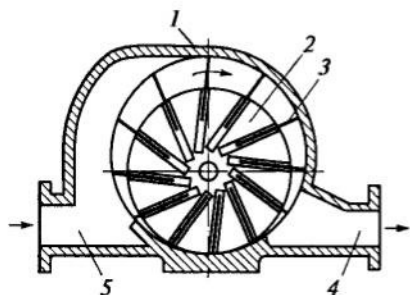


Рис. 8.6. Роторная пластинчатая газодувка:

1 — корпус; 2 — ротор; 3 — пластина; 4 — нагнетательный патрубок; 5 — всасывающий патрубок

Роторные газодувки. В зависимости от конструктивного исполнения роторные газодувки бывают *пластинчатые* и *винтовые*. На рис. 8.6 представлена схема пластинчатой газодувки. В корпусе 1 эксцентрично установлен ротор 2 цилиндрической формы, имеющий продольные прорезы, в которые вставлены пластины 3 прямоугольной формы.

При вращении ротора пластины под действием центробежных сил выдвигаются и скользят по направляющим кольцам,

закрепленным в корпусе. Между поверхностями корпуса, ротора и смежными пластинами образуются замкнутые ячейки, объем которых при их перемещении по окружности уменьшается, а давление, при котором газ покидает газодувку через нагнетательный патрубок 4, возрастает.

Достоинством роторных машин является их быстроходность, поэтому вал машины можно соединять с валом двигателя напрямую без промежуточной передачи. Кроме того, они обеспечивают равномерную подачу газа.

8.2. Компрессоры и водокольцевые вакуум-насосы

В вентиляторах, создающих небольшое избыточное давление, достаточно одной рабочей ступени. В турбогазодувках, как правило, предусматривают от одной до нескольких рабочих ступеней. Компрессоры всегда состоят из нескольких ступеней сжатия. Несмотря на внешнее сходство конструкций рабочих колес и, возможно, одинаковое число ступеней турбогазодувок и турбокомпрессоров, следует отметить два существенных различия между этими машинами.

Во-первых, в газодувках при сжатии газа и увеличении его температуры каких-либо мер по снижению температуры не принимают, тогда как в компрессорах газ обязательно охлаждают. Конструктивно система охлаждения может быть выполнена в виде рубашки на корпусе компрессора, через которую пропускают охлаждающую воду, или охлаждение газа проводят в выносном холодильнике (его размещают между секциями компрессора, каждая из которых состоит из нескольких ступеней сжатия).

Второе различие связано с размером рабочих колес, установленных в последовательно работающих ступенях сжатия. В турбогазодувках диаметры рабочих колес и их ширина одинаковы. В компрессорах с целью уменьшения гидравлических потерь размер рабочих колес последовательно уменьшают. Если компрессор состоит из секций, то внутри каждой из них колеса одинаковы, но уменьшаются от секции к секции.

Осевые компрессоры. Конструкция осевого компрессора предусматривает несколько ступеней повышения давления (рис. 8.7). Каждую ступень образует пара элементов: венец рабочих лопастей 2, закрепленных на вращающемся роторе 4, и направляющий аппарат 3, который состоит из неподвижных лопастей, закрепленных на корпусе 1. Проточную часть компрессора — пространство между корпусом и ротором — уменьшают к выходу для сохранения постоянного значения осевой скорости. Этот эффект достигается либо уменьшением диаметра корпуса, либо увеличением диаметра ротора.

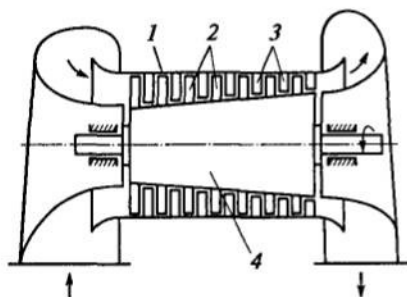


Рис. 8.7. Осевой компрессор:

1 — корпус; 2 — рабочие лопасти; 3 — направляющий аппарат; 4 — ротор

компрессоры *простого и двойного действия*; по числу *параллельно работающих цилиндров*, нагнетающих газ в одну магистраль, — *одно-, двух- и многоцилиндровые*; по числу *ступеней сжатия* — *одно-, двух- и многоступенчатые*.

На рис. 8.8 показана схема одноцилиндрового компрессора простого действия с приводом от кривошипно-шатунного механизма. В цилиндре 1, плотно примыкая к нему, движется поршень 4. В крышке цилиндра смонтированы всасывающий 2 и нагнетательный 3 клапаны. Возвратно-поступательное движение поршня происходит за счет преобразования вращательного движения кривошипа 6, соединенного с поршнем с помощью шатуна 5.

При движении поршня слева направо из крайнего левого положения в полости цилиндра понижается давление, и открывается всасывающий клапан. Газ поступает в цилиндр. Этот процесс всасывания завершается по достижении поршнем правого крайнего положения. При обратном движении поршень воздействует на газ, повышая в нем давление. Всасывающий клапан при этом

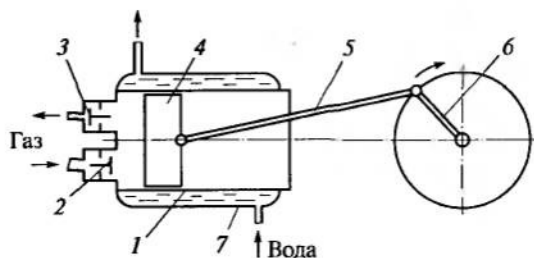


Рис. 8.8. Поршневой компрессор простого действия:

1 — цилиндр; 2 — всасывающий клапан; 3 — нагнетательный клапан; 4 — поршень; 5 — шатун; 6 — кривошип; 7 — водяная рубашка охлаждения

закрывается. Давление в цилиндре повышается до тех пор, пока не достигнет значения давления в нагнетательном трубопроводе. Тогда открывается нагнетательный клапан, и газ вытесняется в трубопровод. Вытеснение происходит до достижения поршнем крайнего левого положения. Затем описанные процессы повторяются.

Так как температура газа при сжатии повышается и при этом затраты энергии на сжатие увеличиваются, то газ в цилиндре охлаждают, используя водяную рубашку 7.

По принципу работы поршневой компрессор двойного действия аналогичен поршневому насосу двойного действия (см. рис. 7.10).

Рассмотрим, что происходит с газом в цилиндре при совершении поршнем двойного хода — «туда и обратно». На рис. 8.9 приведен график изменения давления в цилиндре компрессора в зависимости от положения поршня, или, иначе говоря, от объема цилиндра. Это индикаторная диаграмма.

По завершении всасывания, когда поршень пришел в крайнее положение, соответствующее точке *b* на графике, газ заполнил цилиндр. При этом его давление p_1 ниже атмосферного (если всасывание происходит из атмосферы). Затем начинается движение поршня справа налево и сжатие газа, сопровождающееся повышением давления до значения p_2 , соответствующего точке *c* на графике (давление нагнетания). На схеме под графиком поршень показан именно в таком положении. При этом давлении открывается нагнетательный клапан, газ вытесняется по линии *cd* при давлении p_2 . Точка *d* соответствует завершению движения поршня справа налево. Газ вытеснен, но под поршнем остался некоторый объем сжатого газа $V_{вр}$, который называют *вредным пространством*.

При обратном движении поршня сначала расширяется остаток газа из вредного пространства — кривая *da* на графике. Когда дав-

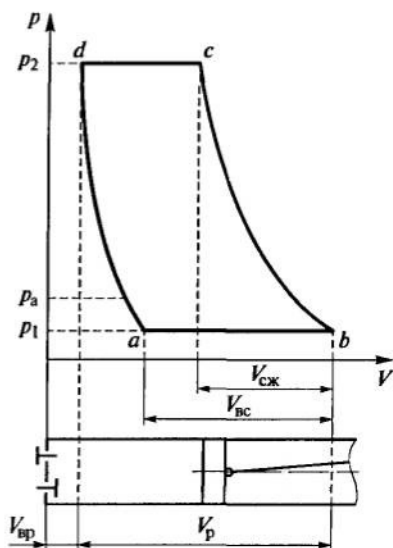


Рис. 8.9. Индикаторная диаграмма поршневого компрессора:

ab — всасывание; *bc* — сжатие; *cd* — нагнетание; *da* — расширение газа, заключенного во вредном пространстве; V_p — рабочий объем; $V_{вр}$ — объем вредного пространства; $V_{вс}$ — объем всасывания; $V_{сж}$ — объем сжатия; p_a — атмосферное давление; p_1 — давление всасывания; p_2 — давление нагнетания

ление понизится до давления всасывания p_1 (точка a), открывается всасывающий клапан, и в цилиндр поступает свежая порция газа — происходит всасывание по линии ab на графике.

Таким образом, некоторая часть хода поршня затрачивается на расширение газа из вредного пространства. Поэтому количество вновь поступившего газа уменьшается в сравнении с тем, которое было бы при отсутствии вредного пространства. Отметим, что в поршневом насосе всасывание начинается сразу с началом движения поршня. Итак, вредное пространство в компрессоре уменьшает его подачу. Отношение всасываемого объема $V_{вс}$ (в соответствии с индикаторной диаграммой) к рабочему объему цилиндра V_p называют *объемным коэффициентом компрессора* λ_0 :

$$\lambda_0 = V_{вс}/V_p.$$

Чем больше вредное пространство, тем дольше расширяется газ из него и меньше объем всасывания $V_{вс}$.

Степень сжатия в одной ступени компрессора ограничена. Это вызвано двумя причинами. Во-первых, при увеличении степени сжатия давление газа во вредном пространстве станет больше. Следовательно, потребуется большая длина хода поршня при расширении остаточного газа для достижения давления всасывания. Поэтому уменьшится количество всасываемого газа и подача компрессора.

Во-вторых, при увеличении степени сжатия температура газа в цилиндре повышается и может достигнуть температуры вспышки компрессорного смазочного масла (около 230°C). При этом может произойти возгорание масла или даже взрыв масляных паров.

При необходимости получения высокого давления процесс сжатия осуществляют ступенчато, с ограничением степени сжатия i на каждой ступени (обычно i не превышает семи). В этом случае при переходе газа из одной ступени в другую его охлаждают с помощью промежуточных холодильников (в дополнение к охлаждению в самом цилиндре компрессора). Проведение межступенчатого охлаждения с применением холодильника, имеющего большую поверхность теплообмена, позволяет повысить экономичность процесса сжатия в целом, хотя неизбежны усложнение конструкции и увеличение стоимости компрессора.

Подача компрессора простого действия определяется по следующей формуле:

$$Q_V = \lambda_n S_n n l z,$$

где λ_n — коэффициент подачи; S_n — площадь сечения поршня; n — частота вращения вала кривошипа или число ходов поршня; l — ход поршня; z — число цилиндров.

Коэффициент подачи λ_n представляет собой отношение объема газа на выходе из компрессора (приведенное к значениям его температу-

ры и давления на входе) к рабочему объему цилиндра. Этот коэффициент, включающий в себя объемный коэффициент λ_0 , зависит от степени нагрева поступающего газа от стенок цилиндра и величины его утечек через неплотности в клапанах.

Обычно компрессор работает на сеть, в которой независимо от потребления газа должно поддерживаться постоянное давление. При переменном потреблении газа необходимо регулировать подачу компрессора. Это можно осуществить несколькими способами:

- изменить частоту вращения вала (экономичный, но технически сложный способ, не получивший широкого распространения);

- применить дросселирование газа на всасывающей линии с помощью заслонки, которая является гидравлическим сопротивлением. Прикрывая ее, понижают давление всасывания, что приводит к увеличению степени сжатия газа в компрессоре и, следовательно, к дополнительным затратам энергии на сжатие. Данный способ технически прост, но неэкономичен;

- частично открыть всасывающий клапан. При этом газ из цилиндра возвращается во всасывающую линию, и происходит пропуск подачи. Такое отжатие клапана может быть осуществлено автоматически при определенном давлении в напорной линии. Отжатием клапана лишь на части хода поршня можно достигнуть плавного изменения подачи. Этот способ требует затрат энергии на циркуляцию газа и поэтому неэкономичен;

- изменить объем вредного пространства. К цилиндру присоединяют дополнительные полости, объем которых можно регулировать вручную или автоматически. При увеличении вредного пространства сжатый газ расширяется на большем пути поршня, уменьшается объем всасываемого газа и снижается объемный коэффициент компрессора. Этот способ экономичен, так как работа по сжатию поступившего газа не увеличивается.

Ротационные пластинчатые компрессоры. К машинам объемного действия относятся также ротационные пластинчатые компрессоры. Конструктивно они аналогичны роторным газодувкам (см. рис. 8.6), но принципиальным отличием пластинчатого компрессора является то, что газ охлаждается в нем с помощью теплоносителя, подаваемого через водяную рубашку корпуса.

Пластинчатые компрессоры отличаются от поршневых равномерной подачей газа. У них намного проще конструкция привода от двигателя (с применением только соединительной муфты), но ограничено абсолютное давление, сообщаемое газу (примерно до 0,5 МПа в одной ступени и до 1,5 МПа — в двухступенчатых компрессорах этого типа).

Водокольцевые вакуум-насосы. Основным назначением водокольцевых вакуум-насосов является откачивание газа из аппаратов с целью создания в них глубокого вакуума. Их маркируют буквами ВВН.

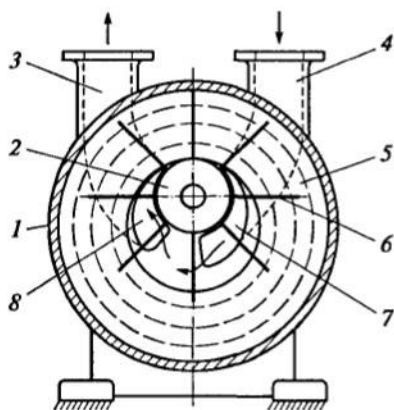


Рис. 8.10. Водокольцевой вакуум-насос:

1 — корпус; 2 — ротор; 3 — выходной патрубком; 4 — входной патрубком; 5 — жидкостное кольцо; 6 — лопатка; 7 — всасывающее окно; 8 — выходное окно

По принципу воздействия на газ, а также форме образующихся замкнутых ячеек переменного объема водокольцевые вакуум-насосы аналогичны машинам с пластинчатыми элементами. При

этом они проще по конструкции, так как в них нет пластин, движению которых сопутствует трение.

В цилиндрическом корпусе 1 вакуум-насоса (рис. 8.10) эксцентрически, с некоторым смещением осей, установлен ротор 2. Перед пуском полость насоса частично заполняют водой. При вращении ротора его лопатки 6 заставляют вращаться воду так, что в корпусе формируется жидкостное кольцо 5. Между ротором, водяным кольцом и смежными лопатками образуются замкнутые ячейки переменного объема.

Через входной патрубок 4 и всасывающее окно 7 в боковой крышке в полость насоса подсасывается газ. При уменьшении объема ячеек газ вытесняется через выходное окно 8 в выходной патрубок 3.

Естественная убыль воды вместе с уходящим газом восполняется из емкости, которая до определенного уровня заполнена водой и сообщается с полостью насоса.

Для создания вакуума применяют также струйные насосы (см. рис. 7.14). В качестве рабочей жидкости в них обычно используют водяной пар (тогда это пароструйный насос), за счет кинетической энергии которого перемещается газ, отсасываемый из емкости, в которой необходимо создать вакуум. Давление в одной пароструйной ступени может составлять 0,9 атмосферного. Для получения более глубокого вакуума применяют двухступенчатые пароструйные насосы.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение компрессорных машин? На какие группы их подразделяют по степени сжатия газа?
2. Каковы устройство и принцип действия центробежного вентилятора?
3. Какие параметры определяют работу вентилятора? Что представляют собой характеристики вентилятора?

4. Какими способами можно регулировать подачу вентилятора?
5. Каковы устройство и принцип действия осевого вентилятора? Как количественно отличаются его параметры от аналогичных параметров центробежного вентилятора?
6. Какое положение по рабочим параметрам занимают газодувки в классификации компрессорных машин?
7. Как устроена и действует турбогазодувка?
8. Каковы устройство и принцип действия роторной пластинчатой газодувки?
9. Каковы конструктивные отличия турбокомпрессоров от турбогазодувок?
10. В чем состоят особенности поршневого компрессора простого действия?
11. Изобразите примерный вид индикаторной диаграммы поршневого компрессора. Какие причины вызывают указанный характер изменения давления на отдельных стадиях работы компрессора?
12. Чем обусловлена ограниченная степень сжатия одной ступени компрессора? Каким образом достигают требуемой степени сжатия?
13. Какими способами можно регулировать подачу компрессора?
14. В чем состоит принципиальное отличие ротационного пластинчатого компрессора от газодувки?

Глава 9

РАЗДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ

В этой главе речь пойдет об очистке газов главным образом от взвешенных твердых частиц — пыли. Реже возникает необходимость в очистке газа от капель жидкости. Источниками запыления газовых потоков могут быть установки пневмотранспорта сыпучих материалов (гл. 3) и измельчения твердых материалов (гл. 4), технологические установки, в состав которых входят аппараты с псевдоожиженным слоем мелкодисперсного сыпучего вещества (гл. 11), и др.

Целью очистки газа может быть улавливание конечного продукта, получаемого на технологической установке, или промежуточного продукта, отбираемого для дальнейшей переработки. Воздушные выбросы установок, загрязненные пылевыми отходами производства, очищают в соответствии с требованиями охраны воздушного бассейна от вредных производственных выбросов.

Эффективность процесса разделения характеризуют *степенью очистки* $\eta_{оч}$:

$$\eta_{оч} = (C_{нач} - C_{кон})/C_{нач},$$

где $C_{нач}$, $C_{кон}$ — начальная и конечная концентрации пыли.

Пылеосадительные камеры. Осаждение в поле сил тяжести является наиболее простым и естественным, но малоэффективным

способом очистки газа. Такое осаждение проводят в пылеосадительных камерах, которые включают в себя набор горизонтальных полок, установленных в корпусе. При медленном движении запыленного газа между полками пыль оседает на них. Эти камеры предназначены для отделения только крупных частиц.

Жалюзийные пылеуловители. Несколько больший эффект достигается в жалюзийных пылеуловителях, в которых осаждение происходит под действием инерционных сил. В корпусе такого аппарата установлен ряд наклонных жалюзийных решеток, изменяющих траекторию газового потока, после чего значительная часть его отводится из аппарата — это очищенный газ. Пылевые частицы вместе с остатком газа по инерции продолжают движение по прямой, образуя концентрированный поток пыли, из которого затем дополнительно отделяют твердые частицы. Жалюзийные пылеуловители позволяют отделять лишь довольно крупные частицы и обеспечивают относительно невысокую степень очистки.

Циклоны. Среди разнообразных конструкций аппаратов, действие которых основано на методе инерционного пылеулавливания, наиболее распространенными в промышленности являются центробежные пылеуловители — циклоны. Они имеют простую конструкцию, компактны и обладают большой пропускной способностью. С их помощью можно достигать высокой степени очистки газа. По конструкции и принципу действия они аналогичны гидроциклонам (см. рис. 5.6), но обрабатывают не жидкость, а газ.

Значения центробежной силы и степени очистки газа в циклоне зависят, в частности, от радиуса закрутки потока — радиуса циклона. Более эффективную очистку от пыли, особенно от мелкой, обеспечивают так называемые батарейные циклоны, которые скомпонованы из группы циклонов малого радиуса, работающих параллельно. В этом случае общий поток запыленного газа разделяется на малые потоки соответственно числу циклонных элементов.

Рукавные фильтры. Фильтрация основана на различии размеров улавливаемых частиц и каналов пористых перегородок. В качестве фильтрующих перегородок чаще всего используют ткани из материалов природного (шерсть, хлопок) или синтетического происхождения. Чем мельче размер улавливаемых частиц, тем более плотная ткань требуется для их задержания, что приводит к возрастанию сопротивления потоку и увеличению затрат энергии на фильтрацию.

В химической промышленности для проведения процесса фильтрации газов наибольшее распространение получили рукавные фильтры (рис. 9.1). Запыленный газ поступает через входной патрубок 1 в вертикальные тканевые рукава 2, подвешенные в корпусе 3 и закрепленные снизу в трубной решетке 4. При проходе газа через рукава частицы оседают на внутренней поверхности и в

Рис. 9.1. Рукавный фильтр:

1 — входной патрубок; 2 — тканевый рукав; 3 — корпус; 4 — трубная решетка; 5 — сборник пыли; 6 — питатель; 7 — выходной патрубок

порах ткани. Очищенный газ удаляется через выходной патрубок 7. Весь фильтр разделен на секции, в которые последовательно прекращается подача газа для отчистки поверхности рукавов от накопленной пыли. Очистку проводят либо специальным механизмом встряхивания, либо кратковременной обратной продувкой воздухом. В этот период пыль внутри рукава оседает в нижнюю камеру — сборник пыли 5, а затем с помощью питателя 6 выводится из аппарата.

Рукавные фильтры обеспечивают высокую степень очистки, в том числе от тонкодисперсной пыли, но они непригодны для очистки горячих и влажных газов.

Скрубберы. При осуществлении так называемого мокрого способа очистки газов твердые частицы прилипают к капелькам или поверхности жидкости. В аппаратах для такой очистки используют свойство смачиваемости твердых частиц.

В полом скруббере разбрызгивают воду форсунками во всем объеме аппарата. Газ очищается от пыли, проходя такую водяную завесу. Загрязненная жидкость собирается на дне аппарата и отводится через штуцер.

Более высокой степени очистки достигают в насадочных скрубберах (рис. 9.2). В корпусе 1 аппарата на опорную решетку 5 насыпан слой насадки 2, состоящей из специальных насадочных тел, в качестве которых в наиболее простом варианте могут быть использованы куски кокса или кварца. Чаще всего применяют специальные керамические кольца или более сложные по форме насадочные тела. Над слоем насадки смонтиро-

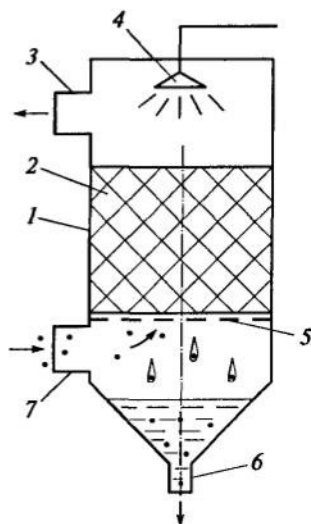
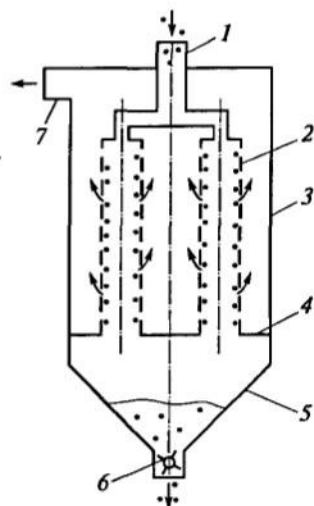


Рис. 9.2. Насадочный скруббер:

1 — корпус; 2 — насадка; 3 — выходной патрубок; 4 — распределитель жидкости; 5 — опорная решетка; 6 — сливной штуцер; 7 — входной патрубок

ван распределитель 4 жидкости, равномерно орошающий насадку. В объеме насадки образуются каналы сложной формы. По поверхности насадочных тел стекает пленка жидкости.

Запыленный газ поступает через входной патрубков 7 под слой насадки. При прохождении насадочных тел пылинки прилипают к жидкой пленке. Загрязненная жидкость стекает в донную часть аппарата и в виде суспензии удаляется из него через сливной штуцер 6. Очищенный газ выводится из пространства над насадкой через выходной патрубков 3.

Пенные пылеуловители. В промышленности хорошо зарекомендовали себя пенные пылеуловители, в которых вместо насадки применяют горизонтальные перегородки — тарелки с отверстиями для пропускания газа. По тарелке протекает слой жидкости. Газовый поток, проходящий через тарелку, при взаимодействии с жидкостью образует пену, которая захватывает пыль. Загрязненная жидкость перетекает с тарелки на тарелку через переливной порог.

«Мокрые» циклоны. Сочетание действия инерционных сил и эффекта прилипания пылинок к пленке жидкости реализуют в «мокрых» циклонах. Конструкция такого циклона аналогична конструкции, представленной на рис. 5.6, но он очищает газовый поток. При этом к нему дополнительно подводится жидкость, которая стекает по стенкам в виде пленки. Пылинки надежно поглощаются жидкостью, что увеличивает степень очистки газа. Причина повышенной эффективности «мокрого» циклона состоит в том, что практически отсутствует вторичный унос частиц пыли в отличие от «сухого» циклона.

Электрофилтры. Осаждение пылевых частиц в электрофилтрах основано на явлении ионизации газа в созданном электрическом поле и образовании заряженных пылевых частиц. Электрическое поле в рабочем элементе аппарата-электрофилтра образуют два электрода. Отрицательный электрод — катод — выполняют в виде проволоки, положительный — анод — в виде трубы или пластины. К электродам подводят постоянный ток высокого напряжения (десятки киловольт).

Между катодом и анодом возникает коронный разряд. Отрицательно заряженные ионы и электроны устремляются к аноду. По пути, сталкиваясь с пылинками и оседая на них, ионы и электроны заряжают пылинки, и те также направляются к аноду — осадительному электроду. Осевшие частицы при встряхивании сбрасываются в нижнюю часть аппарата.

В электрофилтрах размещают несколько пар электродов, соединенных электрически параллельно. Такие аппараты, используемые для тонкой очистки, т. е. очистки газового потока от мелкой пыли, могут работать при высокой температуре газового потока, достигающей 500 °С.

Контрольные вопросы

1. С какими целями проводят очистку газов от пыли?
2. Назовите известные вам способы очистки газов. Какие физические явления лежат в их основе?
3. Опишите устройство и действие пылеосадительных камер, жалюзийных пылеосадителей и циклонов.
4. Каковы устройство и принцип действия рукавного фильтра?
5. Как устроен и действует насадочный скруббер? Что представляет собой «мокрый» циклон?
6. Какие электрические процессы происходят в электрофильтре?

Глава 10

РАЗДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ЖИДКИХ СИСТЕМ

В жидких неоднородных системах мелкие частицы одного вещества, называемые *дисперсной фазой*, распределяются в объеме сплошной среды — *дисперсионной фазы*. Дисперсной фазой могут быть твердые частицы, распределенные в жидкости, и тогда они образуют *суспензию*. Если дисперсной фазой являются нерастворимые капельки жидкости, распределенные в другой жидкости, то они образуют *эмульсию*.

Суспензии и эмульсии характеризуются размером частиц дисперсной фазы. Различают суспензии грубые (с размером частиц более 100 мкм), тонкие (0,5... 100 мкм) и коллоидные растворы (менее 0,1 мкм). Эмульсии устойчивы лишь при незначительных размерах капелек (менее 0,4 мкм).

Способы разделения жидких неоднородных систем по физической основе (за исключением использования электрического поля) аналогичны способам разделения газопылевых образований.

Наиболее простым, но неэффективным способом разделения жидких неоднородных сред является осаждение под действием сил тяжести. Если в высоком цилиндре с водой интенсивно перемешать некоторое количество мелкого песка, то через небольшой промежуток времени из смеси начнут формироваться слои разной плотности (прозрачности) по высоте сосуда.

На дне образуется плотный слой осадка, состоящего из наиболее крупных твердых частиц. Выше расположен стесненный слой частиц, которые уже соприкасаются между собой, но еще остаются взвешенными в жидкости. Этот слой постепенно уплотняется при вытеснении жидкости из пространства между частицами. Здесь осаждение продолжается, но гораздо медленнее. Еще выше расположен слой свободного осаждения, аналогичный начальному состоянию смеси, в котором твердые частицы не соприкаса-

ются друг с другом. Визуально плотность этого слоя неодинакова по высоте. В самой верхней части сосуда остается слой чистой осветленной воды.

В химической промышленности разделение суспензий в поле сил тяжести проводят в аппаратах, называемых *отстойниками*. Их производительность пропорциональна скорости осаждения и горизонтальной площади осаждения. Поэтому такие аппараты имеют небольшую высоту, но занимают значительную площадь. Типовая конструкция отстойника непрерывного действия приведена на рис. 10.1.

Корпус *1* отстойника имеет большой диаметр и малую высоту. Внутри аппарата смонтирована гребковая мешалка *2*, вращаемая с очень малой скоростью (несколько оборотов в час). Суспензию подают в аппарат через приосевой входной патрубок *3*. При медленном радиальном движении жидкости твердые частицы оседают на днище отстойника конической формы.

Движение осадка к патрубку *б* для выгрузки происходит под действием гребковой мешалки и сил тяжести. Осветленная (очищенная) жидкость переливается в желоб *4* кольцевой формы, закрепленный по периферии корпуса. Жидкость выводится из аппарата через патрубок *5*.

Известно, что скорость осаждения крупных частиц больше, чем мелких. Для ускорения этого процесса и, следовательно, уменьшения размеров отстойника при обработке тонких суспензий применяют искусственное укрупнение — агрегатирование осаждаемых частиц. Для этого используют процессы коагуляции и флокуляции.

При *коагуляции* в суспензию вводят дополнительные химические вещества — *коагулянты*. Это соли алюминия или железа. Весьма распространенным коагулянтом является сульфат алюминия $Al_2(SO_4)_3$. Он хорошо растворим в воде и относительно дешев. В воде коагулянты образуют хлопья гидроксидов металлов, которые довольно быстро оседают под действием силы тяжести. По мере осаждения хлопья захватывают мелкие взвешенные частицы, в результате чего образуются их агрегаты со значительно большей скоростью осаждения.

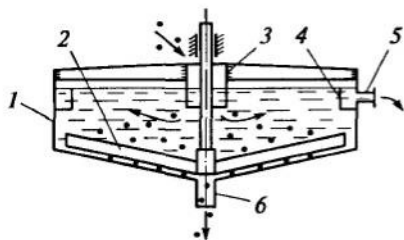


Рис. 10.1. Отстойник:

1 — корпус; *2* — гребковая мешалка; *3* — входной патрубок; *4* — желоб; *5* — патрубок для вывода осветленной жидкости; *6* — патрубок для выгрузки осадка

Укрупнения (агрегатирования) осаждаемых мелких частиц достигают также добавлением в суспензию высокомолекулярных соединений — *флокулянтов*. Наиболее распространенный флокулянт — синтетический полиакриламид. Из природных флокулянтов можно отметить, в частности, крахмал и целлюлозу.

Флокуляция отличается от коагуляции механизмом взаимодействия молекулы флокулянта со взвешенными частицами. Длинные молекулы присоединяются сразу к нескольким взвешенным частицам. В результате образуются трехмерные структуры большого размера, что приводит к ускорению процесса осаждения. Коагуляцию и флокуляцию широко используют в процессах очистки сточных вод.

Фильтрование — процесс разделения суспензий при помощи пористой перегородки. Материал для фильтровальных перегородок выбирают в соответствии с размером твердых частиц и агрессивностью разделяемых веществ. Обычно применяют текстильные и волокнистые материалы: хлопчатобумажные, шелковые, шерстяные ткани и ткани из искусственных и синтетических волокон; волокнистые материалы минерального происхождения — асбест, шлако- и стекловату, а также сетки из коррозионно-стойкой стали или бронзы.

В некоторых производственных процессах используют дешевые насыпные материалы: песок, уголь, целлюлозу и др. Они служат так называемыми насыпными фильтрами. Их целесообразно применять в том случае, когда твердая фаза является отходом производства и вместе с засыпкой идет на выброс.

Пористые керамические материалы стойки к агрессивным средам и обеспечивают высокую степень очистки. Их выпускают в форме плиток, цилиндров и колец, из которых собирают фильтрующие поверхности.

Один из распространенных приемов фильтрования — использование самого осадка в качестве фильтровальной перегородки.

В начале процесса твердые частицы задерживаются на фильтровальной перегородке, выполненной из волокнистого или пористого материала. По мере расхода суспензии число задержанных частиц растет, при этом увеличивается толщина слоя осадка. Именно этот пористый слой осадка становится основным фильтрующим элементом.

Процесс очистки завершается, когда слои свободного и стесненного осаждения исчезают, а остаются только слои осадка и осветленной жидкости.

Для продвижения жидкости (фильтрата) через каналы (поры) осадка необходимо создавать разность давлений в слое. В промышленных условиях в аппаратах-фильтрах искусственно создают разность давлений за счет вакуума под фильтровальной перегородкой либо избыточного давления над слоем суспензии.



Рис. 10.2. Классификация фильтров

Производственный процесс фильтрования включает в себя ряд последовательно выполняемых операций: подачу суспензии; непосредственно фильтрование; отвод фильтрата и выгрузку осадка; регенерацию фильтровальной перегородки (очистка, промывка, сушка). Эти операции могут проводиться в периодическом или непрерывном цикле.

Все перечисленные выше факторы отражены в приведенной на схеме классификации фильтров (рис. 10.2).

Нутч- и друк-фильтры. Эти аппараты наиболее просты по конструкции. Схематично конструкция нутч-фильтра представлена на рис. 10.3, а. В открытом корпусе 1 прямоугольного или круглого сечения смонтирована фильтрующая перегородка 2, собранная из пористых керамических плиток, уложенных на металлическую решетку. Перегородка может быть выполнена также

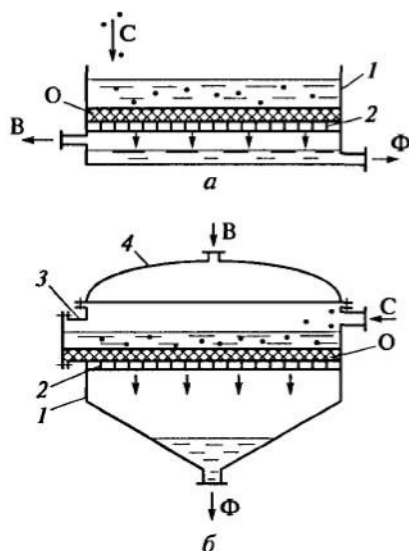


Рис. 10.3. Нутч-фильтр:

а — открытый; б — закрытый (друк-фильтр); 1 — корпус; 2 — фильтрующая перегородка; 3 — люк для выгрузки осадка; 4 — крышка; С — суспензия; О — осадок; В — воздух; Ф — фильтрат

из специальной фильтровальной ткани. Нутч-фильтры работают в периодическом режиме. Разделяемую суспензию С заливают в полость аппарата на поверхность фильтрующей перегородки. Из нижней полости корпуса вакуум-насосом отсасывают воздух, создавая здесь пониженное давление — вакуум, который является движущей силой процесса. Отделенная от осадка О жидкость — фильтрат Ф — самотеком покидает донную часть фильтра.

В друк-фильтрах (рис. 10.3, б) движущей силой процесса фильтрации служит давление газа на поверхности суспензии. В закрытую полость аппарата компрессором нагнетают воздух В. Под давлением воздуха жидкость — фильтрат Ф — проходит через фильтрующую перегородку, а на ней остается осадок О.

Полезная поверхность фильтрации нутч- и друк-фильтров невелика. При их эксплуатации невозможно избежать использования ручного труда, поэтому нутч-фильтры применяют лишь для разделения небольших объемов суспензии.

Фильтр-прессы. Значительно бóльшую производительность обеспечивают рамные фильтр-прессы. Их фильтрующую поверхность образует фильтровальная ткань, которую зажимают между деревянными или металлическими полыми рамами и плитами с вертикальными желобками. Суспензию нагнетают в полость рамы насосом, а фильтрат выводят через желобки плит. Фильтр-прессы работают в периодическом режиме. При достаточном накоплении осадка рамы и плиты разжимают. Осадок под действием собственного веса опадает в поддон. Действие рамных фильтр-прессов сопряжено с применением ручного труда, так как необходимо вручную удалять остатки осадка на ткани, перемещать плиты и рамы по горизонтальным направляющим перед началом рабочего цикла (для последующего сжатия всех этих элементов) и по его окончании — для выгрузки осадка.

Разнообразны конструкции фильтров как периодического, так и непрерывного действия, в которых все операции, сопровождающие процесс фильтрации, механизированы. Без применения ручного труда, в том числе при выгрузке осадка, действуют следующие конструкции фильтров: патронные, барабанные, дисковые, тарельчатые, карусельные и ленточные. Они весьма сложны по устройству и действию отдельных узлов при выполнении различных операций: непосредственно фильтрации, промывки, осушки осадка, сушки ткани и разгрузки осадка. Тем не менее основная операция — фильтрация — по сути не отличается от осуществляемой в простейшем нутч-фильтре. Использование перечисленных фильтров целесообразно при больших объемах производства.

Примером прогрессивной конструкции фильтра, действующего без применения ручного труда, может служить автоматический камерный фильтр-пресс (ФПАК). На горизонтальных плитах 7 (рис. 10.4), расположенных одна над другой, закреплены

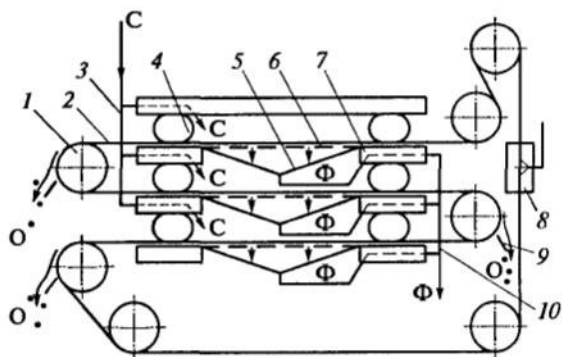


Рис. 10.4. Автоматический камерный фильтр-пресс:

1 — барабан; 2 — фильтровальная ткань-лента; 3 — коллектор суспензии; 4 — резиноканевая камера; 5 — коническое днище; 6 — щелевое сито; 7 — плита; 8 — камера регенерации фильтровальной ткани; 9 — съемный нож; 10 — коллектор фильтрата; С — суспензия; Ф — фильтрат; О — осадок

щелевые сита 6 и конические днища 5. По поверхности сита может перемещаться бесконечная лента 2 из фильтровальной ткани, приводимая в движение и направляемая барабанами 1 (аналогично ленточным транспортерам).

Движение ленты осуществляется в периодическом режиме. В процессе фильтрования лента неподвижна (зажата между плитами резиноканевыми камерами 4 за счет создаваемого внутри них давления). В этом режиме работы фильтра между смежными коническими днищами и резиноканевой камерой образуются замкнутые полости с фильтровальной перегородкой. По коллектору 3 поверх ленты под давлением подают суспензию С. Фильтрование происходит через фильтровальную ткань, и на ней образуется слой осадка О. Фильтрат Ф выводится из конического днища через коллектор 10.

По завершении рабочей фазы процесса в камерах 4 сбрасывается давление, и они разжимаются. Между камерой и лентой образуется зазор. Лента приходит в движение, и осадок транспортируется к барабанам 1, где происходит его срезание ножами 9. Осадок падает в сборный поддон (на рисунке не показан). В режиме движения фильтровальная лента проходит через камеру 8 регенерации, где очищается от остатков осадка струями воды. За один цикл происходит регенерация лишь некоторого участка фильтровальной ткани. По завершении снятия осадка лента останавливается, уплотнительная камера расширяется, и процесс фильтрования возобновляется.

Центрифуги. Значительной интенсификации процесса разделения можно достичь при его проведении в поле центробежных сил. В центрифугах увеличение движущей силы по сравнению с

силой тяжести оценивают *фактором разделения* $K_{ц}$ — отношением центробежной силы к силе тяжести:

$$K_{ц} = m\omega^2 r / (mg) = \omega^2 r / g,$$

где ω — угловая скорость ротора (барабана) центрифуги; r — радиус ротора; g — ускорение свободного падения.

В зависимости от значения фактора разделения различают *нормальные центрифуги* ($K_{ц} < 3000$) и *сверхцентрифуги* ($K_{ц} > 3000$).

В соответствии с *методом разделения* суспензий различают центрифуги *отстойные* и *фильтрующие*. Центрифуги также бывают периодического или непрерывного действия, с ручной или механической выгрузкой осадка, с вертикальным или горизонтальным размещением вала.

На рис. 10.5 представлена схема отстойной центрифуги периодического действия. Барабан 1 в форме цилиндрической стенки с закраиной установлен внутри корпуса 2. Суспензию С подают, как правило, в полость уже вращающегося барабана. Осадок О прижимается к стенке барабана, образуя неподвижный относительно стенки слой. Жидкость — *фугат* $\Phi_{ц}$ — выводится через сливную трубу. По завершении процесса осаждения (при накоплении осадка определенной толщины) и полной остановке барабана осадок выгружают вручную через верхнее окно либо открываемый на днище барабана проем.

В фильтрующих центрифугах стенка барабана перфорирована. Изнутри на стенке закрепляют фильтровальную ткань. При вращении барабана фильтрат проходит сквозь ткань и через отверстия в стенке выводится из него. Осадок накапливается на фильтрующей перегородке.

В простейших конструкциях центрифуг осадок выгружают вручную. В центрифугах большой производительности эту операцию механизуют. Для этого в центрифугах непрерывного действия используют либо поршни, либо шнеки.

Распространены также центрифуги с периодическим ведением процесса фильтрования и сменной последовательных операций без остановки вращения барабана даже при его разгрузке. Схема такой центрифуги приведена на рис. 10.6. Барабан 3 с закрепленной изнутри фильтровальной тканью вращается на горизонтальном валу внутри корпуса 2. Суспензия

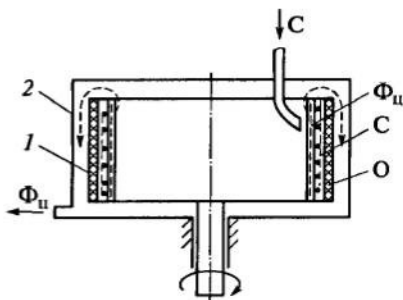


Рис. 10.5. Отстойная вертикальная центрифуга:

1 — барабан; 2 — корпус; С — суспензия; $\Phi_{ц}$ — фугат; О — осадок

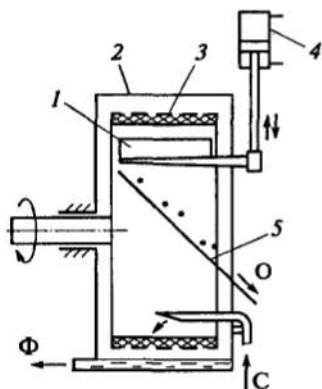


Рис. 10.6. Фильтрующая горизонтальная центрифуга:

1 — нож для срезания осадка; 2 — корпус; 3 — барабан; 4 — гидроцилиндр; 5 — желоб; С — суспензия; Ф — фильтрат; О — осадок

пензию С подают в полость барабана непосредственно при фильтровании, а фильтрат Ф собирается в донной части корпуса и выводится из него самотеком. При накоплении на стенке барабана осадка определенной толщины подачу суспензии прекращают, осадок промывают водой, подавая ее вместо

суспензии, затем осадок высушивают при вращении барабана в холостом режиме. Выгрузку выполняют срезанием осадка ножом 1, который поднимается с помощью гидроцилиндра 4. Осадок О падает на наклонный желоб 5 и под действием веса выводится из полости барабана. По завершении выгрузки нож опускается, и вновь подается суспензия на разделение.

Гидроциклоны. Для ускорения разделения жидких неоднородных систем методом осаждения используют аппараты, называемые гидроциклонами. Принцип их действия полностью соответствует принципу действия циклона, описанному в гл. 5. Различие в плотности обрабатываемых сред (жидкости и газа) сказывается лишь на величине и соотношении некоторых размеров этих аппаратов.

В отличие от центрифуг гидроциклоны не имеют подвижных частей; такие аппараты можно использовать и для разделения эмульсий.

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой дисперсная и дисперсионная фазы? Что такое суспензия и эмульсия?
2. Каковы физические основы методов разделения жидких неоднородных систем?
3. Как протекает процесс отстаивания? Какие факторы влияют на скорость осаждения твердых частиц?
4. Как устроен и действует отстойник? Какой его геометрический параметр является определяющим?
5. В чем смысл процессов коагуляции и флокуляции?
6. Чем определяется выбор материала для фильтрующих перегородок? Приведите примеры таких материалов для разных условий фильтрования.
7. Каковы функции осадка при фильтровании?
8. Что является движущей силой процесса фильтрования и какими способами ее создают?

9. Как устроены и действуют нутч-фильтры и рамные фильтр-прессы?
10. Назовите известные конструкции механизированных фильтров.
11. Как действует автоматический камерный фильтр-пресс?
12. Что является движущей силой процесса разделения в центрифугах? Что такое фактор разделения?
13. Чем различается действие отстойных и фильтрующих центрифуг?
14. Как действует фильтрующая центрифуга с автоматизированной сменой операций?
15. Как устроен и действует гидроциклон?

Глава 11

ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ. ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

11.1. Перемешивание в жидкой среде

На производственных установках перемешивание используют для ускорения технологических процессов. С помощью перемешивания осуществляют процессы получения суспензий или эмульсий, а если в реакторе протекает химический процесс, то перемешивание позволяет усреднить температуру в объеме реактора и получить стабильный режим проведения процесса. Аналогичный эффект по выравниванию концентрации веществ применяют в массообменных процессах — экстракции и кристаллизации.

Результативность процесса перемешивания характеризуют двумя основными показателями: эффективностью и интенсивностью.

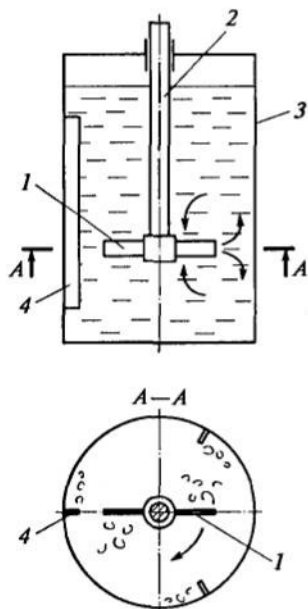
Эффективность оценивает качество процесса или степень достижения цели. Например, при получении суспензии — это степень однородности распределения твердых частиц во всем объеме аппарата.

Интенсивность — это показатель скорости достижения требуемой эффективности.

Ценой каких затрат энергии достигнут требуемый результат перемешивания, определяет третий параметр — *мощность*. Чрезмерное количество вводимой энергии является нецелесообразным и экономически невыгодным.

Для достижения высокой эффективности перемешивания при прочих равных условиях требуется затратить больше энергии. Поэтому в производстве не стремятся к высокой степени эффективности, а ограничивают ее на приемлемом уровне. При получении суспензий необязательно доводить концентрации твердых частиц в верхних слоях и у дна аппарата до одинаковых значений (обычно в донной части концентрация выше), если это не повлияет на

Рис. 11.1. Лопастная мешалка:



1 — лопасть мешалки; 2 — вал; 3 — корпус; 4 — перегородка

последующие технологические операции. Известны, например, такие данные: если разность концентраций в верхних и нижних слоях суспензии уменьшить с 10 до 5 %, т. е. сделать суспензию более однородной, то мощность на перемешивание необходимо увеличить в восемь раз.

Перемешивание относится к гидромеханическим процессам. Оно происходит за счет непрерывного перемещения отдельных частиц относительно друг друга. Такое движение создают искусственно, воздействуя тем или иным способом на жидкость.

Традиционный и наиболее древний способ — механическое перемешивание с применением вращающихся мешалок

разных конструкций. Выбор конструкции аппарата с мешалкой зависит от свойств перемешиваемой среды и требуемых эффективности и интенсивности перемешивания. Наиболее простой является *лопастная мешалка* (рис. 11.1). При вращении вала 2 лопасти 1 мешалки воздействуют на перемешиваемую жидкость, залитую в аппарат. Жидкость, находящаяся в непосредственной близости от лопасти, приходит во вращательное движение и за счет трения вовлекает в движение смежные слои. Различная скорость перемещения слоев, их сдвиг относительно друг друга обуславливают эффект перемешивания. При определенной скорости вращения вала жидкость отрывается от кромок лопасти с образованием вихрей, что еще более способствует ее перемешиванию.

Под действием центробежных сил жидкость отбрасывается от концов лопасти в радиальном направлении — к стенкам аппарата. На ее место притекает новая жидкость из выше- и нижележащих слоев. В целом при вращении происходит сложное взаимное перемещение микрообъемов жидкости, что и обеспечивает перемешивание.

Для создания дополнительных вихрей на стенках аппарата иногда монтируют вертикальные перегородки 4. При вращении жидкости за перегородкой также возникают отрывные течения с вихреобразованием.

Лопастные мешалки самые простые по устройству и соответственно самые дешевые. Но они плохо перемешивают вязкие жид-

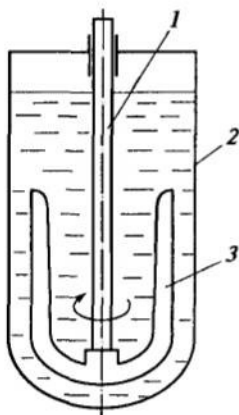


Рис. 11.2. Якорная мешалка:
1 — вал; 2 — корпус аппарата; 3 —
лопасть

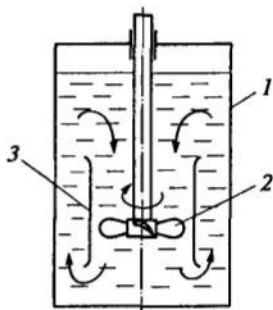


Рис. 11.3. Винтовая мешалка:
1 — корпус аппарата; 2 — лопасть
мешалки; 3 — направляющий аппарат

кости и слабо выравнивают концентрацию вещества или температуру по высоте аппарата.

В этих условиях более эффективны *рамная* и *якорная* мешалки (схема последней приведена на рис. 11.2). Их лопасти 3 имеют горизонтальные и вертикальные элементы, в том числе такие, которые повторяют форму корпуса 2 аппарата. При необходимости осуществления теплообмена через стенку такие мешалки наиболее эффективны, так как в пристенных слоях жидкость движется достаточно интенсивно.

Активные вертикальные токи жидкости в объеме аппарата создает *винтовая мешалка* (рис. 11.3). По конструкции она аналогична судовому винту. Основным направлением движения является движение вдоль оси аппарата. Движению по вертикали способствует также направляющий аппарат 3, который особенно эффективен в относительно высоких сосудах. Кроме того, жидкость вращается вокруг оси. Таким образом, внутри аппарата возникает винтовое перемещение жидкости. Это бывает необходимо, в частности, при изготовлении суспензий.

Однако для перемешивания вязких жидкостей такие мешалки малоэффективны, так как в поперечном направлении зона активного перемешивания здесь сравнительно невелика.

Турбинные мешалки по характеру воздействия на жидкость аналогичны действию рабочих колес центробежных насосов. Простейшая турбинная мешалка (рис. 11.4) — это плоский диск 1 с закрепленными по окружности радиальными лопатками 3. Лопатки могут быть вертикальными или наклонными, плоскими или изогнутыми.

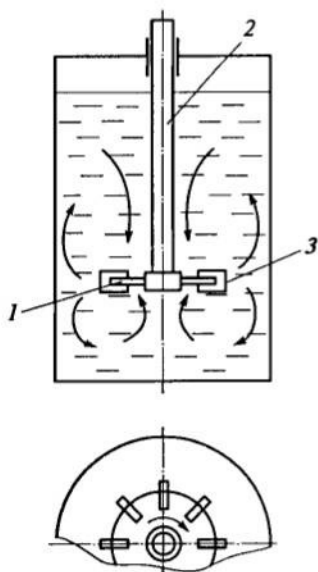


Рис. 11.4. Турбинная мешалка:

1 — диск; 2 — вал; 3 — лопатка

ся энергетически неоправданное вращение всей массы жидкости в аппарате.

В производственных условиях энергию, затрачиваемую на перемешивание, подводят к мешалке от электродвигателя. Обычно частота вращения вала мешалки меньше, чем частота вращения вала электродвигателя. Поэтому в привод мешалки встраивают редуктор, ременную передачу или оба этих механизма, позволяющие снизить частоту вращения выходного вала.

Мощность N , затрачиваемую на перемешивание, можно выразить через силу воздействия F лопасти мешалки на жидкость и линейную скорость движения v рабочего элемента мешалки:

$$N = Fv.$$

На значение величины F влияют такие факторы, как физические свойства жидкости, размеры лопасти, частота вращения мешалки и режим обтекания лопасти.

В формулу для расчета мощности, Вт, включают опытный поправочный коэффициент, полученный для той или иной конструкции мешалки с определенным соотношением размеров ее рабочих элементов:

$$N = k_N d_M^5 n^3 \rho_{ж},$$

При вращении вала 2 лопатки оказывают силовое воздействие на жидкость и приводят ее первоначально во вращательное движение. Под действием центробежных сил жидкость одновременно с вращением движется и в радиальном направлении. При ее оттоке в приосевой зоне понижается давление, поэтому сюда поступает жидкость из прилегающих слоев. Возникает вертикальная циркуляция. Высокие скорости вблизи самой мешалки и активная вертикальная циркуляция весьма эффективны для перемешивания, в частности, вязких жидкостей.

Для более четкой организации циркуляции жидкости рабочие лопатки закрывают сверху и снизу плоскими кольцевыми стенками, а по периметру мешалки устанавливают неподвижное направляющее устройство. При его использовании развивается интенсивное радиальное движение жидкости от мешалки к стенке аппарата и уменьшается

где k_N — опытный коэффициент, называемый критерием мощности (его значение приводят в справочниках); d_m — диаметр мешалки, м; n — частота вращения мешалки, с^{-1} ; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Кроме механического перемешивания в химической технологии осуществляют перемешивание за счет барботирования газа, пульсаций жидкости, размещения турбулизирующих элементов и т. д. Эти способы менее распространены в производственных процессах, однако в ряде конкретных случаев они вполне приемлемы.

Процесс перемешивания жидкости поднимающимися в ней пузырьками газа называют *барботажным перемешиванием*. Этот процесс распространен в химической промышленности при проведении абсорбции и биохимической очистки сточных вод, когда содержащийся в пузырьках газ участвует в процессе (например, при хемосорбции).

Применение для перемешивания *упругих колебаний* в жидкости возможно в двух вариантах. В одном из них — вибрационном перемешивании — в жидкость помещают диски, закрепленные на вертикальных штангах. Они совершают колебательные движения частотой до 100 с^{-1} и амплитудой до 20 мм, которые передаются жидкости.

В дисках выполнены отверстия конической формы. В этом случае жидкость проникает через отверстия с разной скоростью в зависимости от направления движения диска. Поэтому в целом в аппарате происходит еще и циркуляция перемешиваемой среды.

Колебательное движение в жидкости может быть создано также подачей воздуха переменного давления в специальную камеру, погруженную в жидкость. Внутренняя полость камеры связана с жидкостью открытыми патрубками, через которые пульсация газа и передается в жидкость.

Статические смесители, встраиваемые в трубопроводы, разнообразны по конструкции. На рис. 11.5 приведен пример конструкции такого смесителя. В корпусе 1 смонтированы поперечные перегородки 2, образующие пары диск—кольцо. Обтекая их, поток жидкости последовательно разделяется и сливается, за счет чего и происходит перемешивание. Часто в статических смесителях для повышения эффективности процесса создают закрученные потоки.

Статические смесители очень просты в обслуживании, поскольку не имеют подвижных частей. Энергию, необходимую для перемешивания вносит в поток насос, который транспортирует жидкость и находится далеко от

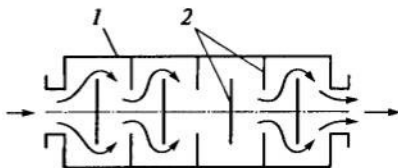


Рис. 11.5. Статический смеситель:
1 — корпус; 2 — перегородки

смесителя. Статические смесители можно использовать и для смешения вязких жидкостей. На производственных предприятиях их применяют сравнительно недавно. Для каждого конкретного технологического процесса такие смесители подбирают, как правило, опытным путем.

11.2. Псевдооживление зернистого материала

Процесс псевдооживления происходит при движении газа или жидкости через слой сыпучего материала. При этом частицы становятся подвижными, хорошо перемешиваются в пределах объема аппарата, тем самым выравнивая поле концентраций и температур.

Различают три состояния слоя сыпучего материала. При небольшой скорости движения газа слой твердых частиц остается неподвижным (рис. 11.6, *а*). При таком режиме проводят процесс фильтрования (гл. 10). При большой скорости наблюдается режим уноса твердой фазы (рис. 11.6, *б*). В промышленном производстве в этом режиме осуществляют процессы пневмо- и гидротранспорта.

В некотором диапазоне значений скорости газа существует третье состояние сыпучего слоя — так называемое псевдооживленное (рис. 11.6, *в*). В этом режиме слой уже перестает быть неподвижным, но унос еще не наступает. Частицы уже не соприкасаются друг с другом, а свободно витают в воздухе, но из аппарата не уносятся. Это состояние называют псевдооживленным, поскольку слой твердых частиц по некоторым признакам становится подобен жидкости: он обладает текучестью (может вытекать через отверстие в стенке аппарата), не имеет собственной формы, а при-

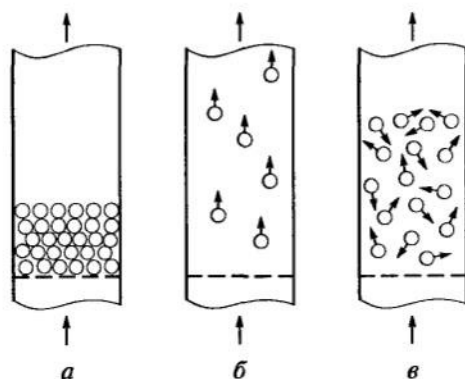
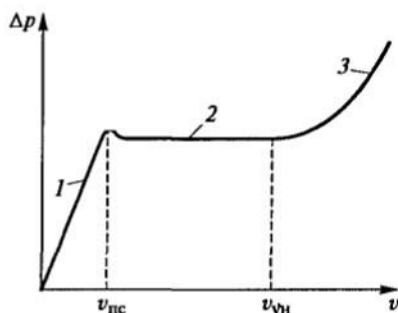


Рис. 11.6. Движение газа через слой твердого материала:

a — неподвижный слой; *б* — унос твердых частиц; *в* — псевдооживленный («кипящий») слой

Рис. 11.7. Зависимость перепада давлений в слое сыпучего материала от скорости продувки газа при различных состояниях этого материала:

1 — неподвижный слой; 2 — псевдооживление; 3 — унос твердых частиц; $v_{нс}$ — скорость начала псевдооживления; $v_{ун}$ — скорость уноса



нимает форму сосуда, в котором содержится, между ним и газом существует граница раздела. Внутри слоя частицы непрерывно хаотически движутся, напоминая кипящую жидкость. Отсюда другое название этого состояния сыпучего материала — «кипящий» слой.

Экспериментально показано, что зависимость перепада давлений от скорости газа в каждом из трех состояний слоя — кривая псевдооживления — имеет свои особенности. На кривой можно выделить три участка (рис. 11.7). Участок 1 соответствует неподвижному состоянию слоя. Газ проходит по каналам между частицами насыпанного слоя. Скорость газа небольшая, проходные сечения невелики, поэтому режим его течения здесь всегда ламинарный. При таком режиме перепад давлений прямо пропорционален скорости, и рассматриваемая зависимость представляет собой прямую линию.

Участок 2 соответствует состоянию псевдооживления. Здесь потери давления не меняются с возрастанием скорости газа. Увеличивается лишь проходное сечение — расстояние между частицами и соответственно высота и объем слоя.

Участок 3 характеризует рост перепада давлений при увеличении скорости газа. Этому участку соответствует режим пневмотранспорта. Такая зависимость свойственна потоку жидкости в трубопроводе при турбулентном течении.

Границы участков на графике соответствуют критическим значениям скорости потока газа: граница участков 1 и 2 — скорости начала псевдооживления, участков 2 и 3 — скорости уноса. На границе участков 1 и 2 кривая имеет выступ: здесь сопротивление немного больше, чем при самом процессе псевдооживления. Это объясняется тем, что для начала псевдооживления необходима некоторая дополнительная энергия, затрачиваемая на преодоление сил сцепления частиц друг с другом.

Почему в состоянии псевдооживления сопротивление слоя не растет с увеличением скорости газа? Для того чтобы твердая частица витала (висела) в потоке воздуха, согласно законам механики необходимо равенство внешних сил, действующих на нее.

Вдоль направления движения потока газа на частицу действуют сила тяжести, направленная вниз, и сила давления газа, направленная вверх. Суммарная сила воздействия газа на псевдооживленный слой частиц равна весу всех частиц слоя. Если эту силу (т.е. вес всех частиц) отнести к единице площади сечения аппарата, то получим значение перепада давлений Δp в этом слое. При определенном весе материала, находящегося в аппарате, и постоянной площади сечения аппарата потеря давления в этом режиме будет постоянной величиной.

Использование закономерностей процесса псевдооживления в промышленности обусловлено известными достоинствами этого состояния сыпучего материала. Благодаря хаотическому непрерывному перемещению частиц происходит выравнивание концентраций и температуры в объеме кипящего слоя, что важно при осуществлении химических или теплообменных процессов.

Псевдооживление широко используют при проведении химических реакций в присутствии мелкодисперсного катализатора. Непрерывное столкновение частиц со стенками аппарата и их перемещение от стенок внутрь объема обрабатываемой среды позволяет эффективно подводить или отводить теплоту именно через стенки реактора. Это было бы затруднительно при осуществлении процесса в неподвижном слое твердой фазы. По сравнению с неподвижным слоем здесь легко проводить процесс в непрерывном режиме. Сыпучий материал свободно перемещается от входа в аппарат к выходу из него.

К недостаткам «кипящего» слоя можно отнести интенсивное истирание частиц, сопровождающееся пылеобразованием и уносом мелкой фракции, что приводит к необходимости применения

в аппаратах или на линии отходящих газов пылеулавливающего оборудования. Недостатком также является ограниченный диапазон изменения расхода газа (от скорости псевдооживления до скорости уноса). Выход за границы этого диапазона приводит к качественному изменению гидродинамики слоя.

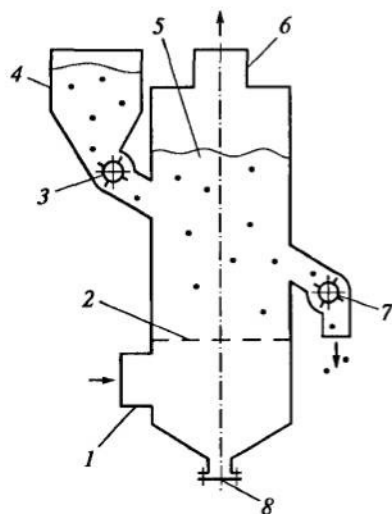


Рис. 11.8. Сушилка с «кипящим» слоем:
1 — патрубок для ввода сушильного агента; 2 — сетчатая перегородка; 3 — питатель; 4 — бункер; 5 — рабочая зона; 6 — выходной патрубок; 7 — затвор; 8 — люк для выгрузки остатка

На рис. 11.8 показан один из возможных вариантов схемы аппарата с «кипящим» слоем для сушки песка. Влажный материал из бункера 4 подается питателем 3 в рабочую зону 5 сушилки. Отметим, что форма такого аппарата в сечении может быть различной (круглая, квадратная, прямоугольная).

Сушильный агент (горячий воздух) через подводящий патрубок 1 и далее через сетчатую перегородку 2 поступает в аппарат, где и создается псевдооживленный слой. Интенсивная сушка песка происходит, пока он движется от входа в сушилку до выгрузки готового продукта, которая осуществляется с помощью затвора 7. Отработанный сушильный агент уходит из аппарата через выходной патрубок 6.

В конической части сушилки предусмотрен люк 8 для выгрузки остатка, который может просыпаться через перегородку 2 при прекращении подачи воздуха. Если перегородка выполнена пористой, непроницаемой для песка, то выгрузка остатка может осуществляться через боковой люк (на рисунке не показан).

Контрольные вопросы

1. Какую роль играет перемешивание в технологическом процессе?
2. По каким показателям оценивают результативность процесса перемешивания?
3. Почему искусственно ограничивают эффективность перемешивания в некоторых производственных процессах?
4. Перечислите способы воздействия на жидкость при перемешивании.
5. Какие конструкции мешалок используют при механическом перемешивании? Чем определяется выбор конструкции для конкретных условий перемешивания?
6. Какие факторы определяют мощность, потребляемую механическими мешалками?
7. Как действуют статические смесители? В чем состоит их достоинства? Приведите пример конструкции.
8. Каким образом используют упругие колебания при перемешивании?
9. Опишите три возможных состояния твердых частиц в слое сыпучего материала, пронизываемого газовым потоком.
10. Как изменяется сопротивление слоя сыпучего материала при увеличении скорости газа, проходящего через этот слой?
11. Почему сопротивление псевдооживленного слоя сохраняется постоянным при изменении скорости газа? Чем определяется перепад давлений?
12. Каковы преимущества проведения некоторых технологических процессов в псевдооживленном слое по сравнению с неподвижным слоем?
13. В чем состоят причины, ограничивающие применение «кипящего» слоя?

РАЗДЕЛ IV

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 12

ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

12.1. Механизмы переноса теплоты

Процесс переноса теплоты, происходящий между телами, имеющими разную температуру, называется *теплообменным*. Тела, которые участвуют в теплообмене, называются *теплоносителями*.

Теплообменные процессы возможны только при наличии разности температур теплоносителей, т. е. разность температур — движущая сила теплообмена.

Способы передачи теплоты. Различают три способа передачи теплоты (теплопередачи): теплопроводность, конвекция и теплопередача излучением.

Теплопроводность — это процесс передачи теплоты внутри тела от одних частиц к другим вследствие их движения и соударений. Передача теплоты только теплопроводностью может происходить лишь в твердых телах. Например, наружная поверхность стакана с горячим чаем становится также горячей за счет процесса теплопроводности внутри стенки стакана.

Конвекция — это процесс распространения теплоты в результате движения объемов и перемещения частиц жидкостей или газов. Примером передачи теплоты конвекцией является обогрев комнаты радиаторной батареей. Процесс обогрева можно значительно интенсифицировать применением вентилятора для перемещения воздуха в комнате.

Теплопередача излучением — перенос энергии, обусловленный процессами испускания, распространения и поглощения электромагнитных волн. Люди, животные, растения на Земле существуют благодаря теплоте, получаемой от Солнца.

В реальных процессах все три способа теплообмена обычно сопутствуют друг другу.

В тепловых процессах, осуществляемых в теплообменном аппарате, происходит передача теплоты от одного теплоносителя к другому, причем эти теплоносители в большинстве случаев разделены стенкой.

Перенос теплоты от поверхности твердого тела к газообразной или жидкой среде (или наоборот) называется *конвективной теплоотдачей* или просто *теплоотдачей*.

Уравнение теплового баланса. Для того чтобы найти количество теплоты, которое должно быть передано в теплообменном аппарате, необходимо составить уравнение теплового баланса.

В теплообменнике количество теплоты Q_1 , отдаваемое горячим теплоносителем в единицу времени, затрачивается на нагрев (Q_2) холодного теплоносителя, а часть теплоты (Q_n), рассеиваемая в окружающую среду, теряется. Соответствующее уравнение теплового баланса записывается в виде

$$Q_1 = Q_2 + Q_n. \quad (12.1)$$

Количество теплоты, переносимой в единицу времени, называют *тепловым потоком*. Если теплоносители не меняют своего агрегатного состояния (не происходит их конденсации и испарения), то уравнение теплового баланса (12.1) принимает вид

$$G_1 c_1 (T_{1н} - T_{1к}) = G_2 c_2 (T_{2к} - T_{2н}) + Q_n, \quad (12.2)$$

где G_1, G_2 — массовые расходы веществ, участвующих в процессе теплообмена, кг/с; c_1, c_2 — удельные теплоемкости этих веществ, Дж/(кг · К); $T_{1н}, T_{1к}$ — начальная и конечная температуры горячего теплоносителя, К; $T_{2н}, T_{2к}$ — начальная и конечная температуры холодного теплоносителя, К; Q_n — тепловые потери, Вт.

Под *удельной теплоемкостью* понимают количество теплоты, сообщаемой 1 кг вещества для изменения его температуры на 1 К.

В тех случаях, когда теплообмен между двумя средами сопровождается фазовым переходом (кипение, конденсация), в уравнениях теплового баланса необходимо учитывать теплоту фазового перехода. Например, для конденсатора, в котором происходит конденсация паров горячего теплоносителя вследствие нагревания холодного теплоносителя, уравнение теплового баланса имеет вид

$$G_1 r_1 = G_2 c_2 (T_{2к} - T_{2н}) + Q_n, \quad (12.3)$$

где r_1 — удельная теплота конденсации горячего теплоносителя, Дж/кг.

Под *удельной теплотой конденсации* понимают количество теплоты, выделяющейся при конденсации 1 кг теплоносителя.

Передача теплоты теплопроводностью. В твердых телах, обладающих упорядоченной молекулярной структурой, распространение теплоты обусловлено преимущественно теплопроводностью.

Основной закон теплопроводности — *закон Фурье* — гласит, что количество теплоты Q , передаваемой теплопроводностью в единицу времени через плоскую стенку, прямо пропорционально ее площади S и разности температур $T_{ст1} - T_{ст2}$ ее поверхностей и обратно пропорционально толщине стенки δ :

$$Q = (\lambda/\delta) S (T_{ст1} - T_{ст2}),$$

где λ — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности показывает, какое количество теплоты проходит вследствие теплопроводности в единицу времени через стенку толщиной 1 м и площадью 1 м² при разности температур ее поверхностей 1 К. Размерность этого коэффициента — Вт/(м · К).

Значение коэффициента теплопроводности зависит от природы вещества и его температуры.

Передача теплоты конвекцией. Различают *естественную конвекцию*, при которой движение частиц вызвано разностью плотностей газа или жидкости в различных точках объема вследствие разности их температур в этих точках, и *принудительную конвекцию*, при которой перемещение газа или жидкости осуществляется специальными устройствами — мешалками, вентиляторами, насосами и др.

Согласно *закону Ньютона* количество теплоты Q , отдаваемой стенкой омывающей ее жидкости (или воспринимаемой стенкой от жидкости) в единицу времени, прямо пропорционально площади S поверхности стенки и разности температур $T_{ст} - T_{ж}$ стенки и жидкости:

$$Q = \alpha S (T_{ст} - T_{ж}),$$

где α — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи показывает, какое количество теплоты передается от 1 м² поверхности стенки к жидкости (или от жидкости к стенке) в течение 1 с при разности температур стенки и жидкости 1 К. Размерность коэффициента теплоотдачи — Вт/(м² · К).

Коэффициент теплоотдачи α не является постоянной величиной для данного вещества или материала, а зависит от скорости перемещения жидкости вдоль поверхности теплообмена, размеров и формы этой поверхности, а также плотности, вязкости, теплопроводности, удельной теплоемкости и коэффициента объемного расширения движущейся жидкости.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от этих факторов очень сложна и не может быть установлена теоретическим путем. Поэтому для определения его значений прибегают к экспериментальным исследованиям, а опытные данные обрабатывают методом *теории подобия*, получая зависимости, справедливые для данного класса явлений, в пределах которого возможно обобщение данных отдельного опыта.

Из дифференциальных уравнений, описывающих конвективный теплообмен, с помощью теории подобия получены определенные комплексы, в которые входят тепловые величины, харак-

теризующие основные случаи переноса теплоты. Эти комплексы называются *критериями подобия*. К ним относятся:

• *число Рейнольдса*, характеризующее соотношение между инерционными силами и силами трения в подобных потоках:

$$Re = vl/\mu,$$

где v — скорость движения жидкости, м/с; l — характерный линейный размер, м; ρ — плотность жидкости, кг/м³; μ — ее динамическая вязкость, Па·с;

• *число Нуссельта*, характеризующее интенсивность теплообмена на границе между стенкой и средой:

$$Nu = \alpha l/\lambda,$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ — коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К);

• *число Пекле*, являющееся мерой соотношения между теплоотой, переносимой путем конвекции, и теплопроводностью:

$$Pe = vl/a,$$

где a — коэффициент температуропроводности, м²/с;

• *число Прандтля*, характеризующее подобие физических свойств теплоносителей в процессах конвективного теплообмена:

$$Pr = c\mu/\lambda,$$

где c — удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К).

Используя указанные критерии, можно на основании опытных данных находить значения коэффициента теплоотдачи α для отдельных технически важных случаев теплообмена. Для вынужденного турбулентного течения жидкости в прямой трубе, не сопровождающегося изменением ее агрегатного состояния,

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}.$$

Тогда с помощью формулы, определяющей число Нуссельта, можно найти значение коэффициента α .

При изменении агрегатного состояния вещества (конденсация паров, кипение жидкости) явления теплообмена еще более осложняются. Данные о тепловых величинах, характеризующих частные случаи теплообмена, приводятся в справочниках по теплопередаче.

Передача теплоты излучением. Все тела способны излучать энергию в виде электромагнитных волн. Эта энергия поглощается другими телами, имеющими более низкую температуру, и превращается в теплоту. Тепловое излучение соответствует инфракрасной, не видимой глазом части спектра электромагнитных колебаний с длиной волны более 0,8 мкм, являющейся продолжением ее видимой части. Спектральная область видимого электромагнитного излучения ограничена значениями длины волны 0,4... 0,8 мкм.

Твердые тела обладают сплошным спектром излучения. Интенсивность теплового излучения резко возрастает с повышением температуры. При температуре, превышающей 600°C , тепловое излучение приобретает доминирующее значение по сравнению с другими способами передачи теплоты.

Физические тела пропускают, отражают и поглощают тепловую энергию. В зависимости от способности тел пропускать, отражать и поглощать тепловую энергию различают абсолютно прозрачные, абсолютно белые и абсолютно черные тела. Абсолютно прозрачные тела пропускают всю поступающую энергию теплового излучения, абсолютно белые полностью отражают ее, а абсолютно черные поглощают всю подводимую энергию.

Однако в природе не существует тел, обладающих такими идеальными свойствами. Все реальные тела способны лишь частично пропускать, отражать и поглощать подводимую энергию электромагнитного излучения. Их называют *серыми*.

Согласно закону Стефана — Больцмана лучеиспускательная способность серого тела E пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры T его поверхности и его коэффициенту лучеиспускания C^{λ} :

$$E = C^{\lambda}(T/100)^4.$$

Лучепоглощательная и лучеиспускательная способность тел (их способность поглощать и испускать излучение) зависит от температуры.

Количество теплоты Q_{λ} , переданное в единицу времени от более нагретого твердого тела с температурой T_1 к менее нагретому телу с температурой T_2 , позволяет определить уравнение

$$Q_{\lambda} = C_{1-2}^{\lambda} S [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \varphi,$$

где C_{1-2}^{λ} — коэффициент взаимного излучения, зависящий от взаимного расположения тел, Вт/(м \cdot К 4); S — площадь поверхности излучения, м 2 ; T_1 , T_2 — абсолютные температуры нагретого и нагреваемого тел, К; φ — угловой коэффициент, зависящий от размеров поверхностей и расстояния между ними.

Чтобы защитить от попадания излучения и нагрева какое-либо тело, между ним и излучателем устанавливают экран, изготовленный из материала с хорошими отражательными свойствами.

В отличие от твердых тел многоатомные газы CO_2 , SO_2 и пары воды излучают и поглощают энергию не поверхностью, а объемом. Кроме того, эти вещества испускают и поглощают электромагнитное излучение не во всем спектре, как твердые тела, а лишь при определенных значениях длины волны, т.е. имеют полосы излучения и поглощения.

Количество теплоты, отдаваемое или воспринимаемое стенкой площадью 1 м^2 за счет излучения в течение 1 с при разности

температур 1 К, называется *коэффициентом теплоотдачи лучеиспусканием* α_n , Вт/(м²·К).

12.2. Процесс теплопередачи

В большинстве технологических процессов теплообмен между теплоносителями происходит через некоторую поверхность раздела. Этот вид теплообмена называется *теплопередачей*. Например, в трубчатых теплообменниках теплота передается через стенку трубы и два слоя загрязнений с обеих сторон стенки.

Основное уравнение теплопередачи. Количество теплоты, передаваемой в единицу времени, определяется *основным уравнением теплопередачи*:

$$Q = KS(T_1 - T_2). \quad (12.4)$$

Численное значение *коэффициента теплопередачи* K определяется количеством теплоты, которое передается от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку площадью 1 м² в течение 1 с при разности температур теплоносителей 1 К. Размерность коэффициента теплопередачи — Вт/(м²·К).

Соотношение для расчета значения коэффициента теплопередачи можно получить, рассмотрев процесс передачи теплоты от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку.

На рис. 12.1 показана плоская стенка толщиной $\delta_{ст}$, материал которой имеет коэффициент теплопроводности $\lambda_{ст}$. По одну сторону стенки протекает горячий теплоноситель с температурой T_1 в ядре потока, по другую — холодный теплоноситель с температурой T_2 . Температуры поверхностей стенки равны $T_{ст1}$ и $T_{ст2}$.

Коэффициент теплопередачи K можно определить (без учета загрязнений с обеих сторон стенки), решив уравнение

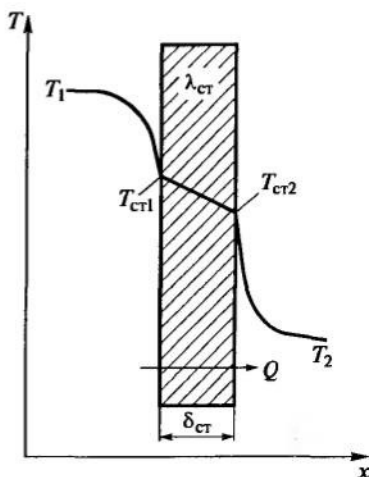


Рис. 12.1. Характер изменения температуры при теплопередаче через плоскую стенку:

T_1 — температура горячего теплоносителя; T_2 — температура холодного теплоносителя; $T_{ст1}$ — температура стенки со стороны горячего теплоносителя; $T_{ст2}$ — температура стенки со стороны холодного теплоносителя; $\delta_{ст}$ — толщина стенки; $\lambda_{ст}$ — коэффициент теплопроводности стенки; Q — количество теплоты, передаваемое в единицу времени от горячего теплоносителя к холодному

$$K = \frac{1}{(1/\alpha_1 + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + 1/\alpha_2)}, \quad (12.5)$$

где α_1, α_2 — коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю соответственно; $\lambda_{ст}$ — коэффициент теплопроводности стенки; $\delta_{ст}$ — ее толщина.

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется *термическим сопротивлением теплопередачи* R , а величина $\delta_{ст}/\lambda_{ст}$ — термическим сопротивлением стенки.

Из уравнения (12.5) следует, что термическое сопротивление теплопередачи

$$R_T = 1/\alpha_1 + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + 1/\alpha_2.$$

Движущая сила тепловых процессов. Движущей силой тепловых процессов является разность температур взаимодействующих сред. В промышленной аппаратуре теплопередача обычно протекает при переменной температуре теплоносителей. Значения температуры теплоносителей изменяются вдоль поверхности разделяющей их стенки, поэтому в расчетах используют среднюю разность температур $\Delta T_{ср}$, которая и должна войти в основное уравнение теплопередачи (12.4).

Количество теплоты, передаваемое в единицу времени через поверхность при теплообмене, пропорционально средней разности температур. Таким образом, основное уравнение теплопередачи принимает вид

$$Q = KS\Delta T_{ср}. \quad (12.6)$$

На рис. 12.2 показан характер изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при их прямоточном и противоточном движении.

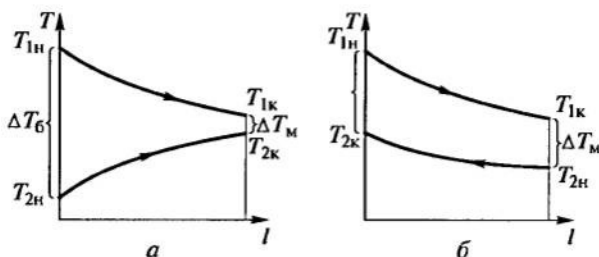


Рис. 12.2. Характер изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при их прямоточном (а) и противоточном (б) движении:

$T_{1н}, T_{1к}$ — начальная и конечная температуры горячего теплоносителя; $T_{2н}, T_{2к}$ — начальная и конечная температуры холодного теплоносителя; $\Delta T_б, \Delta T_м$ — большая и меньшая разности температур теплоносителей

от температуры $T_{1н}$ до $T_{1к}$, другой нагревается от $T_{2н}$ до $T_{2к}$. При прямотоке разность температур теплоносителей на входе в теплообменник $\Delta T_6 = T_{1н} - T_{2н}$, а на выходе из теплообменника $\Delta T_m = T_{1к} - T_{2к}$.

При противоточном движении теплоносителей значения ΔT_6 и ΔT_m находят по начальным и конечным значениям температуры горячего и холодного теплоносителей.

При $\Delta T_6/\Delta T_m < 2$ средняя разность температур определяется как среднеарифметическая величина:

$$\Delta T_{cp} = (\Delta T_6 + \Delta T_m)/2. \quad (12.7)$$

При более интенсивном теплообмене и больших значениях разности температур, т.е. при $\Delta T_6/\Delta T_m > 2$, средняя разность температур будет среднелогарифмической величиной:

$$\Delta T_{cp} = (\Delta T_6 - \Delta T_m)/\ln(\Delta T_6/\Delta T_m). \quad (12.8)$$

При перекрестном токе теплоносителей и смешанном токе в многоходовых теплообменниках

$$\Delta T_{cp} = \epsilon_T \Delta T_{cp}^{prot}, \quad (12.9)$$

где ϵ_T — поправочный коэффициент к средней разности температур ΔT_{cp}^{prot} , рассчитанной для случая противоточного движения теплоносителей.

Контрольные вопросы

1. Какими способами осуществляется передача теплоты? Приведите примеры.
2. Что представляет собой уравнение теплового баланса?
3. Каков физический смысл коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи и какова их размерность?
4. Что представляет собой процесс теплопередачи? Каков физический смысл и какова размерность коэффициента теплопередачи?
5. Что является движущей силой процессов теплообмена? Как рассчитывается средняя разность температур?

Глава 13

НАГРЕВАНИЕ, ОХЛАЖДЕНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ

13.1. Топливо-энергетическая база. Теплоносители

В настоящее время основными источниками энергии являются различные виды топлива: полезные ископаемые или получаемые

на их основе горючие органические вещества. Все виды топлива по *агрегатному состоянию* подразделяются на твердые, жидкие и газообразные.

К *твердому топливу* относятся каменный и бурый уголь, горючие сланцы, торф и древесина. *Жидкое топливо* — это в первую очередь нефть и продукты ее термической или каталитической переработки: бензин, лигроин, газойль, масла и топливные продукты, получаемые на их основе. *Газообразное топливо* представлено природным газом, попутными газами нефтедобычи, коксовым и генераторным газами, образующимися в процессе переработки нефти, а также при осуществлении нефте- и углехимических процессов.

Основной характеристикой топлива является его *удельная теплота сгорания* — количество теплоты, выделяемое 1 кг топлива при его полном сжигании.

Эта величина зависит от химического состава топлива и условий его сжигания. Например, удельная теплота сгорания торфа, МДж/кг, 1,88... 23,3; каменного угля — 27... 32; нефти — 41,8... 62,7; природного газа — 35,0... 45,8.

Ограниченность запасов нефти и перемещение основных центров ее добычи на северо-восток нашей страны требуют от химической науки поиска новых источников энергии, разработки высокоэффективных процессов переработки твердых и жидких горючих ископаемых.

Потребность экономики в топливно-энергетических ресурсах удовлетворяется за счет *первичных топливных ресурсов* (нефть, природный газ, уголь и др.) и *электроэнергии*, вырабатываемой на атомных электростанциях и гидроэлектростанциях.

Возрастание себестоимости получения этих энергоносителей требует более полного использования *вторичных энергетических ресурсов* — «отходов» (горячая вода, вторичный пар и др.), образующихся в результате проведения различных процессов.

Вторичные энергетические ресурсы принято подразделять на три основные группы: горючие (топливные), тепловые и энергетические ресурсы избыточного давления.

Горючие (топливные) ресурсы — это энергоресурсы, образующиеся в различных технологических процессах с применением топлива.

Тепловые ресурсы — это теплота отходящих газов при сжигании топлива, теплота воды или воздуха после использования их для охлаждения технологических агрегатов и установок, а также тепловые отходы производства (например, теплота горячих шлаков).

К последней группе относятся *энергетические ресурсы (газы и жидкости)*, имеющие избыточное давление, но уже не требующиеся на дальнейших стадиях данного технологического процесса. Энергию таких ресурсов преобразуют в механическую энергию,

которую можно использовать непосредственно для приведения в действие приборов, механизмов и машин или преобразовать в электрическую энергию.

Во всех теплообменных устройствах, применяемых в химической промышленности, основным рабочим процессом является теплообмен между теплоносителями.

На этапе разработки технологической схемы процесса при проведении необходимых расчетов требуется обоснованный выбор типа теплоносителя.

При выборе теплоносителя необходимо принимать во внимание диапазон значений рабочей температуры и способность теплоносителя обеспечить высокую интенсивность теплообмена (для этого требуется малая вязкость при высоких значениях плотности, теплоемкости и удельной теплоты парообразования). Кроме того, теплоноситель не должен оказывать отрицательного влияния на материал аппарата.

В качестве теплоносителей в теплообменных аппаратах применяют водяной пар, топочные газы, высококипящие жидкости и другие вещества, а в ряде случаев — вторичные энергоресурсы. Необходимый расход теплоносителя определяют из уравнения теплового баланса.

Тепловые процессы нагревания и охлаждения жидкостей и газов, а также конденсации паров проводят в *теплообменниках* — аппаратах, предназначенных для передачи теплоты от одних веществ другим.

Теплоносители с более высокой температурой, которые отдают теплоту, называют *нагревающими агентами*, теплоносители с более низкой температурой, воспринимающие теплоту, — *охлаждающими агентами*.

13.2. Нагревающие агенты и способы нагревания

В промышленности процесс нагревания осуществляется различными способами, классификация которых представлена на рис. 13.1.

Нагревание водяным паром. Одним из наиболее широко распространенных теплоносителей является насыщенный водяной пар, который обладает высокими теплофизическими характеристиками. Водяной пар имеет большую скрытую удельную теплоту конденсации — до 2,26 МДж/кг (при давлении 100 кПа) и высокие значения коэффициента теплоотдачи. Это обеспечивает при малом расходе пара и небольшой площади поверхности теплообмена передачу значительного количества теплоты.

Существенным достоинством насыщенного пара является постоянство температуры конденсации при данном давлении, что

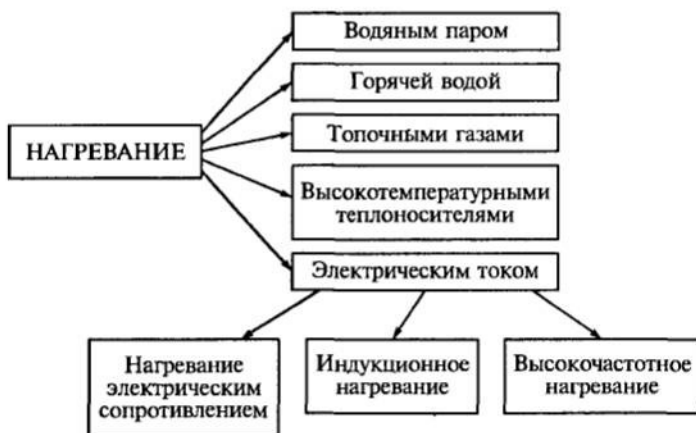


Рис. 13.1. Классификация способов нагревания

позволяет поддерживать неизменной температуру нагревания. Пар удовлетворяет также ряду других требований, среди которых наиболее важными можно считать доступность, пожаробезопасность и относительно высокий тепловой КПД.

Основной недостаток насыщенного водяного пара заключается в значительном увеличении давления с повышением температуры. При температуре $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ его давление составляет около 1 МПа. При таком уровне давления необходимо пользоваться прочной толстостенной и дорогостоящей аппаратурой и подводщими коммуникациями. Применение водяного пара обычно ограничивается областью температур $180\text{...}190\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Небольшой перегрев пара иногда полезен для уменьшения тепловых потерь в подводящих паропроводах. Такой *перегретый пар* получают на специальных установках — пароперегревателях посредством дополнительного нагревания насыщенного пара. В качестве теплоносителя перегретый пар применяют крайне редко, так как его коэффициент теплоотдачи невелик, а по теплосодержанию он почти не отличается от насыщенного пара.

Как теплоноситель насыщенный водяной пар используется в виде *глухого пара* (обогрев осуществляется через теплопередающую поверхность) или *острого пара* (пар и нагреваемый продукт смешиваются).

Нагревание глухим паром через стенку теплообменного аппарата применяется очень часто, поскольку при этом нагреваемый продукт не разбавляется конденсатом и не изменяет своего состава.

Схема обогрева глухим насыщенным паром приведена на рис. 13.2. Греющий пар поступает в теплообменник 1, где продукт нагревается паром через разделяющую их стенку трубочатки. Насыщенный пар, соприкасаясь с более холодной стенкой, конденсируется на

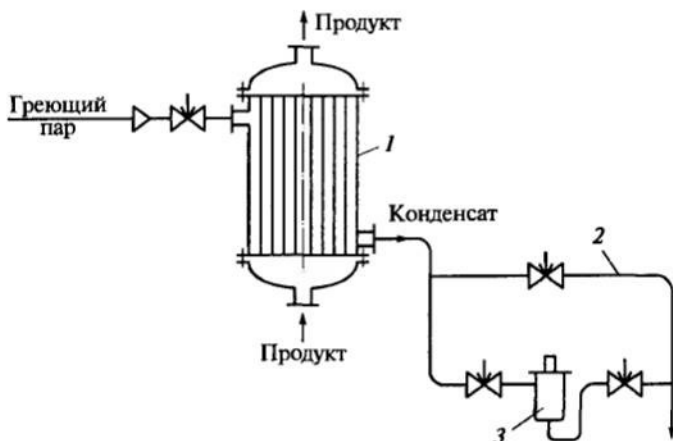


Рис. 13.2. Схема обогрева глухим насыщенным паром:
1 — теплообменник; 2 — обводная линия; 3 — конденсатоотводчик

ней, стекает и удаляется через нижний штуцер аппарата. Чтобы обеспечить удаление конденсата, пар всегда подают в верхнюю часть аппарата, а конденсат удаляют из его нижней части. Во избежание неоправданно большого расхода пара и снижения его давления на трубопроводе конденсата устанавливают конденсатоотводчик 3, препятствующий прохождению пара, но пропускающий конденсат.

Наибольшее распространение получили конденсатоотводчики с закрытым поплавком, используемые при давлении, не превышающем 1 МПа (рис. 13.3). Они состоят из чугунного литого корпуса 1, поплавок 2 с прикрепленными к нему штоком 3 и клапаном 4. Смесь пара и конденсата поступает через штуцер в корпус конденсатоотводчика. По мере накопления конденсата поплавок поднимается, и клапан открывает отверстие для выхода конденсата.

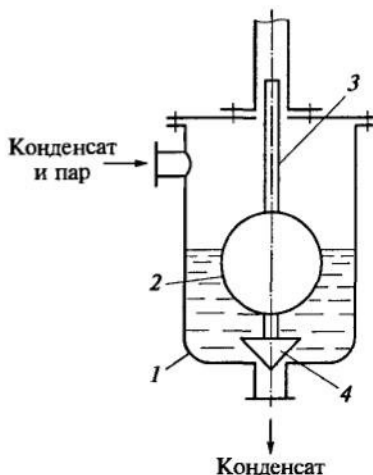


Рис. 13.3. Конденсатоотводчик с закрытым поплавком:
1 — корпус; 2 — поплавок; 3 — шток; 4 — клапан

Расход греющего пара определяют из уравнения теплового баланса с учетом теплоты, частично отбираемой от конденсата.

Нагревание горячей водой. На промышленных предприятиях вода является наиболее доступным теплоносителем и позволяет нагреть рабочую смесь до температуры 100°C , обеспечивая «мягкие» условия проведения процесса. Получают горячую воду в паровых водонагревателях — бойлерах и водогрейных котлах с применением топочных газов.

Однако горячая вода как теплоноситель имеет и существенный недостаток, ограничивающий ее применение: коэффициент теплоотдачи при нагревании горячей водой во много раз ниже, чем при использовании конденсирующегося пара. Кроме того, температура воды снижается по мере ее движения вдоль теплообменной поверхности, что ухудшает равномерность обогрева.

В теплообменных установках при обогреве водой или горячими жидкостями обычно применяется циркуляционный способ обогрева. Это означает, что теплообменник и источник теплоты образуют замкнутую систему, в которой циркулирует вода или высококипящие жидкости. Различают естественную и принудительную циркуляцию.

В случае использования схемы обогрева с *естественной циркуляцией* (рис. 13.3, а) принимают во внимание тот факт, что плотность нагретого теплоносителя меньше, чем у охлажденного. Нагретая жидкость самотеком перемещается от нагревательной печи 1 к теплообменнику 2, отдает теплоту и возвращается в печь для последующего нагревания. Скорость циркулирующей горячей воды зависит от высоты расположения теплообменника относительно печи. Для обеспечения значения скорости на уровне $0,2\text{ м/с}$ эта высота должна составлять не более 5 м .

При *принудительной циркуляции* (рис. 13.4, б) жидкость перемещается по замкнутому контуру с помощью насоса 3, примене-

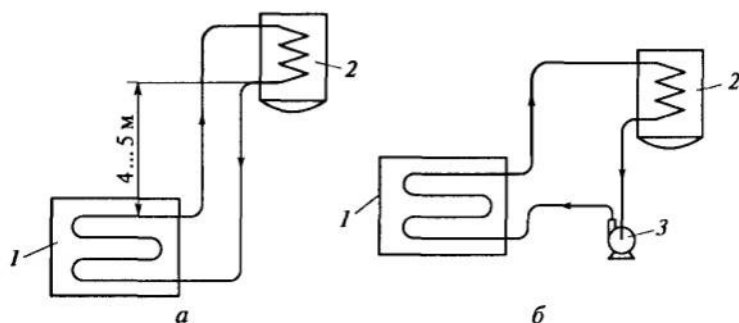


Рис. 13.4. Схема циркуляционного обогрева жидким нагревающим агентом:

а — с естественной циркуляцией; б — с принудительной циркуляцией; 1 — печь; 2 — теплообменник; 3 — насос

ние которого позволяет увеличить скорость циркуляции до 2,5 м/с и благодаря этому повысить интенсивность теплообмена.

Нагревание топочными газами. Топочные газы обеспечивают нагревание рабочих смесей до температуры 1000... 1100 °С. Этот процесс осуществляется в печах. На рис. 13.5 показана современная трубчатая печь для нагревания жидких продуктов, работающая на газообразном топливе. Горючий газ, выходя из сопла горелки 6, вовлекает в движение необходимое количество воздуха, смешивается с ним и поступает на пористую излучающую панель 5, выполненную из керамического материала. При горении газа пламя отсутствует, поэтому горелки такого типа называются беспламенными. Раскаленная поверхность панели испускает мощный поток теплового излучения. Образовавшиеся топочные газы с высокой температурой поступают в первую по ходу радиационную часть рабочего пространства печи, в которой теплота передается к радиационной нагреваемой поверхности 4 змеевика в основном за счет излучения.

В конвективной части печи теплота от частично охлажденных топочных газов передается к конвективной теплообменной поверхности 1 змеевика главным образом за счет конвекции. Для максимального использования теплоты на пути отходящих газов иногда устанавливают дополнительный змеевик-подогреватель 2. Газы удаляются через дымовую трубу 3.

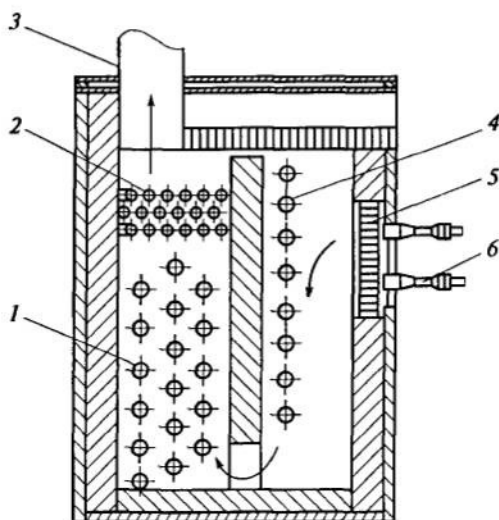


Рис. 13.5. Трубчатая печь для нагревания жидких продуктов:

1 — конвективная теплообменная поверхность; 2 — змеевик-подогреватель; 3 — дымовая труба; 4 — радиационная нагреваемая поверхность; 5 — излучающая панель; 6 — газовая горелка

В настоящее время в качестве топлива в трубчатых печах применяют преимущественно природный газ, содержащий большое количество метана. При отсутствии природного газа используют мазут, каменный или бурый уголь.

Недостатком данного способа нагревания является низкое значение коэффициента теплоотдачи, что требует увеличения площади поверхности теплообмена. Кроме того, такой обогрев характеризуется «жесткими» условиями нагревания, т. е. большим перепадом температур.

Нагревание высокотемпературными теплоносителями. Теплоносители этого вида получают теплоту от топочных газов или электрических нагревателей и передают нагреваемому материалу. Как и водяной пар, они являются промежуточными теплоносителями. Применение промежуточных высокотемпературных теплоносителей обеспечивает равномерность обогрева и безопасные условия работы. В качестве таких теплоносителей используют высококипящие органические соединения, минеральные масла или перегретую воду.

Высококипящие органические теплоносители находят наиболее широкое промышленное применение. К этой группе теплоносителей относится дифенильная смесь, состоящая из 26 % дифенила и 74 % дифенилового эфира. Эта смесь обладает высокой термостойкостью, низкой температурой плавления (12 °С) и используется при температуре, не превышающей 250 °С. Основные достоинства дифенильной смеси как теплоносителя — возможность достижения высокой температуры без повышения давления и нетоксичность.

Минеральные масла также часто служат для нагревания различных продуктов. Для этой цели применяют масла с высокой температурой вспышки — цилиндрическое, компрессорное и разные виды цилиндрического тяжелого масла. Верхний температурный предел при нагревании такими маслами составляет 300 °С.

Масла являются дешевыми теплоносителями, но имеют относительно низкие значения коэффициента теплоотдачи и легко разлагаются, образуя на стенках накипь, ухудшающую теплообмен. В силу указанных недостатков их используют реже, чем высокотемпературные органические теплоносители.

Перегретая вода применяется как теплоноситель при необходимости нагревания до температуры, достигающей критического значения 374 °С. При этом давление в системе возрастает до значений выше 20 МПа. Это относительно дешевый теплоноситель, но высокие значения давления ограничивают выбор конструкций теплообменников и требуют использования только цельнотянутых труб, сварных систем и специальных уплотнений. В связи с этим нагревание перегретой водой в настоящее время осуществляют редко.

При необходимости достижения еще более высокой температуры (500... 800 °С) в качестве промежуточных теплоносителей при-

меняют нитрит — нитратную смесь, ртуть и легкоплавкие металлы (натрий, калий и их сплавы). Однако установки, в которых используются такие теплоносители, крайне опасны: даже незначительная утечка паров (например, ртути) вызывает тяжелое отравление.

Нагревание электрическим током. С помощью электрического тока можно проводить нагревание в очень широком диапазоне температур, легко регулировать и точно поддерживать требуемый температурный режим. Все электрические нагреватели просты по конструкции, компактны и удобны в обслуживании. Однако их широкое применение сдерживается сравнительно высокими затратами электроэнергии.

В зависимости от способа превращения электрической энергии в тепловую различают нагревание электрическим сопротивлением (омическое нагревание), индукционное и высокочастотное нагревание.

Нагревание электрическим сопротивлением является наиболее распространенным способом, осуществляемым в электрических печах и позволяющим достигать значений температуры 1000...1100 °С. Нагреваемый аппарат — котел 2 (рис. 13.6) имеет вертикальные нагревательные секции 1 и донную секцию 3, изготавливаемые из жаростойких сталей в виде проволочных спиралей или лент с большим омическим сопротивлением. Эти элементы укреплены на изолирующих шамотных роликах или втулках, расположенных на стальном каркасе. Теплота от раскаленных спиралей и лент передается стенкам нагреваемого котла. Печь футеруют огнеупорной кладкой 4 и покрывают снаружи слоем тепловой изоляции 5. Для периодического осмотра нагревателей печь снабжена опускным устройством 6.

Индукционное нагревание основано на использовании теплового эффекта, вызываемого вихревыми токами Фуко, возникающими непосредственно в стенках стального нагреваемого аппарата. Аппарат с индукционным нагреванием подобен трансформатору, первичной обмоткой которого служат катушки индуктивности, а магнитопроводом и вторичной катушкой — стенки аппарата. Для удешевления процесса вещество в аппарате предварительно нагревают паром до температуры 180 °С, а затем осуществляют индукцион-

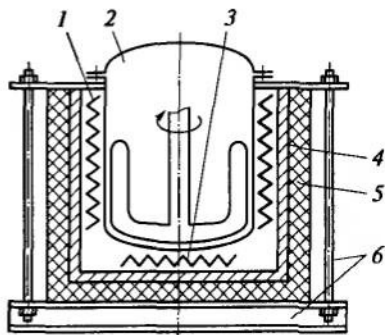


Рис. 13.6. Электрическая печь сопротивления:

1 — вертикальная секция; 2 — котел; 3 — донная секция; 4 — огнеупорная кладка; 5 — тепловая изоляция; 6 — опускное устройство печи

ное нагревание, обеспечивающее точное поддержание более высокой температуры в пределах 400 °С.

Высокочастотное нагревание применяется для диэлектриков — материалов, не проводящих электрический ток. Этим способом достигается весьма равномерное объемное нагревание материала. В химической технологии его используют для нагревания пластических масс перед прессованием, сушки некоторых материалов и других целей. Он требует сложной аппаратуры для преобразования переменного тока частотой 50 Гц в ток высокой частоты (10... 100 МГц). Установка имеет сравнительно низкий КПД и неэкономична в эксплуатации.

13.3. Охлаждающие агенты и способы охлаждения. **Конденсация**

Для охлаждения рабочей среды до температуры 10... 30 °С наиболее широко применяют воду и воздух. Вода имеет более высокие значения теплоемкости и коэффициента теплоотдачи, чем воздух. В зависимости от времени года и климатических условий температура воды природных водоемов достигает 12... 25 °С, а артезианская вода имеет температуру 4... 5 °С.

На предприятиях вводится система водооборота, которая позволяет сократить в целях экономии потребление воды из внешних источников и уменьшить сброс загрязненной воды в водоемы.

Оборотную воду из теплообменных устройств охлаждают в градирнях — башнях с размещенным внутри слоем насадки, по которой стекает вода. За счет частичного испарения вода охлаждается в потоке движущегося противотоком воздуха и снова используется в качестве охлаждающего агента. Обратная вода в летних условиях имеет температуру около 30 °С, что учитывается при проектировании и эксплуатации технологического оборудования.

При использовании атмосферного воздуха в качестве охлаждающего агента в градирнях и теплообменных аппаратах с оребренными трубками осуществляют его принудительную циркуляцию с помощью вентиляторов. Преимущества воздуха обусловлены его доступностью и тем, что он практически не загрязняет наружную поверхность охлаждаемых трубок. К его недостаткам следует отнести сравнительно низкий коэффициент теплоотдачи и небольшую удельную теплоемкость, вследствие чего требуемый массовый расход воздуха должен быть значительным.

Лед применяют для охлаждения рабочей среды до температуры 0 °С. Если ко льду или к снегу добавить кристаллическую поваренную соль (NaCl), то температура таяния этой смеси будет ниже 0 °С. Наиболее низкую температуру смеси (-21,2 °С) можно получить при содержании соли около 29 %.

В качестве промежуточных хладагентов в холодильной технике используют рассолы NaCl и CaCl₂.

Для охлаждения до температуры ниже 0 °С применяют такие хладагенты, как аммиак и хладоны, имеющие низкую температуру кипения.

Конденсация паров и газов в химической промышленности осуществляется путем их охлаждения. Данный процесс используется при выпаривании растворов, ректификации, сушке и др. Объем получаемого конденсата примерно в 1000 раз меньше объема исходного конденсируемого пара, в результате чего при проведении этого процесса создается значительное разрежение.

В зависимости от свойств и назначения конденсируемых продуктов процесс проводится в конденсаторах смешения или поверхностных конденсаторах. В конденсаторах смешения отработанные пары смешиваются с водой, подаваемой для охлаждения пара, конденсируются, а затем выбрасываются в канализацию. Конструкции этих аппаратов будут рассмотрены далее. В поверхностных конденсаторах теплообмен происходит через поверхность, что позволяет удалять получаемый конденсат и охлаждающую воду раздельно.

Контрольные вопросы

1. Какими соображениями необходимо руководствоваться при выборе теплоносителя?
2. Перечислите достоинства водяного пара как теплоносителя. Каковы особенности его применения?
3. В чем преимущества и недостатки нагревания с помощью дымовых газов?
4. Какие высокотемпературные теплоносители вам известны?
5. Какими способами осуществляется нагревание с помощью электрического тока?
6. Какие охлаждающие агенты применяются для охлаждения до температуры 10...30 °С? Каковы их характеристики?

Глава 14

ТЕПЛООБМЕННАЯ АППАРАТУРА

14.1. Классификация и конструкции теплообменников

Теплообменники — это аппараты, в которых осуществляется теплообмен между греющей и нагреваемой средами. Греющие и нагреваемые среды называют *теплоносителями*.

В теплообменных аппаратах могут происходить различные тепловые процессы: нагревание, охлаждение, испарение, конденсация, кипение и др. Теплообменники могут выполнять разные функции. В зависимости от *назначения* различают подогреватели, испарители, конденсаторы, скрубберы, кипяильники, выпарные аппараты и др.

Теплообменные аппараты по *принципу взаимодействия фаз* разделяют на поверхностные, смесительные и регенеративные.

В *поверхностных теплообменниках* теплообмен между средами может осуществляться через трубчатую, плоскую или иную поверхность (соответственно в кожухотрубчатых, пластинчатых и других аппаратах).

В *смесительных теплообменниках* теплоноситель смешивается непосредственно с рабочей средой. К таким теплообменникам относятся градирни, конденсаторы смешения и аппараты с барботажом газа.

В *регенеративных теплообменниках* проводят нагревание керамических твердых тел, размещенных в аппарате, а затем применяют их для нагревания рабочей среды.

Кожухотрубчатые теплообменники. Эти аппараты наиболее широко используются в химической и нефтехимической промышленности. На рис. 14.1 представлен кожухотрубчатый теплообменник жесткой конструкции, включающий в себя корпус (или кожух) *1* и приваренные к нему трубные решетки *2* с пучком труб *3*.

Выступающие из корпуса части решеток являются одновременно фланцами *5*, к которым крепятся сферические днища *4*. В таком теплообменнике одна среда (*I*) движется внутри труб, а другая (*II*) — в межтрубном пространстве, омывая пучок труб снаружи. При этом нагреваемую среду направляют снизу вверх, а среду, отдающую теплоту, — в противоположном направлении.

Трубы в решетках обычно размещают равномерно по периметрам правильных шестиугольников (рис. 14.2, *a*),

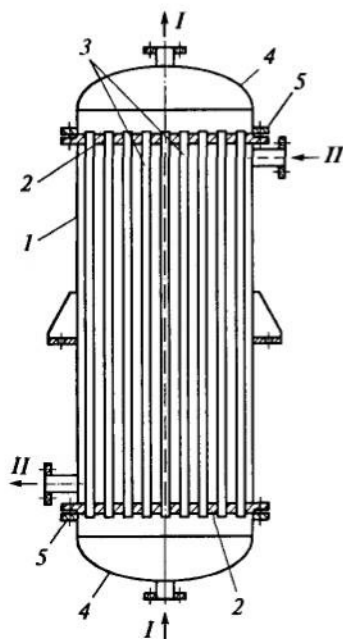


Рис. 14.1. Кожухотрубчатый теплообменник: *1* — корпус (или кожух); *2* — трубные решетки; *3* — трубы; *4* — днища; *5* — фланцы; *I*, *II* — потоки теплоносителей

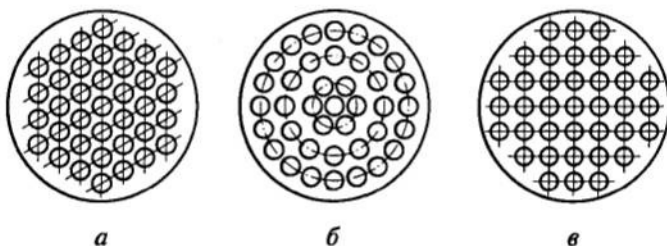


Рис. 14.2. Способы размещения труб в трубных решетках:

a — по периметрам правильных шестиугольников; *б* — по окружностям; *в* — коридорное расположение

что обеспечивает компактность их расположения, или по concentрическим окружностям (рис. 14.2, *б*). Для облегчения очистки наружных поверхностей труб иногда применяется коридорное расположение — по сторонам квадратов (рис. 14.2, *в*).

Для интенсификации процесса теплоотдачи в ряде конструкций теплообменных аппаратов предусмотрено размещение перегородок, увеличивающих число ходов для теплоносителей, что приводит к возрастанию скорости их потоков. Такие теплообменники называют многоходовыми.

При большой разности температур теплоносителей вследствие неодинакового теплового удлинения элементов конструкции аппарата в сварных швах возникают значительные механические напряжения, которые могут превысить предел прочности материала. Для предотвращения разрушения аппарата создают конструкции, в которых пучок труб перемещается относительно кожуха для компенсации теплового удлинения. Такие конструкции используют при разности температур пучка труб и кожуха, превышающей 50 °С.

При малом удлинении труб приемлема конструкция теплообменника с линзовым компенсатором 2 (рис. 14.3, *а*), расположенным на кожухе 1. При большой длине труб и значительных перемещениях применяют теплообменники с плавающей головкой (рис. 14.3, *б*). Верхняя часть кожуха 1 теплообменника этой конструкции присоединена к верхней трубной решетке, а нижняя трубная решетка имеет самостоятельное днище — плавающую головку 3. Таким образом, пучок труб может свободно перемещаться относительно наружного корпуса, не вызывая в деталях механических напряжений.

На рис. 14.3, *в* приведена конструкция теплообменника с компенсирующим устройством в виде U-образных труб. Кожух 1 не связан жестко с трубами 4, и каждый элемент может удлиняться, не вызывая напряжений в месте присоединения.

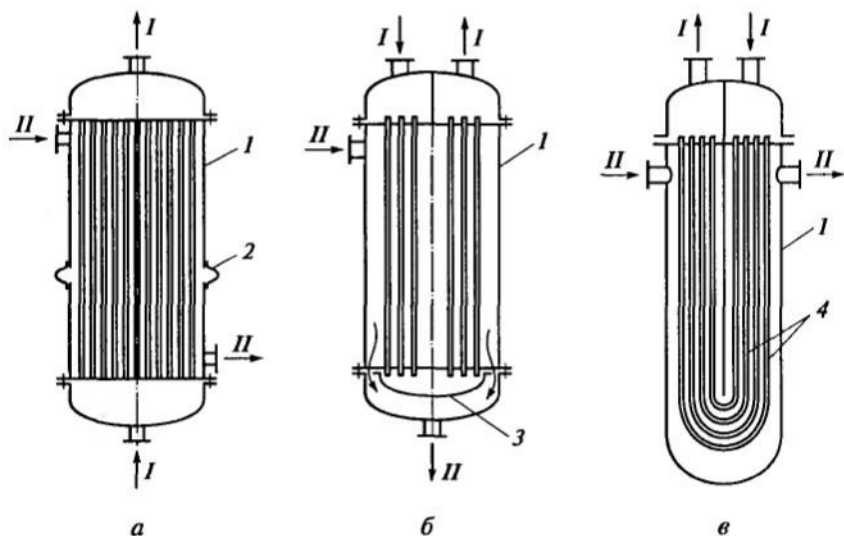


Рис. 14.3. Кожухотрубчатые теплообменники с компенсирующими устройствами:

a — с линзовым компенсатором; *б* — с плавающей головкой; *в* — с U-образными трубами; 1 — кожух; 2 — линзовый компенсатор; 3 — плавающая головка; 4 — U-образные трубы; I, II — потоки теплоносителей

Трубы в трубной решетке укрепляют различными способами: развальцовкой, сваркой, склеиванием или пайкой. Иногда их крепят с помощью разъемных сальниковых устройств, благодаря которым при необходимости трубы легко заменить. Выбор способа крепления зависит от свойств материалов, из которых изготовлены трубы и решетка, а также рабочего давления.

Теплообменники типа «труба в трубе». Теплообменник этого типа (рис. 14.4) представляет собой несколько отрезков труб 2, каждый из которых заключен в трубу 1 большего диаметра. Внутренние трубы соединены друг с другом последовательно «калачами» 3, наружные — патрубками с фланцами. Отдельные элементы теплообменника собирают в вертикальные секции. В такой конструкции благодаря малой площади сечения внутренней трубы и узкому кольцевому зазору даже при небольшом расходе теплоносителей достигается высокая скорость их потоков, что обеспечивает эффективную теплоотдачу. К недостаткам таких конструкций можно отнести громоздкость и металлоемкость.

Змеевиковые теплообменники. Змеевик 3 (рис. 14.5) изготавливают из труб, свернутых в спирали, и заключают в кожух 1. Для увеличения скорости потока среды, омывающей наружную поверхность змеевика, в некоторых конструкциях предусмотрен внут-

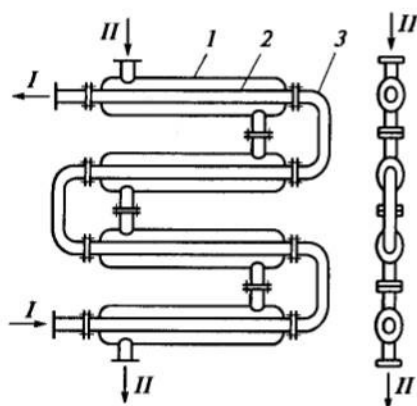


Рис. 14.4. Теплообменник типа «труба в трубе»:

1 — наружная труба; 2 — внутренняя труба; 3 — «качал»; I, II — потоки теплоносителей

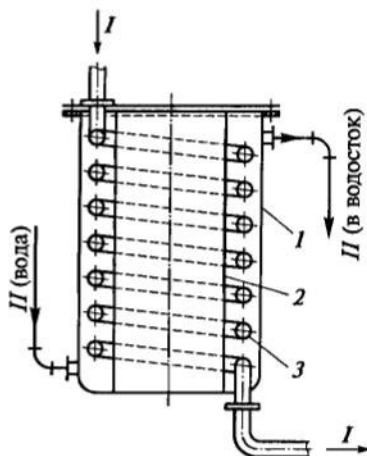


Рис. 14.5. Змеевиковый теплообменник:

1 — кожух; 2 — внутренний стакан; 3 — змеевик; I, II — потоки теплоносителей

ренный стакан 2. Основными недостатками таких теплообменников являются малый коэффициент теплоотдачи теплоносителя II, омывающего змеевик, и незначительная площадь поверхности теплообмена.

Спиральные теплообменники. В таких теплообменниках (рис. 14.6) поверхность теплообмена образуется двумя металлическими листами — 1 и 2, свернутыми в спирали. Внутренние концы листов приварены к глухой разделительной перегородке 3, а их наружные концы сварены друг с другом. С торцов спирали закрыты крышками 4, установленными на прокладках. Таким образом, внутри аппарата образуются два изолированных спиральных канала шириной 8 и 12 мм, по которым противотоком движутся теплоносители. Теплоноситель I входит в верхний штуцер и удаляется через правый боковой штуцер, а теплоноситель II поступает в левый боковой штуцер и отводится через нижний штуцер. Эти теплообменники компактны, имеют малое гидравлическое сопротивление, но не могут быть использованы при большом давлении рабочей среды.

Теплообменники с оребренными трубами. В том случае, когда один из теплоносителей имеет низкий коэффициент теплоотдачи (например, газы, вязкие жидкости), применяют теплообменники с оребренными трубами. Оребрение позволяет интенсифицировать процесс за счет увеличения площади поверхности теплооб-

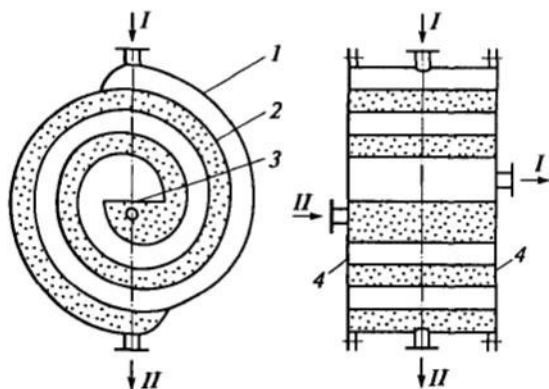


Рис. 14.6. Горизонтальный спиральный теплообменник:

1, 2 — листы; 3 — разделительная перегородка; 4 — крышки; I, II — потоки теплоносителей

мена. На рис. 14.7 представлена конструкция такого теплообменника. Теплообменники, собранные из секций оребренных труб, широко используются для нагрева воздуха и других газов и носят название *калориферов*. Греющий теплоноситель (например, водяной пар) поступает в трубы калорифера, а воздух подается вентилятором вдоль ребер перпендикулярно трубам.

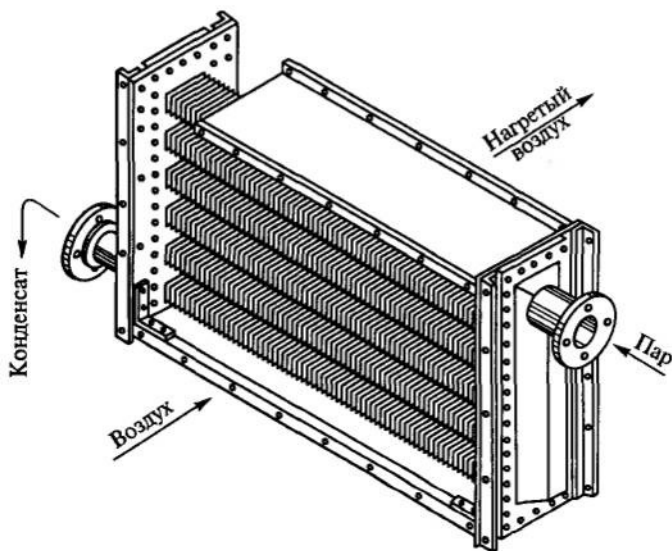


Рис. 14.7. Оребренный холодильник-калорифер

Рис. 14.8. Барометрический конденсатор с сегментными полками:

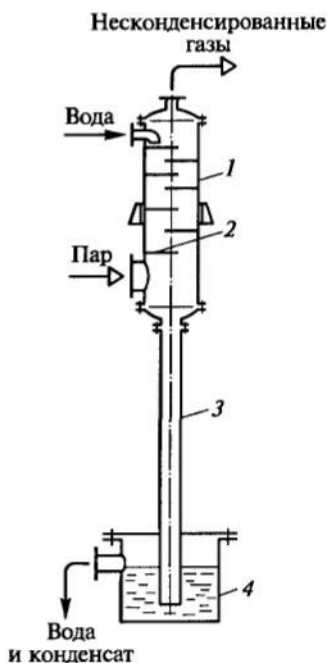
1 — корпус; 2 — полка; 3 — барометрическая труба; 4 — барометрический ящик

Аппараты воздушного охлаждения. Эти аппараты предназначены для охлаждения потоков, перемещающихся в секциях оребренных труб, воздухом, который подается на наружную поверхность труб с помощью вентилятора.

Смесительные теплообменники. Примером аппаратов этого класса служит барометрический конденсатор с сегментными полками (рис. 14.8), обычно применяемый при проведении процесса конденсации водяного пара при низком давлении. Аппарат имеет корпус 1, внутри которого расположены сегментные полки 2. Нижний штуцер присоединен к барометрической трубе 3, конец которой погружен в барометрический ящик 4, заполненный водой.

Охлаждающая вода поступает в верхнюю часть аппарата и стекает с полки на полку, образуя завесу из капель, брызг и струй. Пар подается в нижнюю часть корпуса и, поднимаясь вверх, соприкасается со стекающей водой и конденсируется.

Вода, смешанная с конденсатом, выводится через барометрическую трубу, образующую барометрический затвор, а несконденсированные газы удаляются из верхней части аппарата вакуумным насосом.



14.2. Конструктивный расчет поверхностного теплообменника

При проектировании теплообменника тепловой расчет сводится к определению необходимой площади поверхности теплообмена при известных значениях расхода, начальной и конечной температуры теплоносителей.

Для действующих теплообменных аппаратов выполняют поверочные тепловые расчеты, результаты которых позволяют сопоставить возможную производительность аппарата с фактической и определить условия, соответствующие оптимальному режиму работы теплообменника.

Конструктивный расчет проводят совместно с гидравлическим, а затем подбирают соответствующую стандартную или нормализованную конструкцию теплообменного аппарата.

Необходимо, чтобы выбранная конструкция была оптимальной, т. е. обеспечивала интенсивный теплообмен и в то же время отличалась низкой стоимостью, надежностью и удобством в эксплуатации.

До проведения собственно расчета трубчатых теплообменников следует установить целесообразность направления одного из теплоносителей в трубное, а другого — в межтрубное пространство аппарата.

В трубное пространство теплообменника целесообразно подавать с малым расходом теплоносителя, обладающие большой вязкостью, содержащие твердые взвеси и загрязнения (для облегчения очистки поверхности), а также химически активные вещества (что не потребует изготовления корпуса из коррозионно-стойкого материала).

Необходимо иметь в виду, что при направлении нагревающего теплоносителя в трубы уменьшаются потери теплоты в окружающую среду.

При выборе направления взаимного движения теплоносителей, следует также учитывать преимущество противотока при теплообмене (без изменения агрегатного состояния).

Скорости теплоносителей в выбранном аппарате должны обеспечивать благоприятное сочетание интенсивного переноса теплоты и умеренного расхода энергии на перемещение теплоносителя.

Тепловой расчет проектируемого теплообменника проводят в такой последовательности.

1. Определяют тепловую нагрузку теплообменника. С помощью уравнений (12.2) и (12.3) рассчитывают значения расхода теплоносителей. В случае если эти значения заданы, то находят неизвестную конечную температуру одного из теплоносителей. Если значения температуры обоих теплоносителей на выходе из теплообменника неизвестны, то их задают, принимая во внимание то, что разность температур теплоносителей на конце теплообменника должна составлять не менее 5 К.

2. Используя одно из уравнений (12.7) — (12.9), определяют значение средней разности температур и проводят предварительный выбор теплообменника. Принимая во внимание данные табл. 14.1, задают ориентировочное значение коэффициента теплопередачи $K_{\text{оп}}$ и рассчитывают соответствующее значение площади поверхности теплопередачи по формуле

$$S_{\text{оп}} = Q / (K_{\text{оп}} \Delta T_{\text{ср}}).$$

3. По полученному значению $S_{\text{оп}}$ выбирают конкретный вариант конструкции теплообменника и находят значения коэффици-

**Ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи,
Вт/(м²·К)**

Вид теплообмена	Вынужденное движение	Свободное движение
От газа к газу (при невысоком давлении)	10...40	4...12
От газа к жидкости (газовые холодильники)	10...60	6...20
От конденсирующегося пара к газу (воздухоподогреватели)	10...60	6...12
От жидкости к жидкости:		
вода	800...1700	140...340
углеводороды, масла	120...270	30...60
От конденсирующегося пара к воде (конденсаторы)	800...3500	300...1200
От конденсирующегося пара к органическим жидкостям (подогреватели)	120...340	60...170
От конденсирующегося пара органических веществ к воде (конденсаторы)	300...800	230...460
От конденсирующегося пара к вязкой жидкости (конденсаторы)	—	300...2500

ента теплопередачи и площади поверхности теплообмена. Коэффициент теплопередачи K определяют, решая уравнение (12.5).

При наличии на стенке загрязнений ее общее термическое сопротивление

$$\sum r_{ст} = r_{загр1} + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + r_{загр2},$$

где $r_{загр1}$ и $r_{загр2}$ — термические сопротивления загрязнений, контактирующих с теплоносителями.

В этом случае при переносе теплоты через плоскую стенку

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum r_{ст} + 1/\alpha_2}.$$

Для расчета α_1 и α_2 , как правило, необходимо знать значения температуры поверхностей стенки. В таких случаях коэффициенты теплоотдачи обычно находят методом последовательных приближений: задают эти значения температуры и после определения значения K его сравнивают с ориентировочным (см. табл. 14.1).

Площадь S поверхности теплообмена определяют из уравнения (12.6). Сопоставление расчетного значения площади поверх-

ности теплообмена с ориентировочным $S_{ор}$ дает ответ на вопрос о правильности выбранного варианта. В случае существенного различия значений следует перейти к рассмотрению другого варианта конструкции теплообменника.

Контрольные вопросы

1. Какие конструкции трубчатых теплообменников вам известны?
2. Что представляют собой теплообменники с плоской поверхностью теплообмена?
3. Как устроены и для чего предназначены калориферы?
4. Где применяются барометрические конденсаторы? Как они устроены?
5. В чем заключается конструктивный расчет поверхностного теплообменника?

Глава 15

ВЫПАРИВАНИЕ

15.1. Основные понятия. Способы выпаривания

Выпаривание — это процесс концентрирования растворов твердых нелетучих веществ путем удаления жидкого растворителя в виде паров. Сущность выпаривания заключается в переводе растворителя в парообразное состояние и отводе полученного пара от оставшегося сконцентрированного раствора. Выпаривание обычно проводят при кипении, т.е. в условиях, когда давление пара над раствором равно давлению в рабочем объеме аппарата.

Различают следующие основные способы выпаривания:

- простое (однокорпусное), проводимое в непрерывном или периодическом режиме;
- многократное (многокорпусное), осуществляемое только в непрерывном режиме;
- с применением теплового насоса.

Все перечисленные способы выпаривания в зависимости от параметров греющего пара и свойств выпариваемых растворов реализуют как под давлением, так и в вакууме.

Простое выпаривание. Этот процесс осуществляют на установках небольшой производительности. Его проведение в периодическом режиме возможно с одновременной или порционной загрузкой исходного раствора.

Схема однокорпусной выпарной установки непрерывного действия представлена на рис. 15.1. Аппарат состоит из сепаратора 1 и теплообменника 2. Греющий пар поступает в межтрубное пространство. Исходный раствор, подаваемый в аппарат, воспринимает теп-

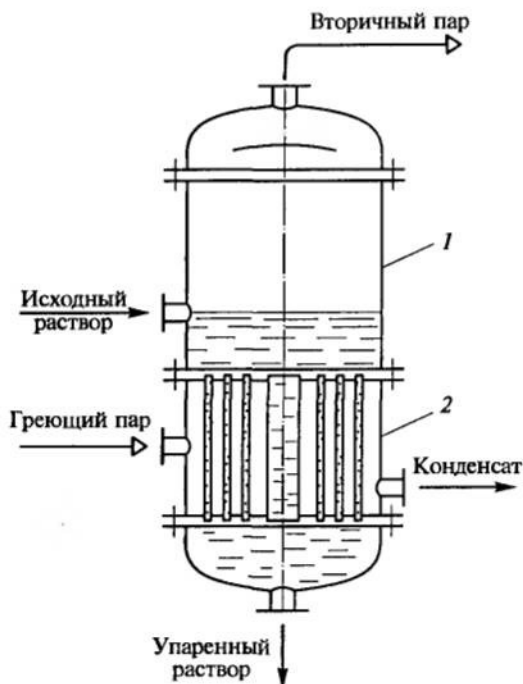


Рис. 15.1. Схема однокорпусной выпарной установки непрерывного действия:

1 — сепаратор; 2 — теплообменник

лоту греющего пара, и растворитель испаряется. Образовавшийся вторичный пар и инертные газы освобождаются от брызг жидкости в сепараторе и отводятся через верхнюю часть аппарата. Упаренный раствор отбирается из штуцера, расположенного в нижней части аппарата.

Материальный баланс простого выпаривания может быть выражен двумя способами:

1) общий материальный баланс выпарного аппарата — с помощью уравнения

$$G_n = G_k + W, \quad (15.1)$$

где G_n , G_k — массовый расход соответственно исходного и упаренного растворов, кг/с; W — массовый расход вторичного пара или выпариваемой воды, кг/с;

2) материальный баланс по сухому веществу, находящемуся в растворе, — с помощью уравнения

$$G_n \bar{x}_n = G_k \bar{x}_k, \quad (15.2)$$

где \bar{x}_n, \bar{x}_k — массовые доли растворенного вещества соответственно в исходном и упаренном растворах.

Из уравнений (15.1) и (15.2) найдем массовый расход выпариваемой воды:

$$W = G_n(1 - \bar{x}_n / \bar{x}_k).$$

Уравнение теплового баланса имеет вид

$$G_{гр} I_{гр} + G_n c_n T_n = G_k c_k T_k + W I_{вт} + G_{гр} I_{конд} + Q_{п}, \quad (15.3)$$

где $G_{гр}$ — массовый расход греющего пара, кг/с; $I_{гр}, I_{вт}, I_{конд}$ — удельная энтальпия греющего пара, вторичного пара и конденсата, Дж/кг; c_n, c_k — удельная теплоемкость исходного и конечного растворов, Дж/(кг · К); T_n, T_k — температура исходного раствора на входе в аппарат и конечного на выходе из него, К; $Q_{п}$ — потери теплоты в окружающую среду, Вт.

Под *энтальпией (теплосодержанием)* понимают сумму внутренней энергии и потенциальной энергии давления.

С учетом того, что удельная теплота конденсации пара

$$r = I_{гр} - I_{конд},$$

уравнение (15.3) позволяет определить массовый расход греющего пара. Расчет показывает, что для удаления 1 кг влаги из раствора может потребоваться 1,1... 1,2 кг греющего пара.

Площадь поверхности нагрева выпарного аппарата согласно основному уравнению теплопередачи (12.4) записывается в виде

$$S = Q / (K \Delta T),$$

где применительно к процессу выпаривания ΔT — полезная разность температур, т. е. разность температуры греющего пара и температуры кипения раствора в выпарных установках. Значение ΔT определяется по общей разности температур и температурным потерям (депрессиям).

Общей разностью температур в выпарных установках называют разность температур греющего пара $T_{гр}$ и вторичного пара $T_{вт}$:

$$\Delta T_{общ} = T_{гр} - T_{вт}.$$

Полезная разность температур меньше общей на величину температурных потерь $\sum \Delta$ (*депрессий*):

$$\Delta T_{общ} = \Delta T + \sum \Delta.$$

Различают три вида депрессий: температурную (физико-химическую), гидростатическую и гидравлическую.

Так как давление пара растворителя над раствором всегда ниже, чем над чистым растворителем, температура кипения раствора выше температуры кипения чистого растворителя при том же давлении. Например, в условиях, когда давление равно атмо-

сферному, вода кипит при температуре 100 °С, а 30%-ный раствор NaOH — при 117 °С. Такая разность температур кипения раствора и чистого растворителя называется *температурной депрессией* Δ' .

Значение температурной депрессии, зависящее от свойств растворенного вещества и растворителя, повышается с увеличением концентрации раствора и давления. Определить значение Δ' можно опытным путем.

Большинство опытных данных относится к температурной депрессии $\Delta'_{\text{атм}}$ при атмосферном давлении. Если известна величина $\Delta'_{\text{атм}}$, К, то можно найти депрессию Δ' , К, и при другом давлении по приближенной формуле Тищенко:

$$\Delta' = (16,2T^2/r)\Delta'_{\text{атм}},$$

где T — абсолютная температура кипения, К; r — удельная теплота испарения, Дж/кг, воды при данном давлении.

Повышение температуры кипения раствора обусловлено также гидростатической и гидравлической депрессиями.

Гидростатическая депрессия Δ'' вызывается тем, что нижние слои жидкости в аппарате закипают при более высокой температуре, чем верхние (вследствие гидростатического давления верхних слоев).

Гидравлическая депрессия Δ''' учитывает понижение давления в аппарате вследствие гидравлических потерь при прохождении вторичного пара через ловушку и выходной трубопровод. При расчетах полагают, что $\Delta''' = 1$ К.

Общая депрессия

$$\sum \Delta = \Delta' + \Delta'' + \Delta'''.$$

Проведение выпаривания в вакууме в большинстве случаев играет положительную роль: снижается температура кипения раствора, а это позволяет применять для нагревания выпарного аппарата пар низкого давления, который относится к тепловым отходам, образующимся при осуществлении других процессов.

Многократное выпаривание. Сущность этого способа выпаривания состоит в том, что его проводят в нескольких последовательно соединенных аппаратах, давление в которых поддерживают на таком уровне, чтобы вторичный пар предыдущего аппарата мог быть использован как греющий пар в последующем аппарате. Очевидно, что многократное выпаривание позволяет сократить расход теплоты на проведение процесса приблизительно пропорционально числу последовательно соединенных аппаратов (числу корпусов). Установки для многократного выпаривания всегда имеют несколько корпусов и поэтому называются многокорпусными.

Многокорпусные выпарные установки могут быть прямоточными, противоточными и комбинированными.

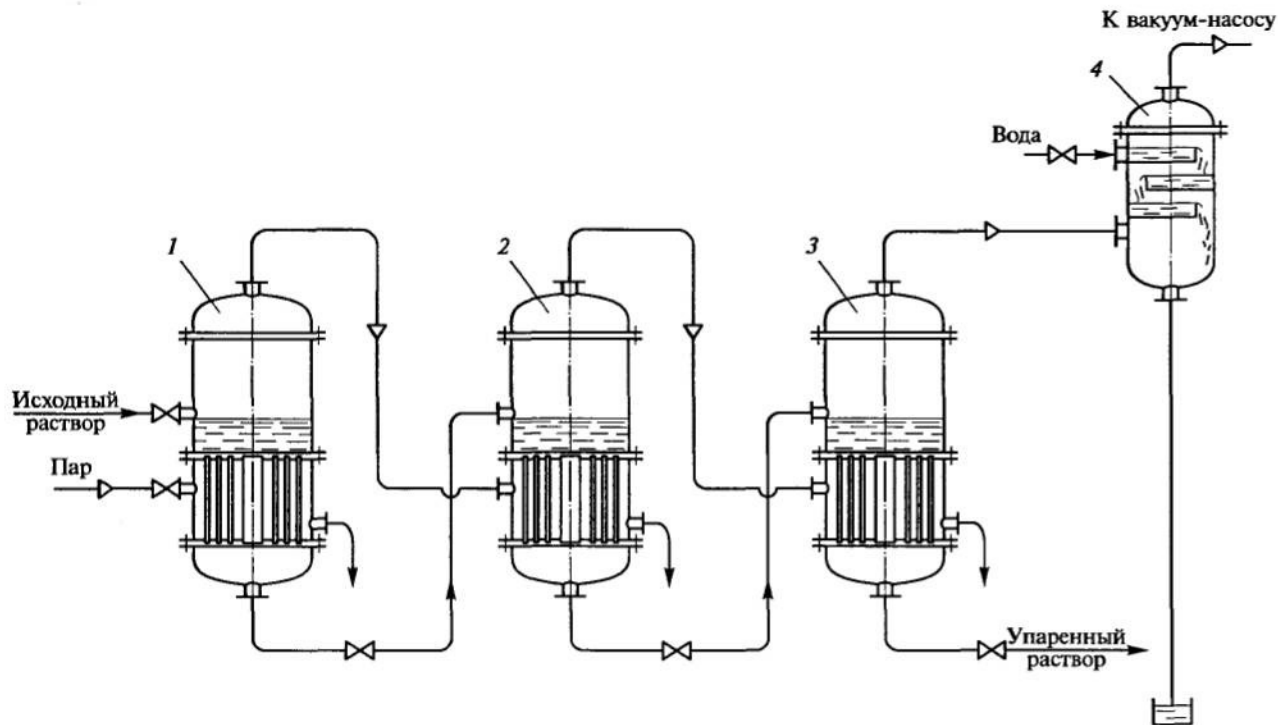


Рис. 15.2. Схема прямоточной многокорпусной выпарной установки:
1—3 — корпуса; 4 — барометрический конденсатор

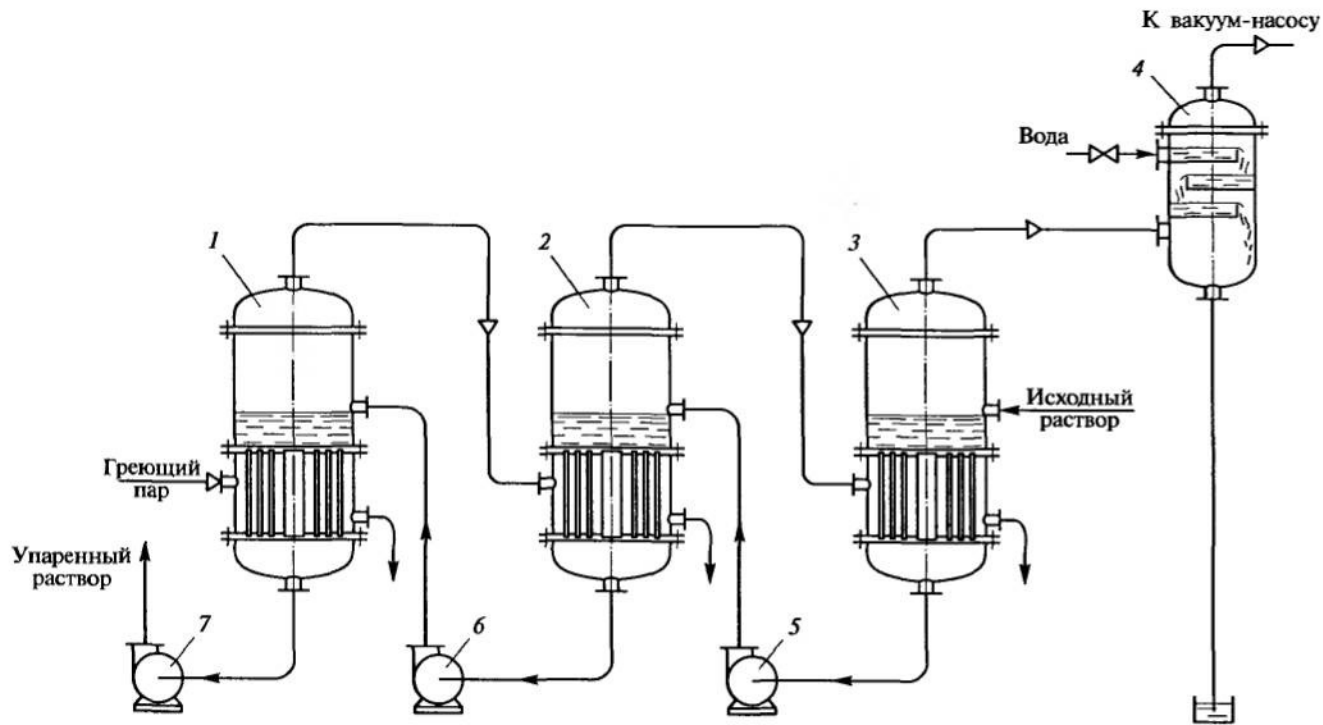


Рис. 15.3. Схема противоточной многокорпусной выпарной установки:

1—3 — корпуса; 4 — барометрический конденсатор; 5—7 — насосы

Схема прямоточной многокорпусной выпарной установки приведена на рис. 15.2. Исходный раствор подают в корпус 1, далее он поступает в корпуса 2 и 3, а затем удаляется из корпуса 3 в виде готового продукта. Давление в установке уменьшается в направлении от корпуса 1 к корпусу 3, что обеспечивает перемещение раствора самотеком под действием перепада давлений.

Греющий пар перемещается в том же направлении, что и раствор: свежий пар вводится в корпус 1, а образовавшийся в этом корпусе вторичный пар направляется в качестве греющего пара в корпус 2. Образовавшийся в корпусе 2 вторичный пар применяется для обогрева корпуса 3, а вторичный пар из корпуса 3 поступает для конденсации в барометрический конденсатор 4.

Очевидным достоинством прямоточной схемы выпаривания является возможность перемещения раствора из корпуса в корпус без помощи насосов. К недостаткам этой схемы относится резкое снижение коэффициента теплопередачи от корпуса к корпусу.

Схема противоточной многокорпусной выпарной установки представлена на рис. 15.3. Свежий греющий пар поступает в корпус 1, а вторичный пар уже в качестве греющего пара перемещается от корпуса 1 к корпусу 3. Выпариваемый раствор вводится в корпус 3, перемещается в установке в направлении от корпуса 3 к корпусу 1 и отбирается из корпуса 1. Поскольку давление в каждом последующем корпусе меньше, чем в предыдущем, для перемещения раствора используются насосы 5—7.

Преимуществом противоточной схемы выпаривания перед прямоточной является потребность в меньшей поверхности теплообмена, а недостатком — необходимость применения насосов для перекачивания растворов.

Общий массовый расход воды, выпариваемой в многокорпусной установке,

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$

Очевидно, что увеличение числа корпусов ограничено вследствие уменьшения полезной разности температур, значения которых при этом возрастают. Оптимальное число корпусов установок многократного выпаривания, при определении которого принимаются во внимание и экономические соображения, составляет 3—4.

15.2. Конструкции выпарных аппаратов

Конструкции выпарных аппаратов отличаются друг от друга расположением, видом, конфигурацией и компоновкой поверхности нагрева, родом теплоносителей, взаимным расположением рабочих сред, кратностью и режимом циркуляции.

В зависимости от характера движения кипящей жидкости различают выпарные аппараты с естественной и принудительной циркуляцией, а также пленочные аппараты.

Выпарные аппараты с естественной циркуляцией. Ранее (см. рис. 15.1) была рассмотрена конструкция выпарного аппарата с центральной циркуляционной трубой. Диаметр этой трубы значительно больше диаметра кипяtilьных труб, поэтому содержащийся в ней раствор нагревается менее интенсивно, чем в кипяtilьных трубах. Вес столба жидкости в циркуляционной трубе больше, чем в кипяtilьных трубах. Вследствие этого происходит упорядоченное движение (циркуляция) кипящей жидкости, благодаря чему повышается ее коэффициент теплоотдачи и уменьшается вероятность образования накипи на поверхности труб. Аппарат с центральной циркуляционной трубой отличается простотой конструкции. В то же время наличие обогреваемой центральной циркуляционной трубы снижает интенсивность циркуляции.

Для выпаривания кристаллизующихся и пенящихся растворов широко применяются выпарные аппараты с выносным кипяtilьником. В этом случае трубы кипяtilьника могут иметь значительную длину (до 6 м), что способствует интенсивной циркуляции.

Выпарные аппараты с принудительной циркуляцией. Для повышения интенсивности циркуляции и увеличения коэффициента теплопередачи между греющим паром и раствором используют аппараты с принудительной циркуляцией раствора. На рис. 15.4 показан аппарат, греющая камера 1 которого снабжена наружной циркуляционной трубой 3. Циркуляция жидкости обеспечивается насосом 2. Поддерживаемый уровень жидкости несколько ниже верхнего среза кипяtilьных труб.

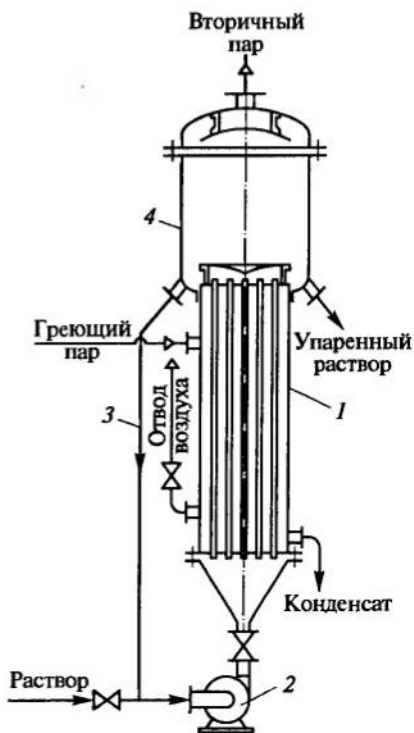


Рис. 15.4. Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией:

1 — греющая камера; 2 — насос; 3 — циркуляционная труба; 4 — сепаратор

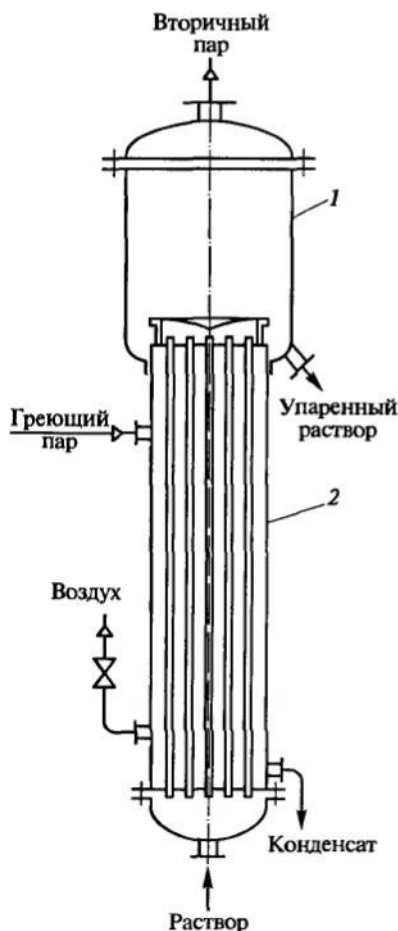


Рис. 15.5. Пленочный выпарной аппарат:

1 — сепаратор; 2 — кипятильник

Достоинством аппаратов с принудительной циркуляцией являются более высокие значения коэффициента теплопередачи, а недостатком — необходимость в дополнительных затратах энергии на обеспечение работы насоса.

Пленочные выпарные аппараты. В выпарных аппаратах с пленочным движением раствора (рис. 15.5) исходный раствор подается снизу, причем его уровень должен поддерживаться на высоте нижнего среза трубного пучка. Труба заполнена парожидкостной смесью; на внутренней поверхности трубок образуется пленка жидкости, а в центре — пар. Под действием силы трения жидкая пленка увлекается струей пара вверх по трубе, поэтому такие аппараты часто называют аппаратами с поднимающейся пленкой.

В пленочных выпарных аппаратах достигается высокое значение коэффициента теплопередачи.

Они применяются для выпаривания пенящихся растворов, а также растворов, чувствительных к высокой температуре, но не пригодны для выпаривания очень вязких и кристаллизующихся растворов.

Контрольные вопросы

1. Что называется процессом выпаривания?
2. Как осуществляется выпаривание в однокорпусной установке?
3. Напишите уравнения материального и теплового баланса простого выпаривания.
4. Как определяются общая и полезная разности температур?
5. Опишите устройство и принцип действия многокорпусных выпарных установок.

6. По каким признакам различаются конструкции выпарных аппаратов?
7. Опишите конструкцию и принцип действия выпарного аппарата с принудительной циркуляцией раствора.
8. Каковы особенности работы пленочного выпарного аппарата?

Глава 16

ИСКУССТВЕННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

16.1. Способы получения искусственного холода

Процесс понижения температуры тела называется *охлаждением*. Различают естественное и искусственное охлаждение.

Естественное охлаждение позволяет охладить тело до температуры окружающей среды. Такое охлаждение обеспечивает холодная вода или воздух.

Для охлаждения до температуры более низкой, чем температура окружающей среды, применяется *искусственное охлаждение*, которое можно осуществить с помощью любого физического процесса, связанного с отводом теплоты.

Искусственное охлаждение используется при проведении процессов абсорбции, кристаллизации, разделения газов, сублимационной сушки и кондиционирования воздуха.

С помощью холодильных смесей можно получать довольно низкие температуры. Смесь льда и CaCl_2 (до 30 %) позволяет достичь температуры -55°C . Однако для осуществления охлаждения таким способом требуется много льда и соли, поэтому его применение ограничено.

В современных холодильных машинах используется свойство ряда низкокипящих сжиженных газов (аммиак, хладоны, диоксид углерода и др.) при испарении поглощать из окружающей среды большое количество теплоты.

Искусственное охлаждение можно разделить на *умеренное* (до температуры -100°C) и *глубокое* (до более низкой температуры).

В промышленности глубокое охлаждение применяют для сжижения разделяемых парогазовых и газовых смесей. Полученные таким способом газы широко используются в химической промышленности: азот — для получения химических удобрений, кислород, метан и этилен — для производства минеральных кислот и т. п.

В установках искусственного холода осуществляют необходимое снижение температуры рабочего тела. По *агрегатному состоянию рабочего тела* холодильные установки подразде-

ляют на газовые, газожидкостные, парожидкостные и адсорбционные (с применением твердой фазы).

Искусственное охлаждение в большинстве случаев осуществляется двумя методами:

- испарением низкокипящих жидкостей;
- расширением различных предварительно сжатых газов с помощью дросселирования или детандирования.

При испарении низкокипящих жидкостей последние охлаждаются за счет уменьшения внутренней энергии.

Дросселирование представляет собой процесс расширения газа при его прохождении через сужающее устройство, в результате чего давление газа снижается. Энергия, необходимая для расширения газа при дросселировании, когда поступление теплоты извне отсутствует, может быть получена только за счет внутренней энергии самого газа. *Дроссельный эффект* (эффект Джоуля—Томсона) — это изменение температуры газа при дросселировании в условиях отсутствия теплообмена с окружающей средой.

Детандирование — это расширение газа в расширительной машине — детандере. По своей конструкции этот агрегат аналогичен поршневому компрессору или турбокомпрессору. При детандировании газ охлаждается вследствие снижения внутренней энергии и совершения внешней работы.

16.2. Хладагенты

Вещества, применяемые в качестве рабочего тела в холодильных машинах, называются *холодильными агентами* или *хладагентами*.

К хладагентам предъявляют следующие требования: они должны поглощать большое количество теплоты при испарении, иметь невысокую температуру испарения, а также быть безвредными, пожаробезопасными, доступными и дешевыми.

Кроме того, необходимо, чтобы хладагенты обладали высокой теплоотдачей, малой вязкостью и плотностью, хорошо растворялись в воде и не растворялись в смазочном материале. При выборе хладагента учитывают назначение холодильной машины, условия ее работы и конструктивные особенности.

Например, у холодильных машин с поршневыми компрессорами удельная холодопроизводительность должна быть максимальной, что позволяет уменьшить размеры компрессора. Под *холодопроизводительностью* понимают количество теплоты Q_0 , отбираемой от охлаждаемой среды в единицу времени.

Широко применяемые хладагенты — аммиак и хладоны (фреоны) — представляют собой насыщенные фторуглероды, часто содержащие хлор, реже — бром.

Аммиак — один из наиболее распространенных хладагентов. Он обеспечивает большую удельную холодопроизводительность, обладает малой вязкостью и плотностью, высокими значениями коэффициента теплоотдачи и теплоты парообразования. Однако он ядовит, отличается высокой воспламеняемостью и взрывоопасен в смесях с воздухом.

Хладоны относительно безвредны и пожаробезопасны. Они обладают хорошими теплофизическими свойствами и химической стойкостью по отношению к металлам.

16.3. Умеренное охлаждение

Нижней предельной температурой, обеспечиваемой с помощью умеренного охлаждения, принято считать -100°C . Агрегаты, предназначенные для получения умеренного холода, называют *холодильными машинами (установками)*.

В зависимости от *вида затрачиваемой энергии* холодильные машины разделяют на машины, работающие с затратой механической энергии (паро- и газокompрессионные) и теплоты (абсорбционные и парожеткторные).

В *парокompрессионных* машинах для получения холода используется кипение жидкого хладагента при низкой температуре с последующим сжатием образовавшихся паров компрессором и их конденсацией. Компрессионные холодильные машины являются наиболее распространенными и экономичными. В них применяют хладагенты, испаряющиеся при температуре ниже 0°C .

В *газокompрессионных* машинах охлаждение среды происходит за счет расширения предварительно сжатых газов.

Абсорбционные холодильные машины вырабатывают холод благодаря способности веществ абсорбировать рабочее тело. Действие машин основано на абсорбции рабочего тела (CaCl_2) при температуре окружающей среды и его десорбции при более высокой температуре.

Парожеткторные холодильные машины работают с затратами тепловой энергии. Сжатие хладагента осуществляется паровым жетктором, а конденсация — с помощью охлаждающей воды.

Для перехода теплоты от тела с меньшей температурой к телу, температура которого выше, холодильная машина должна получать механическую энергию от внешнего источника. Наименьшие затраты энергии характерны для теоретического цикла идеальной компрессионной холодильной машины, соответствующего обратному циклу Карно.

В идеальной компрессионной машине (рис. 16.1) пары хладагента при температуре T_0 засасываются в компрессор 1, сжимаются до давления сжижения (при этом хладагент нагревается до

некоторой температуры T) и поступают в конденсатор 4. Конденсация паров происходит изотермически, т.е. при постоянной температуре T . Жидкий хладагент перемещается из конденсатора в детандер 3, где расширяется (охлаждаясь до температуры испарения T_0), и направляется в испаритель 2. Здесь хладагент испаряется при постоянной температуре T_0 , отбирая теплоту от охлаждаемой среды. Затем пары вновь поступают в компрессор, и цикл повторяется.

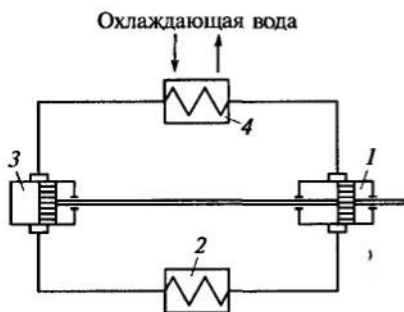
При конденсации паров хладагент теряет теплоту, которая передается охлаждаемой воде, тогда как в испарителе он получает от охлаждаемой среды количество теплоты, равное Q_0 .

В реальных холодильных машинах вместо сложного расширительного цилиндра (детандера) используется дроссельный регулирующий вентиль. Следовательно, обратимое расширение газа заменяется необратимым процессом дросселирования, что уменьшает холодопроизводительность.

Принцип действия абсорбционных холодильных машин основан на поглощении (абсорбции) паров хладагента каким-либо абсорбентом при давлении испарения и последующем его выделении (десорбции) при давлении конденсации в процессе нагревания. Вместо сжатия холодильного агента в компрессоре, необходимого для последующей конденсации, в абсорбционной холодильной установке осуществляются десорбция и выделение холодильного агента из растворителя при избыточном давлении.

Наибольшее распространение получили водоаммиачные абсорбционные установки, в которых хладагентом является аммиак, а поглотителем (абсорбентом) — вода. Раствор аммиака в воде по сравнению с аммиаком имеет значительно более высокую температуру кипения.

В водоаммиачной абсорбционной холодильной машине (рис. 16.2) концентрированный водоаммиачный раствор поступает в кипятильник 1. Образовавшиеся пары аммиака направляются в конденсатор 2, где превращаются в жидкость, отдавая теплоту охлаждающей среде. Сжиженный аммиак проходит через дросселирующий вентиль 3 и вновь переходит в газообразное состояние в испарителе 4, отбирая теплоту от охлаждаемой среды.



Из испарителя газообразный аммиак переходит в абсорбер 5, где поглощается водой с образо-

вания раствора аммиака. Этот процесс называется абсорбцией. Раствор аммиака в воде нагревается в абсорбере 5, что приводит к выделению паров аммиака. Этот процесс называется десорбцией. Пары аммиака переходят в конденсатор 2, где конденсируются в жидкое состояние, отдавая теплоту охлаждающей среде. Жидкий аммиак проходит через дросселирующий вентиль 3 и вновь переходит в газообразное состояние в испарителе 4, отбирая теплоту от охлаждаемой среды.

Рис. 16.1. Схема идеальной компрессионной машины:

1 — компрессор; 2 — испаритель; 3 — детандер; 4 — конденсатор

Рис. 16.2. Схема водоаммиачной абсорбционной холодильной машины:

1 — кипятильник; 2 — конденсатор;
3, 8 — вентили; 4 — испаритель; 5 —
абсорбер; 6 — насос; 7 — теплооб-
менник

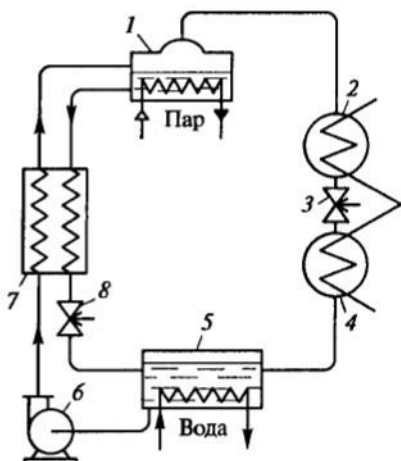
ванием концентрированного (приблизительно 50%-ного) раствора. Полученный раствор нагнетается насосом 6 через теплообменник 7 в кипятильник, где в результате нагрева водяным паром большая часть аммиака испаряется и в виде газа поступает в конденсатор. Слабый раствор отводится из кипятильника в абсорбер, где вновь концентрируется вследствие абсорбции газообразного аммиака из испарителя.

Таким образом, в абсорбционной холодильной машине роль компрессора выполняет термокомпрессор — агрегат, включающий в себя кипятильник, абсорбер и теплообменник. Для абсорбционных установок требуется менее сложное оборудование, чем для компрессионных машин. Эксплуатация этих установок сопряжена с меньшими затратами (в частности, энергия расходуется в них только на приведение в действие насоса для перемещения водоаммиачного раствора).

Применение пароструйных эжекторов позволяет отказаться от поршневых компрессоров и выбрать в качестве хладагента воду, которая обладает высокой теплотой парообразования, абсолютно безвредна и имеет низкую стоимость. Действие парозжекторных установок основано на использовании кинетической энергии расширяющегося потока газа или пара.

В пароводяной эжекторной холодильной машине (рис. 16.3) рабочий пар под давлением около 600 кПа поступает из парового котла в сопло эжектора 1, где при расширении пара создается вакуум. Из испарителя 5 в эжектор засасываются холодные водяные пары, а остаточное давление в испарителе снижается до 200... 500 Па. Циркулирующая вода вследствие частичного испарения охлаждается и прокачивается насосом 6 через потребитель холода 7, где нагревается и вновь попадает в испаритель.

Водяной пар после выхода из эжектора в конденсаторе 2 переводится в жидкое состояние с помощью охлаждающей воды. Конденсат откачивается насосом в паровой котел, при этом часть конденсата через регулирующий вентиль 4 поступает в испаритель



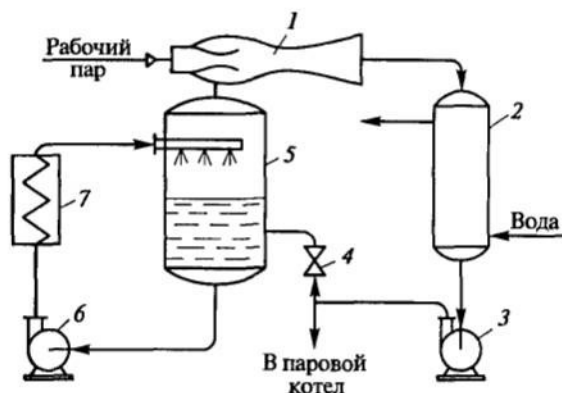


Рис. 16.3. Схема пароводяной эжекторной холодильной машины:

1 — эжектор; 2 — конденсатор; 3, 6 — насосы; 4 — регулирующий вентиль; 5 — испаритель; 7 — потребитель холода

для компенсации убыли воды. В пароежекторных машинах холодопроизводительность и расход пара в значительной степени зависят от температуры охлаждаемой воды.

К достоинствам пароежекторных холодильных установок относятся взрывобезопасность, отсутствие вредных выделений и простота изготовления. Их недостатками являются большой расход воды и сложность регулирования холодопроизводительности.

16.4. Глубокое охлаждение

Глубокое охлаждение используется для сжижения и разделения газов (воздух, коксовый и природный газы и т. д.). Методами глубокого охлаждения получают редкие газы: аргон, гелий, неон, криптон и ксенон. При глубоком охлаждении применяют два основных метода получения низких температур:

- расширение газов без совершения внешней работы (дросселирование с использованием эффекта Джоуля—Томсона);
- расширение газов с совершением внешней работы в детандере.

Дроссельный эффект может быть положительным (при дросселировании газ охлаждается) и отрицательным (газ нагревается). Температура большинства газов при дросселировании понижается, причем воздух, кислород и азот можно охладить при комнатной температуре, а водород и гелий необходимо предварительно охладить для получения положительного дроссельного эффекта.

Цикл высокого давления с однократным дросселированием (рис. 16.4) применяется для сжижения воздуха. Он сжимается в

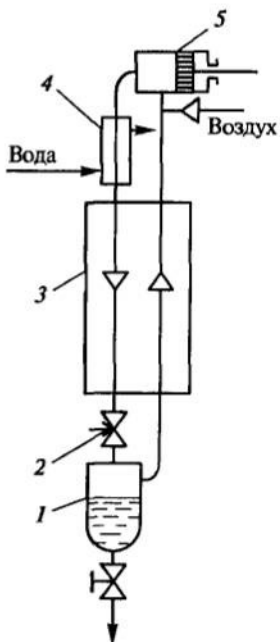
Рис. 16.4. Схема цикла высокого давления с однократным дросселированием:

1 — сборник жидкого воздуха; 2 — дроссель; 3 — противоточный теплообменник; 4 — водяной холодильник; 5 — компрессор

компрессоре 5 и охлаждается в водяном холодильнике 4 до первоначальной температуры. Затем сжатый воздух охлаждается в противоточном теплообменнике 3 дросселированным газом, поступающим из сборника 1 жидкого воздуха. По выходе из теплообменника сжатый воздух проходит через дроссель 2; его давление и температура снижаются. Часть его переходит в сборник. Несжиженный воздух возвращается в теплообменник, где нагревается до первоначальной температуры, снова засасывается компрессором, и цикл повторяется.

Другой способ получения холода основан на явлении охлаждения газа при его расширении в детандере с совершением внешней работы. Расширение сжатого газа происходит без обмена теплотой с окружающей средой, и совершаемая при этом работа производится за счет его внутренней энергии.

Детандеры могут быть как поршневыми, так и центробежными (турбодетандеры). При расширении газа в детандере достигается большее снижение температуры, чем при дросселировании. Однако эффективность охлаждения с помощью этого метода невелика из-за гидравлических ударов и вихреобразования в детандере, приводящих к потерям теплоты. Поэтому для получения низких температур осуществляют комбинированные циклы, в которых расширение газа в детандере обеспечивает предварительное охлаждение, а для дальнейшего охлаждения до температуры сжижения применяют дросселирование.



Контрольные вопросы

1. В каких процессах используется искусственное охлаждение?
2. Как классифицируют способы получения искусственного холода?
3. Какие требования предъявляют к хладагентам?
4. Что называют холодопроизводительностью?
5. Как работают компрессионные холодильные машины?
6. Каков принцип действия абсорбционных холодильных машин?
7. Назовите методы глубокого охлаждения. Чем они различаются?

РАЗДЕЛ V
МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 17
ОСНОВЫ МАССОПЕРЕДАЧИ

17.1. Статика массообменных процессов

В химической технологии чрезвычайно важное значение имеют процессы массопередачи. Их сущность состоит в переходе вещества из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия. В промышленности широко распространены следующие процессы массопередачи: абсорбция, перегонка, ректификация, адсорбция, сушка, экстракция и кристаллизация. Во многих случаях массообменные процессы сопровождаются выделением или поглощением теплоты, что оказывает влияние на их скорость.

Для определения направления и скорости массообменного процесса необходимо знать состав веществ. Пусть смесь состоит из двух компонентов — A и B . Для этой системы способы выражения состава фаз представлены в табл. 17.1.

Равновесие между фазами. Перенос массы из одной фазы в другую происходит до тех пор, пока не будет достигнуто *равновесие между фазами* — термодинамическое состояние системы, при котором скорости прямого и обратного процессов равны.

В общем виде связь между составом фаз при равновесии может быть выражена зависимостью

Таблица 17.1

Способы выражения состава фаз

Величина	Обозначение содержания компонента A	
	в жидкой фазе	в газовой (паровой) фазе
Мольная доля, кмоль A /кмоль $(A + B)$	x	y
Массовая доля, кг A /кг $(A + B)$	\bar{x}	\bar{y}
Относительная мольная доля, кмоль A /кмоль B	X	Y
Относительная массовая доля, кг A /кг B	\bar{X}	\bar{Y}

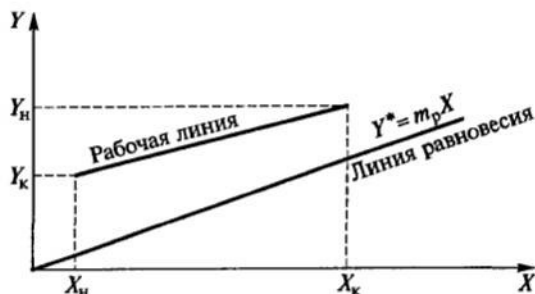


Рис. 17.1. Линия равновесия и рабочая линия массообменного аппарата: Y_n, Y_k — начальная и конечная относительные мольные доли целевого компонента в газовой фазе; X_n, X_k — начальная и конечная относительные мольные доли этого компонента в жидкой фазе; Y^* — его равновесная относительная мольная доля в газовой фазе; m_p — коэффициент распределения

$$Y^* = f(X),$$

где Y^* — равновесная относительная мольная доля целевого компонента в газовой (паровой) фазе. Графическое изображение этой зависимости называется *линией равновесия* (рис. 17.1).

Отношение составов фаз при равновесии

$$m_p = Y^*/X$$

называется коэффициентом распределения.

Коэффициент распределения — это тангенс угла наклона линии равновесия. Если она имеет форму кривой, то m_p является тангенсом угла наклона касательной к данной точке этой линии.

Материальный баланс массообменного процесса. Рабочая линия.

Для построения уравнения материального баланса рассмотрим схему массообменного противоточного аппарата, работающего в режиме полного (идеального) вытеснения при противоточном движении фаз (рис. 17.2).

Пусть в процессе массопередачи целевой компонент переходит из газовой фазы в жидкую, причем относительная мольная доля этого компонента в газовой фазе уменьшается от Y_n (на входе в аппарат)

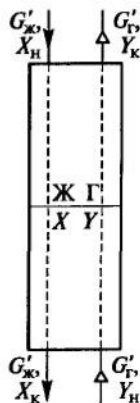


Рис. 17.2. К выводу уравнения материального баланса:

$G'_g, G'_ж$ — мольный расход газовой и жидкой фаз соответственно; Y_n, Y_k — начальная и конечная относительные мольные доли целевого компонента в газовой фазе; X_n, X_k — начальная и конечная относительные мольные доли этого компонента в жидкой фазе; Ж — жидкая фаза; Г — газовая фаза.

до Y_k (на выходе из аппарата). Соответственно относительная мольная доля этого же компонента в жидкой фазе увеличивается от X_n (на входе в аппарат) до X_k (на выходе из аппарата). Тогда мольный расход M'_r компонента, перешедшего из газовой фазы,

$$M'_r = G'_r Y_n - G'_r Y_k, \quad (17.1)$$

где G'_r — мольный расход газовой фазы, а мольный расход $M'_ж$ компонента, перешедшего в жидкую фазу,

$$M'_ж = G'_ж X_k - G'_ж X_n, \quad (17.2)$$

где $G'_ж$ — мольный расход жидкой фазы.

Поскольку речь идет о переходе одного и того же компонента, справедливо приравнять правые части уравнений (17.1) и (17.2):

$$M' = G'_r (Y_n - Y_k) = G'_ж (X_k - X_n).$$

Для произвольного сечения аппарата, в котором текущие составы целевого компонента равны Y и X , уравнение материального баланса для верхней части аппарата имеет вид:

$$G'_r Y_n + G'_ж X = G'_r Y + G'_ж X_k.$$

Отсюда получаем

$$Y = \frac{G'_ж}{G'_r} X + Y_n - \frac{G'_ж}{G'_r} X_k. \quad (17.3)$$

Выражение (17.3) называется *уравнением линии рабочих концентраций (рабочей линией)* и представляет собой уравнение прямой линии с тангенсом угла наклона $G'_ж/G'_r$. Рабочая линия для всего аппарата ограничена точками с координатами X_n, Y_k и Y_n, X_k (см. рис. 17.1).

17.2. Кинетика массообменных процессов

При отклонении системы от состояния равновесия происходит переход вещества из фазы, в которой его содержание выше равновесного, в ту фазу, где содержание этого вещества ниже равновесного.

Основное уравнение массопередачи. Движущая сила массообменных процессов. Скорость перехода вещества из одной фазы в другую пропорциональна степени отклонения от равновесия, которую можно выразить как разность рабочей и равновесной концентраций данного вещества в одной из фаз. Именно разность концентраций является движущей силой процесса массопередачи. Кроме того, скорость перехода вещества пропорциональна площади поверхности соприкосновения фаз. Скорость перехода ве-

щества можно определить как количество вещества, переходящего в единицу времени из одной фазы в другую.

Основное уравнение массопередачи представим в виде

$$M' = K_M S \Delta, \quad (17.4)$$

где M' — мольный расход компонента, перешедшего из одной фазы в другую, кмоль/с; K_M — коэффициент массопередачи, кмоль/(с · м² · единица движущей силы); S — площадь поверхности соприкосновения фаз, м²; Δ — движущая сила процесса массопередачи.

Из уравнения (17.4) следует, что коэффициент массопередачи K_M показывает, какое количество компонента, кмоль, перешло из одной фазы в другую за единицу времени через поверхность соприкосновения фаз единичной площади при движущей силе, равной единице.

Направление процесса массопередачи удобно определять на диаграмме $Y-X$ по взаимному расположению линии равновесия и рабочей линии. Если рабочая линия расположена над линией равновесия (рис. 17.3, а), то для любой точки (например, точки A_1) рабочей линии $Y_1 > Y_1^*$ и $X_1 < X_1^*$. В этом случае целевой компонент переходит из газовой фазы в жидкую, и значения движущей силы процесса равны $\Delta Y_1 = Y_1 - Y_1^*$ и $\Delta X_1 = X_1^* - X_1$. Примером такого процесса является абсорбция.

Если же рабочая линия располагается под линией равновесия (рис. 17.3, б), то для точки A_2 (произвольно выбранной на рабо-

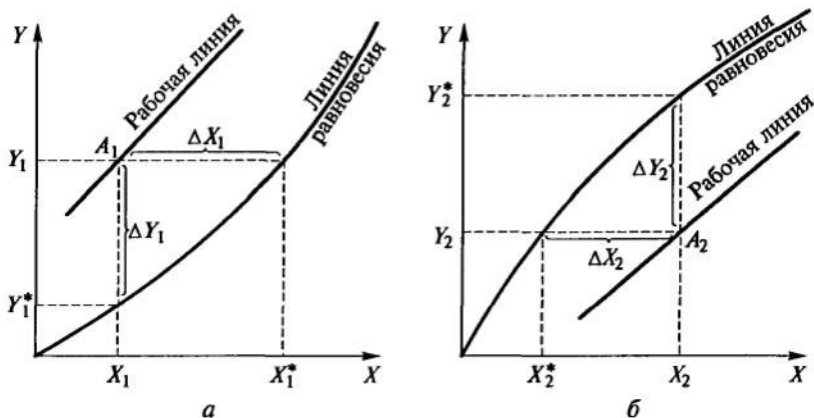


Рис. 17.3. Определение направления массопередачи по диаграмме $Y-X$, на которой рабочая линия расположена выше (а) и ниже (б) линии равновесия:

A_1, A_2 — произвольные точки на рабочих линиях с координатами соответственно (X_1, Y_1) и (X_2, Y_2) ; $\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta X_2, \Delta Y_2$ — движущие силы массообменного процесса

чей линии) $Y_2 < Y_2^*$ и $X_2 > X_2^*$. При этом целевой компонент переходит из жидкой фазы в газовую, и значения движущей силы процесса равны $\Delta Y_2 = Y_2^* - Y_2$ и $\Delta X_2 = X_2 - X_2^*$. Такой переход происходит, например, в процессе ректификации. Тогда уравнения массопередачи можно записать в следующем виде:

$$M' = K_{mY} S \Delta Y \text{ и } M' = K_{mX} S \Delta X,$$

где K_{mY} , K_{mX} — соответствующие коэффициенты массопередачи.

Движущая сила не остается постоянной по длине аппарата, и при использовании основного уравнения массопередачи следует подставлять в него ее среднее значение. Среднелогарифмическое значение движущей силы процесса массопередачи определяется по формуле

$$\Delta Y_{\text{cp}} = (\Delta Y_6 - \Delta Y_m) / \ln(\Delta Y_6 / \Delta Y_m),$$

где ΔY_6 и ΔY_m — значения движущей силы на входе и выходе из аппарата.

Среднелогарифмическое значение движущей силы определяется точно только в том случае, если линия равновесия и рабочая линия являются прямыми, а коэффициент массопередачи остается постоянным по всей длине аппарата. Однако линия равновесия часто отличается от прямой. В этом случае во избежание ошибок следует пользоваться более точным методом расчета ΔY_{cp} и ΔX_{cp} .

Молекулярная и конвективная диффузия. Перенос вещества внутри фазы может происходить путем молекулярной диффузии, обусловленной беспорядочным движением молекул в неподвижной среде, либо посредством одновременно конвекции и молекулярной диффузии (конвективной диффузии), если перенос осуществляется в движущейся среде.

Процесс молекулярной диффузии описывается *законом Фика*, согласно которому масса вещества $m_{\text{диф}}$, перешедшего за время τ через поверхность площадью S (нормальную к направлению диффузии), пропорциональна градиенту концентрации этого вещества, т. е. приближенно изменению его концентрации ΔC , приходящемуся на единицу толщины слоя, имеющего общую толщину δ :

$$m_{\text{диф}} = D_m S \frac{\Delta C}{\delta} \tau,$$

где D_m — коэффициент пропорциональности, называемый *коэффициентом молекулярной диффузии* и показывающий, какое количество вещества переносится в единицу времени через поверхность единичной площади при градиенте концентрации, равном единице.

Коэффициент молекулярной диффузии D_m представляет собой физическую константу, характеризующую способность данного вещества проникать вследствие диффузии в неподвижную среду.

Следует помнить о том, что молекулярная диффузия всегда протекает в направлении уменьшения концентрации этого вещества. Значения D_m зависят от его свойств, а также свойств среды, через которую оно проникает, температуры и давления.

Молекулярная диффузия является весьма медленным процессом, особенно если он протекает в жидкости или твердом теле.

В химической технологии применяют процесс *конвективной диффузии*, при проведении которого масса целевого компонента переходит из одной фазы в другую не только за счет молекулярного движения, но и в результате движения более крупных объемов одной фазы относительно другой. Для конвективной диффузии характерна более высокая скорость переноса вещества, чем для молекулярной. При массоотдаче перенос вещества в газе или жидкости при их турбулентном движении или перемешивании происходит одновременно вдоль потока и в поперечном направлении.

Процесс массообмена между фазами. Уравнение массоотдачи. Перенос вещества из фазы в фазу можно описать на основе теоретического представления о наличии так называемого пограничного слоя между фазами (рис. 17.4). В каждой фазе условно выделяется ядро потока (т. е. основная масса потока) и пограничный слой у поверхности раздела фаз. При этом в ядре потока за счет конвекции происходит интенсивное перемешивание.

Процесс перехода целевого компонента из газовой фазы в жидкую схематично можно разбить на три последовательные стадии: диффузию вещества в потоке газовой фазы к границе раздела фаз, преодоление этой границы и дальнейшую диффузию в потоке жидкой фазы.

Наиболее наглядным представляется описание этого процесса с помощью так называемой *двухпленочной модели*, согласно которой по обе стороны межфазной поверхности находятся пограничные пленки контактирующих фаз, обуславливающие основное сопротивление

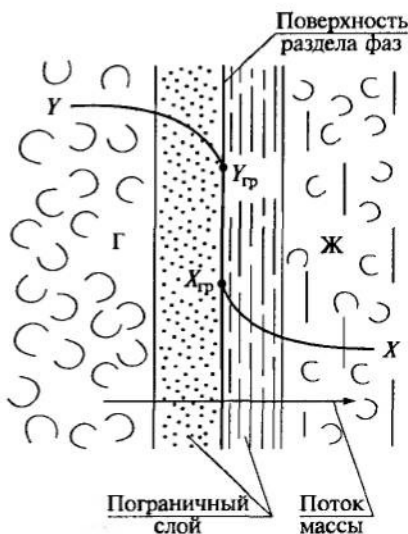


Рис. 17.4. Схема процесса массоотдачи:

Г — газовая фаза; Ж — жидкая фаза; Y , $Y_{гр}$ — относительные мольные доли целевого компонента в ядре газовой фазы и на границе раздела фаз; X , $X_{гр}$ — относительные мольные доли целевого компонента в ядре жидкой фазы и на границе раздела фаз

переходу вещества из одной фазы в другую. При этом на межфазной границе достигается равновесие фаз.

Мольный расход целевого компонента M' в пределах каждой фазы (потоки вещества направлены к границе раздела фаз и от нее) можно выразить уравнениями *массоотдачи*, которые имеют вид

$$M' = \beta_Y S(Y - Y_{гр}) \text{ и } M' = \beta_X S(X_{гр} - X),$$

где $Y - Y_{гр}$, $X_{гр} - X$ — движущие силы процесса массоотдачи соответственно в газовой и жидкой фазах; $Y_{гр}$, $X_{гр}$ — относительные мольные доли целевого компонента на границе раздела фаз; β_Y , β_X — коэффициенты *массоотдачи* в газовой и жидкой фазах, показывающие, какое количество вещества переходит в единицу времени из ядра фазы к границе раздела (или в обратном направлении) через поверхность единичной площади при движущей силе, равной единице.

Коэффициент массоотдачи может быть выражен различным образом в зависимости от выбора единиц измерения количества целевого компонента и движущей силы.

Переход целевого компонента из газовой фазы в жидкую описывается основным уравнением массопередачи (17.4). Связь коэффициентов массопередачи и массоотдачи можно представить в виде

$$1/K_{мY} = 1/\beta_Y + m_p/\beta_X.$$

Это уравнение аналогично уравнению (12.5), устанавливающему связь между коэффициентом теплопередачи и коэффициентами теплоотдачи.

17.3. Основы расчета массообменных аппаратов

При расчете массообменного аппарата прежде всего следует учитывать особенности его конструкции. Различают следующие типы массообменных аппаратов: *с непрерывным контактом фаз* (например, насадочные колонны, пленочные аппараты) и *со ступенчатым контактом фаз* (тарельчатые колонны).

Насадочные колонны. Схема насадочной колонны приведена на рис. 17.5. В корпусе 3 аппарата размещается насадка 5, которая может заполнять внутренний объем колонны полностью или слоями высотой 1,5... 3 м. Насадку засыпают на решетки 4, в которых имеются отверстия для прохода газа и стока жидкости. Во избежание растекания жидкости к стенкам корпуса после каждого слоя насадки устанавливают направляющие конусы 2, позволяющие равномерно распределять жидкость в насадке. Подается жидкость в аппарат через специальное распределительное устройство 1.

Рис. 17.5. Насадочная колонна:

1 — распределительное устройство; 2 — направляющий конус; 3 — корпус; 4 — решетки; 5 — насадка

В насадочных колоннах применяют насадку разной конфигурации (рис. 17.6). Насадочные тела должны быть механически прочными и устойчивыми к коррозии и колебаниям температуры. Наибольшее распространение получили кольца Рашига. Кольца с крестообразными перегородками и со спиральями имеют только большие размеры. Кольца размером свыше 75 мм укладывают послойно так, чтобы их вертикальные оси не совпадали. Правильно уложенные кольца хорошо распределяют жидкость и оказывают меньшее гидравлическое сопротивление.

Для сравнения насадки различных типов используют такие параметры, как свободный объем $V_{св}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$, и удельная площадь поверхности насадки σ , $\text{м}^2/\text{м}^3$. Площадь поверхности контакта фаз

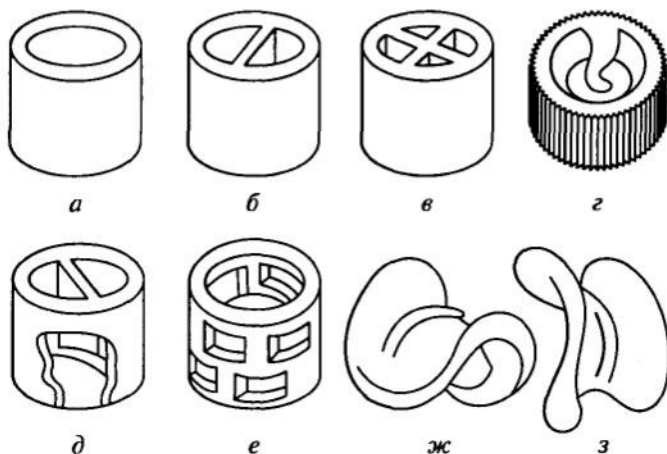
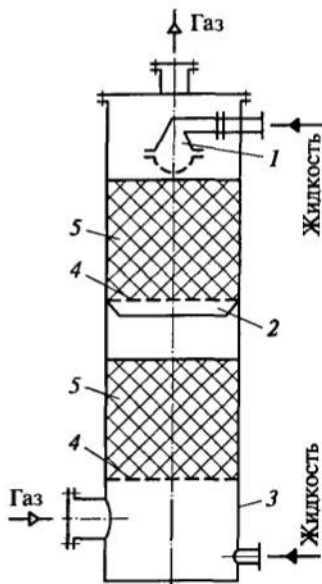


Рис. 17.6. Типы насадки:

а — кольцо Рашига; б — кольцо Лессинга; в — кольцо с крестообразными перегородками; г — кольцо с одиночной спиралью; д — кольцо с двойной спиралью; е — кольцо Палля; ж — седло Берля; з — седло «Инталокс»

$$S = H_{\text{нас}} S_{\text{ап}} \sigma \psi, \quad (17.5)$$

где $H_{\text{нас}}$ — высота слоя насадки или общая высота рабочей части аппарата; $S_{\text{ап}}$ — площадь поперечного сечения аппарата; ψ — коэффициент смачиваемости насадки.

Площадь поверхности контакта фаз согласно соотношению

$$n_y = K_{\text{мг}} S / G'_r,$$

где n_y — число единиц переноса (ЧЕП),

$$S = (G'_r / K_{\text{мг}}) n_y. \quad (17.6)$$

Приравнивая правые части уравнений (17.5) и (17.6), получим

$$H_{\text{нас}} S_{\text{ап}} \sigma \psi = (G'_r / K_{\text{мг}}) n_y.$$

Тогда общая высота рабочей части аппарата

$$H_{\text{нас}} = G'_r n_y / (K_{\text{мг}} S_{\text{ап}} \sigma \psi) = h_y n_y,$$

где h_y — высота рабочей части аппарата, эквивалентной одной единице переноса (ВЕП), м, причем

$$h_y = G'_r / (K_{\text{мг}} S_{\text{ап}} \sigma \psi).$$

Величина h_y зависит от коэффициента массопередачи. Очевидно, что высота единицы переноса и всего аппарата будет тем меньше, чем интенсивнее массопередача в этом аппарате.

Диаметр аппарата рассчитывают с помощью уравнения

$$Q_V = v S_{\text{ап}},$$

где Q_V — объемный расход газа (пара); v — скорость, отнесенная к полному сечению аппарата. Величина Q_V обычно задана или легко определяется из уравнений баланса.

При выборе скорости v исходят из ее максимального (предельного) значения, которое в насадочных аппаратах определяется наступлением режима «захлебывания».

Барботажные колонны. Колонные аппараты со ступенчатым контактом фаз называют колоннами барботажного типа. В таких аппаратах жидкая фаза подается на верхнее контактное устройство — та-

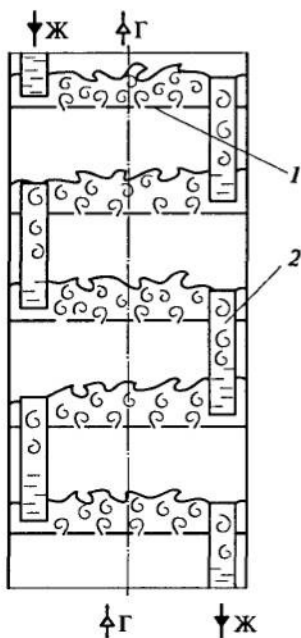


Рис. 17.7. Колонна с ситчатыми тарелками: 1 — тарелка; 2 — переливное устройство; Г — газовая фаза; Ж — жидкая фаза

релку и последовательно перетекает сверху вниз. Газ проходит снизу вверх и распределяется в жидкости в виде пузырьков и струек. Такой режим движения газа называют барботажем.

На рис. 17.7 приведена схема колонны с ситчатыми тарелками. На тарелке 1 поддерживается слой жидкости, через который проходит восходящий поток газа. Тарелки в колонне располагаются на определенном расстоянии друг от друга. В пространстве между ними газ отделяется от унесенных капель и брызг. Жидкость непрерывно перетекает с верхних тарелок на нижние по специальным переливным устройствам 2. Контакт между поднимающимся газом и стекающей жидкостью осуществляется ступенчато. Тарелки в колоннах могут быть самых разнообразных видов и конструкций — клапанные, колпачковые, тарелки с S-образными элементами.

На рис. 17.8 проиллюстрирован метод нахождения числа теоретических тарелок, который предусматривает последовательное построение ступеней между линией равновесия и рабочей линией и определение числа n_T теоретических ступеней контакта (тарелок).

Для перехода от числа теоретических тарелок к числу действительных тарелок используют соотношение

$$n_d = n_T / \eta,$$

где η — среднее значение коэффициента полезного действия тарелки. Величина η зависит от скорости и взаимного направления движения фаз, интенсивности перемешивания, физических свойств взаимодействующих сред и т. п. Значения КПД находят опытным путем. Они изменяются в широких пределах (обычно 0,3...0,8).

Рабочую высоту аппарата с тарелками $H_{\text{тар}}$ (расстояние между крайними тарелками) определяют по формуле

$$H_{\text{тар}} = (n_d - 1)h_{\text{м.т}},$$

где $h_{\text{м.т}}$ — расстояние между тарелками, м.

Диаметр аппарата рассчитывают, используя уравнение расхода для газовой (паровой) фазы. При этом скорость, отнесенную к полному сечению аппарата, находят по формуле

$$v = 0,5 C_{\text{м.т}} (\rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{г}}),$$

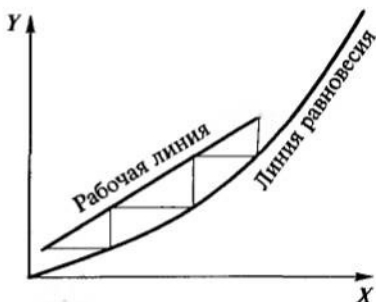


Рис. 17.8. Определение числа теоретических тарелок по диаграмме $Y-X$

где $C_{м.т}$ — коэффициент, зависящий от вида тарелок и расстояния между ними; $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ — плотности жидкости и газа соответственно.

Контрольные вопросы

1. Какие массообменные процессы проводят в химической промышленности?
2. Что представляет собой линия равновесия? Запишите уравнение линии рабочих концентраций.
3. Запишите основное уравнение массопередачи. Каков физический смысл коэффициента массопередачи?
4. Что является движущей силой массообменного процесса?
5. Запишите уравнение молекулярной диффузии. Каков физический смысл коэффициента молекулярной диффузии?
6. Запишите уравнение массоотдачи. Каков физический смысл коэффициента массоотдачи и какова связь между коэффициентом массопередачи и коэффициентами массоотдачи?
7. Как устроены тарельчатые и насадочные колонны? Какими основными параметрами характеризуются насадочные тела?
8. Как рассчитывают диаметр и высоту насадочной и тарельчатой колонн?

Глава 18

АБСОРБЦИЯ

18.1. Общие сведения. Равновесие в процессе абсорбции

Абсорбцией называют процесс избирательного поглощения компонентов из газовых или парогазовых смесей, как правило, жидкими поглотителями (абсорбентами). В отличие от адсорбции компоненты поглощаются во всем объеме абсорбента.

Различают физическую и химическую абсорбцию (хемосорбцию). При *физической абсорбции* поглощаемый компонент не вступает в химическую реакцию с абсорбентом. Процесс абсорбции в большинстве случаев обратим. На этом свойстве основан обратный процесс выделения поглощенного компонента из раствора — *десорбция*. При *хемосорбции* поглощаемый компонент образует с абсорбентом химическое соединение. В промышленности процесс абсорбции обычно сочетают с десорбцией, что позволяет многократно использовать абсорбент.

Примерами использования абсорбции в химическом производстве могут служить процессы разделения газообразных углеводородов на нефтеперерабатывающих установках, получение со-

ляной и серной кислот, аммиачной воды, очистка газовых выбросов от вредных примесей, выделение ценных компонентов из продуктов крекинга или пиролиза метана, из газов коксовых печей и т.д. Процесс абсорбции часто сопровождается выделением теплоты.

Жидкие поглотители (абсорбенты) выбирают по степени растворимости в них поглощаемых компонентов. Степень растворимости газов в жидких поглотителях зависит от физических и химических свойств газовой и жидкой фаз, температуры и давления газа в смеси.

Очевидно, что с практической точки зрения лучшим из ряда возможных будет тот поглотитель, расход которого при проведении данного процесса окажется наименьшим.

Для абсорбционно-десорбционных процессов равновесие между газами и их растворами описывается *законом Генри*, согласно которому при данной температуре количество газа, растворяющегося в жидкости, прямо пропорционально парциальному давлению газа над ней:

$$p^* = H_e x, \quad (18.1)$$

где p^* — равновесное парциальное давление растворяемого газа, Па; x — мольная доля растворенного компонента в жидкости; H_e — константа Генри, Па, зависящая от свойств растворенного газа и поглотителя, а также температуры.

Под *парциальным давлением* газа понимают такое давление, которое создавал бы газ, если бы из газовой смеси были удалены все остальные компоненты при условии, что температура и объем системы сохранились неизменными.

Закон Генри применим для слабо растворимых газов, а также хорошо растворимых газов низкой концентрации.

Растворимость многих газов значительно отклоняется от закона Генри, и при расчетах рекомендуется пользоваться полученными из опыта значениями равновесного парциального давления p^* для соответствующих значений x .

Согласно *закону Дальтона* парциальное давление компонента в газовой смеси пропорционально общему давлению:

$$p_{\text{парц}} = \Pi y, \quad (18.2)$$

где y — мольная доля абсорбируемого компонента в газовой смеси; $p_{\text{парц}}$ — парциальное давление газа; Π — общее давление газовой смеси.

Таким образом, совместное решение уравнений (18.1) и (18.2) позволяет записать для равновесного состояния:

$$y^* = (H_e/\Pi)x = m_p x, \quad (18.3)$$

где $m_p = H_e/\Pi$; m_p — коэффициент распределения, постоянный для данной системы газ—жидкость (при $T = \text{const}$ и $\Pi = \text{const}$).

Уравнение (18.3) описывает прямую линию с тангенсом угла наклона, равным m_p , и называется *уравнением равновесия* для процесса абсорбции при низких концентрациях растворов газов.

Из закона Генри следует, что растворимость газа в жидкости увеличивается по мере повышения давления и понижения температуры.

Для понижения температуры жидкости исходные вещества охлаждаются с помощью теплообменников.

18.2. Материальный баланс абсорбера. Расход абсорбента

Уравнение материального баланса абсорбера записывается в виде

$$M' = G'_r(Y_n - Y_k) = G'_j(X_k - X_n), \quad (18.4)$$

где M' — мольный расход целевого компонента, перенесенного из газовой фазы в жидкую; G'_r , G'_j — мольные расходы инертного газа и абсорбента соответственно.

Из уравнения (18.4) находим мольный расход абсорбента:

$$G'_j = G'_r(Y_n - Y_k)/(X_k - X_n).$$

Уравнение рабочей линии для любого массообменного процесса имеет вид, описываемый уравнением (17.3).

На рис. 18.1 приведена диаграмма $Y-X$ для процесса абсорбции. При минимальном мольном расходе поглотителя движущая сила процесса массопередачи в точке касания рабочей линии и линии равновесия (точка C) равна нулю. В реальном абсорбционном аппарате равновесие между фазами не достигается и всегда $X_k < X_k^*$, где X_k^* — относительная мольная доля поглощаемого газа в жидкости, находящейся в равновесии с поступающим газом.

С увеличением расхода поглотителя уменьшается требуемая высота абсорбера, но возрастают затраты на десорбцию, перека-

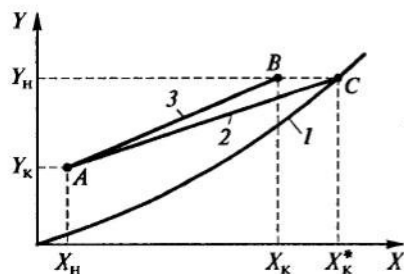


Рис. 18.1. Диаграмма $Y-X$ для процесса абсорбции:

1 — линия равновесия; 2, 3 — рабочие линии; A, B — точки рабочей линии; C — точка равновесия; Y_n , Y_k — начальная и конечная относительные мольные доли поглощаемого компонента в газовой фазе; X_n , X_k — начальная и конечная относительные мольные доли этого компонента в жидкой фазе

чивание поглотителя и т. д. На значение расхода абсорбента влияют параметры процесса — температура и давление. При прочих равных условиях с увеличением общего давления расход поглотителя уменьшается, а с повышением температуры увеличивается значение константы Генри H_e , и расход поглотителя возрастает.

18.3. Схемы абсорбционных установок

В химическом производстве процесс абсорбции обычно проводят в непрерывном режиме. На рис. 18.2 представлена схема абсорбционно-десорбционной установки непрерывного действия. Газ, содержащий извлекаемый компонент, проходит через абсорбер 1 снизу вверх, а жидкость стекает сверху вниз. При этом уходящий из абсорбера газ встречается со свежим абсорбентом, что обеспечивает более полное извлечение поглощаемого компонента. Поглотитель из абсорбера направляется через теплообменник 2, где подогревается, после чего поступает в десорбер 3. Здесь абсорбент освобождается от поглощенного компонента, насосом 4 по-

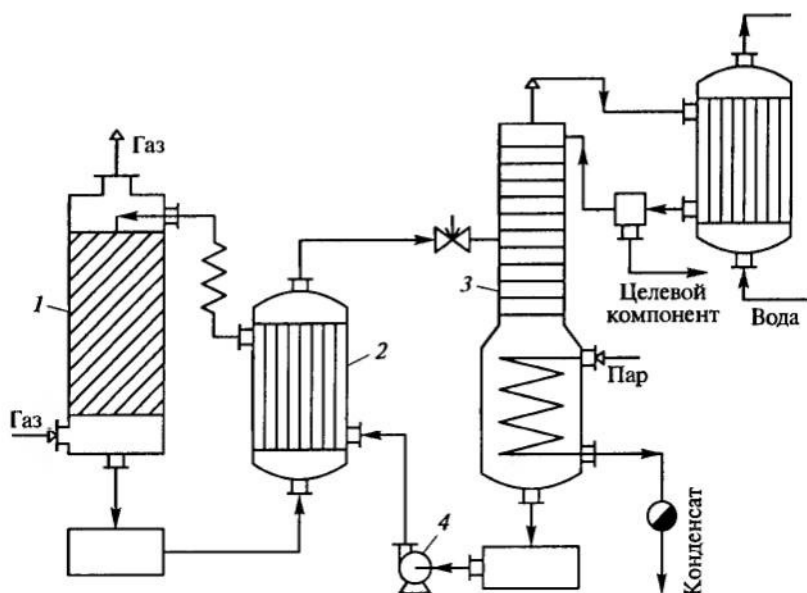


Рис. 18.2. Схема абсорбционно-десорбционной установки непрерывного действия:

1 — абсорбер (насадочная колонна); 2 — теплообменник; 3 — десорбер (ректификационная колонна); 4 — насос

дается в теплообменник для охлаждения, а затем возвращается в абсорбер.

В химической промышленности различают следующие принципиальные схемы абсорбционных процессов: по *направлению движения компонентов* — прямоточные и противоточные; по *числу ступеней контакта* — одноступенчатые с рециркуляцией и многоступенчатые с рециркуляцией.

Прямоточная схема. При прямоточной схеме взаимодействия компоненты потоки газа и абсорбента движутся параллельно друг другу (рис. 18.3, *a*). Газ с большей концентрацией распределяемого вещества приводится в контакт с жидкостью, имеющей меньшую концентрацию этого вещества, а газ с меньшей концентрацией взаимодействует на выходе из аппарата с жидкостью, имеющей большую концентрацию распределяемого вещества. На диаграмме $Y-X$, представленной на рис. 18.3, *б*, показано положение рабочей линии, имеющей отрицательный наклон.

Противоточная схема. При использовании противоточной схемы (рис. 18.4, *a*) в одной части аппарата взаимодействуют газ и жидкость с повышенной концентрацией распределяемого компонента, а в противоположной части — с пониженной. На рис. 18.4, *б* построена диаграмма $Y-X$ и показано положение рабочей линии.

Сравнивая прямоточную и противоточную схемы процесса по диаграмме $Y-X$, можно отметить, что противоточная схема обеспечивает большее значение конечной концентрации поглощаемого компонента в абсорбенте и, следовательно, меньший расход

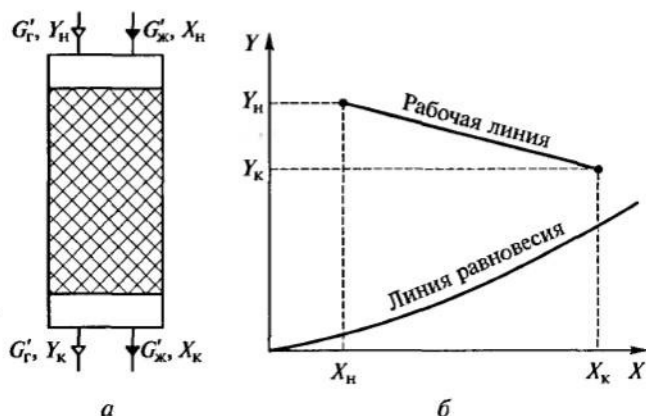


Рис. 18.3. Прямоточная схема абсорбции:

a — схема движения потоков; *б* — взаимное расположение линии равновесия и рабочей линии; $G'_г$, $G'_ж$ — мольный расход газовой и жидкой фаз соответственно; $Y_н$, $Y_к$ — начальная и конечная относительные мольные доли поглощаемого компонента в газовой фазе; $X_н$, $X_к$ — начальная и конечная относительные мольные доли этого компонента в жидкой фазе

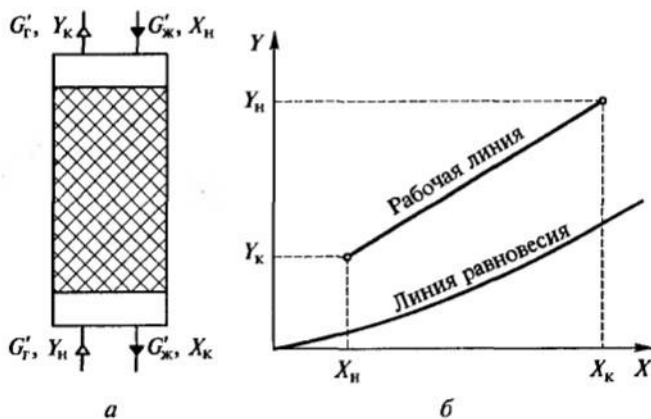


Рис. 18.4. Противоточная схема абсорбции:

a — схема движения потоков; *b* — взаимное расположение линии равновесия и рабочей линии; $G'_г$, $G'_ж$ — мольный расход газовой и жидкой фаз соответственно; $Y_н$, $Y_к$ — начальная и конечная относительные мольные доли поглощаемого компонента в газовой фазе; $X_н$, $X_к$ — начальная и конечная относительные мольные доли этого компонента в жидкой фазе

абсорбента. Однако при противотоке движущая сила процесса меньше, чем при прямотоке, поэтому необходимы бóльшие размеры аппарата.

Схемы с рециркуляцией абсорбента или газа по сравнению со схемами без рециркуляции имеют следующую особенность. При одном и том же расходе свежего абсорбента (или свежего газа) количество жидкости (газа), проходящего через аппарат, значительно больше. Это приводит к повышению коэффициента массопередачи и некоторому уменьшению движущей силы процесса. Окончательный выбор схемы зависит от конкретных условий и назначения процесса абсорбции.

Эффективность проведения процесса абсорбции зависит от того, насколько развита поверхность контакта фаз в аппарате. По способу формирования этой поверхности абсорберы условно разделяют на поверхностные и пленочные (например, насадочные колонны), барботажные (например, тарельчатые колонны) и аппараты с распылением жидкости. Конструкции насадочных и тарельчатых колонн подробно рассмотрены в гл. 17.

Контрольные вопросы

1. Что называется процессом абсорбции?
2. Запишите уравнение материального баланса процесса абсорбции.
3. Какие факторы влияют на расход абсорбента?
4. Сравните прямоточную и противоточную схемы процесса абсорбции.

ПЕРЕГОНКА И РЕКТИФИКАЦИЯ

19.1. Общие сведения. Простая перегонка

В химической технологии широко применяют разнообразные методы разделения жидких однородных смесей, основанные на неодинаковой летучести компонентов, т. е. на различии составов жидкости и образующегося над ней пара.

Разделяют смеси с разной взаимной растворимостью компонентов. Двойные смеси обычно называют *бинарными*, а смеси, содержащие несколько компонентов, — *многокомпонентными*. Бинарные смеси могут состоять из взаимно растворимых, частично растворимых и нерастворимых жидкостей.

Для упрощения будем рассматривать процессы разделения смесей, состоящих из двух компонентов. Компонент, который имеет более низкую температуру кипения, называется *низкокипящим* или *легколетучим*. Компонент с более высокой температурой кипения называется *высококипящим* или *труднолетучим*.

Процесс частичного испарения жидкой смеси и получения пара, при конденсации которого образуется жидкость нового состава — дистиллят, называется *перегонкой* или *дистилляцией*. Дистиллят содержит больше летучего компонента, чем исходная жидкость. Неиспарившаяся часть жидкости носит название *кубового остатка*.

Процесс перегонки применим в том случае, когда не требуется полного разделения компонентов. Его применяют для грубого разделения смесей или предварительной очистки продуктов от нежелательных примесей.

Перегонка основана на различии температур кипения, парциальных давлений и летучести отдельных веществ, входящих в состав смеси. Более летучим в процессе испарения является компонент с пониженной температурой кипения.

Многочисленное чередование процессов испарения и конденсации с целью разделения смеси на чистые компоненты (при использовании теплоты конденсации паров для испарения соответствующего количества жидкости) называют *ректификацией*.

Процесс ректификации проводят при противотоке жидкости и пара, причем пар, поднимаясь вверх по колонне, контактирует со стекающей жидкостью и непрерывно обогащается низкокипящим (легколетучим) компонентом, а жидкость — высококипящим (труднолетучим). Сконденсированные пары, которые отводятся из верхней части колонны, состоят в основном из низкокипящего компонента и называются *дистиллятом*. Жидкость, удаляемая из

нижней части колонны (кубовой остаток), по составу близка к чистому высококипящему компоненту. Ректификацией может быть достигнута любая заданная степень разделения жидких смесей.

Равновесие процессов перегонки и ректификации подчиняется законам академика Д. П. Коновалова.

Первый закон Коновалова определяет качественный состав паровой фазы по отношению к составу жидкой фазы: пар, находящийся в равновесии с раствором, всегда содержит в избытке тот компонент, прибавление которого к раствору понижает его температуру кипения.

Второй закон Коновалова служит для установления состава нераздельно кипящих смесей (называемых *азеотропными*): в экстремумах значений давления пара (или температуры кипения) смесей составы жидкой и паровой фаз совпадают.

На практике часто приходится иметь дело с нераздельно кипящими смесями, например азеотропной смесью этилового спирта с водой, содержащей около 96 % (по массе) C_2H_5OH . При нормальном давлении в этой системе с массовой долей спирта в жидкости, составляющей 96 %, пар также будет содержать 96 % спирта. При более высокой концентрации спирта данную систему нельзя разделить на индивидуальные компоненты методом обычной перегонки и ректификации.

Для описания условий равновесия разделяемых бинарных смесей используют три вида диаграмм:

- зависимости давления пара от состава жидкости $p = f_1(x)$;
- зависимости температуры кипения смеси от состава жидкости и пара $T = f_2(x, y)$;
- зависимости состава пара от состава жидкости $y = f_3(x)$.

Идеальные смеси подчиняются *закону Рауля*, согласно которому парциальное давление компонента в парах над жидкостью равно давлению пара чистого компонента, умноженному на его мольную долю в жидкости:

$$p_{нк} = p_{нк}^{нас}x, p_{вк} = p_{вк}^{нас}(1 - x),$$

где $p_{нк}$, $p_{вк}$ — парциальные давления низкокипящего и высококипящего компонентов; $p_{нк}^{нас}$, $p_{вк}^{нас}$ — давления насыщенных паров чистых компонентов (при данной температуре); x — мольная доля низкокипящего компонента в жидкой смеси.

Общее давление Π в соответствии с законом Дальтона

$$\Pi = p_{нк} + p_{вк}.$$

На рис. 19.1 представлены изотермы парциальных давлений компонентов и общего давления для идеальных растворов в зависимости от состава x жидкой фазы.

На рис. 19.2 приведены зависимости температуры кипения и конденсации от состава фаз. При использовании диаграммы из

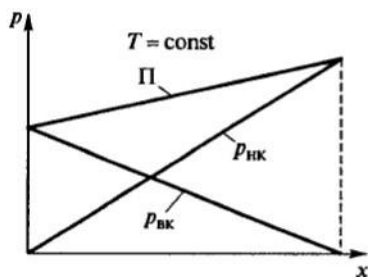


Рис. 19.1. Изотермы парциальных давлений компонентов и общего давления для идеальных растворов:

$P_{н\kappa}$, $P_{в\kappa}$ — парциальные давления низкокипящего и высококипящего компонентов; Π — общее давление над раствором; x — состав жидкой фазы

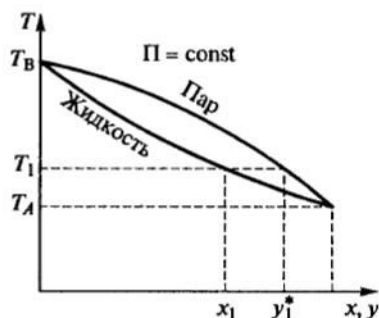
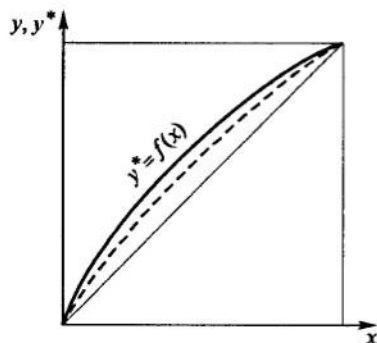


Рис. 19.2. Зависимости температуры кипения и конденсации от состава жидкой x и паровой y фаз:

T_A , T_B — температуры кипения низкокипящего и высококипящего компонентов соответственно; x_1 — координата произвольной точки; y_1^* — равновесный состав пара

точки x_1 , соответствующей составу жидкой смеси, проводят вертикаль до пересечения с линией кипения и находят температуру кипения жидкости, а затем из точки пересечения проводят горизонталь вправо до пересечения с линией конденсации и определяют равновесный состав пара y_1^* .

Для определения соотношения между составами жидкости и находящегося в равновесии с ней пара пользуются диаграммой равновесия пар — жидкость (рис. 19.3). Общее давление существенно влияет на равновесные составы. С увеличением давления кривая равновесия становится менее выпуклой, т. е. приближается к диагонали квадрата (штриховая линия на рис. 19.3). Разделить смесь тем труднее, чем ближе кривая $y^* = f(x)$ к диагонали диаграммы.



В промышленности применяют несколько вариантов простой перегонки. Процесс проводят в периодическом или непрерывном режиме, однократно и многократно, с дефлегмацией и фракционированием.

Рис. 19.3. Диаграмма равновесия пар — жидкость двухкомпонентной (бинарной) смеси

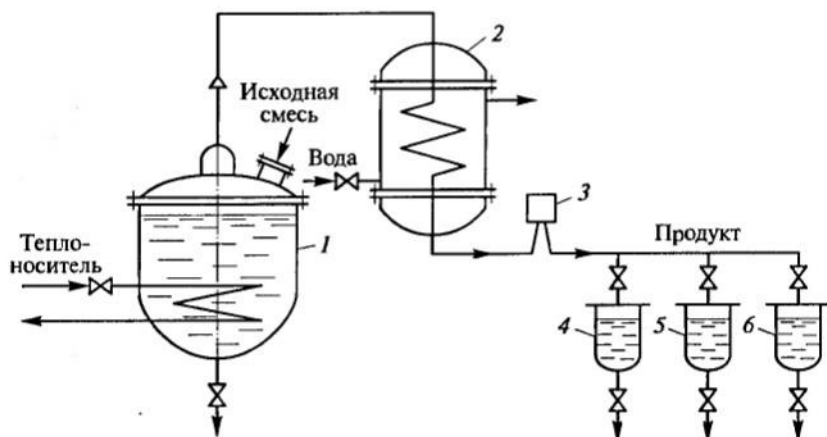


Рис. 19.4. Схема установки для простой перегонки:

1 — перегонный куб; 2 — конденсатор-холодильник; 3 — смотровой фонарь;
4—6 — сборники дистиллята

Простая перегонка используется для очистки веществ от малолетучих и нелетучих примесей, а также в случаях, когда к составу продукта, получаемого в виде дистиллята, не предъявляется строгих требований (различие составов жидкой и паровой фаз достаточно велико). Процесс однократного испарения применяется в технологии переработки нефти.

На рис. 19.4 представлена схема установки для простой перегонки, работающей в периодическом режиме. Исходную смесь загружают в перегонный куб 1, снабженный змеевиком для обогрева, и доводят до кипения. Пары направляют в конденсатор-холодильник 2, дистиллят поступает в сборник 4. По окончании процесса остаток сливают из куба и в него вновь загружают разделяемую смесь.

Если требуется получить несколько фракций дистиллята с различным содержанием низкокипящего компонента, то устанавливают несколько сборников 4—6. Простая перегонка в этом случае называется *фракционированной дистилляцией*.

19.2. Ректификация

Ректификация — это процесс разделения жидких смесей на дистиллят и кубовой остаток в результате противоточного взаимодействия жидкости и пара.

Процесс ректификации может осуществляться в периодическом или непрерывном режиме при различном давлении: в вакууме (для разделения смесей высококипящих веществ), при атмосферном давлении или давлении, превышающем атмосферное.

Ректификационная установка непрерывного действия. Схема такой установки приведена на рис. 19.5. Внутри ректификационной колонны 2 расположены контактные устройства в виде тарелок или насадки. Исходную смесь с мольным расходом G'_F и мольной долей легколетучего компонента x_F подогревают до температуры кипения в теплообменнике 4 и подают в колонну на ту тарелку, где кипит смесь того же состава, т. е. на верхнюю тарелку нижней, *исчерывающей* части колонны. Верхняя часть колонны называется *укрепляющей* по легколетучему компоненту.

Снизу вверх по колонне движется пар, поступающий из куб-испарителя 3. На каждой тарелке происходит частичная конденса-

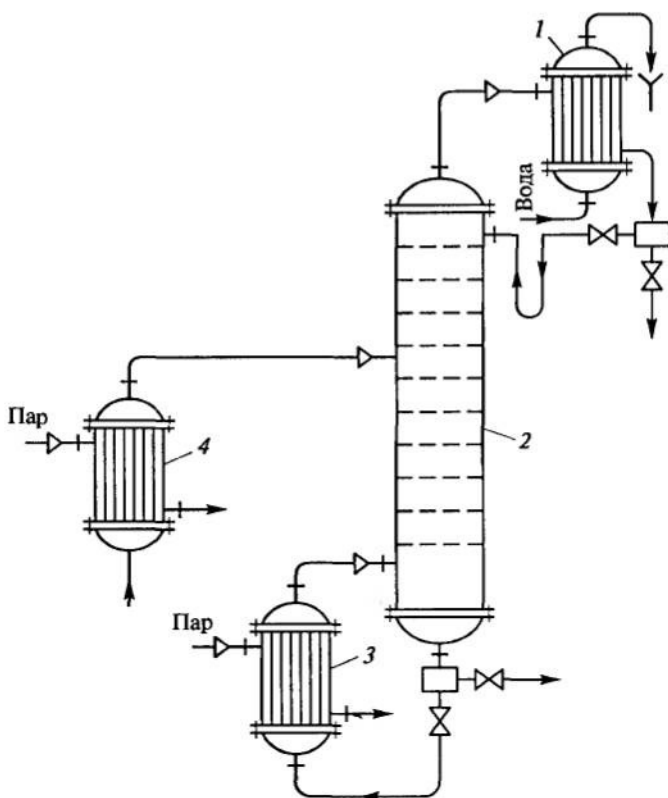


Рис. 19.5. Схема ректификационной установки непрерывного действия: 1 — дефлегматор; 2 — колонна; 3 — куб-испаритель; 4 — теплообменник для подогрева исходной смеси

ция пара труднолетучего компонента и за счет конденсации — частичное испарение легколетучего компонента. Таким образом, пар, выходящий из куба-испарителя и представляющий собой почти чистый труднолетучий компонент, по мере движения вверх обогащается легколетучим компонентом и покидает колонну в виде почти чистого пара легколетучего компонента. Пар конденсируется в дефлегматоре 1.

Полученный конденсат разделяется на дистиллят (верхний продукт) с мольным расходом G'_D и мольной долей легколетучего компонента x_D и флегму, которая направляется на верхнюю тарелку колонны. Флегма, стекая по колонне и взаимодействуя с паром, обогащается труднолетучим компонентом. Отношение расхода флегмы к расходу дистиллята называется *флегмовым числом* R . Из куба-испарителя отводят нижний продукт или кубовой остаток с мольным расходом G'_W и мольной долей легколетучего компонента x_W .

Материальный баланс ректификационной колонны. При расчетах ректификационных колонн принимают следующие допущения:

- состав пара y_D , выходящего из колонны в дефлегматор, и состав флегмы x_D , возвращающейся в колонну, одинаковы, т. е. $y_D = x_D$;

- состав пара y_W , поднимающегося из кипятильника в колонну, аналогичен составу жидкости x_W в кубе-испарителе, т. е. $y_W = x_W$.

Уравнения материального баланса ректификационной колонны имеют следующий вид:

для потоков —

$$G'_F = G'_D + G'_W;$$

для легколетучего компонента —

$$G'_F x_F = G'_D x_D + G'_W x_W.$$

Построение рабочих линий ректификационной колонны на диаграмме $y-x$ (рис. 19.6) проводят в такой последовательности. Согласно допущению $x_D = y_D$. Из точки x_D восстанавливают вертикаль до пересечения с диагональю диаграммы в точке a . Откладывая на оси ординат отрезок $B = x_D/(R + 1)$, получают точку d и соединяют ее прямой линией с точкой a .

Из точки, отвечающей составу x_F , проводят вертикаль до пересечения с линией ad и получают точку b . Отрезок ab — *рабочая линия для верхней (укрепляющей) части колонны*. Согласно допущению $x_W = y_W$. Из точки, соответствующей составу x_W , восстанавливают вертикаль до пересечения с диагональю диаграммы и получают точку c . Точку c соединяют прямой линией с точкой b . Отрезок cb — *рабочая линия для нижней (исчерпывающей) части колонны*.

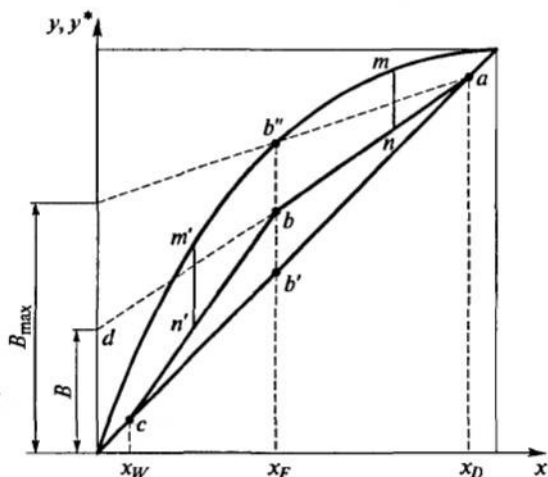


Рис. 19.6. Построение рабочих линий ректификационной колонны на диаграмме $x-y$:

ab — рабочая линия для верхней части колонны; bc — рабочая линия для нижней части колонны; mn , $m'n'$ — движущие силы процесса ректификации; b' , b'' , d — характерные точки построения; x_W , x_F , x_D — составы жидкости в кубе-испарителе, исходной смеси и дистиллята

Рабочие линии на графике отражают изменение рабочих концентраций в верхней и нижней частях ректификационной колонны. При этом вертикальные отрезки mn и $m'n'$, измеряемые разностью $y^* - y$, характеризуют движущую силу процесса ректификации на различных ступенях контакта.

Флегмовое число. При заданном составе дистиллята x_D длина отрезка B (см. рис. 19.6), отсекаемого рабочей линией для верхней (укрепляющей) части колонны на оси ординат, зависит только от флегмового числа R . С увеличением R длина отрезка B уменьшается, точка b перемещается по вертикали вниз и в пределе занимает положение b' на диагонали диаграммы. В этом случае движущая сила процесса, измеряемая разностью $y^* - y$, достигает максимального значения. С уменьшением R точка b перемещается по вертикали вверх. В этом случае движущая сила процесса уменьшается и в пределе, при некотором минимальном значении R_{\min} , когда точка b находится на пересечении вертикали с равновесной кривой (точка b''), окажется равной нулю.

Рабочее флегмовое число, при котором действует колонна, должно находиться в пределах $R_{\min} < R < \infty$. Исходной величиной для выбора рабочего флегмового числа является R_{\min} , значение которой можно найти расчетным путем.

Выбор рабочего флегмового числа часто проводят приближенно по уравнению

$$R = \varphi R_{\min},$$

где φ — коэффициент избытка флегмы ($\varphi > 1$). Если данные о значениях коэффициента избытка флегмы для разделяемых систем отсутствуют, то можно воспользоваться эмпирической зависимостью

$$R = 1,3R_{\min} + 0,3.$$

В ректификационных установках применяют аппараты следующих типов: тарельчатые, пленочные и насадочные колонны.

Экстрактивная ректификация. Разделение смесей компонентов, которые имеют близкие значения температуры кипения, методом обычной ректификации сопряжено со значительными трудностями. Кривая фазового равновесия $y^* = f(x)$ для таких смесей подходит очень близко к диагонали диаграммы $y-x$, и требуемое число ректификационных тарелок существенно возрастает даже при больших значениях коэффициента избытка флегмы.

Процесс разделения таких смесей основан на введении третьего компонента — разделяющего агента, способного резко повысить относительную летучесть основных компонентов. Необходимо, чтобы третий компонент был менее летуч, чем оба компонента разделяемой смеси, и хорошо растворял труднолетучий компонент исходной смеси.

Ректификация жидких смесей с использованием разделяющего агента, получившая название *экстрактивной ректификации*, осуществляется в двух обычных ректификационных колоннах. В первую из них поступает на разделение исходная смесь, состоящая из компонентов $A + B$. На одну из верхних тарелок укрепляющей части колонны вводится разделяющий агент C . Компонент B хорошо растворим в C , в то время как компоненты A и C взаимно нерастворимы (или ограниченно растворимы). Компонент C экстрагирует компонент B (более высококипящий компонент исходной смеси) из жидкой и паровой фаз. Смесь B и C удаляется в виде остатка, а дистиллят представляет собой почти чистый компонент A .

За процессом собственно экстрактивной ректификации следует процесс разделения смеси компонентов B и C во второй ректификационной колонне. Из этой колонны в качестве дистиллята получают компонент B , более летучий, чем компонент C .

Регенерированный разделяющий компонент C (кубовой остаток) возвращается на повторное использование в первую ректификационную колонну.

Азеотропная ректификация. К разделяемой азеотропной смеси A и B добавляют третий компонент C , который образует с одним

из ее компонентов новую (более летучую по сравнению с исходной) азеотропную смесь. Эта смесь отгоняется в качестве дистиллята, а другой практически чистый компонент удаляется в виде кубового остатка.

Контрольные вопросы

1. Какие смеси разделяются на отдельные компоненты с помощью перегонки и ректификации?
2. Какие диаграммы используют для описания условий равновесия разделяемых смесей?
3. Что представляет собой простая перегонка?
4. В чем заключается принцип разделения смесей ректификацией?
5. Запишите уравнения материального баланса процесса ректификации.
6. Что называется укрепляющей и исчерпывающей частями ректификационной колонны?
7. Что означает флегмовое число?
8. Как осуществляется разделение смесей, которые имеют близкие значения температуры кипения?

Глава 20

СУШКА

20.1. Основные сведения. Формы связи влаги с материалом

Процессом сушки называется удаление влаги из различных сыпучих, пастообразных, кристаллических и волокнистых материалов. По своей физической сущности сушка сложный тепло- и массообменный процесс, скорость которого определяется скоростью диффузии влаги в материале. При сушке влага перемещается из глубины материала к поверхности, а затем удаляется с нее. Теплота, необходимая для нагрева материала при сушке, подводится к поверхности и распространяется в глубь материала. Таким образом, сушка представляет собой сочетание процессов тепло- и массообмена, причем перенос теплоты и массы происходит в противоположных направлениях.

Процесс сушки по способу подвода теплоты к высушиваемому материалу подразделяют на конвективную сушку, осуществляемую непосредственным соприкосновением высушиваемого материала с сушильным агентом (нагретым воздухом или топочными газами); контактную — путем подвода теплоты, содержащейся в теплоносителе, к материалу через тепло-

передающую поверхность; *радиационную* — посредством передачи теплоты инфракрасным излучением; *дielekтрическую* — нагреванием высушиваемого материала в поле токов высокой частоты; *сублимационную* сушку — путем проведения процесса в глубоком вакууме при низких температурах, причем влага переходит в парообразное состояние сразу из твердой фазы, минуя жидкое состояние.

Три последних способа называются специальными видами сушки и применяются только в отдельных случаях.

Наиболее распространена конвективная сушка, осуществляемая с помощью горячего воздуха или дымовых газов.

Существуют различные формы связи влаги с материалом. *Химически* связанная влага является результатом ионного или сильного молекулярного взаимодействия влаги и материала. Такая связь очень прочна и нарушается только в результате химического взаимодействия или нагревания до высоких температур.

Адсорбционно связанная влага присутствует в виде мономолекулярного слоя на поверхности материала и его пор.

Оsmотически связанная влага находится внутри структурного скелета материала и удерживается осмотическим давлением (в двух последних случаях связь воды с материалом имеет физико-химическую природу).

Капиллярно связанная влага заполняет макро- и микрокапилляры пористого тела. Она механически связана с материалом и наиболее легко удаляется. Давление пара над поверхностью материала тем меньше, чем прочнее связь между водой и материалом. Наиболее прочна эта связь у гигроскопичных веществ. Давление пара над ними наиболее существенно отличается от давления насыщенных паров.

20.2. Основные параметры влажного газа и диаграмма $I-x$

Для понимания физической сущности процесса конвективной сушки и правильной его организации необходимо предварительно рассмотреть свойства влажного воздуха.

При конвективной сушке сушильный агент передает материалу теплоту и уносит влагу, испаряющуюся из материала за счет этой теплоты, т. е. играет роль тепло- и влагоносителя. При прочих методах сушки находящийся в соприкосновении с материалом влажный газ служит только влагоносителем. Влажный газ обычно является смесью сухого воздуха и водяного пара, поскольку в большинстве случаев из высушиваемых материалов удаляется вода, хотя возможно удаление и других жидкостей (спирты, углеводороды и др.).

Влажный воздух характеризуют следующие показатели: *абсолютная влажность* — масса, кг, водяного пара, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха, и *относительная влажность* φ — отношение массы водяного пара, находящегося в 1 м^3 влажного воздуха при данных условиях, к его максимально возможному количеству в условиях насыщения.

В процессе сушки параметры воздуха изменяются, поэтому при анализе его состояния некоторые переменные удобно относить к величине, не изменяющейся при проведении сушки, т. е. к массе, кг, абсолютно сухого воздуха. *Влагосодержание воздуха* x — масса, кг, водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, отнесенная к массе, кг, абсолютно сухого воздуха. *Удельная энтальпия (теплосодержание)* I *влажного воздуха* определяется как суммарная энтальпия абсолютно сухого воздуха и содержащейся в нем влаги, отнесенная к массе, кг, абсолютно сухого воздуха.

При проведении конвективной сушки воздухом параметры влажного воздуха (температура T , удельная энтальпия I , влагосодержание x и относительная влажность φ) изменяются. Наиболее

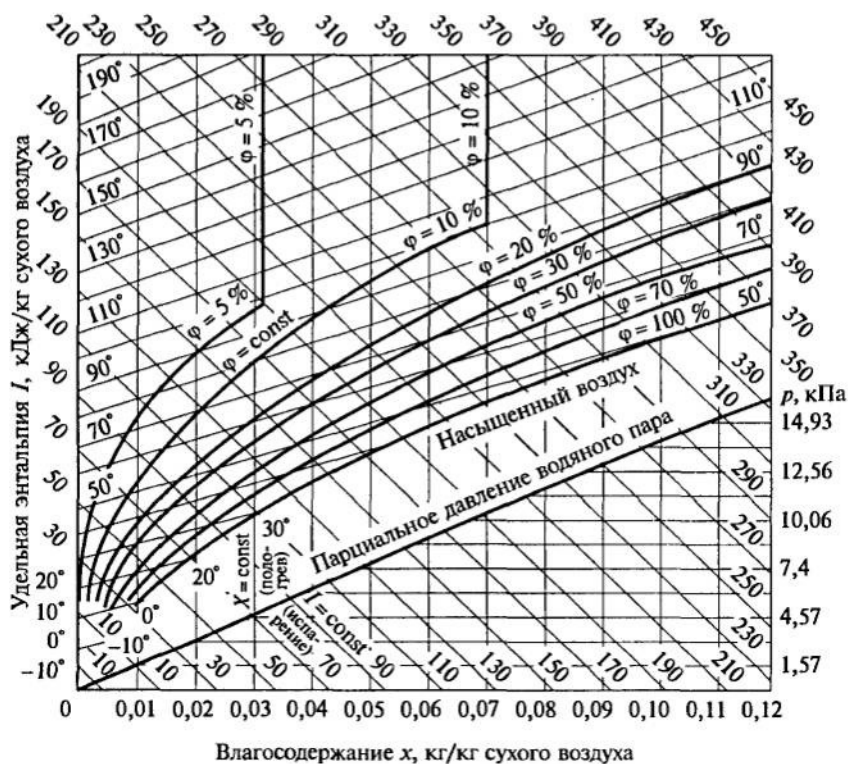


Рис. 20.1. Диаграмма $I-x$ влажного воздуха

просто и наглядно состояние влажного воздуха характеризуется графически на диаграмме, предложенной Л. К. Рамзиным (рис. 20.1). По оси ординат отложены значения удельной энтальпии I влажного воздуха, по оси абсцисс — значения влагосодержания x . Диаграмма $I-x$ построена в косоугольной системе координат с углом между осями 135° .

Все точки диаграммы, лежащие выше линии $\varphi = 100\%$, характеризуют состояние влажного воздуха. Температуру, при которой воздух данного состояния, охлаждаясь при постоянном влагосодержании, становится полностью насыщенным ($\varphi = 100\%$), называют *точкой росы*. Если материал находится во влажном воздухе и не получает теплоты извне, то процесс протекает при постоянной энтальпии. Испарение влаги приводит к ее 100%-ному содержанию в воздухе. Это состояние будет характеризоваться точкой, называемой *пределом охлаждения*. Температура данного состояния называется *температурой мокрого термометра*.

20.3. Материальный и тепловой баланс конвективной сушики

Схема процесса конвективной сушики приведена на рис. 20.2. Влажный материал с массовым расходом G_n поступает в сушильную камеру, где осуществляется сушика, и отводится с массовым расходом G_k . Абсолютно сухой воздух с массовым расходом L первоначально поступает в калорифер, нагревается до заданной температуры и далее направляется в сушильную камеру.

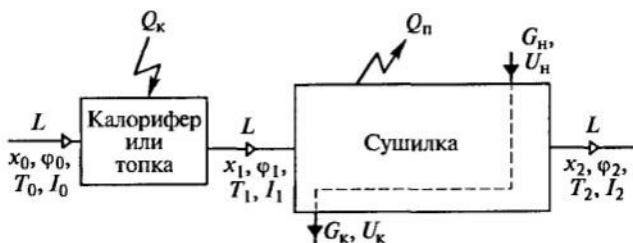


Рис. 20.2. Схема конвективной сушики:

G_n — массовый расход влажного материала, поступающего в сушилку; G_k — массовый расход материала, выходящего из сушилки; U_n , U_k — влажность материала до и после сушики; x_0 , x_1 , x_2 — влагосодержание воздуха при входе в калорифер, сушилку и после сушики; I_0 , I_1 , I_2 — удельная энтальпия воздуха до поступления в калорифер, по выходе из калорифера и после сушики; T_0 , T_1 , T_2 — температура воздуха при входе в калорифер, сушилку и после сушики; φ_0 , φ_1 , φ_2 — относительная влажность воздуха до поступления в калорифер, по выходе из калорифера и после сушики; L — массовый расход абсолютно сухого воздуха; Q_k — теплота, подводимая в калорифере; Q_n — потери теплоты в окружающую среду

Введем следующие обозначения: U_n — влажность материала до сушки; U_k — влажность материала после сушки; W — массовый расход удаляемой влаги; x_0, x_1, x_2 — влагосодержание воздуха до поступления в калорифер, в сушилке и после сушки соответственно; I_0, I_1, I_2 — удельная энтальпия воздуха до поступления в калорифер, по выходе из него и после сушки соответственно.

Уравнение материального баланса для материала, подвергаемого сушке, запишем в следующем виде:

$$G_n = G_k + W, \quad (20.1)$$

для абсолютно сухого вещества в высушиваемом материале — в виде

$$G_n(1 - U_n) = G_k(1 - U_k). \quad (20.2)$$

Из уравнений (20.1) и (20.2) получим уравнения, позволяющие определить массовый расход высушенного материала

$$G_k = G_n(1 - U_n)/(1 - U_k)$$

и массовый расход удаляемой влаги

$$W = G_n(U_n - U_k)/(1 - U_k).$$

Для определения расхода воздуха, требующегося для проведения процесса сушки, необходимо составить уравнение материального баланса для влаги. Если массовый расход абсолютно сухого воздуха, предназначенного для сушки, составляет L , то уравнение материального баланса для влаги имеет вид

$$Lx_0 + W = Lx_2.$$

Общий массовый расход абсолютно сухого воздуха

$$L = W/(x_2 - x_0).$$

Тогда удельный расход воздуха

$$l = L/W = 1/(x_2 - x_0).$$

Так как при прохождении воздуха через калорифер его влагосодержание не изменяется ($x_0 = x_1$), то

$$l = 1/(x_2 - x_1).$$

Тепловой баланс сушилки можно представить в виде

$$Q_{вн} + Q_{вм} + Q_{тн} + Q_k + Q_{л} = Q_{вк} + Q_{см} + Q_{тк} + Q_{п}.$$

Теплота поступает с воздухом ($Q_{вн}$), влажным материалом ($Q_{вм}$) и транспортными устройствами ($Q_{тн}$), а также подводится в калорифере (Q_k) и от дополнительного подогревателя ($Q_{л}$).

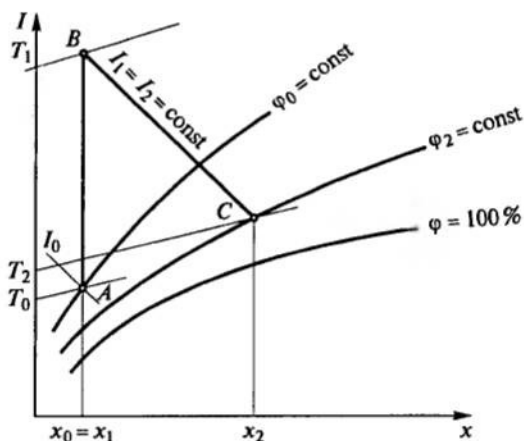


Рис. 20.3. Диаграмма процесса сушки в теоретической сушилке:
A, B, C — точки, характеризующие состояние воздуха на входе в калорифер, сушилку и на выходе из сушилки; *x, I, T, φ* — параметры процесса сушки

Теплота отводится отходящим воздухом ($Q_{\text{вк}}$), сухим материалом ($Q_{\text{см}}$), транспортными устройствами ($Q_{\text{тк}}$), а также вследствие потерь ($Q_{\text{п}}$) в окружающую среду.

Если в сушильную камеру вводится дополнительная теплота в количестве, компенсирующем все потери, то процесс сушки протекает при постоянной удельной энтальпии воздуха, а сушилка рассматривается как теоретическая (рис. 20.3). Воздух в калорифере от начального состояния (T_0, x_0) в точке *A* нагревается до температуры T_1 в точке *B*. Нагрев проводится при постоянном влагосодержании x_0 , и на диаграмме это отображено вертикальной линией *AB*. Процесс сушки в теоретической сушилке протекает при постоянной удельной энтальпии по линии *BC*. Конечное состояние процесса (точка *C*) определяется пересечением линий равной энтальпии и заданной относительной влажности φ_2 (или T_2).

20.4. Конструкции сушилок

В химической промышленности применяются разнообразные конструкции сушилок.

Туннельные сушилки. Внутри камеры туннельной сушилки прямоугольного сечения по рельсовому пути перемещаются вагонетки с высушиваемым материалом. Свежий воздух подают в сушильную камеру вентилятором через калорифер, где он подогревается до необходимой температуры. Сушильный агент — воздух — подается противотоком или прямотоком.

Туннельные сушилки обычно работают с частичной рециркуляцией сушильного агента и предназначаются для сушки большого числа штучных керамических изделий. Загрузка и выгрузка вагонеток проводится вручную; сушка изделий, находящихся в различных местах вагонеток, протекает неодинаково. Неравномерность процесса сушки и значительные размеры сушилки — существенные недостатки рассмотренной конструкции.

Ленточные сушилки. Конструкция такой сушилки представлена на рис. 20.4. Она включает в себя корпус 1, внутри которого расположен ряд транспортерных лент 5 из прорезиненной ткани или металлической сетки. Каждая из бесконечных лент натянута между ведущими 6 и ведомыми 2 барабанами. Влажный материал поступает в загрузочную воронку 4. Воздух засасывается вентилятором 3 и перед поступлением в сушилку нагревается калорифером 8, расположенным в ее нижней части.

Ведущие и ведомые барабаны смежных лент смещены относительно друг друга по вертикали. Верхние части смежных лент движутся в противоположных направлениях (на рис. 20.4 показано стрелками). Материал на верхней ленте движется слева направо. Дойдя до конца ленты, он высыпается на нижележащую ленту и начинает двигаться в противоположном направлении. Такое перемещение материала осуществляют до тех пор, пока он не достигнет выходного отверстия.

С помощью перегородок 7 в сушилке создается противоток воздуха относительно движения высушиваемого материала. При пе-

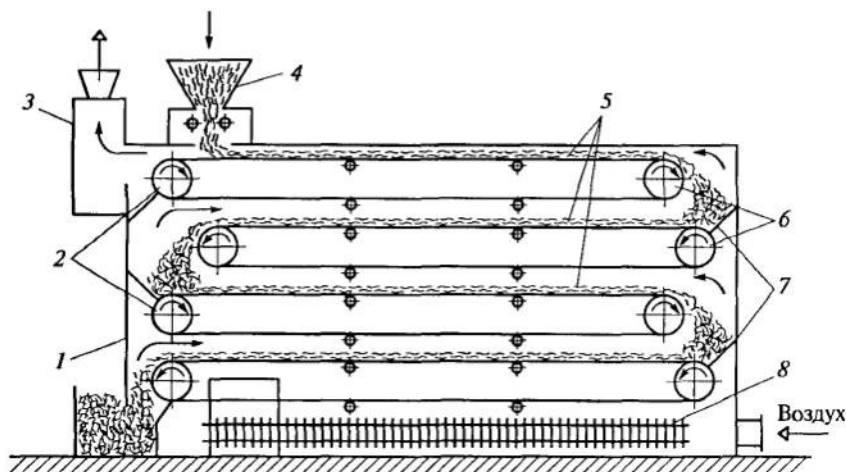


Рис. 20.4. Ленточная сушилка:

1 — корпус сушилки; 2 — ведомые барабаны; 3 — вентилятор; 4 — загрузочная воронка; 5 — транспортерные ленты; 6 — ведущие барабаны; 7 — перегородки; 8 — калорифер

ресыпанию с ленты на ленту материал перемешивается, и его поверхность обновляется. В этот момент воздух соприкасается со всей поверхностью каждой частицы, что интенсифицирует процесс сушки.

Ленточные многоярусные сушилки, используемые для сушки сыпучих и кристаллических материалов, довольно компактны. Они не требуют применения ручного труда для загрузки и выгрузки продукта.

Петлевые сушилки. В петлевых сушилках высушиваемый материал в виде пасты или сильно увлажненных мелких кристаллов поступает из бункера-питателя 1 (рис. 20.5) на движущуюся бесконечную металлическую ленту-сетку 8 и уплотняется с помощью двух нажимных роликов 2. Лента в виде петель непрерывно перемещается в корпусе сушилки с помощью цепного конвейера 3. Высушенный материал удаляется из ячеек ленты с помощью ударного устройства 4 и шнеком 5 выгружается из сушилки. В качестве сушильного агента используются нагретый воздух и дымовые газы. Подача сушильного агента осуществляется вентилятором 6.

Барабанная сушилка. Сушилка (рис. 20.6) состоит из стального барабана 4 с бандажами 3, опирающимися на опорные ролики. Барабаны изготавливают разного диаметра — 200...2800 мм. Вращение барабана осуществляется посредством редуктора 11, малая шестерня которого входит в зацепление с большой венцовой шестерней, установленной в средней части барабана. Барабан расположен на опорных роликах 10 с углом наклона к горизонту 3...6°. Во избежание осевого смещения барабана на одном из бандажей имеются упорные ролики 9, препятствующие его соскальзыванию. Частота вращения барабана невелика — 3...8 мин⁻¹.

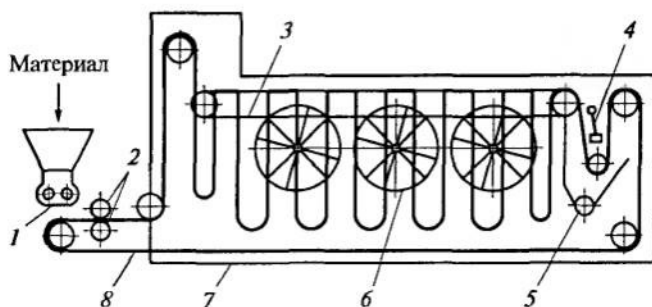


Рис. 20.5. Петлевая сушилка:

1 — бункер-питатель; 2 — нажимные ролики; 3 — цепной конвейер; 4 — ударное устройство; 5 — шнек для выгрузки; 6 — вентилятор; 7 — корпус сушилки; 8 — бесконечная металлическая лента-сетка

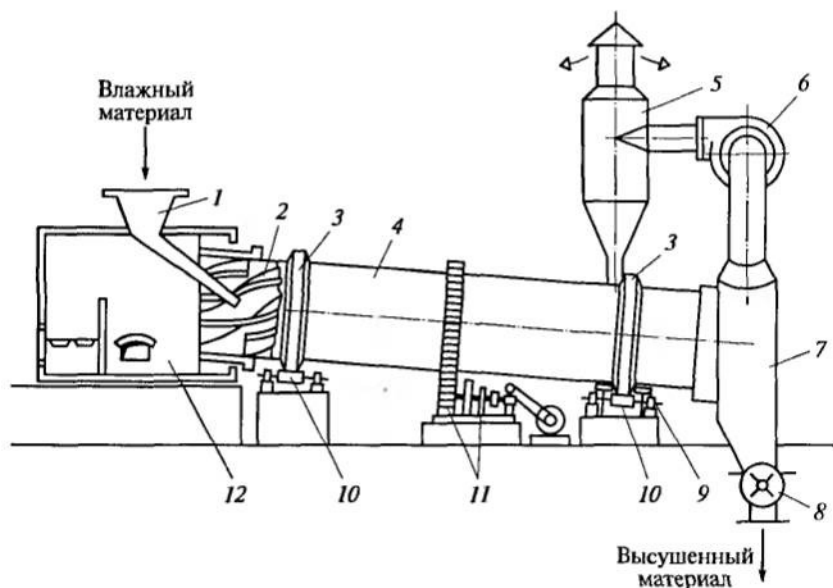


Рис. 20.6. Барабанная сушилка:

1 — загрузочный бункер; 2 — распределительная лопасть; 3 — бандажи; 4 — барабан (корпус сушилки); 5 — циклон; 6 — вентилятор; 7 — бункер; 8 — шнек; 9 — упорный ролик; 10 — опорные ролики; 11 — редуктор; 12 — топка

Влажный материал подается питателем через загрузочный бункер 1 в верхнюю часть барабана, захватывается расположенными внутри него распределительными лопастями 2, непрерывно перемешиваясь, подходит к нижнему концу барабана, поступает в бункер 7 и выгружается разгрузочным шнеком 8. Для очистки отходящих газов от пыли на газоходе установлен циклон 5. Степень заполнения барабана не превышает 20 %.

Продолжительность обработки материала регулируют изменением частоты вращения барабана, а также угла его наклона к горизонту. В качестве сушильного агента обычно используют дымовые газы, перемещаемые через сушилку с помощью вентилятора 6.

В зависимости от крупности и свойств высушиваемого материала к корпусу барабана прикрепляют специальные распределительные насадки различной формы. *Подъемно-лопастные* насадки предназначены для крупнокусковых материалов, склонных к налипанию (рис. 20.7, а). *Секторные* насадки применяют для материалов большой плотности и малосыпучих материалов (рис. 20.7, б), *перевалочные* насадки с закрытыми ячейками — для сильно сыпучих материалов (рис. 20.7, в).

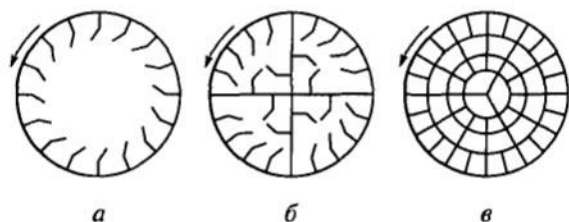


Рис. 20.7. Типы насадок:

a — подъемно-лопастная; *b* — секторная; *v* — перевалочная

Сушилка с «кипящим» слоем. Конструкция такой сушилки (рис. 20.8) представляет собой вертикальную коническую емкость *b*, расширяющуюся в верхней части корпуса; в нижней части аппарата укреплена решетка *3*. Материал поступает из бункера *5* с питателем и удаляется через штуцер *4*. Сушильный агент подается вентилятором *1*, проходит смесительную камеру *2* и поступает под решетку *3* сушилки. Скорость подачи сушильного агента устанавливают такой, чтобы находящийся на решетке высушиваемый материал начал «кипеть» и перешел в псевдооживленное состояние.

В сушилках с «кипящим» слоем обеспечивается наилучший контакт сыпучего материала с сушильным агентом. Продолжительность процесса сушки сокращается до нескольких минут, что приводит к повышению производительности установки и качества высушиваемого материала при отсутствии его разложения.

В связи с тем что частицы высушиваемого материала различаются по величине и массе, для обеспечения равномерности режима «кипения» корпусу сушилки придают форму расширяющегося кверху конуса. При такой форме аппарата более тяжелые частицы скапливаются в нижней части аппарата, а более мелкие — в верхней. Так как наиболее мелкие и легкие частицы уносятся потоком газа, для улавливания частиц на линии отходящих газов последовательно установлены циклон *7* и батарейный циклон *8*. Основная масса высушенного материала удаляется транспортером *9* из сушильной камеры и очистительных устройств.

В сушилках с «кипящим» слоем из единицы объема аппарата удаляется значительно больше влаги, чем в сушилках других типов.

Распылительные сушилки. Сушилки этого типа применяют для сушки жидких продуктов — растворов солей, суспензий и эмульсий. Устройство таких сушилок показано на рис. 20.9. Воздух, предварительно нагретый в калорифере *2*, с помощью вентилятора *1* нагнетается в сушильную камеру *3*. Высушиваемый материал распыляется специальным устройством *4*. В качестве распылителей

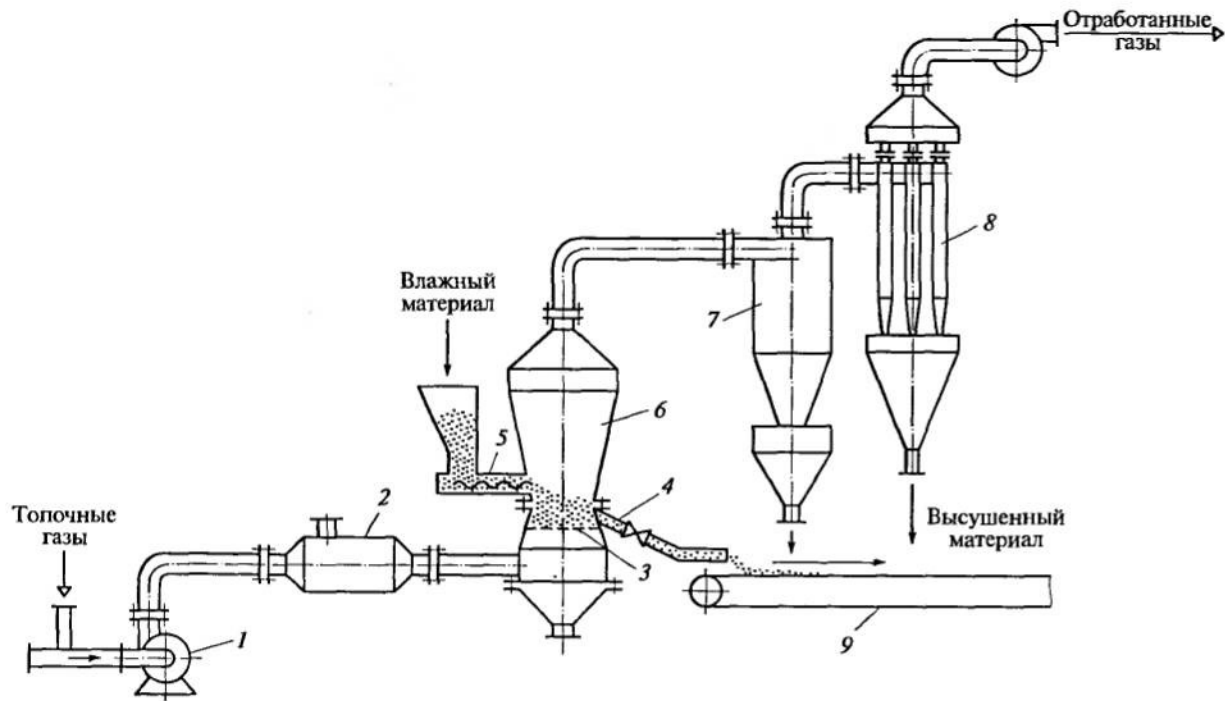


Рис. 20.8. Сушилка с «кипящим» слоем:

1 — вентилятор; 2 — смесительная камера; 3 — решетка; 4 — штуцер для выгрузки продукта; 5 — бункер с питателем; 6 — коническая емкость (корпус сушилки); 7 — циклон; 8 — батарейный циклон; 9 — транспортер

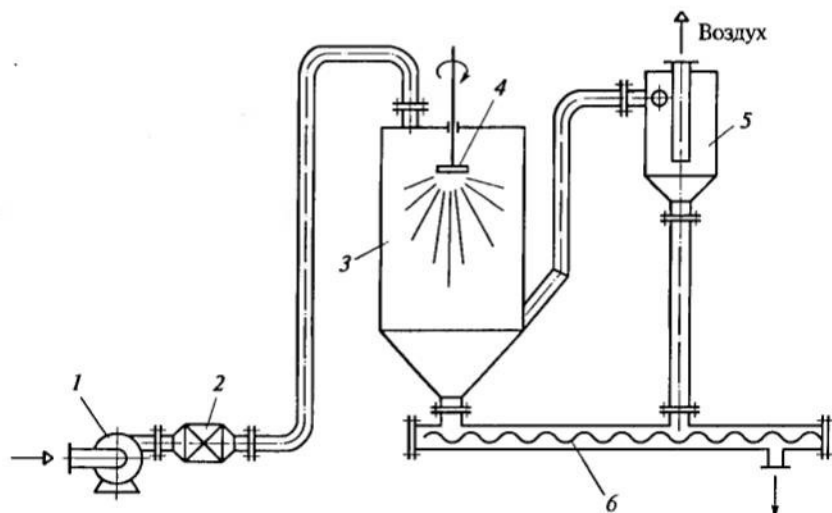


Рис. 20.9. Распылительная сушилка:

1 — вентилятор; 2 — калорифер; 3 — камера сушилки; 4 — распылительное устройство; 5 — циклон; 6 — шнек

могут применяться вращающиеся диски, форсунки или пневматические устройства.

Распыление дисками приемлемо для суспензий и вязких жидкостей, но требует больших затрат энергии. Распыление чистых жидкостей проводится форсунками под давлением 3... 20 МПа. Высушиваемый материал диспергируется в виде мелких капель, что обеспечивает хороший контакт материала с сушильным агентом. Воздух со взвешенными частицами высушенного продукта поступает в циклон 5, где происходит отделение частиц от газа. Высушенный продукт удаляется из аппарата с помощью шнека 6.

Сушилка с инфракрасным обогревом. При подводе энергии потоком инфракрасного излучения можно передать высушиваемому материалу значительное количество теплоты и обеспечить высокую скорость испарения влаги. В качестве источников инфракрасного излучения применяют специальные электрические лампы с нитью накаливания большой толщины и зеркальным отражателем. Для этой же цели используют специальные экраны или панели, обогреваемые газом.

В ламповой радиационной сушилке над поверхностью высушиваемого материала (обычно перемещаемого транспортером) устанавливают лампы, создающие направленный поток инфракрасного излучения требуемой мощности. Такой метод сушки недостаточно экономичен и применяется только при необходимости удаления небольшого количества влаги.

Сушку инфракрасным излучением можно проводить при использовании отражающих экранов (стальных, чугунных, керамических), обогреваемых горячими газами. Нагревание излучающих поверхностей осуществляется либо открытым газовым пламенем, либо продуктами сгорания газов, которые перемешаются внутри излучателя.

Такие сушилки компактны и эффективны при сушке тонколистовых материалов и окрашенных поверхностей (ткань, бумага, лакокрасочные покрытия).

Сушка токами высокой частоты. Для высушивания толстослойных материалов, когда необходимо регулировать температуру и влажность не только на поверхности, но и в глубине материала, в ряде случаев эффективно проведение сушки в поле токов высокой частоты. Такой сушке подвергают изделия из пластических масс, фарфора и других материалов, обладающих диэлектрическими свойствами. Сушка токами высокой частоты обеспечивает быстрое и равномерное высушивание толстослойных материалов, однако требует дорогостоящего оборудования и больших затрат энергии.

Сублимационная сушка. Это разновидность контактной вакуум-сушки, но ее проводят в более глубоком вакууме и при низких температурах (до -50°C). При использовании такого способа сушки материал и влага, содержащаяся в нем, находятся в замороженном состоянии. При быстром нагреве лед переходит в пар, минуя жидкое состояние.

При проведении сублимационной сушки у материалов не изменяется структура и биологические свойства. После сушки они могут храниться долгое время. Однако затраты энергии и эксплуатационные расходы в этом случае значительно больше, чем при обычной вакуумной сушке. Сублимационная сушка применяется для высушивания плазмы крови, обработки различных продуктов питания и т. п.

Контрольные вопросы

1. Что называется процессом сушки? Какие основные виды сушки применяют в химической промышленности и в чем их различие?
2. Что называется относительной влажностью, влагосодержанием и теплосодержанием влажного воздуха?
3. Какие основные параметры влажного воздуха нанесены на диаграмме $I-x$?
4. Как с помощью диаграммы $I-x$ определить точку росы и температуру мокрого термометра?
5. Из каких основных элементов состоит конвективная сушилка?
6. Запишите уравнения материального и теплового баланса конвективной сушки.

7. Какие основные типы сушилок используются в химической промышленности?
8. Как устроены и для обработки каких материалов предназначены туннельные сушилки?
9. В чем состоят преимущества и недостатки камерных сушилок?
10. Каким образом осуществляется перемещение материала в ленточных многоярусных сушилках?
11. Для обработки каких материалов применяются петлевые сушилки?
12. В чем заключается основное преимущество сушилок с «кипящим» слоем?
13. На каких принципах основано действие сушилок специальных типов?

Глава 21

ЭКСТРАКЦИЯ

21.1. Общие сведения о процессе. Треугольная диаграмма

Экстракция — это процесс извлечения одного или нескольких компонентов из растворов или твердых пористых материалов избирательно действующими растворителями (экстрагентами). Различают экстракционные процессы в системах жидкость — жидкость (*экстракция*) и экстрагирование в системах твердое тело — жидкость (*твердофазное экстрагирование*).

Экстракционные процессы широко применяют для извлечения ценных веществ из смесей, очистки жидкостей и твердых веществ от примесей.

Процессы жидкофазной (или жидкостной) экстракции используют в нефтехимической и химической отраслях промышленности для извлечения в чистом виде различных продуктов органического синтеза и редких элементов, очистки сточных вод и т. д.

В некоторых случаях экстракция используется в сочетании с ректификацией (предварительная экстракция позволяет значительно сократить затраты теплоты на разделение жидкой смеси ректификацией).

Экстракция в системах жидкость — жидкость как метод разделения жидких смесей основана на различии растворимости выделяемых компонентов смеси в жидких растворителях, составляющих две фазы.

Принципиальная схема процесса экстракции приведена на рис. 21.1. Исходный раствор представляет собой смесь *первичного растворителя* и *извлекаемого компонента*. Последний может быть как неорганическим, так и органическим веществом.



Рис. 21.1. Принципиальная схема процесса экстракции

На первой стадии экстракции исходный раствор и экстрагент приводят в тесное соприкосновение, обеспечивающее максимальное развитие поверхности контакта фаз. При этом получают две новые фазы, которые называются экстрактом и рафинатом. *Экстракт* представляет собой раствор извлекаемого компонента в экстрагенте, *рафинат* — остаточный исходный раствор (первичный растворитель). На второй стадии экстракт и рафинат разделяют отстаиванием, центрифугированием или другими методами.

Экстракция отличается от других массообменных процессов низкой рабочей температурой. Экстракционное разделение наиболее экономично при разделении смесей, чувствительных к высоким температурам. Во многих случаях процесс экстракции сопровождается химической реакцией.

Каждый экстрагент (вторичный растворитель) при экстракции определенного компонента имеет предельную емкость, по достижении которой растворитель насыщается извлекаемым компонентом. Значения предельной емкости для разных веществ изменяются в широких пределах.

К экстрагенту предъявляют следующие требования:

- высокая избирательность по отношению к извлекаемому компоненту;
- высокая экстракционная емкость по отношению к извлекаемому компоненту;
- легко осуществляемая реэкстракция, т. е. возможность извлечения извлекаемого компонента;
- хорошее расслаивание фаз;
- безопасность при работе (экстрагент не должен быть токсичным, летучим и взрывоопасным);
- стойкость в процессе экстракции или реэкстракции;
- низкая стоимость;
- доступность (экстрагент не должен быть дефицитным).

Промышленные экстрагенты подразделяются на три класса:

- органические кислоты или их соли (алифатические монокарбоновые кислоты, нафтеновые кислоты, сульфокислоты, фенолы, кислые эфиры фосфорной кислоты), которые переводят катионы металлов из водной фазы в органическую фазу;

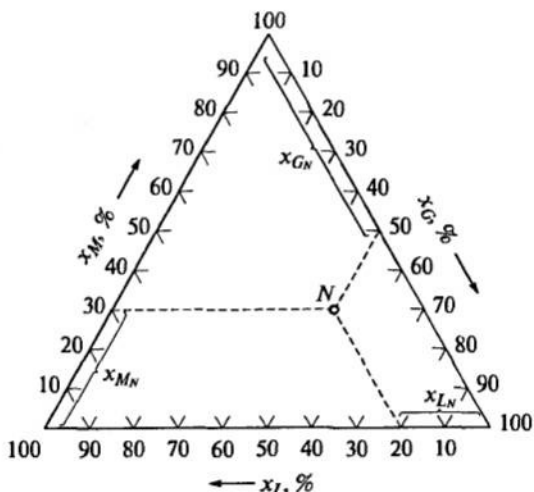


Рис. 21.2. Треугольная диаграмма:

x_L , x_G , x_M — мольные доли соответственно первичного растворителя, экстрагента и извлекаемого вещества; N — точка, отвечающая составу трехкомпонентного раствора

- соли органических оснований (первичных, вторичных и третичных аминов, а также четвертичных аммониевых оснований), с помощью которых извлекают анионы металлов из водных растворов;

- нейтральные экстрагенты (вода, спирты, простые и сложные эфиры, альдегиды и кетоны), извлечение которых осуществляется с помощью разных механизмов в зависимости от кислотности исходного раствора.

При частичной взаимной растворимости первичного растворителя и экстрагента каждая фаза при экстракции будет представлять собой трехкомпонентную систему, состав которой невозможно отразить на прямоугольной диаграмме. Составы таких фаз удобно представить в треугольной системе координат — на так называемой *треугольной диаграмме* (рис. 21.2), которая представляет собой равносторонний треугольник. Каждая точка на сторонах треугольника соответствует составу двухкомпонентных растворов, а каждая точка внутри диаграммы — составу трехкомпонентного раствора.

Для определения содержания каждого компонента в растворе на сторонах диаграммы нанесены шкалы, причем длина каждой стороны принята за 100%. Состав раствора или смеси определяются длиной отрезков, получаемых на сторонах треугольника. Например, точка N характеризует тройную смесь, состоящую из 20%

первичного растворителя, 50 % экстрагента и 30 % извлекаемого вещества.

21.2. Схемы процесса экстракции. Конструкции экстракционных аппаратов

Процесс экстракции проводят разными способами с помощью аппаратов, отличающихся конструкцией и принципом действия.

Схемы процесса экстракции. В промышленности преимущественно используются однократная экстракция, многократная с перекрестным током экстрагента, многократная с противотоком экстрагента, непрерывная противоточная и ступенчатая противоточная. Процесс *однократной экстракции* может быть осуществлен периодическим или непрерывным способом. Схема процесса однократной периодической экстракции представлена на рис. 21.3, *а*. В аппарат загружается исходный раствор, содержащий извлекаемое вещество, и к нему добавляется порция экстрагента. Жидкости перемешивают до установления равновесия. По окончании перемешивания мешалка останавливается, и жидкости расслаиваются в том же аппарате. После этого сливают сначала нижний слой (рафинат), а затем верхний (экстракт).

Для расслаивания фаз часто используют особые конструкции — отстойники (рис. 21.3, *б*). В таком аппарате процесс однократной экстракции проводят в непрерывном режиме. При непрерывной

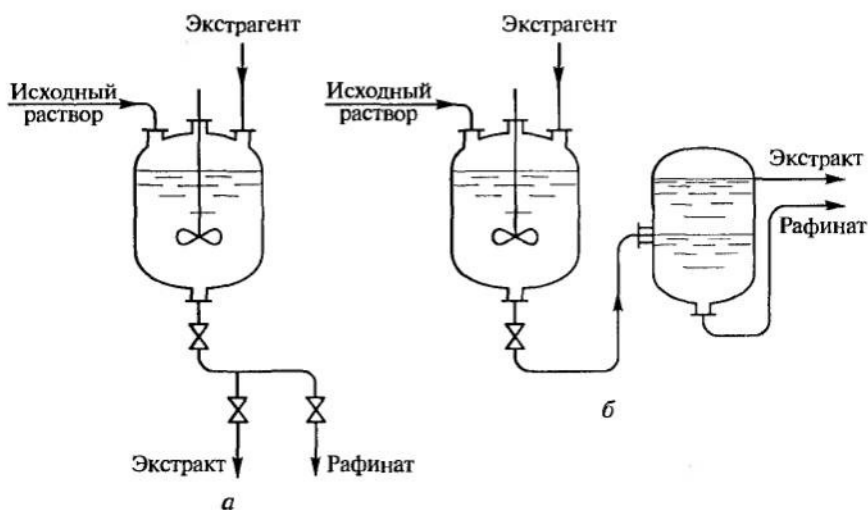


Рис. 21.3. Схемы однократной экстракции, проводимой периодическим (*а*) и непрерывным (*б*) способами

подаче исходного раствора и свежего экстрагента из отстойника также непрерывно выводят полученные экстракт и рафинат.

При проведении *многократной экстракции с перекрестным током экстрагента* полученный после первой стадии процесса рафинат вводится во вторую ступень, где взаимодействует со свежей порцией экстрагента. Тройная смесь вновь расслаивается на экстракт и рафинат, который снова контактирует со свежим экстрагентом. Процесс обработки проводят до тех пор, пока не получают рафинат заданного состава.

Общий расход экстрагента равен сумме его порций во всех ступенях экстракции. Процесс многократной экстракции можно провести в периодическом и непрерывном режимах.

Конструкции экстракционных аппаратов. По *принципу действия* экстракторы разделяют на ступенчатые и дифференциально-контактные. К первой группе относят *смесительно-отстойные* аппараты разного типа с дискретным контактом фаз. Ступень смесительно-отстойного экстрактора состоит из смесителя, в котором осуществляется процесс экстрагирования, и отстойника для последующего разделения фаз. При непрерывном проведении процесса ступени соединяют по принципу организации противотока фаз; при периодическом процессе обе стадии осуществляются в одном аппарате.

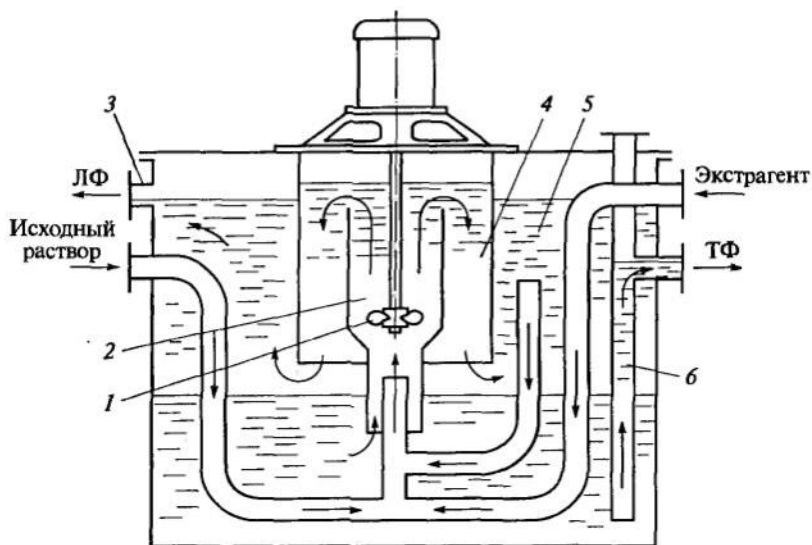


Рис. 21.4. Смесительно-отстойный экстрактор:

1 — мешалка; 2 — зона смешения; 3 — переливной патрубок; 4 — кольцеобразное пространство; 5 — зона расслаивания; 6 — сифон; ТФ, ЛФ — потоки тяжелой и легкой фаз

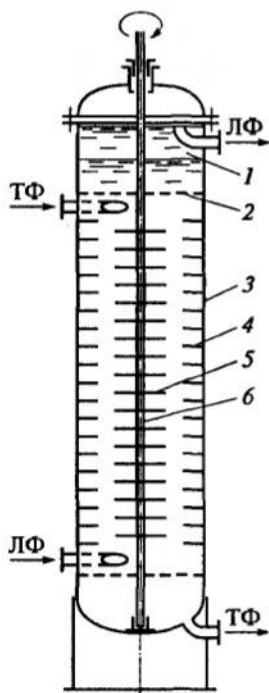


Рис. 21.5. Схема роторно-дискового экстрактора: 1 — разделительная камера; 2 — успокоительная перфорированная перегородка; 3 — корпус; 4 — неподвижные кольцевые перегородки; 5 — вращающиеся диски; 6 — вал; ТФ, ЛФ — потоки тяжелой и легкой фаз

Простейшим смесительно-отстойным экстрактором является аппарат с мешалкой. Кроме мешалок применяют инжекторные, диафрагменные и трубчатые смесители, центробежные насосы и вентили. Для расслаивания используются также гидроциклоны, центрифуги и центробежные сепараторы.

В смесительно-отстойных экстракторах смешение и разделение фаз осуществляются одновременно (рис. 21.4). Исходный раствор и экстрагент по трубам подаются в зону смешения 2, где они перемешиваются мешалкой 1. Смесь поднимается вверх и через кольцеобразное пространство 4 поступает в зону расслаивания 5. Отстоявшаяся тяжелая жидкая фаза (ТФ) выводится через сифон 6, а легкая фаза (ЛФ) — через

переливной патрубок 3. Наличие центральной трубы обеспечивает циркуляцию компонентов.

К группе дифференциально-контактных аппаратов относятся *колонные экстракторы*. Среди них наибольшее распространение получили распылительные, тарельчатые, насадочные и роторно-дисковые экстракторы. На рис. 21.5 приведена схема роторно-дискового экстрактора, представляющего собой колонну, в которой вращаются укрепленные на вертикальном валу диски. Внутри корпуса устанавливают кольцевые перегородки. Аналогично устроены многосекционные экстракторы с мешалками (две кольцевые перегородки с расположенной между ними мешалкой — это одна секция экстрактора).

Контрольные вопросы

1. Что называется процессом экстракции?
2. Каким основным свойством должны обладать применяемые экстрагенты?
3. Что представляет собой треугольная диаграмма?
4. Как проводится однократная и многократная экстракция?
5. Как устроены смесительно-отстойные и роторно-дисковые экстракторы?

22.1. Общие сведения

Адсорбция — это процесс поглощения одного или нескольких компонентов из газовой или жидкой фазы, как правило, твердым поглотителем (*адсорбентом*). Адсорбируемый компонент называют *адсорбатом*. В отличие от абсорбции компоненты поглощаются в поверхностном слое адсорбента.

В химической промышленности процесс адсорбции применяется для извлечения летучих растворителей из смеси с воздухом, осушения природного газа, выделения ароматических углеводородов из коксового газа, улучшения качества сырья и продуктов и т.д. Адсорбция является эффективным способом разделения «бедных» смесей, содержащих незначительное количество поглощенных веществ, а также смесей, состоящих из компонентов, очень близких друг к другу по химическим и физическим свойствам.

Процессы адсорбции обычно тесно связаны с процессами десорбции. *Десорбция* — это удаление адсорбированных веществ из адсорбента для его повторного использования в процессе.

В зависимости от природы сил, действующих на поверхности твердого тела, различают *физическую адсорбцию*, вызываемую силами молекулярного взаимодействия, и *хемосорбцию*, обусловленную силами химического взаимодействия.

Во многих случаях технологическая очистка промышленных газов (от SO_2 , CS_2 , NO_2 , NO и др.) с помощью адсорбентов представляет собой один из методов защиты окружающей среды.

К адсорбционным процессам можно отнести *ионный обмен*. Он обеспечивает разделение компонентов, находящихся в растворе, с помощью твердых веществ, обладающих особым свойством обменивать содержащиеся в них ионы на ионы, присутствующие в растворе. Такие твердые вещества носят название *ионитов*.

Адсорбционной способностью может обладать любое твердое вещество. Промышленное применение нашли только твердые адсорбенты с сильно развитой внутренней поверхностью, включающей в себя поры и капиллярные каналы различного размера. Наиболее распространенными адсорбентами являются активированный уголь и негорючий гель кремневой кислоты (силикагель), причем площадь поверхности 1 г угля может составлять 200...4000 м², силикагеля — 500 м² и более. В некоторых случаях в качестве адсорбентов используют глины, активированные серной кислотой. В промышленности применяются адсорбенты в виде зерен размером 2...8 мм или пыли с размером частиц 50...200 мкм. Боль-

шинство из них относятся к смешанным структурным типам адсорбентов и имеют поры различного размера.

Адсорбенты характеризуются такими важными показателями, как *активность* (адсорбционная способность) и *селективность* (избирательность поглощения компонентов разделяемой смеси). Природные и искусственные иониты также должны иметь максимальную поверхность контакта со смесью для ускорения обмена и быстрого достижения равновесия. Природные иониты нестойки в сильных кислотах и щелочах, что существенно ограничивает их использование.

Открытие синтетических высокомолекулярных полимеров привело к созданию ряда широко применяемых искусственных ионитов. Их используют для процесса опреснения воды, в гидрометаллургической промышленности, при получении электролитических покрытий, в фармацевтической промышленности, при проведении очистки промышленных сточных вод и т. д.

Синтетические смолы, на основе которых изготавливают иониты, чаще всего имеют трехмерную решетку полистирола (или другого высокомолекулярного соединения), с которой «сшиты» функциональные группы, определяющие свойства этих полимеров. По знаку электрического заряда у активных групп различают *катиониты* и *аниониты*.

22.2. Конструкции адсорберов

Для проведения процессов адсорбции используют следующие конструкции аппаратов: адсорберы с неподвижным слоем адсорбента, «кипящим» (псевдооживленным) и движущимся слоем. В химической промышленности широкое распространение нашли адсорберы первых двух видов.

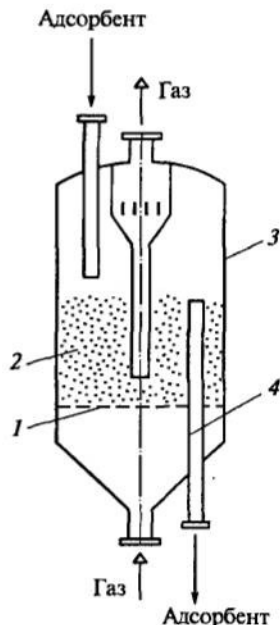
Адсорберы с неподвижным слоем адсорбента. В таких адсорберах последовательно проводятся следующие процессы: адсорбция, десорбция, сушка и охлаждение адсорбента.

Газовая (паровоздушная) смесь подается в адсорбер, проходит сквозь слой адсорбента, находящийся на решетке, и удаляется через выходной штуцер. Для вытеснения из адсорбента поглощенного вещества в аппарат подается перегретый водяной пар или другой вытесняющий агент, который движется в направлении, обратном движению газа. Паровая смесь (смесь паров воды и извлекаемого компонента) удаляется из аппарата и поступает на разделение в отстойник непрерывного действия или ректификационную колонну. Для сушки адсорбента после десорбции сквозь слой вещества пропускают горячий воздух, который входит через паровой штуцер. Высушенный адсорбент охлаждается холодным воздухом.

Рис. 22.1. Одноступенчатый адсорбер с «кипящим» (псевдооживленным) слоем адсорбента: 1 — распределительная решетка; 2 — «кипящий» слой; 3 — корпус; 4 — труба для выхода адсорбента

Для обеспечения непрерывного процесса адсорбционная установка может включать в себя два параллельно работающих аппарата, один из которых находится в рабочем режиме, а другой — в стадии регенерации.

Адсорберы с псевдооживленным слоем. Такие аппараты подразделяют на одно- и многоступенчатые. В одноступенчатом адсорбере (рис. 22.1) в корпусе 3 имеется распределительная решетка 1, через которую снизу подается газ, приводящий слой 2 мелкозернистого адсорбента в состояние «кипения». Адсорбент загружается в аппарат сверху и удаляется через трубу 4.



Проведение адсорбции в «кипящем» (псевдооживленном) слое адсорбента характеризуется малым гидравлическим сопротивлением. Скорость газового потока может достигать больших значений. Сочетание высокой скорости газа и развитой поверхности контакта фаз значительно интенсифицирует процесс адсорбции. Кроме того, при интенсивном перемешивании частиц в «кипящем» слое в нем быстро выравнивается температура, что предотвращает перегрев адсорбента.

Однако интенсивное перемешивание приводит к сильному истиранию твердых частиц адсорбента, в связи с чем для проведения процесса необходимо применять адсорбенты, обладающие достаточной механической прочностью.

Контрольные вопросы

1. Что называется процессом адсорбции и для каких целей он применяется?
2. Что называется процессом десорбции?
3. Какие адсорбенты применяют в химической промышленности? Какие требования предъявляют к ним?
4. Как устроен адсорбер с неподвижным слоем адсорбента?
5. Каковы особенности устройства адсорбера с псевдооживленным слоем адсорбента?

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

23.1. Общие сведения. Способы кристаллизации

Кристаллизация представляет собой процесс выделения твердого растворенного вещества из раствора (кристаллизация из раствора) или твердой фазы при затвердевании веществ, находящихся в расплавленном состоянии (кристаллизация из расплава).

Кристаллизация применяется для получения веществ в чистом виде. Процесс кристаллизации может быть осуществлен следующими способами: путем охлаждения растворов, удаления из них части растворителя, высаливания и с помощью химической реакции. В промышленности наиболее часто осуществляют первые два способа.

Процесс кристаллизации из растворов включает в себя следующие стадии:

- собственно кристаллизация;
- отделение кристаллов от маточного раствора;
- промывка и сушка кристаллов.

В основе процесса кристаллизации лежит ограниченная способность вещества растворяться в различных жидкостях, называемых растворителями. Наиболее распространенным растворителем для неорганических веществ является вода. Для растворения органических веществ используют углеводороды, спирты, эфиры и другие органические соединения. Растворы, содержащие максимальное количество растворенного вещества в определенном количестве растворителя при данной температуре, называют *насыщенными*. Если раствор содержит большее количество растворенного вещества, то он является *пересыщенным*. Такие растворы неустойчивы, из них выделяется избыток растворенного вещества — происходит процесс кристаллизации. После выделения кристаллов раствор становится вновь насыщенным и называется *маточным раствором*.

Скорость процесса кристаллизации зависит от температуры раствора, степени его пересыщения, скорости образования зародышей кристаллов, интенсивности перемешивания и других факторов.

Первая стадия процесса кристаллизации — образование *зародышей*, или *центров кристаллизации*. Они самопроизвольно формируются в пересыщенных или переохлажденных растворах. Скорость их образования можно увеличить посредством повышения температуры и интенсивности перемешивания, путем встряхивания или введения примесей. Вторая стадия процесса — рост кристаллов из зародышей.

В промышленности применяют различные способы создания пересыщенных растворов:

- кристаллизацию с охлаждением при постоянном содержании растворителя в растворе;
- кристаллизацию с удалением части растворителя посредством испарения или вымораживания;
- комбинированные способы кристаллизации (вакуум-кристаллизация, кристаллизация с испарением части растворителя в потоке носителя (обычно воздуха) и др.).

23.2. Конструкции кристаллизаторов

В зависимости от способа кристаллизации применяют следующие конструкции кристаллизаторов:

- с охлаждением раствора;
- с удалением части растворителя;
- с псевдооживленным слоем;
- вакуум-кристаллизаторы без охлаждающих устройств.

Кристаллизатор с мешалкой. В кристаллизаторе с мешалкой охлаждение раствора осуществляется с помощью охлаждающего агента (вода или рассол), подаваемого в теплообменник типа «рубашка». В результате охлаждения раствор в аппарате становится пересыщенным, и начинается процесс кристаллизации. Благодаря вращению мешалки выпадающие кристаллы не осаждаются на дно, а остаются в растворе во взвешенном состоянии. Для предотвращения образования кристаллов на стенках аппарата, что привело бы к снижению интенсивности теплопередачи, лопасти мешалки снабжают скребками или металлическими щетками.

Такие кристаллизаторы могут работать в периодическом или непрерывном режиме. Для обеспечения непрерывного режима устанавливают последовательно несколько аппаратов, причем раствор перетекает из одного кристаллизатора в другой. Благодаря простоте конструкции эти кристаллизаторы получили широкое распространение.

Кристаллизаторы данного типа иногда изготавливают с теплообменными устройствами — змеевиками, устанавливаемыми внутри аппарата.

Кристаллизатор с выносным холодильником. Такой аппарат (рис. 23.1) включает в себя емкость 5 и трубчатый холодильник 1. Раствор поступает по патрубку 3, а затем при помощи циркуляционного насоса 7 по циркуляционной трубе 6 направляется в холодильник (в межтрубном пространстве движется вода) и возвращается в емкость по трубе 2. В холодильнике происходит пересыщение раствора. Образующиеся кристаллы циркулируют с раствором до тех пор, пока скорость их осаждения не превысит скорость

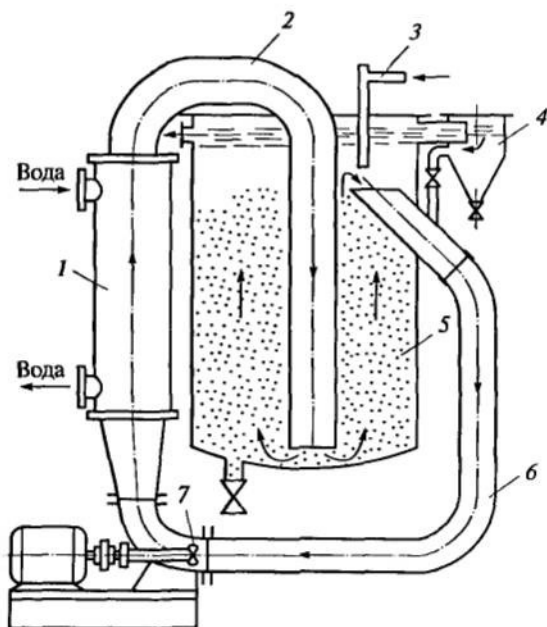


Рис. 23.1. Кристаллизатор с выносным холодильником:

1 — трубчатый холодильник; 2 — труба; 3 — патрубок для подачи сырья; 4 — ловушка; 5 — емкость; 6 — циркуляционная труба; 7 — насос

движения раствора, после чего они осаждаются на дно емкости. Таким образом, в этой емкости происходит классификация кристаллов по крупности. Размеры кристаллов регулируют путем изменения скорости циркуляции раствора и отвода тепла в холодильнике. Маточный раствор удаляется через ловушку 4, в которой отделяются мелкие кристаллы.

Кристаллизатор с внутренним охлаждением. Аппарат состоит из вращающегося полого барабана, нижней частью погруженного в открытую емкость. В барабан подается охлаждающая вода. Исходный продукт поступает в емкость и кристаллизуется тонким слоем на наружной поверхности барабана. Кристаллы снимают с барабана ножом.

Вакуум-кристаллизатор. В аппаратах этого типа одновременно происходит удаление части растворителя (путем испарения в вакууме) и охлаждение раствора. Температура раствора снижается до тех пор, пока не станет равна температуре насыщенного пара при давлении, установившемся в аппарате.

Простейший вакуум-кристаллизатор периодического действия представляет собой герметичный сосуд с мешалкой, в который

заливают раствор, после чего в аппарате создают вакуум. По окончании охлаждения открывают воздушник, и в сосуде устанавливается атмосферное давление. Затем маточный раствор вместе с кристаллами удаляют через нижний патрубок. Для создания вакуума обычно применяют пароструйные эжекторы, выводящие из аппарата пары растворителя. В смеси с рабочим паром эжектора они направляются в конденсатор.

На рис. 23.2 показан вакуум-кристаллизатор непрерывного действия. Испарение растворителя происходит в испарителе 4, из которого раствор по барометрической трубе 5 поступает в сборник 6, где выпадают кристаллы, а раствор по циркуляционной трубе 3 с помощью насоса 1 возвращается в испаритель.

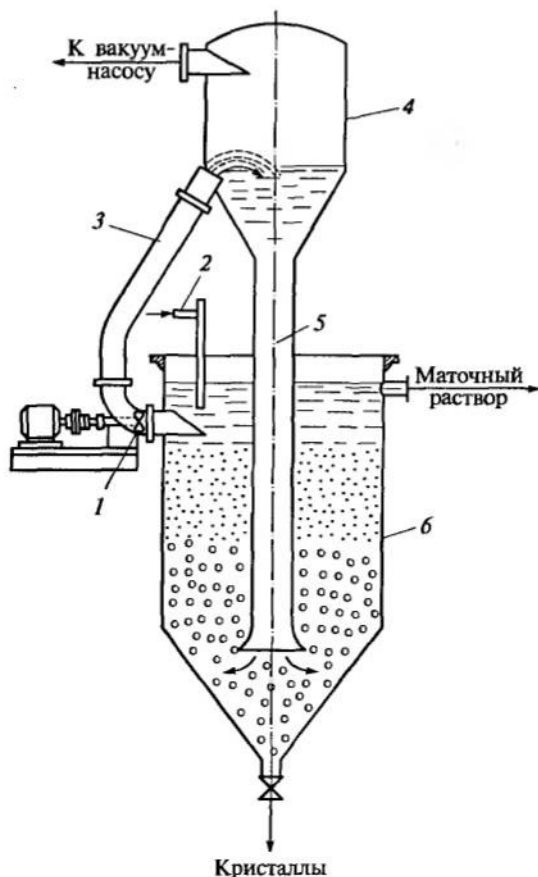


Рис. 23.2. Вакуум-кристаллизатор непрерывного действия:

1 — насос; 2 — патрубок для подачи сырья; 3 — циркуляционная труба; 4 — испаритель; 5 — барометрическая труба; 6 — сборник

При непрерывном режиме работы обычно применяют многокорпусные вакуум-кристаллизаторы, состоящие из нескольких последовательно соединенных аппаратов, расположенных по ходу движения жидкости. В первых корпусах испарение происходит при меньшем вакууме, а максимальный вакуум достигается в последнем корпусе. При этом абсолютное давление и температура раствора в аппарате постепенно уменьшаются от первого корпуса к последнему. Перемещение раствора из корпуса в корпус происходит самотеком за счет разности давлений.

Контрольные вопросы

1. Что называется процессом кристаллизации и с какой целью этот процесс проводят в промышленности?
2. От каких факторов зависит скорость кристаллизации?
3. Перечислите известные вам способы проведения процесса кристаллизации.
4. Опишите устройство и принцип действия кристаллизаторов с охлаждением раствора.
5. Каковы особенности устройства и принцип действия вакуум-кристаллизаторов?

РАЗДЕЛ VI
ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 24
ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

24.1. Классификация процессов по типу химических реакций

В перечне основных процессов химического производства химические процессы занимают особое место и являются их важной составной частью. В основе химического процесса лежит химическая реакция.

Что же такое химическая реакция? Если при определенных условиях взаимодействующие вещества изменились и создали новое химическое соединение, причем это превращение было связано с перегруппировкой или перераспределением атомов и образованием новых молекул, то произошла химическая реакция.

Все химические реакции можно классифицировать по нескольким признакам. По *механизму химического превращения* различают реакции простые и сложные. Для *простых необратимых реакций* характерно однократное преодоление энергетического барьера. Эти реакции не осложнены получением побочных продуктов. В ходе *простой обратимой реакции* продукты могут снова превратиться в исходные вещества. Такой переход может осуществляться до тех пор, пока не установится динамическое равновесие, которое достигается при определенных значениях параметров процесса (температура, давление). Сместить равновесие в сторону получения продукта можно, воздействуя на внешние условия: температуру, давление и концентрацию вещества.

Сложные реакции представляют собой совокупность нескольких простых. Различают последовательные, параллельные и последовательно-параллельные реакции. Они часто сопровождаются получением промежуточных продуктов, которые, вступая во взаимодействие с другими компонентами, образуют продукт.

По *термическим условиям* реакции подразделяются на экзотермические, эндотермические и сменно-циклические. *Экзотермические* реакции протекают с выделением теплоты, что приводит к повышению температуры реакционного объема. При осуществлении таких реакций следует соблюдать заданный температурный режим (например, обеспечивать интенсивный отвод теплоты от системы). Примером экзотермической реакции является окисление диоксида серы. *Эндотермические* реакции сопровожда-

ются поглощением теплоты и снижением температуры реакционного объема. Такая реакция протекает при крекинге нефтепродуктов.

Химический процесс представляет собой одну или несколько химических реакций, которые часто сопровождаются тепло- и массообменными явлениями. Для каждого химического превращения требуется свой *технологический режим* — совокупность значений параметров (давление, температура, состав смеси и др.), при которых необходимо его осуществлять.

Аппараты, в которых проводят химические реакции, называют *химическими реакторами*. Их конструкции включают в себя известные элементы, используемые для выполнения технологических операций (мешалки, теплообменные элементы и др.). Сочетание таких элементов позволяет осуществить в реакторе химическое превращение компонентов.

К конструкциям реакторов предъявляется ряд требований. Реактор должен быть изготовлен из материалов, способных противостоять агрессивной химической среде; в реакторе требуется организовать эффективный подвод (отвод) теплоты и интенсивное протекание массообменных процессов. Кроме того, необходимо, чтобы реактор был герметичным и исключалась возможность попадания агрессивных химических веществ в окружающую среду.

Для того чтобы правильно выбрать конструкцию химического реактора и составить технологическую схему химического производства, необходимо изучить механизм химической реакции и выявить факторы, влияющие на максимальную скорость ее проведения.

По *фазовому состоянию*, в котором находятся реагирующие вещества, химические реакции разделяют на гомогенные и гетерогенные.

Гомогенные реакции протекают только в однофазной системе (газ—газ или жидкость—жидкость). Реакции в системе газ—газ характеризуются высокой скоростью и проходят при высокой температуре (например, процесс горения горючего газа).

Особенностью *гетерогенных реакций* является их протекание на границе раздела фаз. Такие реакции могут проходить только в неоднородных системах газ—жидкость (реакции окисления растворов кислородом воздуха) и газ—твердое тело (полимеризация в суспензиях), а также между двумя несмешивающимися жидкостями (полимеризация в эмульсиях).

По *участию в реакции веществ, способных влиять на скорость ее протекания*, реакции подразделяют на *некаталитические* и *каталитические*.

Присутствие катализатора позволяет увеличить скорость реакции, изменить рабочие параметры процесса (температура, давление). В химической технологии можно встретить также реакции, протекающие в присутствии замедлителей (ингибиторов). Иногда

один из продуктов, образующийся в ходе химического превращения, становится катализатором. В этом случае процесс называется *автокаталитическим*.

24.2. Основные понятия химической кинетики

Химическая кинетика изучает вопросы скорости химических превращений. Одни реакции протекают мгновенно, тогда как другие могут длиться часы и годы. Важно уметь влиять на скорость реакции. Увеличить скорость химической реакции можно, например, повысив температуру проведения процесса. От скорости реакции зависит выбор размера реактора и его производительность.

Для *гомогенной среды* скоростью химической реакции W_p называют количество вещества, израсходованного или получаемого в ходе реакции в единице объема за единицу времени. В этом случае скорость реакции пропорциональна изменению концентрации C вещества, вступившего в реакцию или образующегося при реакции за единицу времени:

$$W_p = dC/dt.$$

Для *гетерогенной среды* скоростью химической реакции называют количество вещества, израсходованного или получаемого в ходе реакции при единичной площади поверхности раздела фаз за единицу времени. Скорость химической реакции зависит от природы реагирующих веществ, их концентрации, температуры и присутствия катализатора.

В химической кинетике часто используют формализованное описание химической реакции. Уравнение реакции записывают в виде стехиометрического уравнения, которое может выглядеть, например, следующим образом:



где a, b, c — стехиометрические коэффициенты соответствующих веществ.

Константа скорости реакции k зависит от природы реагирующих веществ, температуры и присутствия катализатора и определяется по уравнению Аррениуса

$$k = k_0 \exp(-E/RT), \quad (24.2)$$

где k_0 — коэффициент; E — энергия активации, Дж/кмоль; R — универсальная газовая постоянная, $R = 8310$ Дж/(кмоль · К); T — температура, К.

Скорость реакции определяется числом соударений реагирующих веществ, которое, в свою очередь, зависит от концентрации реагирующих веществ. Для реакции, протекающей в соответствии

с уравнением (24.1), скорость по веществу A определяется с помощью уравнения

$$W_{pA} = kC_A^{n_A}C_B^{n_B},$$

где n_A, n_B — показатели, называемые *порядком реакции* и равные стехиометрическим коэффициентам a и b в уравнении (24.1). Например, для реакции окисления оксида азота



уравнение для скорости реакции имеет вид

$$W_{pA} = kC_A^2C_B.$$

Мерой глубины химической реакции является *степень превращения вещества* x_A , которая показывает долю исходных веществ, прореагировавших в данной реакции. В случае если в реакции участвует не один, а несколько реагентов, степень превращения определяют по каждому реагенту.

Другой важной характеристикой эффективности проведения процесса является *выход продукта* — отношение реально полученного количества продукта к теоретически возможному.

Поскольку в ходе проведения химической реакции кроме целевого продукта часто образуются и побочные продукты, в химической технологии используют такую характеристику процесса, как *селективность* — отношение количества исходного вещества, израсходованного на получение необходимого продукта, к общему количеству исходного вещества, вступившего в химическое взаимодействие.

Степень превращения вещества, выход продукта и селективность являются безразмерными характеристиками эффективности химических реакций и изменяются в интервале от нуля до единицы.

Для того чтобы подойти к вопросу конструирования и выбора химического реактора, необходимо уметь правильно составлять уравнения материального и теплового балансов.

Порядок составления таких уравнений рассмотрен в гл. 1. Здесь отметим, что для определения количества теплоты, образующейся в результате проведения химической реакции, можно воспользоваться уравнением

$$Q_p = G_c q_p x_A,$$

где G_c — массовый расход вещества, участвующего в химической реакции; q_p — тепловой эффект реакции, значение которого зависит от конкретной реакции и находится из справочной литературы; x_A — степень превращения вещества A .

Для поддержания скорости реакции на высоком уровне необходимо грамотно управлять химическим процессом. Выбор способа управления зависит от типа реакции.

Различают следующие способы управления процессом: управление временем его проведения, концентрациями реагирующих веществ, температурным режимом процесса; создание развитой межфазной поверхности; поддержание требуемой активности катализатора (для каталитических реакций).

Управлять *временем проведения процесса* можно, осуществляя его в периодическом, непрерывном, полупериодическом и сменно-циклическом режимах.

Управление *концентрациями реагирующих веществ* достигается несколькими путями: рециркуляцией непревращенного сырья (подачей его на вход реактора), подводом сырья в разные точки реакционного объема и секционированием рабочего объема реактора.

Управлять *температурным режимом* можно путем проведения химического процесса в адиабатическом, изотермическом или политропическом режиме.

При осуществлении гетерогенных процессов важно *создание развитой межфазной поверхности*. Для реакций в системе газ—жидкость это может быть достигнуто путем интенсивного диспергирования газа в жидкости.

При проведении каталитических реакций необходимо *поддержание активности катализатора на высоком уровне*, что достигается его циркуляцией или регенерацией, а если этого недостаточно, то полной или частичной заменой.

Контрольные вопросы

1. Что изучает химическая кинетика? Что представляет собой химическая реакция? Какие бывают реакции?
2. От каких факторов зависит скорость химической реакции?
3. Какие требования предъявляют к конструкциям химических реакторов?
4. Приведите определения таких понятий, как степень превращения вещества, выход продукта и селективность.
5. Каким образом можно управлять химическим процессом в реакторе?

Глава 25

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

25.1. Классификация химических реакторов

Многообразные химические реакторы классифицируют по ряду признаков.

По *принципу действия* различают реакторы периодического, полупериодического и непрерывного действия. Особенности проведения процессов в таких реакторах рассмотрены в гл. 1.

По *тепловому режиму* проведения реакции различают реакторы адиабатического и изотермического действия, а также реакторы с промежуточным (политропическим) тепловым режимом.

В реакторах *адиабатического действия* отсутствует теплообмен с окружающей средой. Вся теплота, выделяемая (или поглощаемая) в результате химической реакции, уходит из реактора с продуктом. Реакторы адиабатического действия отличаются простотой конструкции и большой удельной мощностью. Их корпус снабжен значительным теплоизоляционным слоем, уменьшающим потери теплоты в окружающую среду.

Для реакторов *изотермического действия* характерно постоянство температуры в реакционном объеме. Это обеспечивается интенсивным теплообменом с окружающей средой и конструктивно достигается наличием в аппарате теплообменных устройств (рубашка, теплообменные трубы и пр.).

В реакторах с *промежуточным (политропическим) тепловым режимом* происходит частичный теплообмен с окружающей средой, причем часть теплоты выводится из аппарата с продуктом реакции.

По *организации процесса перемешивания* различают реакторы вытеснения и реакторы смешения.

В *реакторах вытеснения* химическое взаимодействие осуществляется при движении реагентов в трубах. В трубчатых реакторах перемешивание и взаимодействие компонентов происходят за счет турбулентных пульсаций и неравномерности профиля скорости потока по сечению реактора. Чем выше скорость потока реагентов, тем больше турбулентность и эффективнее перемешивание.

Идеальная структура потока характеризуется поршневым течением реагентов, т. е. режимом идеального вытеснения. Такой режим наиболее эффективен. Для обеспечения необходимого времени реакции в этом случае используют циркуляционный контур, при наличии которого часть потока, выходящего из реактора, возвращается на вход. На практике приблизиться к режиму идеального вытеснения позволяет применение труб малого диаметра и большой длины. Снаружи эти реакторы могут быть снабжены теплообменными устройствами в виде рубашки.

Достоинствами таких реакторов являются высокая интенсивность смешения и возможность эффективного теплообмена. К недостаткам можно отнести трудности, возникающие при необходимости дополнительного ввода химических компонентов в процессе реакции. Указанные реакторы применяют для проведения гомогенных и гетерогенных реакций, например синтеза аммиака и метилового спирта, хлорирования этилена и др.

В *реакторах смешения* перемешивание реагентов осуществляется одним из известных способов: механическим, пульсационным, пневматическим перемешиванием газом или циркуляци-

онным перемешиванием жидкости (см. гл. 11). Чем выше интенсивность процесса перемешивания, тем ближе он к режиму идеального смешения, когда в любой точке реакционного объема все параметры процесса постоянны вследствие мгновенного перемешивания реагирующих веществ. В таком идеализированном реакторе отсутствуют застойные зоны и зоны циркуляции.

В реальных реакторах смешения вследствие несовершенства конструкции смесителя и самого реактора возможно образование застойных зон (например, в придонной области или у стенок реактора). Для предотвращения этого явления реактор снабжают вертикальными перегородками, а днищу придают сферическую или эллиптическую форму. В реакторах такого типа проводят смешение, полимеризацию и другие процессы.

По числу фаз, участвующих в реакции, различают реакторы для проведения гомогенных и гетерогенных реакций.

По конструктивным особенностям различают емкостные и колонные реакторы, а также реакторы теплообменного типа.

В емкостных реакторах химическая реакция проводится в рабочем объеме — емкости, куда через специальный штуцер загружают сырье, а через сливной штуцер осуществляют выгрузку продукта (см. рис. 2.2). В емкостных реакторах проводятся гомогенные реакции в жидкой фазе. Более подробно о реакторах емкостного типа изложено в гл. 11.

На производстве емкостные реакторы работают в непрерывном режиме и часто устанавливаются последовательно. Такое размещение называют каскадом реакторов смешения. В каскаде значительно активизируется перемешивание за счет уменьшения реакционного объема, снижения отрицательного влияния застойных зон и зон циркуляции. В конечном итоге это приводит к достижению более высоких значений степени превращения и выхода исходных компонентов реакции.

В колонном реакторе основным требованием к конструкции является интенсивное взаимодействие реагентов на всех ступенях контакта. Такое взаимодействие может быть достигнуто созданием развитой поверхности контакта фаз путем установления контактных устройств в виде тарелок (тарельчатые колонны), слоев насадки (насадочные колонны), распыливанием жидкой фазы (распылительные колонны) или диспергированием газовой фазы в слое жидкости (барботажные колонны). Тот или иной способ создания развитой поверхности контакта фаз выбирается в зависимости от типа реакции, физических свойств реагирующих веществ и практического опыта. Более подробно особенности конструкций колонных аппаратов рассмотрены в гл. 17.

В барботажных колоннах химическая реакция протекает в жидкой фазе, в которую из газа за счет процесса абсорбции переносится реагирующее вещество. Барботажная колонна (рис. 25.1)

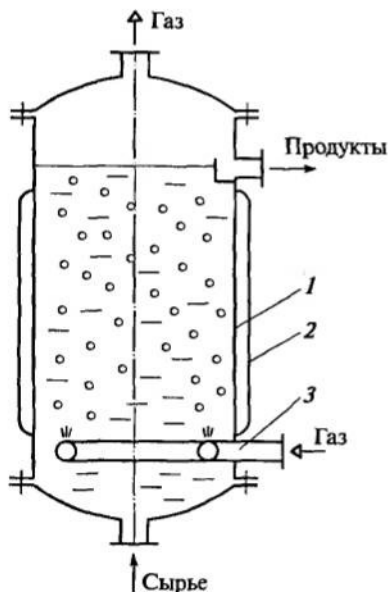


Рис. 25.1. Барботажная колонна:

1 — корпус; 2 — теплообменник типа «рубашка»; 3 — газораспределительное устройство

состоит из вертикального корпуса 1 с размещенным в нижней части газораспределительным устройством 3 — барботером. Газовая фаза проходит через отверстия барботера, диспергируется в виде мелких пузырьков, которые всплывают к поверхности. Колонна может быть снабжена теплообменником 2 типа «рубашка». Реактор такой конструкции применяется для проведения реакций в гомо- или гетерогенной среде с малым тепловым эффектом.

Реакторы теплообменного типа часто используют в химических

процессах для проведения реакций при высокой температуре. Среди многообразия реакторов-печей можно выделить трубчатые печи и реакторы окислительного пиролиза.

Описание конструкции трубчатой печи и принципа ее действия приведено в гл. 13.

В реакторах окислительного пиролиза (рис. 25.2) процесс горения происходит в присутствии кислорода, что обеспечивает температуру 1400...1600 °С. Сырье смешивается с воздухом и поступает в камеру горения, куда через форсунку подается топливо. Сырье воспламеняется, но полностью не сгорает. В реакционной трубе происходит его разложение, вследствие подачи воды через форсунки температура снижается, и процесс прекращается. В реакторах подобного типа получают сажу — продукт, широко применяемый

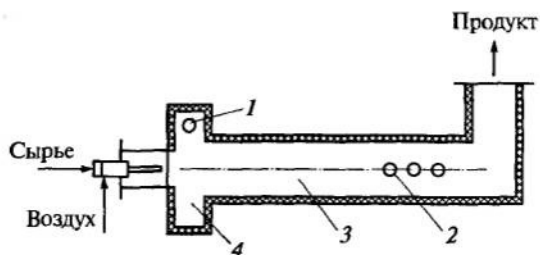


Рис. 25.2. Реактор окислительного пиролиза:

1 — форсунка для топлива и воздуха; 2 — форсунка для воды; 3 — реакционная труба; 4 — камера горения

в разных отраслях промышленности (резиновая, лакокрасочная, полиграфическая и др.).

25.2. Контактно-каталитические процессы

Если химическая реакция протекает слишком медленно или для ее осуществления требуются чрезмерно большие энергетические затраты, то ее проводят (если это возможно) в присутствии *катализатора* — специального вещества, ускоряющего химический процесс.

Каталитические процессы широко применяются в органическом синтезе. Большинство процессов переработки нефти невозможны сегодня без применения катализаторов.

Катализаторы — это вещества, которые изменяют скорость химической реакции, но при этом не меняют свой химический состав. Катализаторы способны изменить порядок реакции, снизить значение энергии активации и коэффициент k_0 в уравнении (24.2). Для каждой реакции требуется свой катализатор.

Химические процессы, проходящие в присутствии катализатора, подразделяют на гомогенные и гетерогенные. Наиболее широко распространены в промышленности гетерогенно-каталитические процессы, в которых одной средой является газ (пар) или жидкость, а другой — твердый катализатор. Именно поверхность катализатора служит границей раздела фаз.

К катализаторам предъявляют определенные требования, среди которых главными являются:

- *активность катализатора*, под которой понимают его способность содействовать ускорению химической реакции;
- *температура зажигания* — минимальная температура, при которой обеспечивается достаточная для технологических целей скорость химической реакции;
- *селективность катализатора* — его способность избирательно ускорять определенную реакцию. Эта важная характеристика катализатора позволяет получать максимальную степень превращения вещества той реакции, в результате которой образуется продукт;
- *структура катализатора*, характеризующая наличие у него развитой поверхности, с которой непосредственно контактирует реагент. Катализаторы делят на пористые и непористые. Наиболее развитой поверхностью обладают пористые катализаторы. Площадь их поверхности контакта в тысячи раз превышает площадь поверхности непористого зерна катализатора. Однако в ряде случаев нет необходимости создавать пористую поверхность: реакция происходит в диффузионной области и ее скорость определяется не площадью поверхности пор, а турбулентностью среды и скоростью доставки вещества к поверхности зерна;

- *долговечность работы катализатора*, зависящая от его способности сохранять высокий уровень активности. К сожалению, в ряде химических процессов происходит отравление или коксование поверхности катализатора, что снижает его активность. Катализатор нуждается в восстановлении;

- *регенерация катализатора* — возможность в условиях производства восстановить его активность. На практике это достигается специальными технологическими операциями, которые, однако, требуют остановки производства.

Химический процесс, протекающий в присутствии катализатора, называют *катализом*. Особую роль играет избирательный катализ, который состоит в том, что катализатор ускоряет только одну реакцию, подавляя остальные. Например, из этилового спирта путем избирательного действия катализатора можно получить ацетальдегид, этилен или дивинил.

В ходе контактно-каталитической реакции может происходить значительное выделение или поглощение теплоты. Неравномерность укладки катализатора по сечению и высоте реактора приводит к появлению зон локального перегрева катализатора, образованию продуктов горения на его поверхности и потере активности. Поэтому вся реакционная аппаратура для таких процессов классифицируется по *способу размещения катализатора в рабочем объеме реактора*. В соответствии с этим они подразделяются на реакторы с неподвижным, движущимся и псевдооживленным слоем катализатора.

Реакторы с неподвижным слоем катализатора. На рис. 25.3 представлен *реактор шахтного типа*. В таких реакторах возможны два способа движения реагента. Реакторы с аксиальным движением (рис. 25.3, а) применяют для проведения процессов с небольшим тепловым эффектом. Катализатор может быть засыпан сплошным слоем на опорную плиту или на слой инертной насадки, что позволяет использовать опорные плиты с малым гидравлическим сопротивлением. В этих реакторах снизить температуру сырья можно, разбавляя исходное сырье инертным газом или используя в качестве разбавителя керамические гранулы, смешанные с катализатором.

Основной недостаток такой конструкции — неравномерность профиля скорости движения реагента по сечению реактора вследствие неравномерной укладки катализатора. Это приводит к отложению кокса на поверхности зерен катализатора и необходимости его регенерации или замены; реактор же вынужден работать в периодическом режиме.

Разновидностью реакторов шахтного типа является реактор с радиальным движением реагента (рис. 25.3, б). В этом случае катализатор засыпается в пространство кольцевого сечения, образованного двумя перфорированными цилиндрическими стаканами.

Рис. 25.3. Реакторы с неподвижным слоем катализатора при аксиальном (а) и радиальном (б) движении реагента

Такая конструкция значительно улучшает гидродинамическую обстановку в зоне реакции.

В реакторах с размещением катализатора на полках (рис. 25.4) обеспечены условия для более эффективного отвода или подвода теплоты. Температурный режим процесса регулируется подогревом или охлаждением реагентов в пространстве между полками.

Добиться равномерного температурного режима можно путем размещения на полках разного количества катализатора. Характерным недостатком таких конструкций, как и всех реакторов с неподвижным слоем катализатора, является периодичность их работы и высокие значения сопротивления движению потока газа.

В химических реакторах трубчатого типа достигается эффективный теплообмен при размещении катализатора в межтрубном (рис. 25.5, а) или трубном (рис. 25.5, б) пространстве. Конструктивно такие аппараты напоминают кожухотрубчатый теплообменник. Теплоноситель подается через разделяющую поверхность. Производительность таких реакторов меньше, чем у реакторов шахтного типа, однако в этих реакторах значительно уменьшается возможность образования кокса на поверхности катализатора.

Реакторы с движущимся слоем катализатора. Для организации процесса в непрерывном режиме, уменьшения отрицательного влияния зон локального перегрева и снижения сопротивления зернистого слоя разработаны конструкции реакторов с движущимся слоем катализатора. Их отличительной особенностью является работа в блоке с регенератором, при этом катализатор постоянно циркулирует между реактором и регенератором, куда по пневмотранспортным трубам поступает закоксованный катализатор.

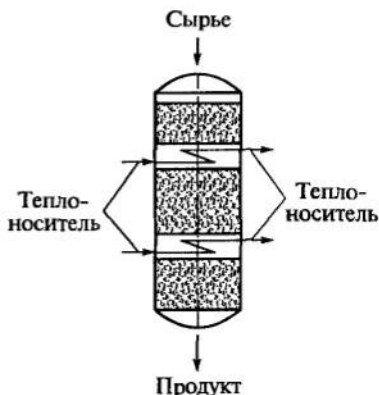
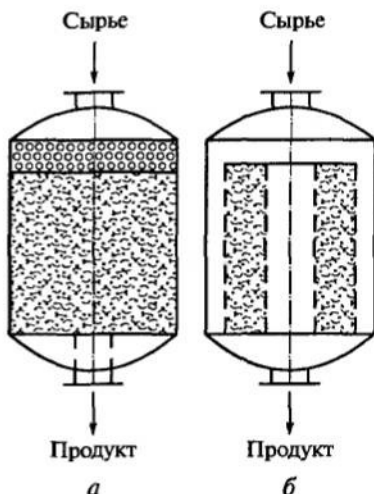


Рис. 25.4. Реактор с размещением катализатора на полках

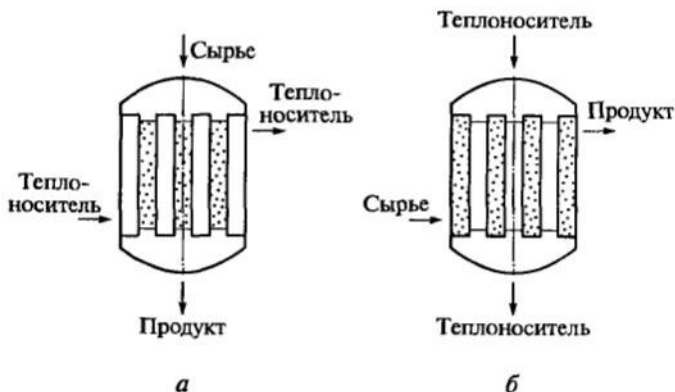
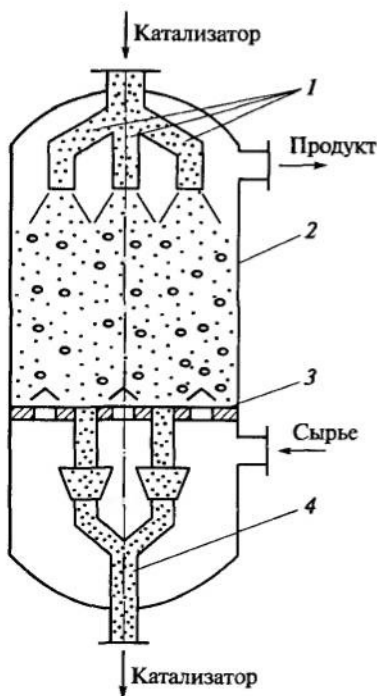


Рис. 25.5. Кожухотрубчатые реакторы с размещением катализатора в межтрубном пространстве (а) и трубах (б)

Регенированный катализатор по пневмотранспортным распределительным трубам 1 (рис. 25.6) направляется в реактор 2. Частицы движутся под действием собственного веса со скоростью 2...8 мм/с. Пары сырья поступают под плиту 3 и в виде пузырьков поднимаются в верхнюю часть реактора. Закоксованный катализатор собирается в сборных трубах 4 и выводится из реактора на регенерацию.



Реакторы с псевдооживленным слоем катализатора. Проведение химических процессов в реакторах с псевдооживленным слоем катализатора обеспечивает равномерное распределение температуры по сечению и высоте слоя, малое гидравлическое сопротивление и возможность их работы в непрерывном режиме. В таких процессах используется мелкодисперсный катализатор с развитой поверхностью контакта фаз. Особенности гидродинамического режима подробно рассмотрены в гл. 11.

Рис. 25.6. Реактор с движущимся слоем катализатора:

1 — распределительные трубы; 2 — реактор; 3 — плита; 4 — сборные трубы

25.3. Способы герметизации реакторов

Проведение химического процесса требует соблюдения правил безопасной эксплуатации оборудования. В инженерной практике использования химических реакторов встречаются технические оболочки, изготовленные в виде одной детали (отливки, поковки). Другие оболочки представляют собой сварные конструкции, что обеспечивает высокую степень их герметичности. Однако часто узлы реакторов соединяются друг с другом при помощи разъемных соединений, что обусловлено требованиями изготовления, монтажа и эксплуатации реактора. Наиболее распространенным видом разъемного соединения является *фланцевое соединение*. Необходимо, чтобы оно было герметичным, прочным и дешевым, быстро разбиралось и собиралось.

По способу соединения с обечайкой фланцевые соединения разделяют на фланцы, выполненные совместно с обечайкой (рис. 25.7, *а*), применяемые для литой, стальной кованой или чугуновой аппаратуры; плоские приварные фланцы (рис. 25.7, *б*) — для стальной сварной аппаратуры; приварные с шейкой (рис. 25.7, *в*) — для ответственной аппаратуры, выполненной из обычных и углеродистых сталей; свободные на отбор-

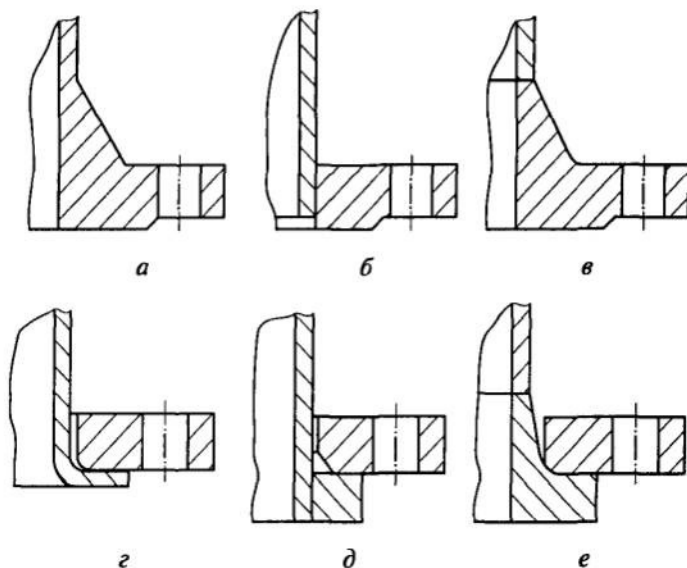


Рис. 25.7. Типы фланцевых соединений при различных видах соединений с обечайкой:

а — литое и кованое; *б* — плоское приварное; *в* — приварное с шейкой; *г* — свободное на отбортовке; *д* — свободное на бортовом кольце; *е* — свободное на приварном бурте

товке (рис. 25.7, *з*) — для изготовления аппаратуры из мягких цветных металлов; свободные на бортовом кольце (рис. 25.7, *д*) и приварном бурте (рис. 25.7, *е*) — для ответственных видов работы реакторов при высоком давлении.

По *форме уплотнительной поверхности* различают фланцы с плоской уплотнительной поверхностью (рис. 25.8, *а*) или плоской с рисками (рис. 25.8, *б*), при этом рабочее давление в реакторе не должно превышать 2,5 МПа. Фланцы с выступом-впадиной (рис. 25.8, *в*) используют при давлениях до 20 МПа. Такая конструкция облегчает центрирование прокладки и уменьшает вероятность ее пробоя. Фланец с соединительной поверхностью типа «шип—паз» (рис. 25.8, *г*) обладают наибольшей надежностью для работы в химической промышленности при давлении до 10 МПа. В нефтяной промышленности хорошо зарекомендовали себя соединения с уплотнением в виде овального шлифовально-

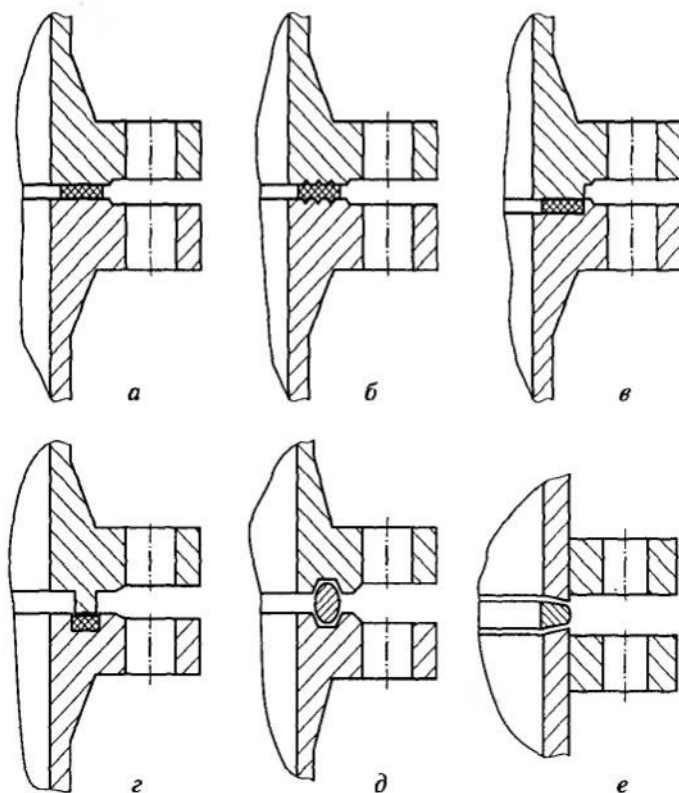


Рис. 25.8. Типы фланцевых соединений при различной форме уплотнительной поверхности:

а — плоская; *б* — плоская с рисками; *в* — с выступом-впадиной; *г* — типа «шип—паз»; *д* — под шлифованное кольцо; *е* — под линзу

го кольца, применяемые при давлении до 20 МПа (рис. 25.8, *д*), и с линзовым уплотнением (рис. 25.8, *е*) — до 100 МПа.

Прокладки, используемые во фланцевых соединениях, должны обеспечивать герметичность, быть долговечными, эластичными и не терять этих характеристик в процессе эксплуатации. Форма прокладок различна в зависимости от вида соединительной поверхности фланца.

Если среда в реакторе инертная, давление не превышает 0,4 МПа, а температура — 120 °С, то в качестве материала можно использовать пенку и пропитанный картон. Для воды и пара при температуре до 450 °С и давлении, не превышающем 5 МПа, применяют паронит. Обычные сорта резины пригодны при температуре до 100 °С, а специальные — до 200 °С.

Распространенным материалом в химической промышленности является асбестовый картон, который противостоит воздействию температуры до 500 °С и давления до 2,5 МПа. Для аппаратуры и трубопроводов высокого давления используются металлические прокладки. В последнее время широко применяются прокладки из полимерных материалов — фторопласта и полиэтилена.

25.4. Защитные покрытия и тепловая изоляция реакторов

Существует несколько способов защиты внутренней поверхности корпуса реактора от воздействия химически агрессивной среды. Наиболее распространенным можно считать нанесение на внутреннюю поверхность корпуса защитного слоя.

Эмалирование. Для защиты корпуса реакторов используют эмалирование — покрытие слоем эмали, которая устойчива к воздействию различных кислот и растворов минеральных солей. Эмаль получают сплавлением кварцевого песка и других материалов с плавнями (бура, поташ, селитра). Эмаль плохо выдерживает механические нагрузки, удары и резкие колебания температуры. В слое эмали образуются трещины, куда проникает агрессивная среда, защитный слой быстро разрушается и корпус корродирует.

Гуммирование. Процесс обкладки внутренней поверхности реактора сырой резиной с последующей вулканизацией называют гуммированием. В состав резины могут входить компоненты на основе дивинилстирольных, дивиниловых и изопреновых каучуков, стойких к воздействию кислот и щелочей. Нанесение резины позволяет гасить возможные вибрации корпусных элементов. Однако эффективным такое покрытие можно считать при температуре, не превышающей 60 °С.

Обкладка полимерными материалами. Листовые материалы, выполненные из полимеров (на основе полиизобутилена, бутилкау-

чука, эбонита и др.) обладают высокой химической стойкостью, слабо подвержены тепловому и кислородному старению, отличаются высокой водостойкостью и газонепроницаемостью.

Защитные пластмассовые покрытия. Пластмассовые покрытия на основе винилпласта, полиэтилена и полипропилена наносят в виде тонких слоев толщиной до 1 мм.

Лакокрасочные покрытия. Такие покрытия способны противостоять воздействию кислот, щелочей, кислых паров и газов при рабочей температуре, не превышающей 200 °С.

Напыление слоя металла. Защищаемая поверхность может быть покрыта тонким слоем металла (например, алюминием или кремнием). Металлические покрытия наносят при высокой температуре. Их используют при наличии в реакционном объеме растворов, содержащих серную кислоту.

Футеровка. Поверхность корпуса, защищенная облицовочным силикатным материалом, способна противостоять химической коррозии реакционной среды. Высокая механическая прочность футеровочного материала позволяет защитить корпус реактора от воздействия твердых частиц катализатора, находящихся в реакторе. В качестве такого материала используют кислотоупорный кирпич, графитовые, фарфоровые или керамические плитки, торкрет-бетон и др. Плитки укладывают на предварительно промазанную поверхность металла.

На практике покрытие часто выполняют из двух слоев — изоляционного и покровного. Изоляционный слой обладает низким коэффициентом теплопроводности, а покровный — высокой теплопроводностью и большой прочностью, благодаря чему он препятствует разрушению изоляционного слоя. Покровный слой может быть выполнен из цементной штукатурки или листового материала (тонколистовая коррозионно-стойкая сталь, листовая алюминий и др.).

Защитить химическое оборудование от коррозии можно с помощью специальных веществ — *ингибиторов (замедлителей) коррозии*. Они вводятся в небольшом количестве (до 1 %) в коррозионную среду и значительно уменьшают скорость коррозии. Однако данный способ снижает чистоту получаемого продукта.

Тепловая изоляция реакторов. Многие химические реакции протекают при температурах, отличающихся от температуры окружающей среды. В этой связи возникает задача снижения тепловых потерь. Кроме этого при эксплуатации реакторов необходимо обеспечить нормальные условия их обслуживания рабочим персоналом. С этой целью поверхность реакторов и трубопроводов покрывают слоем тепловой изоляции.

К материалам, из которых изготавливается тепловая изоляция, предъявляется ряд требований: низкий коэффициент теплопроводности, небольшая плотность, малая гигроскопичность, стойкость

к высокой температуре и ее колебаниям, химическая стойкость, достаточная механическая прочность.

Теплоизоляционные материалы по *природе их происхождения* подразделяют на *минеральные* (на основе асбеста, керамзита, полученные из расплавов шлаков, горных пород и др.) и *органические* (полученные из волокнистого сырья с добавлением органических клеев).

По *предельным температурам применения* теплоизоляционные материалы делят на три класса: *низкотемпературные* (до 150 °С — торфоплиты, строительный войлок и др.); *среднетемпературные* (до 450 °С — асбозурит, стекловата и др.); *высокотемпературные* (выше 450 °С — шлаковата, асботермит, асбест и др.).

Существуют различные способы монтажа тепловой изоляции на поверхности реактора или трубопровода. Порошкообразные мастичные материалы предварительно замешивают с водой до получения однородной пастообразной массы и наносят на каркас, устанавливаемый на корпусе.

Засыпной способ предусматривает засыпку изоляционного материала в каркасный кожух. *Оберточный* способ заключается в обертывании поверхности реактора мастичным материалом.

Мастично-формовочный способ предусматривает укладку изоляционных плит, кирпичей на подмазочный слой мастики.

На практике при проведении высокотемпературных процессов возникает потребность в установке многослойной изоляции. При этом один слой должен выдерживать высокие температуры и иметь невысокие теплоизоляционные характеристики, а второй — обладать хорошими теплоизоляционными свойствами. Для повышения поверхностной прочности отделки изоляционного слоя на него наносят защитный слой асбоцементной штукатурки, в состав которой входят цемент, асбест и диатомит.

Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируют химические реакторы?
2. В чем состоит особенность каталитических процессов? Какие требования предъявляют к катализаторам?
3. Каковы особенности конструкций реакторов для проведения каталитических процессов?
4. Перечислите известные вам типы фланцевых соединений.
5. Какие материалы используют в качестве прокладок во фланцевых соединениях?
6. Назовите способы защиты корпусов реакторов от воздействия химически агрессивной среды.
7. По каким признакам классифицируют теплоизоляционные материалы?
8. Расскажите о способах крепления тепловой изоляции к корпусу реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник / *Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов* и др. — М.: Машиностроение, 1982. — 423 с.
2. *Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. М.* Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. — Л.: Химия, 1984. — 336 с.
3. *Вильнер Я. М., Ковалев Я. Т., Некрасов Б. Б.* Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Под ред. Б. Б. Некрасова. — Минск: Вышэйш. шк., 1976. — 416 с.
4. *Вихман Г. Л., Круглов С. А.* Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов: Учебник. — М.: Машиностроение, 1978. — 328 с.
5. *Домашнев А. Д.* Конструирование и расчет химических аппаратов. — М.: Машгиз, 1961. — 624 с.
6. *Калинушкин М. П.* Вентиляторные установки: Учеб. пособие. — М.: Высш. шк., 1979. — 223 с.
7. *Касаткин А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник. — М.: Химия, 1971. — 784 с.
8. *Кутепов А. М., Бондарева Т. И., Беренгартен М. Г.* Общая химическая технология: Учебник. — М.: Высш. шк., 1990. — 520 с.
9. *Лащинский А. А., Толчинский А. Р.* Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: Справочник. — Л.: Машиностроение, 1970. — 752 с.
10. *Левенциль О.* Инженерное оформление химических процессов: Пер. с англ. — М.: Химия, 1969. — 624 с.
11. *Лекае В. М., Лекае А. В.* Процессы и аппараты химической промышленности: Учебник. — М.: Высш. шк., 1984. — 247 с.
12. *Львов М. В.* Сушка в химической промышленности: Учеб. пособие. — М.: Химия, 1970. — 432 с.
13. *Макс Лева.* Псевдоожидение / Пер. с англ.; Под ред. Н. И. Гельперина. — М.: Гостоптехиздат, 1961. — 400 с.
14. Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи: Учеб. пособие / *И. В. Доманский, В. П. Исаков, Г. М. Островский* и др.; Под общ. ред. В. Н. Соколова. — СПб.: Политехника, 1992. — 327 с.
15. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи: Учеб. пособие. — М.: Энергия, 1977. — 342 с.

16. *Плановский А. Н., Николаев П. И.* Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: Учебник. — М.: Химия, 1987. — 496 с.
17. *Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З.* Процессы и аппараты химической технологии: Учебник. — М.: Химия, 1968. — 847 с.
18. Процессы и аппараты химической промышленности: Учебник для техникумов / П. Г. Романков, М. И. Курочкина, Ю. И. Мозжерин и др. — Л.: Химия, 1989. — 560 с.
19. *Рейхсфельд В. О., Еркова Л. Н.* Оборудование производств основного органического синтеза и синтетических каучуков. — М.: Химия, 1965. — 624 с.
20. *Рейхсфельд В. О., Шеин В. С., Ермаков В. И.* Реакционная аппаратура и машины заводов основного органического синтеза и синтетического каучука: Учеб. пособие. — Л.: Химия, 1985. — 264 с.
21. *Романков П. Г., Курочкина М. И.* Гидромеханические процессы химической технологии. — Л.: Химия, 1982. — 288 с.
22. *Скобло А. И., Трегубова И. А., Молоканов Ю. К.* Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. — М.: Химия, 1982. — 584 с.
23. *Смирнов В. В.* Реакторы в химической промышленности. — Л.: Химия, 1972. — 56 с.
24. Справочник машиностроителя: В 6 т.: Т. 6 / Под ред. Э. А. Сатяля. — М.: Машиностроение, 1964. — 540 с.
25. *Стабников В. П., Баранцев В. И.* Процессы и аппараты пищевых производств. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. — 328 с.
26. Коррозионная стойкость оборудования химических производств: Способы защиты оборудования от коррозии: Справочник / А. М. Сухотин, Е. И. Чекулаева, В. М. Княжева, В. А. Зайцев; Под ред. Б. В. Строкана, А. М. Сухотина. — Л.: Химия, 1987. — 280 с.
27. *Черкасский В. М.* Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник. — М.: Энергия, 1977. — 424 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Глава 1. Общие положения	5
Глава 2. Конструкционные материалы	8
2.1. Требования к конструкционным материалам	8
2.2. Материалы для изготовления аппаратуры	10

РАЗДЕЛ II. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 3. Перемещение твердых материалов	20
Глава 4. Измельчение твердых материалов	25
Глава 5. Классификация, смешивание и дозирование сыпучих материалов	32

РАЗДЕЛ III. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 6. Основы гидравлики	39
6.1. Предмет гидравлики. Физические свойства жидкости	39
6.2. Гидростатика. Основное уравнение гидростатики	40
6.3. Кинематика и динамика жидкости	45
6.4. Движение жидкостей по трубам	50
Глава 7. Перемещение жидкостей	58
7.1. Классификация и параметры работы насосов. Насосная установка	58
7.2. Центробежные насосы	61
7.3. Поршневые насосы	68
7.4. Роторные насосы	72
7.5. Насосы других типов	73
Глава 8. Перемещение, сжатие и разрежение газов	78
8.1. Классификация компрессорных машин. Вентиляторы и газодувки	78
8.2. Компрессоры и водокольцевые вакуум-насосы	83
Глава 9. Разделение неоднородных газовых систем	89
Глава 10. Разделение неоднородных жидких систем	93

Глава 11. Перемешивание в жидкой среде. Псевдооживление зернистого материала	101
11.1. Перемешивание в жидкой среде	101
11.2. Псевдооживление зернистого материала	106

РАЗДЕЛ IV. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 12. Основы теплопереноса	110
12.1. Механизмы переноса теплоты	110
12.2. Процесс теплопередачи	115
Глава 13. Нагревание, охлаждение и конденсация	117
13.1. Топливо-энергетическая база. Теплоносители	117
13.2. Нагревающие агенты и способы нагревания	119
13.3. Охлаждающие агенты и способы охлаждения. Конденсация	126
Глава 14. Теплообменная аппаратура	127
14.1. Классификация и конструкции теплообменников	127
14.2. Конструктивный расчет поверхностного теплообменника	133
Глава 15. Выпаривание	136
15.1. Основные понятия. Способы выпаривания	136
15.2. Конструкции выпарных аппаратов	142
Глава 16. Искусственное охлаждение	145
16.1. Способы получения искусственного холода	145
16.2. Хладагенты	146
16.3. Умеренное охлаждение	147
16.4. Глубокое охлаждение	150

РАЗДЕЛ V. МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Глава 17. Основы массопередачи	152
17.1. Статика массообменных процессов	152
17.2. Кинетика массообменных процессов	154
17.3. Основы расчета массообменных аппаратов	158
Глава 18. Абсорбция	162
18.1. Общие сведения. Равновесие в процессе абсорбции	162
18.2. Материальный баланс абсорбера. Расход абсорбента	164
18.3. Схемы абсорбционных установок	165
Глава 19. Перегонка и ректификация	168
19.1. Общие сведения. Простая перегонка	168
19.2. Ректификация	171
Глава 20. Сушка	176
20.1. Основные сведения. Формы связи влаги с материалом	176
20.2. Основные параметры влажного газа и диаграмма $I-x$	177
20.3. Материальный и тепловой баланс конвективной сушки	179
20.4. Конструкции сушилок	181
Глава 21. Экстракция	189
21.1. Общие сведения о процессе. Треугольная диаграмма	189
21.2. Схемы процесса экстракции. Конструкции экстракционных аппаратов	192

Глава 22. Адсорбция	195
22.1. Общие сведения	195
22.2. Конструкции адсорберов	196
Глава 23. Кристаллизация	198
23.1. Общие сведения. Способы кристаллизации	198
23.2. Конструкции кристаллизаторов	199
РАЗДЕЛ VI. ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	
Глава 24. Основы химической кинетики	203
24.1. Классификация процессов по типу химических реакций	203
24.2. Основные понятия химической кинетики	205
Глава 25. Химические реакторы	207
25.1. Классификация химических реакторов	207
25.2. Контактно-каталитические процессы	211
25.3. Способы герметизации реакторов	215
25.4. Защитные покрытия и тепловая изоляция реакторов	217
Список литературы	220

Учебное издание

**Сугак Александр Викторович,
Леонтьев Валерий Константинович,
Туркин Валентин Витальевич**

Процессы и аппараты химической технологии

Учебное пособие

Редактор *И. П. Гаврилова*
Технический редактор *Н. И. Горбачева*
Компьютерная верстка: *О. В. Пешкетова*
Корректор *Т. Н. Морозова*

Диапозитивы предоставлены издательством

Изд. № А-1148-1. Подписано в печать 16.05.2005. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Таймс». Печать офсетная. Бумага тип. № 2. Усл. печ. л. 14,0.
Тираж 5100 экз. Заказ № 14894.

Издательский центр «Академия».

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.004796.07.04 от 20.07.2004.
117342, Москва, ул. Бултерова, 17-Б, к. 360. Тел./факс: (095) 330-1092, 334-8337.

Отпечатано в ОАО «Саратовский полиграфический комбинат»
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.