

ДЛЯ ВУЗОВ

МАШИНЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

*Допущено Государственным комитетом
по народному образованию в качестве учебника
для студентов вузов, обучающихся по специальности
"Машины и аппараты химических производств
и предприятий строительных материалов"*



Москва
• Машиностроение •
1989

ББК 35.11я73

М38

УДК 66.02/.04 (075.8)

Авторы: И. И. Поникаров, О. А. Перелыгин,
В. Н. Доронин, М. Г. Гайнуллин

Рецензенты д-р техн. наук В. П. Майков,
д-р техн. наук В. Н. Соколов

Машины и аппараты химических производств: Учебник
М38 для вузов по специальности «Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов»/И. И. Поникаров, О. А. Перелыгин, В. Н. Доронин, М. Г. Гайнуллин. — М.: Машиностроение, 1989. — 368 с.: ил.
ISBN 5-217-00347-2

Описаны конструкции, работа, область применения и методы расчета на прочность и устойчивость химических аппаратов и машин, а также рассмотрены монтаж и ремонт химического оборудования, указаны перспективные направления его совершенствования.

М $\frac{2705100000-201}{038 (01)-89}$ 201—89

ББК 35.11я73

ISBN 5-217-00347-2 © Издательство «Машиностроение», 1989

Одно из основных направлений интенсификации народного хозяйства — химизация его отраслей, обеспечивающая снижение материальных затрат в производстве промышленной и сельскохозяйственной продукции. Основные отрасли промышленности, обеспечивающие химизацию народного хозяйства: химическая, нефтехимическая и нефтеперерабатывающая, нефтяная и газовая, целлюлозно-бумажная и микробиологическая; материальной базой развития этих отраслей промышленности является химическое и нефтяное машиностроение.

Основные направления развития химического и нефтяного машиностроения: увеличение единичной мощности оборудования, т. е. увеличение съема продукции с единицы объема; увеличение в 1,3—1,5 раза выпуска оборудования и технологических линий в комплектном и блочно-комплектном исполнении; расширение номенклатуры оборудования; создание и освоение химического оборудования пониженных металло- и энергоемкости; создание и освоение оборудования для новых, наиболее прогрессивных химических процессов (мембранная технология разделения, плазмохимия, сверхвысокочастотный нагрев и др.).

Учебник состоит из шести глав. В гл. 1—4 рассмотрено основное оборудование химических производств (тепло- и массообменное, реакционное, оборудование для разделения неоднородных систем), в гл. 5 — технологические трубопроводы, соединительные детали, компенсаторы, опоры и трубопроводная арматура. В гл. 6 изложены основы монтажных и ремонтных работ на предприятиях химической промышленности и смежных отраслей.

Будущие инженеры должны не только знать традиционно выпускаемое оборудование, но и знакомиться с техникой, которая будет внедрена через 5 лет и более, поэтому в учебнике приведены

характеристики новой техники, которая проходит лабораторные или промышленные испытания.

При подготовке учебника авторы учли, что до курса «Машины и аппараты химических производств» студенты предварительно изучали курсы «Процессы и аппараты химической технологии» и «Расчет и конструирование химических машин и аппаратов», в связи с этим приведены лишь автоматизированные технологические расчеты аппаратов и машин, а механические расчеты даны, как правило, не для отдельных деталей аппаратов и машин, а для конструкции в целом.

§ 1.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ВЫБОР И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Теплообменные аппараты предназначены для проведения процессов теплообмена при необходимости нагревания или охлаждения технологической среды с целью ее обработки или утилизации теплоты.

Теплообменная аппаратура составляет весьма значительную часть технологического оборудования в химической и смежных отраслях промышленности. Удельный вес на предприятиях химической промышленности теплообменного оборудования составляет в среднем 15—18 %, в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности 50 %. Значительный объем теплообменного оборудования на химических предприятиях объясняется тем, что почти все основные процессы химической технологии (выпаривание, ректификация, сушка и др.) связаны с необходимостью подвода или отвода теплоты.

Теплообменные аппараты можно классифицировать по следующим признакам:

по конструкции — аппараты, изготовленные из труб (кожухотрубчатые, «труба в трубе», оросительные, погружные змеевиковые, воздушного охлаждения); аппараты, поверхность теплообмена которых изготовлена из листового материала (пластинчатые, спиральные, сотовые); аппараты с поверхностью теплообмена, изготовленной из неметаллических материалов (графита, пластмасс, стекла и др.);

по назначению — холодильники, подогреватели, испарители, конденсаторы;

по направлению движения теплоносителей — прямоточные, противоточные, перекрестного тока и др.

В общем выпуске теплообменных аппаратов для химической и смежных отраслей промышленности в СССР около 80 % занимают кожухотрубчатые теплообменники. Эти теплообменники достаточно просты в изготовлении и надежны в эксплуатации и в то же время достаточно универсальны, т. е. могут быть использованы для осуществления теплообмена между газами, парами, жидкостями в любом сочетании теплоносителей и в широком диапазоне их давлений и температур.

Теплообменники типа «труба в трубе» и змеевиковые стальные в общем объеме теплообменной аппаратуры составляют около 8 %, а оросительные из чугуна — около 2 %.

Доля спиральных и пластинчатых теплообменников и аппаратов воздушного охлаждения пока невелика, но на вновь строящихся технологических линиях аппараты этого типа занимают все большее место.

Условия проведения процессов теплообмена в промышленных аппаратах чрезвычайно разнообразны. Эти аппараты применяют для рабочих сред с различным агрегатным состоянием и структурой (газ, пар, капельная жидкость, эмульсия и др.) в широком диапазоне температур, давлений и физико-химических свойств.

Из-за разнообразия предъявляемых к теплообменным аппаратам требований, связанных с условиями их эксплуатации, применяют аппараты самых различных конструкций и типов, причем для аппарата каждого типа разработан широкий размерный ряд поверхности теплообмена (от нескольких до нескольких тысяч квадратных метров в одном аппарате). В размерном ряду теплообменники различаются по допускаемым давлениям и температурам рабочей среды, а также по материалам, из которых изготовлен аппарат.

Широкая номенклатура теплообменников по типам, размерам, параметрам и материалам позволяет выбрать для конкретных условий теплообмена аппарат, оптимальный по размерам и материалам. Выбор конструкции аппарата для определенных условий теплообменного процесса зависит в основном от эрудиции и интуиции конструктора. Однако существуют рекомендации общего характера, которыми можно руководствоваться при выборе конструкции теплообменника и схемы движения в нем теплоносителей:

при высоком давлении теплоносителей предпочтительнее трубчатые теплообменники; в этом случае в трубное пространство желательно направить теплоноситель с более высоким давлением, поскольку из-за малого диаметра трубы могут выдержать большее давление, чем корпус;

коррозионный теплоноситель в трубчатых теплообменниках целесообразно направлять по трубам, так как в этом случае при коррозионном изнашивании не требуется замена корпуса теплообменника;

при использовании коррозионных теплоносителей предпочтительнее теплообменные аппараты из полимерных материалов, например фторопласта и его сополимеров, обладающих уникальной коррозионной стойкостью;

если один из теплоносителей загрязнен или дает отложения, то целесообразно направлять его с той стороны теплообмена, которая более доступна для очистки (в змеевиковых теплообменниках — это наружная поверхность труб, в кожухотрубчатых — внутренняя);

для улучшения теплообмена не всегда требуется увеличение скорости теплоносителя (так, например, при конденсации паров для улучшения теплообмена необходимо обеспечить хороший отвод конденсата с теплообменной поверхности, для чего следует подобрать аппарат соответствующей конструкции).

§ 1.2. КОЖУХОТРУБЧАТЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Как уже отмечено, кожухотрубчатые теплообменники — наиболее распространенная конструкция теплообменной аппаратуры.

По ГОСТ 9929—82 стальные кожухотрубчатые теплообменные аппараты изготовляют следующих типов: Н — с неподвижными трубными решетками; К — с температурным компенсатором на кожухе; П — с плавающей головкой; У — с U-образными трубами; ПК — с плавающей головкой и компенсатором на ней.

Т а б л и ц а 1.1

Основные параметры и размеры стальных кожухотрубчатых теплообменных аппаратов

Параметр, размер	Значения параметра и размера для аппаратов типа				
	Н	К	П	У	ПК
Поверхность теплообмена, м ²	От 1 до 5000		От 10 до 1250	От 10 до 1400	От 178 до 1866
Условное давление в трубном или межтрубном пространстве, МПа	0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 8,0	0,6; 1,0; 1,6; 2,5	1,0; 1,6; 2,5; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0	4,0; 6,3; 12,5; 16,0	5,0; 6,3; 8,0; 10,0
Диаметр кожуха, мм:					
наружный (из труб)	159; 273; 325; 426; 530; 630		325 *1; 426 *1; 530 *1; 630 *1		—
внутренний (из листовой стали)	400; 500; 600; 800; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; 2200; 2400; 2600; 2800; 3000		400 *1; 500 *1; 600 *1; 800; 1000; 1200; 1400; 1600 *2; 1800 *2; 2000 *2; 2200 *2; 2400 *2; 2600 *2; 2800 *2		800; 1000; 1100; 1200; 1300; 1500; 1600; 1800
Наружный диаметр × толщина стенки теплообменных труб, мм	16 × 1,5; 16 × 2; 20 × 2; 25 × 1,5; 25 × 2; 25 × 2,5; 38 × 2; 57 × 3		20 × 2; 25 × 2; 25 × 2,5; 38 × 2	20 × 2; 25 × 2; 25 × 2,5	20 × 2; 25 × 2; 25 × 2,5
Длина прямого участка теплообменных труб, мм	1000; 1500; 2000; 3000; 4000; 6000; 8000; 9000		3000; 4000; 6000; 9000 *1		6000; 9000

*1 Только для аппаратов с плавающей головкой и U-образными трубами.

*2 Только для аппаратов с паровым пространством.

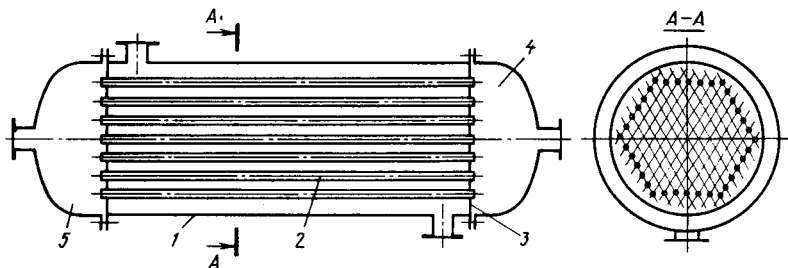


Рис. 1.1. Теплообменник с неподвижной трубной решеткой

Медные кожухотрубчатые аппараты по ГОСТ 11971—77 изготовляют двух типов (Н и К).

В зависимости от назначения кожухотрубчатые аппараты могут быть теплообменниками, холодильниками, конденсаторами и испарителями; их изготовляют одно- и многоходовыми.

Основные параметры и размеры стальных кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, применяемых для теплообмена жидких и газообразных сред при температуре от -60 до $+600$ °С (по ГОСТ 9929—82), приведены в табл. 1.1.

Использование стальных, кожухотрубчатых, теплообменных аппаратов различных типов в химических производствах характеризуется приблизительно следующими данными: Н — 75 %, К — 15 %; У — 3 %, П и ПК — остальное.

Теплообменники с неподвижными трубными решетками (тип Н). Схема теплообменника с неподвижными трубными решетками приведена на рис. 1.1. В кожухе 1 размещен трубный пучок, теплообменные трубы 2 которого развальцованы в трубных решетках 3. Трубная решетка жестко соединена с кожухом. С торцов кожух аппарата закрыт распределительными камерами 4 и 5. Кожух и камеры соединены фланцами.

Для подвода и отвода рабочих сред (теплоносителей) аппарат снабжен штуцерами. Один из теплоносителей в этих аппаратах движется по трубам, другой — в межтрубном пространстве, ограниченном кожухом и наружной поверхностью труб.

Особенностью аппаратов типа Н является то, что трубы жестко соединены с трубными решетками, а решетки приварены к кожуху. В связи с этим исключена возможность взаимных перемещений труб и кожуха; поэтому аппараты этого типа называют еще теплообменниками жесткой конструкции. Некоторые варианты крепления трубных решеток к кожуху в стальных аппаратах приведены на рис. 1.2.

Трубы в кожухотрубчатых теплообменниках стараются разместить так, чтобы зазор между внутренней стенкой кожуха и поверхностью, огибающей пучок труб, был минимальным; в противном случае значительная часть теплоносителя может

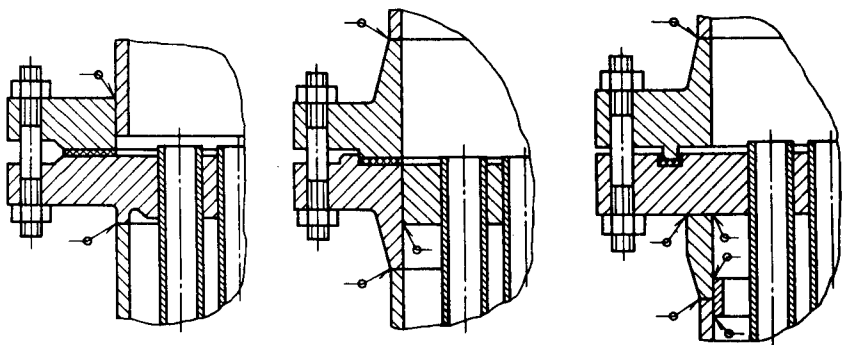


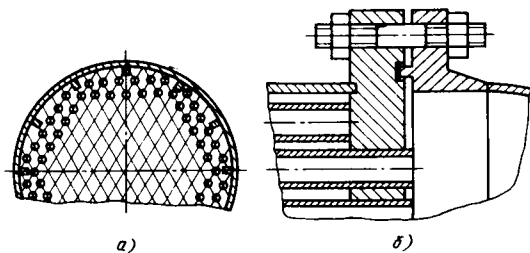
Рис. 1.2. Варианты крепления трубных решеток к кожуху аппарата

минимизировать основную поверхность теплообмена. Для уменьшения количества теплоносителя, проходящего между трубным пучком и кожухом, в этом пространстве устанавливают специальные заполнители, например приваренные к кожуху продольные полосы (рис. 1.3, а) или глухие трубы, которые не проходят через трубные решетки и могут быть расположены непосредственно у внутренней поверхности кожуха (рис. 1.3, б).

В кожухотрубчатых теплообменниках для достижения больших коэффициентов теплоотдачи необходимы достаточно высокие скорости теплоносителей: для газов 8—30 м/с, для жидкостей не менее 1,5 м/с. Скорость теплоносителей обеспечивают при проектировании соответствующим подбором площади сечения трубного и межтрубного пространства.

Если площадь сечения трубного пространства (число и диаметр труб) выбрана, то в результате теплового расчета определяют коэффициент теплопередачи и теплообменную поверхность, по которой рассчитывают длину трубного пучка. Последняя может оказаться больше длины серийно выпускаемых труб. В связи с этим применяют многоходовые (по трубному пространству) аппараты с продольными перегородками в распределительной камере. Промышленностью выпускаются двух-, четырех- и шести-ходовые теплообменники жесткой конструкции.

Рис. 1.3. Способы расположения в пространстве между трубным пучком и кожухом полос (а) и заглушенных труб (б)



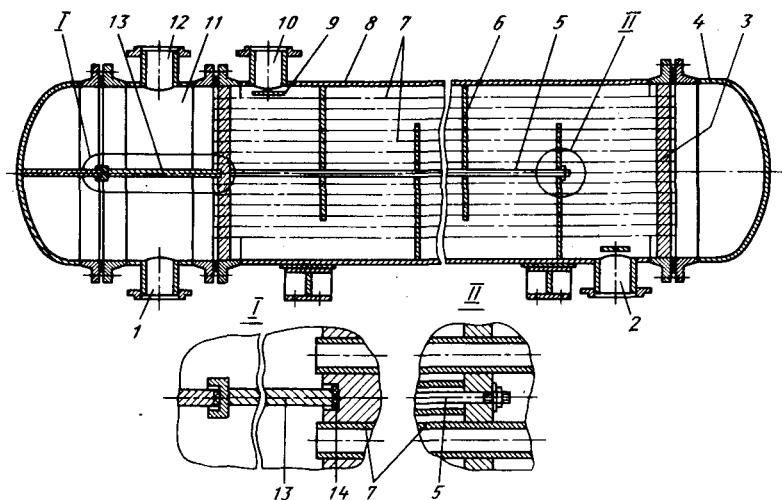


Рис. 1.4. Двухходовой горизонтальный теплообменник с неподвижными решетками

Двухходовой горизонтальный теплообменник типа Н (рис. 1.4) состоит из цилиндрического сварного кожуха 8, распределительной камеры 11 и двух крышек 4. Трубный пучок образован трубами 7, закрепленными в двух трубных решетках 3. Трубные решетки приварены к кожуху. Крышки, распределительная камера и кожух соединены фланцами. В кожухе и распределительной камере выполнены штуцера для ввода и вывода теплоносителей из трубного (штуцера 1, 12) и межтрубного (штуцера 2, 10) пространств. Перегородка 13 в распределительной камере образует ходы теплоносителя по трубам. Для герметизации узла соединения продольной перегородки с трубной решеткой использована прокладка 14, уложенная в паз решетки 3.

Поскольку интенсивность теплоотдачи при поперечном обтекании труб теплоносителем выше, чем при продольном, в межтрубном пространстве теплообменника установлены зафиксированные стяжками 5 поперечные перегородки 6, обеспечивающие зигзагообразное по длине аппарата движение теплоносителя в межтрубном пространстве. На входе теплообменной среды в межтрубное пространство предусмотрен отбойник 9 — круглая или прямоугольная пластина, предохраняющая трубы от местного эрозийного изнашивания.

Теплообменники типа Н отличаются простым устройством и сравнительно дешевы, однако им присущи два крупных недостатка. Во-первых, наружная поверхность труб не может быть очищена от загрязнений механическим способом, а теплоносители в некоторых случаях могут содержать примеси, способные оседать

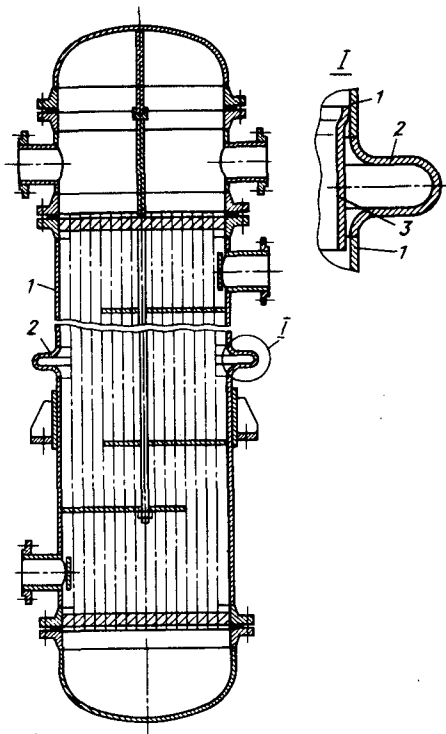
Рис. 1.5. Вертикальный кожухотрубчатый теплообменник с температурным компенсатором на кожухе

на поверхности труб в виде накипи, отложений и др. Слой таких отложений имеет малый коэффициент теплопроводности и способен весьма существенно ухудшить теплопередачу в аппарате.

Во-вторых, область применения теплообменных аппаратов типа Н ограничена возникновением в кожухе и трубах аппарата так называемых температурных напряжений. Это явление объясняется тем, что кожух и трубы теплообменника при его работе претерпевают разные температурные деформации, так как температура кожуха близка к температуре теплоносителя, циркулирующего в межтрубном пространстве, а температура труб — к температуре теплоносителя с большим коэффициентом теплоотдачи. Разность температурных удлинений возрастает, если кожух и трубки изготовлены из материалов с различными температурными коэффициентами линейного расширения. Возникающие при этом напряжения в сумме с напряжениями от давления среды в аппарате могут вызвать устойчивые деформации и даже разрушение конструкций.

По указанной причине теплообменники типа Н используют при небольшой разности температур (менее 50°C) кожуха и труб, при этом возможна так называемая самокомпенсация конструкции. Однако многие аппараты типа Н, серийно выпускаемые отечественной промышленностью, рекомендованы для работы при еще меньшей разности температур (менее 30°C). Для исключения значительных температурных напряжений при пуске аппаратов типа Н сначала направляют теплообменную среду в межтрубное пространство, для выравнивания температур кожуха и труб, а затем вводят среду в трубы.

Если расчетная разность температур кожуха и труб превышает указанную, используют теплообменные аппараты с частичной (тип К или ПК) или полной (тип У или П) компенсацией температурных напряжений.



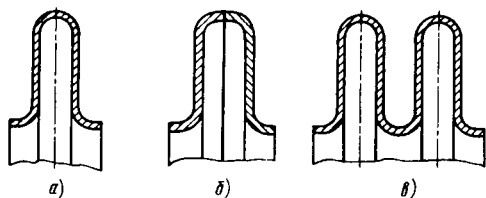


Рис. 1.6. Компенсаторы:

а — однолинзовый; б — сваренный из двух полулинз; в — двухлинзовый

Аппараты с температурным компенсатором на кожухе (тип К). В этих аппаратах для частичной компенсации температурных деформаций используют специальные гибкие элементы (расширители и компенсаторы), расположенные на кожухе.

Вертикальный кожухотрубчатый теплообменник типа К (рис. 1.5) отличается от теплообменника типа Н наличием сваренного между двумя частями кожуха 1 линзового компенсатора 2 и обтекателя 3. Обтекатель уменьшает гидравлическое сопротивление межтрубного пространства такого аппарата; обтекатель приваривают к кожуху со стороны входа теплоносителя в межтрубное пространство.

Наиболее часто в аппаратах типа К используют одно- и многоэлементные линзовые компенсаторы (рис. 1.6), изготавливаемые обкаткой из коротких цилиндрических обечаек. Линзовый элемент, показанный на рис. 1.6, б, сварен из двух полулинз, полученных из листа штамповкой. Компенсирующая способность линзового компенсатора примерно пропорциональна числу линзовых элементов в нем, однако применять компенсаторы с числом линз более четырех не рекомендуется, так как резко снижается сопротивление кожуха изгибу. Для увеличения компенсирующей способности линзового компенсатора он может быть при сборке кожуха предварительно сжат (если предназначен для работы на растяжение) или растянут (при работе на сжатие).

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

Кроме линзовых в аппаратах типа К можно использовать компенсаторы других типов: из плоских параллельных колец, соединенных пластиной по наружному краю (рис. 1.7, а), сваренные из двух полусферических элементов (рис. 1.7, б), тороидальные (рис. 1.7, в) и др. Тороидальные компенсаторы довольно дешевы и просты в изготовлении. Их изготавливают из труб, сгибая в тор с последующей резкой его по внутренней поверхности. Для этих компенсаторов характерны небольшие (по сравнению с линзовым компенсатором) напряжения, плавно изменяющиеся по сечению компенсатора. Однако тяжелые условия работы сварного шва, соединяющего компенсатор с кожухом, сдерживают их широкое применение.

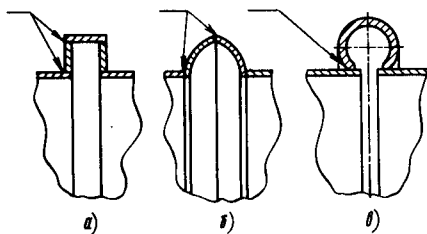


Рис. 1.7. Компенсаторы

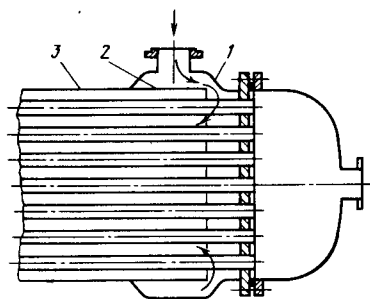


Рис. 1.8. Теплообменник с расширителем на кожухе

К аппаратам, обеспечивающим частичную компенсацию температурного расширения за счет гибких элементов в кожухе, относится аппарат с расширителем 1 на кожухе 3 (рис. 1.8).

Преимущество этой конструкции — эффективность теплообмена вследствие исключения застойных зон в межтрубном пространстве. Для кожухотрубчатых теплообменников особенно характерно образование таких зон вблизи трубных решеток, поскольку штуцера ввода и вывода теплоносителя расположены на некотором расстоянии от решеток. Для ликвидации застойных зон в аппарате с частичной компенсацией температурных расширений предусмотрен распределитель 2, который обеспечивает равномерное распределение теплоносителя по межтрубному пространству.

Введение линзового компенсатора или расширителя допускает гораздо больший температурный перепад, чем в теплообменниках типа Н, однако при этом возрастает стоимость аппарата.

Область использования стальных аппаратов типа К ограничена избыточным давлением 2,5 МПа.

Теплообменники с U-образными трубами (тип У). В кожухотрубчатых аппаратах этой конструкции обеспечивается свободное

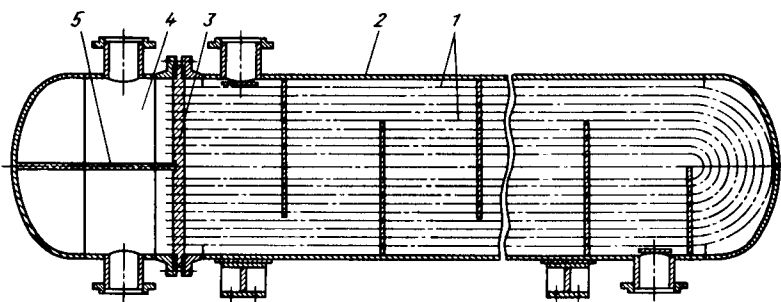


Рис. 1.9. Теплообменник с U-образными трубами

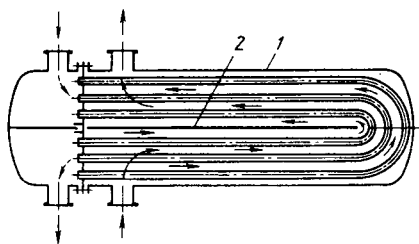


Рис. 1.10. Двухходовой теплообменник с U-образными трубами

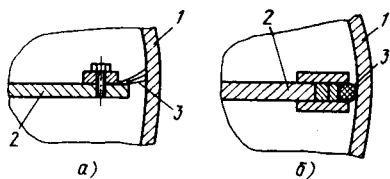


Рис. 1.11. Варианты уплотнения пространства между перегородкой и кожухом:

а — гибкой металлической пластиной; б — шнуром

удлинение труб, что исключает возможность возникновения температурных напряжений.

Такие аппараты (рис. 1.9) состоят из кожуха 2 и трубного пучка, имеющего одну трубную решетку 3 и U-образные трубы 1. Трубная решетка вместе с распределительной камерой 4 крепится к кожуху аппарата на фланце.

Для обеспечения раздельного ввода и вывода циркулирующего по трубам теплоносителя в распределительной камере предусмотрена перегородка 5.

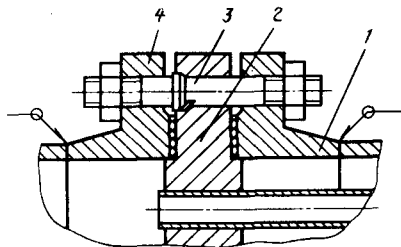
Теплообменники типа У являются двухходовыми по трубному пространству и одно- или двухходовыми по межтрубному пространству. В последнем случае (рис. 1.10) в аппарате установлена продольная перегородка 2, извлекаемая из кожуха 1 вместе с трубным пучком. Для исключения перетекания теплоносителя в зазорах между кожухом аппарата (рис. 1.11) и перегородкой 2 у стенки кожуха устанавливают гибкие металлические пластины 3 (рис. 1.11, а) или прокладку 3 (рис. 1.11, б) из прорезиненного асбестового шнура, уложенную в паз перегородки 2.

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

Преимущество конструкции аппарата типа У — возможность периодического извлечения трубного пучка для очистки наружной поверхности труб или полной замены пучка. Однако следует отметить, что наружная поверхность труб в этих аппаратах неудобна для механической очистки.

Поскольку механическая очистка внутренней поверхности труб в аппаратах типа У практически невозможна, в трубное пространство таких аппаратов следует направлять среду, не образующую отложений, которые требуют механической очистки.

Рис. 1.12. Способ крепления распределительной камеры к кожуху теплообменника



Внутреннюю поверхность труб в этих аппаратах очищают водой, водяным паром, горячими нефтепродуктами или химическими реагентами. Иногда используют гидромеханический способ (подача в трубное пространство потока жидкости, содержащей абразивный материал, твердые шары и др.).

Крепление фланца 4 распределительной камеры к фланцу 1 кожуха аппарата показано на рис. 1.12. Специальная шпилька 3 с коническим стопорным выступом позволяет снимать распределительную камеру без нарушения соединения трубной решетки 2 с кожухом.

Один из наиболее распространенных дефектов кожухотрубчатого теплообменника типа У — нарушение герметичности узла соединения труб с трубной решеткой из-за весьма значительных изгибающих напряжений, возникающих от массы труб и протекающей в них среды. В связи с этим теплообменные аппараты типа У диаметром от 800 мм и более для удобства монтажа и уменьшения изгибающих напряжений в трубном пучке снабжают роликовыми опорами.

К недостаткам теплообменных аппаратов типа У следует отнести относительно плохое заполнение кожуха трубами из-за ограничений, обусловленных изгибом труб.

Обычно U-образные трубы изготовляют гибкой труб в холодном или нагретом состоянии. Для исключения сплющивания и значительного утонения стенки на растянутой стороне стальной трубы радиус изгиба принимают $R \geq 4d_t$, где d_t — наружный диаметр трубы.

К существенным недостаткам аппаратов типа У следует отнести невозможность замены труб (за исключением крайних труб) при выходе их из строя, а также сложность размещения труб, особенно при большом их числе.

Из-за указанных недостатков теплообменные аппараты этого типа не нашли широкого применения.

Теплообменные аппараты с плавающей головкой (тип П). В теплообменниках с плавающей головкой теплообменные трубы закреплены в двух трубных решетках, одна из которых неподвижно связана с корпусом, а другая имеет возможность свободного осевого перемещения; последнее исключает возможность температурных деформаций кожуха и труб.

Горизонтальный двухходовой конденсатор типа П (рис. 1.13) состоит из кожуха 10 и трубного пучка. Левая трубная решетка 1 соединена фланцевым соединением с кожухом и распределитель-

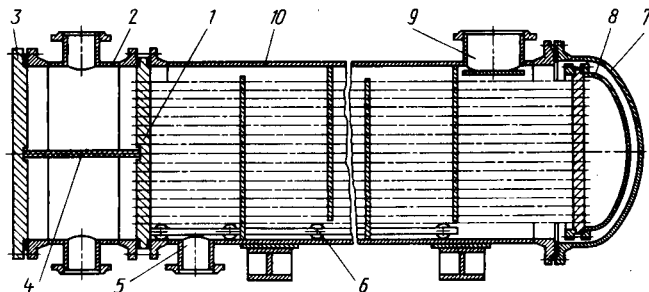


Рис. 1.13. Горизонтальный двухходовой конденсатор с плавающей головкой

ной камерой 2, снабженной перегородкой 4. Камера закрыта плоской крышкой 3. Правая, подвижная, трубная решетка установлена внутри кожуха свободно и образует вместе с присоединенной к ней крышкой 8 «плавающую головку». Со стороны плавающей головки аппарат закрыт крышкой 7. При нагревании и удлинении трубок плавающая головка перемещается внутри кожуха.

Для обеспечения свободного перемещения трубного пучка внутри кожуха в аппаратах диаметром 800 мм и более трубный пучок снабжают опорной платформой 6. Верхний штуцер 9 предназначен для ввода пара и поэтому имеет большое проходное сечение; нижний штуцер 5 предназначен для вывода конденсата и имеет меньшие размеры.

Значительные коэффициенты теплоотдачи при конденсации практически не зависят от режима движения среды. Поперечные перегородки в межтрубном пространстве этого аппарата служат лишь для поддержания труб и придания трубному пучку жесткости.

Аппараты с плавающей головкой обычно выполняют одноходовыми по межтрубному пространству, однако установкой продольных перегородок в межтрубном пространстве можно получить многоходовые конструкции. На рис. 1.14 показаны двухходовые по межтрубному пространству теплообменники.

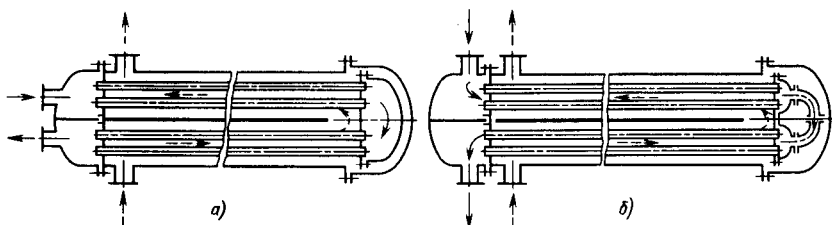


Рис. 1.14. Двухходовой теплообменник типа П с плавающей головкой:
а — цельной; б — разрезной

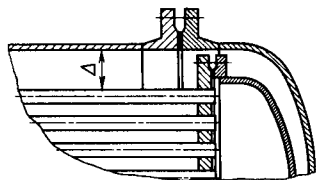


Рис. 1.15. Вариант размещения плавающей головки в кожухе большого диаметра

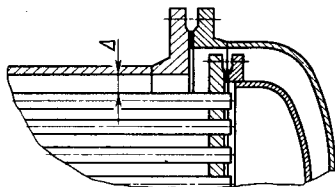


Рис. 1.16. Вариант размещения крышки плавающей головки в кожухе меньшего диаметра

Хотя в аппаратах типа П обеспечивается хорошая компенсация температурных деформаций, эта компенсация не является полной, поскольку различие температурных расширений самих трубок приводит к короблению трубной решетки. В связи с этим в многоходовых теплообменниках типа П диаметром более 1000 мм при значительной (выше 100 °С) разности температур входа и выхода среды в трубном пучке, как правило, устанавливают разрезную по диаметру плавающую головку.

Наиболее важный узел теплообменников с плавающей головкой — соединение плавающей трубной решетки с крышкой. Это соединение должно обеспечивать возможность легкого извлечения пучка из кожуха, аппарата, а также минимальный зазор Δ между кожухом и пучком труб. Вариант, показанный на рис. 1.15, позволяет извлекать трубный пучок, но зазор Δ получается больше (по крайней мере чем в теплообменниках типа Н) на ширину фланца плавающей головки. Крепление по этой схеме наиболее простое; его часто применяют в испарителях с паровым пространством.

Размещение плавающей головки внутри крышки, диаметр которой больше диаметра кожуха, позволяет уменьшить зазор; но при этом усложняется демонтаж аппарата, так как плавающую головку нельзя извлечь из кожуха теплообменника (рис. 1.16).

Конструкции крепления плавающей головки с трубной решеткой, позволяющие легко извлекать трубный пучок из кожуха при минимальном зазоре Δ между трубным пучком и кожухом, показаны на рис. 1.17. В одном из таких простых соединений использованы разрезные фланцы (рис. 1.17, а). Конструкция включает разрезной фланец 1 (состоит из двух полуколец, стянутых ограничительным кольцом 2), уплотняющую прокладку 3, крышку 4 плавающей головки и трубную решетку 5.

Широко распространены соединения фланцевой скобой 2 (рис. 1.17, б), представляющей собой приспособление типа струбины. Соединение состоит из двух полуколец, охватывающих край трубной решетки 4 и фланец 3 крышки. Винты 1 должны быть расположены посередине уплотнения, что обеспечивает разгрузку фланца от изгибающих моментов.

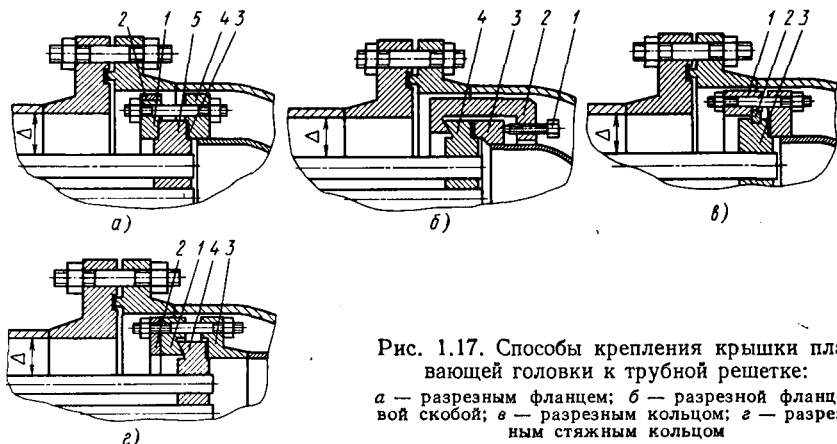


Рис. 1.17. Способы крепления крышки плавающей головки к трубной решетке:

а — разрезным фланцем; б — разрезной фланцевой скобой; в — разрезным кольцом; г — разрезным стяжным кольцом

В другой конструкции (рис. 1.17, в) накидной фланец 1 удерживается разрезным кольцом 2, вставленным в паз трубной решетки 3. Широко применяют также крепление крышки 3 (рис. 1.17, г) и трубной решетки 4 разрезным кольцом 1, половинки которого соединены между собой накладками 2.

Особенно часто трубные пучки с плавающей головкой используют в испарителях с паровым пространством.

В этих аппаратах должна быть создана большая поверхность зеркала испарения, поэтому диаметр кожуха испарителя значительно превышает диаметр трубного пучка, а перегородки в пучке служат лишь для увеличения его жесткости.

В испарителе (рис. 1.18) уровень жидкости в кожухе 11 поддерживается перегородкой 2. Для обеспечения достаточного объема парового пространства и увеличения поверхности испарения расстояние от уровня жидкости до верха корпуса составляет примерно 30 % его диаметра. Трубный пучок 3 расположен в корпусе испарителя на поперечных балках 4. Для удобства монтажа трубного пучка в перегородке 2 и левом днище предусмотрен люк 10, через который в аппарат можно завести трос от лебедки.

Продукт вводится в испаритель через штуцер 5; для защиты трубного пучка от эрозии над этим штуцером установлен отбойник 6. Пары отводятся через штуцер 9, продукт — через штуцер 1. Теплоноситель подводится в трубный пучок и отводится через штуцеры 7, 8. В таких аппаратах можно устанавливать несколько трубных пучков.

Теплообменники с плавающей головкой и компенсатором (тип ПК) представляют собой аппараты полужесткой конструкции, в которых компенсацию температурных напряжений обеспечивает гибкий элемент — компенсатор, установленный на плавающей головке.

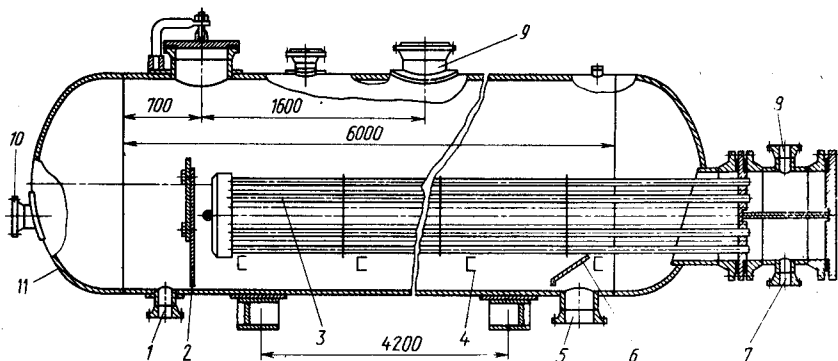


Рис. 1.18. Испаритель

Теплообменники типа ПК выполняют одноходовыми с противоточным движением теплоносителей и используют при повышенном давлении теплообмениваемых сред (5—10 МПа).

Теплообменник этой конструкции (рис. 1.19) отличается от рассмотренных наличием на крышке 2 удлиненного штуцера (горловины) 3, внутри которого размещен компенсатор 4. Последний соединен одним концом с плавающей головкой 1, другим — со штуцером на крышке теплообменника. Конструкции остальных узлов теплообменника аналогичны используемым в аппаратах типа П.

Показанная на рис. 1.19 конструкция обеспечивает возможность извлечения трубного пучка из корпуса для контроля его состояния и механической очистки труб.

Компенсаторы, используемые в аппаратах типа ПК, отличаются от линзовых компенсаторов аппаратов типа К относительно меньшими диаметрами, большим числом волн (гофров), меньшей толщиной стенки. Такие компенсаторы можно использовать при перепаде давлений не более 2,5 МПа, поэтому аппараты типа ПК разрешается эксплуатировать только при одновременной подаче теплоносителей в трубное и межтрубное пространства.

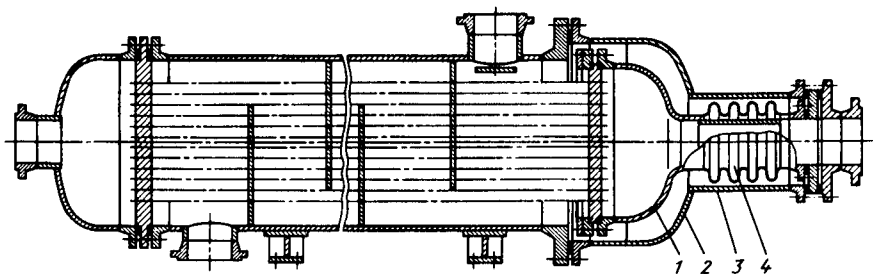


Рис. 1.19. Теплообменник с плавающей головкой и компенсатором

Пример частичной компенсации разности температурных деформаций кожуха и труб — использование в кожухотрубчатых аппаратах сальникового уплотнения.

На рис. 1.20 приведена схема кольцевого уплотнения трубной решетки 4. Уплотнение обеспечивают сальниковые кольца 3 и поджатые фланцами 2, 5. В случае утечки через сальник теплоноситель выводится из аппарата через отверстие в дренажном кольце. Трубная решетка в аппарате такой конструкции должна быть на периферии достаточно широкой для возможности размещения прокладки и дренажных колец, с учетом перемещения решетки при удлинении труб.

Такие аппараты нельзя использовать для летучих и воспламеняющихся жидкостей.

Аппарат, предназначенный для нагрева насыщенным водяным паром кислых агрессивных сред (рис. 1.21) состоит из металлического кожуха 1 и графитового трубного пучка 2. В верхней части аппарата, где его кожух сопрягается с подвижной (трубной) решеткой 3, установлен сальник 4. В качестве сальниковой набивки, как правило, используют графитизированный асбестовый шнур. Уплотнение герметизируют перемещением нажимной втулки 5 и затягиванием шпилек 6.

Следует учитывать, что при повышенном давлении в межтрубном пространстве сальник в таких аппаратах является источником утечек теплоносителя.

В некоторых конструкциях кожухотрубчатых теплообменников с трубами из неметаллических материалов, например стекла, компенсацию температурных удлинений и перекоса труб в решетках обеспечивают упругие элементы 2 (рис. 1.22, а), установленные между трубой

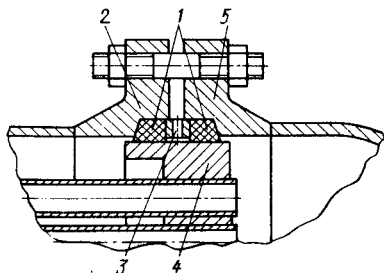


Рис. 1.20. Сальниковое кольцевое уплотнение

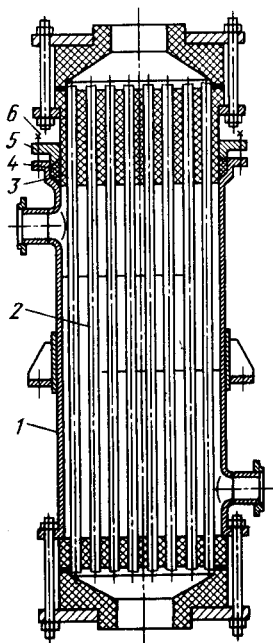
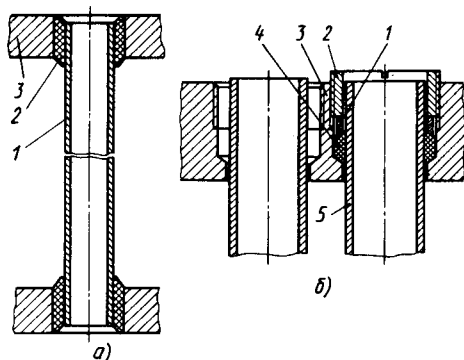


Рис. 1.21. Теплообменник для нагрева кислых сред

Рис. 1.22. Способы компенсации температурных напряжений в теплообменниках с неметаллическими трубами:

а — упругими элементами; *б* — подвижным соединением

1 и трубной решеткой 3. Эти элементы изготавливают из полимерных материалов и приклеивают одной стороной к наружной поверхности концов труб, другой — к трубной решетке.



Для компенсации температурных напряжений в аппарате с неметаллическими трубами иногда используют подвижное соединение одного конца труб с трубной решеткой. В этом случае концы труб 5 закрепляют в трубной решетке 3 (рис. 1.22, б) с использованием сальниковой набивки 4, нажимного кольца 1 и нажимной втулки 2.

§ 1.3. ЭЛЕМЕНТЫ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Основные элементы кожухотрубчатых теплообменных аппаратов: кожух (корпус), распределительная камера и трубный пучок. Последний состоит из труб, трубных решеток и перегородок. Элементы стальных кожухотрубчатых аппаратов изготавливают из стали. Из стали можно выполнять и некоторые элементы медных (ГОСТ 11971—77) аппаратов, например кожух.

Для каждого из рассмотренных выше типов стальных кожухотрубчатых аппаратов в зависимости от их назначения материалы регламентированы соответствующими ГОСТами.

Кожухи и распределительные камеры. Кожух (корпус) теплообменного аппарата малого диаметра D (менее 600 мм) чаще всего изготавливают из труб, а кожух большого диаметра вальцуют из листовой стали. В последнем случае особенно при большой длине аппарата кожух может быть сварным из трех обечайек: центральной и двух концевых. Длина концевых обечайек $l = 2 \sqrt{D_n s_k}$ (где D_n — наружный диаметр кожуха; s_k — толщина стенки кожуха), но не менее 100 мм. Толщина концевых обечайек в 1,2—1,4 раза должна превосходить толщину центральной обечайки. Это объясняется необходимостью компенсировать напряжения, возникающие в месте соединения кожуха с трубной решеткой.

Для теплообменных аппаратов, особенно аппаратов типа У, П и ПК, должна быть обеспечена необходимая устойчивость формы кожуха; к этой характеристике обечайки предъявляют особые требования, потому что для очистки указанных аппаратов при-

ходится периодически извлекать трубный пучок с перегородками. Так как зазор между кожухом и перегородкой невелик (несколько миллиметров), появление овальности кожуха приведет к невозможности монтажа и демонтажа трубного пучка.

Для аппаратов типа Н должна быть обеспечена способность кожуха и труб к самокомпенсации, т. е. способность противостоять напряжениям, возникающим из-за различия их температурных удлинений.

При определении температурных напряжений в трубах и кожухе теплообменников типа Н можно полагать, что трубные решетки не деформируются, а кожух и трубы не подвергаются продольному изгибу.

Пусть кожух и трубы аппарата выполнены из материалов с модулями упругости соответственно E_K и E_T (МПа) и температурными коэффициентами линейного расширения соответственно α_K и α_T ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Введем обозначения: длина труб L (м); площади поперечного сечения труб и кожуха соответственно F_T и F_K (м^2), их температуры t_T и t_K ($^{\circ}\text{C}$); для определенности примем $t_T > t_K$.

Если бы трубы и кожух не были жестко связаны между собой, то разность их относительных деформаций можно было бы определить из соотношения

$$\Delta/L = \varepsilon = \alpha_T(t_T - t_0) - \alpha_K(t_K - t_0), \quad (1.1)$$

где t_0 — температура окружающей среды при сборке аппарата.

В реальных условиях эта разность компенсируется деформациями кожуха $\Delta'_K/L = \varepsilon_K$ (растяжение) и труб $\Delta'_T/L = \varepsilon_T$ (сжатие). Очевидно, что

$$\varepsilon = \varepsilon_K + \varepsilon_T. \quad (1.2)$$

Деформации кожуха и труб определяются напряжениями растяжения в кожухе σ_K и сжатия в трубах σ_T :

$$\sigma_K = \varepsilon_K E_K; \quad \sigma_T = \varepsilon_T E_T. \quad (1.3)$$

Поскольку осевая сила $Q(H)$, вызывающая эти напряжения, одинакова для кожуха и труб, можно записать

$$\varepsilon_K E_K F_K = \varepsilon_T E_T F_T. \quad (1.4)$$

Подставив (1.4) и (1.1) в (1.2), с учетом (1.3) найдем

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \theta [\alpha_T(t_T - t_0) - \alpha_K(t_K - t_0)]/F_T; \\ \sigma_K &= \theta [\alpha_T(t_T - t_0) - \alpha_K(t_K - t_0)]/F_K, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где

$$\theta = E_K F_K E_T F_T / (E_K F_K + E_T F_T). \quad (1.6)$$

Для стальных теплообменников, корпус и трубы которых изготовлены из материала с модулем упругости $E = 200$ ГПа и температурным коэффициентом линейного расширения $\alpha = 1,21 \cdot 10^{-5} ^{\circ}\text{C}^{-1}$, при разности температур кожуха и труб $\Delta t = 50 ^{\circ}\text{C}$ (допустимой для теплообменников типа Н) и равных

площадах поперечного сечения кожуха и труб $F_k = F_t$, напряжения $\sigma_k = \sigma_t = 0,5\alpha E \Delta t = 60,5$ МПа. Установкой линзовых компенсаторов уменьшают напряжения в кожухе на $\Delta\sigma_k$, в трубах на $\Delta\sigma_t$:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_k &\approx \Delta'_L z \theta [\alpha_t(t_t - t_0) - \alpha_k(t_k - t_0)] / (F_k L) \quad \text{и} \\ \Delta\sigma_t &\approx \Delta'_L z \theta [\alpha_t(t_t - t_0) - \alpha_k(t_k - t_0)] / (F_t L),\end{aligned}\quad (1.7)$$

где Δ'_L — компенсирующая способность одного элемента, м; z — число элементов компенсатора.

Из выражения (1.7) следует, что при введении компенсатора в конструкцию уменьшение температурных напряжений тем значительнее, чем больше элементов в компенсаторе. Однако число линз не должно быть большим из-за опасности потери устойчивости формы кожуха, особенно если компенсаторы работают на осевое сжатие.

Распределительные камеры теплообменного аппарата предназначены для распределения потока теплоносителя по трубам (см. рис. 1.9) и представляют собой обечайку с фланцами, соединенными с трубной решеткой и съемной эллиптической или плоской крышкой (см. рис. 1.4). В некоторых конструкциях крышка приварена к цилиндрической обечайке.

Для образования ходов теплоносителя по трубам распределительную камеру снабжают продольной перегородкой. Вариант герметизации узла соединения перегородки показан на рис. 1.4. Для аппаратов небольшого диаметра (до 800 мм) крышку распределительной камеры выполняют плоской, поскольку такие крышки дешевле и проще в изготовлении. В некоторых случаях для удобства обслуживания аппарата распределительные камеры и крышки к ним навешивают в шарнирных устройствах, закрепленных на кожухе.

Толщину стенок распределительной камеры принимают равной толщине стенки кожуха аппарата. Камеру и крышку обычно изготавливают из того же материала, что и кожух аппарата.

Фланцы теплообменных аппаратов выполняют с привалочной поверхностью выступ-впадина или под прокладку восьмиугольного сечения. В стальных кожухотрубчатых теплообменниках используют металлические и асбометаллические прокладки. Во всех случаях прокладку следует изготавливать цельной без сварки, пайки или склеивания. Прокладку в плавающей головке выполняют обычно из стали.

Теплообменные трубы и трубные решетки. Теплообменные трубы кожухотрубчатых стальных аппаратов — это серийно выпускаемые промышленностью трубы из углеродистых, коррозионно-стойких сталей и латуни. Диаметр теплообменных труб значительно влияет на скорость теплоносителя, коэффициент теплоотдачи в трубном пространстве и габариты аппарата; чем меньше диаметр труб, тем большее их число можно разместить

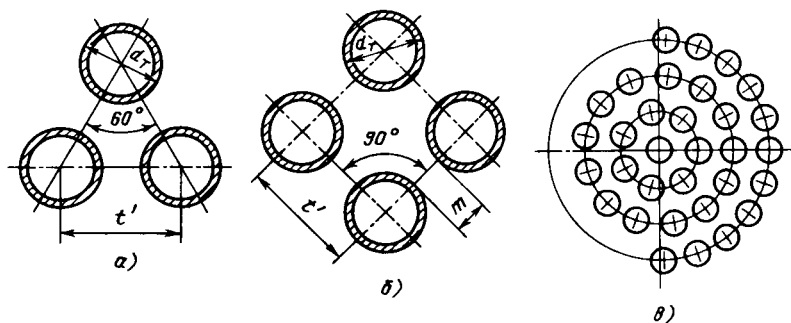


Рис. 1.23. Схема размещения труб в трубной решетке:

а — по вершинам равностороннего треугольника; *б* — по вершинам квадратов; *в* — по окружностям

в кожухе данного диаметра. Однако трубы малого диаметра быстрее засоряются при работе с загрязненными теплоносителями, определенные сложности возникают при механической очистке и закреплении таких труб развальцовкой. В связи с этим наиболее употребительны стальные трубы с наружным диаметром 20 и 25 мм. Трубы диаметром 38 и 57 мм применяют при работе с загрязненными или вязкими жидкостями.

С увеличением длины труб и уменьшением диаметра аппарата его стоимость снижается. Наиболее дешевый теплообменный аппарат при длине труб 5—7 м.

Трубные решетки кожухотрубчатых теплообменников изготовляют из цельных стальных листов или поковок. Для аппаратов большого диаметра используют сварные трубные решетки. В этом случае сварные швы не должны пересекаться, а расстояние от кромки сварного шва до отверстий должно быть не менее 0,8 диаметра отверстия.

Схема расположения труб в трубных решетках и шаг отверстий для труб регламентируются ГОСТ 9929—82. Для теплообменников типов Н и К трубы размещают в трубных решетках по вершинам равносторонних треугольников (рис. 1.23, *а*), а для теплообменников типов П, У и ПК — по вершинам квадратов (рис. 1.23, *б*) или равносторонних треугольников. При размещении труб диаметром d_t по вершинам равносторонних треугольников обеспечивается более компактное расположение труб в трубной решетке, чем при размещении их по вершинам квадратов при одинаковом шаге t' . Однако последняя схема имеет важное эксплуатационное преимущество: она позволяет очищать трубы снаружи механическим способом, поскольку между трубами образуются сквозные ряды. При размещении по вершинам треугольников такие ряды можно получить, только увеличив шаг t' . По окружностям (рис. 1.24, *в*) трубы располагают лишь в кислородной аппаратуре.

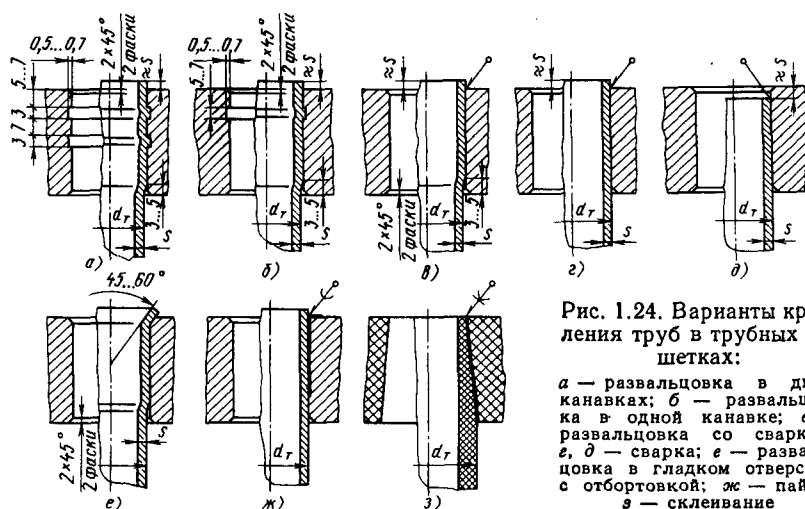


Рис. 1.24. Варианты крепления труб в трубных решетках:

а — развальцовка в двух канавках; б — развальцовка в одной канавке; в — развальцовка со сваркой; г, д — сварка; е — развальцовка в гладком отверстии с отбортовкой; ж — пайка; з — склеивание

Шаг t' отверстий для труб в решетке выбирают с учетом достаточной прочности участка шириной $m = t' - d_T$; для стальных кожухотрубчатых аппаратов шаг принимают по следующим данным:

d_T , мм	16	20	25	38	57
t' , мм	21	26	32	48	70

Трубы соединяют с трубной решеткой стальных аппаратов развальцовкой (рис. 1.24, а, б, е), сваркой (рис. 1.24, г, д), развальцовкой со сваркой (1.25, в). Пайку и заливку металлом концов труб в решетках (рис. 1.25, ж) применяют при изготовлении теплообменников из меди и ее сплавов, а склеивание — при изготовлении аппаратов из полимерных материалов (рис. 1.25, з).

Наиболее распространенный способ крепления труб в решетке — развальцовка. Трубы вставляют в отверстия решетки с некоторым зазором, а затем обкатывают изнутри специальным инструментом, снабженным роликами (вальцовкой). При этом в стенках трубы создаются остаточные пластические деформации, а в трубной решетке — упругие деформации, благодаря чему материал решетки после развальцовки плотно сжимает концы труб. Однако при этом материал труб подвергается наклепу (металл упрочняется с частичной потерей пластичности), что может привести к растрескиванию труб. С уменьшением начального зазора между трубой и отверстием в решетке наклеп уменьшается, поэтому обычно принимают зазор 0,25 мм. Кроме этого для обеспечения качественной развальцовки и возможности замены труб необходимо, чтобы твердость материала трубной решетки превышала твердость материала труб.

Развальцовочное соединение должно быть прочным и герметичным. Прочность соединения оценивают усилием вырыва трубы из гнезда, герметичность — максимальным давлением среды, при котором соединение герметично. При развальцовке конец трубы должен выступать над трубной решеткой на расстояние, равное толщине s трубы. Для повышения прочности и герметичности соединения иногда выполняют отбортовку выступающего над решеткой конца трубы (рис. 1.25, е).

Наиболее простой способ — развальцовку (в гладких отверстиях) — применяют при относительно небольших рабочих давлениях (до 0,6 МПа). Прочность и герметичность вальцовочного соединения значительно возрастают при развальцовке в отверстиях с одной или двумя канавками глубиной около 0,5 мм.

Трубы развальцовывают обычно на глубину $1,5d_t$ или, если толщина решетки меньше $1,5d_t$, на полную толщину решетки. При этом со стороны межтрубного пространства оставляют неразвальцованным поясok шириной 3 мм, чтобы не подрезать трубу кромкой решетки при развальцовке, либо на этой кромке снимают фаску.

В толстых решетках трубу развальцовывают двумя поясками: один шириной $1,5d_t$ со стороны распределительной камеры, другой шириной $0,75d_t$ со стороны межтрубного пространства. Это позволяет исключить проникновение среды в щель между трубой и решеткой и коррозию.

Крепление труб сваркой с развальцовкой применяют без ограничений давления и температуры теплоносителей. В этом случае сначала выполняют сварку, а затем развальцовку трубы.

Перегородки, прокладки. В кожухотрубчатых теплообменниках устанавливают поперечные и продольные перегородки.

Поперечные перегородки, размещаемые в межтрубном пространстве теплообменников, предназначены для организации движения теплоносителя в направлении, перпендикулярном оси труб, и увеличения скорости теплоносителя в межтрубном пространстве. В обоих случаях возрастает коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности труб.

Поперечные перегородки устанавливают и в межтрубном пространстве конденсаторов и испарителей, в которых коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности труб на порядок выше коэффициента на их внутренней поверхности. В этом случае перегородки выполняют роль опор трубного пучка, фиксируя трубы на заданном расстоянии одна от другой, а также уменьшают вибрацию труб.

Вибрация труб обычно не вызывает серьезных неприятностей, если теплоноситель в межтрубном пространстве является вязкой жидкостью и достаточно хорошо демпфирует колебания труб. Однако в аппаратах, где по межтрубному пространству с большой скоростью идет газ, вибрация труб может вызвать их серьезное повреждение.

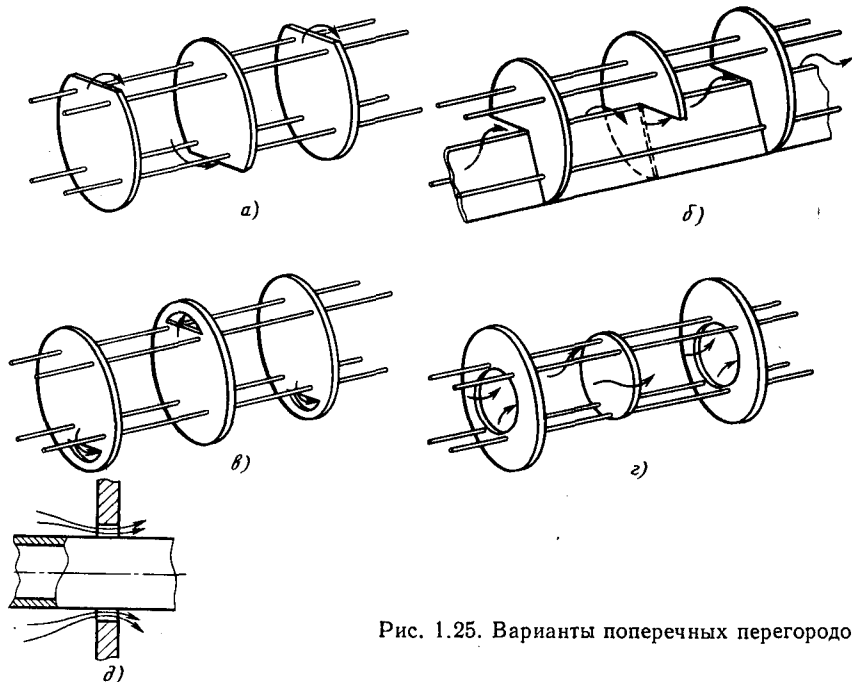


Рис. 1.25. Варианты поперечных перегородок

Известны несколько конструкций поперечных перегородок: с сегментным (рис. 1.25, а), секторным (рис. 1.25, б) и щелевым (рис. 1.25, в) вырезами, с чередованием дисков и колец (рис. 1.25, г).

Наиболее широко в мировой практике применяют сегментные перегородки. Высота вырезаемого сегмента равна примерно $1/3$ диаметра аппарата, а расстояние между перегородками — около $0,5$ диаметра аппарата.

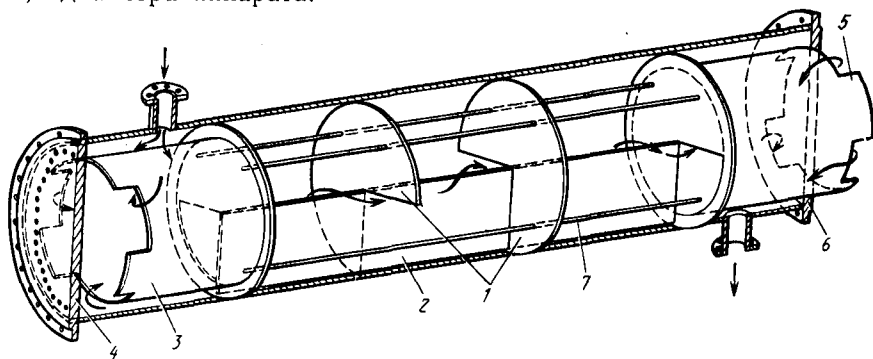


Рис. 1.26. Вариант установки перегородок, обеспечивающий винтовое движение теплоносителя

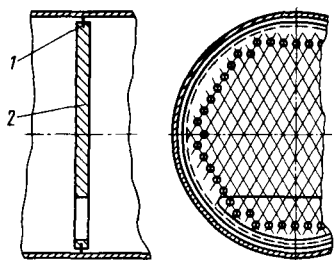


Рис. 1.27. Вариант уплотнения зазора между поперечной перегородкой и корпусом аппарата

Аппараты со сплошными перегородками используют обычно для чистых жидкостей. В этом случае жидкость протекает по кольцевому зазору (около 1,5 мм) между трубой и перегородкой (рис. 1.25, д).

В зазорах между перегородкой и трубами поток сильно турбулизуется, что приводит к уменьшению толщины ламинарного пограничного слоя и, как следствие, увеличению коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности труб.

Иногда в теплообменниках в пространстве между трубными решетками 4, 6 (рис. 1.26) устанавливают поперечные перегородки 1 с секторными вырезами и продольную перегородку 2 высотой, равной половине диаметра аппарата. Секторный вырез, по площади равный четверти круга, располагают в соседних перегородках в шахматном порядке. При этом теплоноситель в межтрубном пространстве совершает вращательное движение то по часовой стрелке, то против нее. Для устранения застойных зон и обеспечения наиболее полного обтекания теплоносителем трубного пучка на его концах устанавливают распределительные цилиндры 3 и 5 с окнами. Стяжки 7 предназначены для фиксации перегородок.

Интенсификация теплообмена поперечными перегородками может значительно снижаться из-за утечек теплоносителя в зазорах между корпусом и перегородками. Для уменьшения утечек устанавливают следующие ограничения. При наружном диаметре кожуха аппарата не более 600 мм зазор между корпусом и перегородкой не должен превышать 1,5 мм. В остальных случаях диаметр поперечных перегородок выбирают по соответствующим нормативным документам.

Для уменьшения зазоров между корпусом и поперечными перегородками иногда используют упругие уплотняющие кольца 1, закладываемые в паз перегородки 2 (рис. 1.27). В межтрубном пространстве теплообменников в ряде случаев устанавливают и продольные перегородки (см. рис. 1.10).

Толщина продольных перегородок трубного пучка, распределительных камер и крышек должна быть не менее 6 мм.

§ 1.4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛОБМЕННИКОВ

Расчет теплообменников, который, как правило, состоит в оптимальном подборе типоразмера аппарата для конкретных условий теплообмена, требует довольно много времени

Рис. 1.28. Схема автоматизированного расчета кожухотрубчатого теплообменника

при использовании традиционных (немашинных) приемов. При использовании для этих целей ЭВМ значительно сокращается время расчета и, как правило, гарантируется выбор наиболее экономичного теплообменника. В связи с этим в проектных организациях, занимающихся расчетами теплообменников, разработаны программы их автоматизированных расчетов.

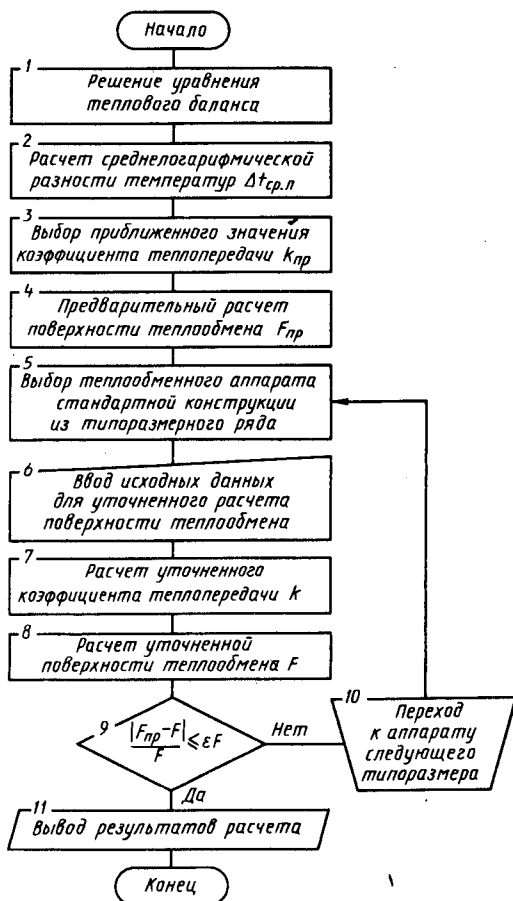
Рассмотрим порядок автоматизированного расчета кожухотрубчатого теплообменника.

Предположим, что по данным анализа опросного листа по теплообменникам разных конструкций выбран кожухотрубчатый теплообменник. Сформулируем задачу: выбрать из стандартного типоразмерного ряда аппарат с минимальной теплообменной поверхностью, обеспечивающей передачу требуемого количества теплоты. На рис. 1.28 приведена схема автоматизированного расчета.

1. Расчет по заданным температурам теплоносителей и их расходам по уравнению теплового баланса одного из неизвестных параметров процесса (температуры или расход одного из теплоносителей)

$$Q' = G_o (i_{он} - i_{ок}) = G_v (i_{вк} - i_{вн}),$$

где Q' — тепловой поток; G_o и G_v — расход теплоносителей, отдающего (горячего) и воспринимающего (холодного) теплоту; $i_{он}$ и $i_{ок}$ — начальная и конечная энтальпии горячего теплоносителя; $i_{вн}$ и $i_{вк}$ — начальная и конечная энтальпии холодного теплоносителя.



2. Определение, в зависимости от типа движения теплоносителей, среднелогарифмической разности температур $\Delta t_{\text{ср. л.}}$ при противоточном движении

$$\Delta t_{\text{ср. л.}} = [(t_{\text{гн}} - t_{\text{хк}}) - (t_{\text{гк}} - t_{\text{хн}})] / \ln \frac{t_{\text{гн}} - t_{\text{хн}}}{t_{\text{гк}} - t_{\text{хн}}};$$

при прямоточном движении

$$\Delta t_{\text{ср. л.}} = [(t_{\text{гн}} - t_{\text{хн}}) - (t_{\text{гк}} - t_{\text{хк}})] / \ln \frac{t_{\text{гн}} - t_{\text{хн}}}{t_{\text{гк}} - t_{\text{хк}}},$$

при смешанном и перекрестном движении

$$\Delta t_{\text{ср. л.}} = \psi [(t_{\text{гн}} - t_{\text{хн}}) - (t_{\text{гк}} - t_{\text{хк}})] / \ln \frac{t_{\text{гн}} - t_{\text{хк}}}{t_{\text{гк}} - t_{\text{хн}}},$$

где $t_{\text{гн}}$ и $t_{\text{гк}}$ — начальная и конечная температуры горячего теплоносителя; $t_{\text{хн}}$ и $t_{\text{хк}}$ — начальная и конечная температуры холодного теплоносителя;

$$\psi = \frac{\sqrt{R^2 + 1}}{R_1 - 1} \frac{\ln \frac{1 - R}{1 - PR}}{\ln \frac{2 - P(R + 1 - \sqrt{R^2 + 1})}{2 - P(R + 1 + \sqrt{R^2 + 1})}};$$

$$P = \frac{t_{\text{гк}} - t_{\text{хн}}}{t_{\text{гн}} - t_{\text{хн}}}; \quad R = \frac{t_{\text{гн}} - t_{\text{гк}}}{t_{\text{хн}} - t_{\text{хк}}}.$$

3. Выбор по справочным данным приближенного значения коэффициента теплопередачи $k_{\text{пр.}}$.

4. Расчет предварительной поверхности теплообмена

$$F_{\text{пр}} = Q' / (k_{\text{пр}} \Delta t_{\text{ср. л.}}).$$

5. Выбор теплообменного аппарата из стандартного типоразмерного ряда, имеющегося в памяти машины, по поверхности теплообмена.

6. Ввод исходных геометрических параметров выбранного теплообменника для уточненного расчета.

7. Расчет коэффициента теплопередачи k с учетом геометрических размеров выбранного теплообменника и условий работы:

$$k = \left[\frac{A}{\beta_{\text{г}}} + \sum \theta + \frac{E}{\beta_{\text{х}}} \right]^{-1},$$

где A и E — коэффициенты ($A = d_{\text{н}}/d_{\text{в}}$ и $E = 1$ для горячего теплоносителя в трубах; $A = 1$ и $E = d_{\text{н}}/d_{\text{в}}$ для горячего теплоносителя в межтрубном пространстве; $d_{\text{н}}$ и $d_{\text{в}}$ — наружный и внутренний диаметры трубы теплообменника); $\beta_{\text{г}}$ — коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке; $\beta_{\text{х}}$ — коэффициент теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю; $\sum \theta$ — суммарное термическое сопротивление.

8. Расчет уточненной поверхности теплообмена $F = Q' / (k \Delta t_{\text{ср. л.}}).$

9. Проверка условия заданного приближения расчетной поверхности теплообмена к поверхности выбранного аппарата. Если условие заданного приближения не выполняется, то осуществляется переход к аппарату следующего типоразмера. Если условие заданного приближения расчетной поверхности к поверхности теплообмена выбранного аппарата выполняется, то происходит вывод результатов расчета с указанием: схемы движения теплоносителей; параметров теплоносителей (t , i , G) на входе и выходе из аппарата; поверхности теплообмена и коэффициента теплопередачи; основных конструктивных размеров; схемы расположения труб и др.

§ 1.5. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Расчет на прочность элементов кожухотрубчатых аппаратов проводят в соответствии с разработанным ВНИИНЕФТЕМАШем ОСТ 26.1185—81 (Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Элементы теплообменных аппаратов). Методы расчета распространяются на стальные, работающие при статических и повторно-статических нагрузках аппараты с неподвижными трубными решетками, компенсатором или расширителем на кожухе, а также на аппараты с U-образными трубами и плавающей головкой. При этом следует учитывать все сочетания давлений в трубном и межтрубном пространствах и температур труб и кожуха, возможные при пуске, в рабочих условиях, при промывке или испытаниях аппарата, с целью определения экстремальных значений расчетных характеристик для каждого из элементов аппарата.

Прежде чем приступить к анализу приведенных в указанном стандарте расчетных зависимостей, рассмотрим деформации и нагрузки, возникающие в элементах кожухотрубчатых аппаратов при воздействии на них давлений и температур.

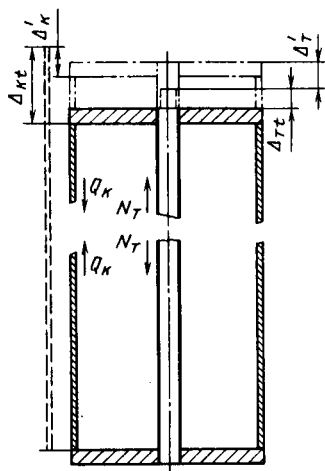
Осевые деформации и нагрузки в теплообменниках типа Н и К. Рассмотрим случай, когда трубная решетка, не деформируясь, перемещается параллельно своему первоначальному состоянию. Будем полагать, что температура кожуха t_k равномерно распределена по длине и сечению аппарата, а температура теплообменных труб постоянна и равна t_r .

Поскольку кожух теплообменных аппаратов обычно теплоизолирован, в расчетах примем t_k равной средней температуре продукта, находящегося в межтрубном пространстве. В этом случае температура стенки трубы

$$t_r = 0,5 (t_r - q/\beta_r + t_x + q/\beta_x),$$

где t_r , t_x — средние температуры соответственно горячего и холодного теплоносителя, °С; q — плотность теплового потока, Вт/м²; β_r , β_x — коэффициенты теплоотдачи со стороны соответственно

Рис. 1.29. Схема и определению температурных деформаций элементов теплообменника



горячего и холодного теплоносителя, Вт/(м³·°C).

Если $\beta_r \approx \beta_x$, т. е. коэффициенты теплоотдачи в трубном и межтрубном пространстве равны, то принимают $t_r = 0,5(t_r + t_x)$.

Предположим, что аппарат изготовлен при температуре t_0 , причем кожух и каждая из теплообменных труб не имеют после сборки остаточных осевых напряжений. Тогда при нагревании до температур t_k и t_r удлинения кожуха и трубы составят (рис. 1.29):

$$\Delta_{\kappa t} = \alpha_{\kappa}(t_k - t_0)L; \quad (1.8)$$

$$\Delta_{\tau t} = \alpha_{\tau}(t_r - t_0)L; \quad (1.9)$$

здесь α_{κ} и α_{τ} — температурные коэффициенты линейного расширения соответственно кожуха и труб, °C⁻¹; L — расстояние между трубными решетками (длина труб и кожуха), мм.

Если, например, $\Delta_{\kappa t} > \Delta_{\tau t}$, то при нагревании аппарата кожух сжимается на величину Δ'_{κ} , а каждая труба растягивается на величину Δ'_{τ} (условие совместности деформаций кожуха и труб).

Сжатие кожуха вызывает появление осевой силы Q_{κ} , Н/мм (на единицу длины окружности кожуха). Связь между Δ'_{κ} и Q_{κ} имеет вид

$$\Delta'_{\kappa} = Q_{\kappa}L/(s_{\kappa}E_{\kappa}), \quad (1.10)$$

где s_{κ} — толщина кожуха, мм; E_{κ} — модуль упругости материала кожуха, МПа.

Соотношение между Δ'_{τ} и осевой силой в трубе N_{τ} :

$$\Delta'_{\tau} = N_{\tau}L/[\pi(d_{\tau} - s_{\tau})s_{\tau}E_{\tau}], \quad (1.11)$$

где d_{τ} и s_{τ} — соответственно наружный диаметр и толщина стенки теплообменной трубы, мм; E_{τ} — модуль упругости материала трубы, МПа.

Приравняв деформации кожуха и труб

$$\Delta_{\kappa t} - \Delta'_{\kappa} = \Delta_{\tau t} + \Delta'_{\tau} \quad (1.12)$$

и воспользовавшись условием равновесия трубной решетки $\pi D_{cp}Q_{\kappa} = iN_{\tau}$, можно найти

$$N_{\tau} = \pi(d_{\tau} - s_{\tau})s_{\tau}E_{\tau}[\alpha_{\kappa}(t_k - t_0) - \alpha_{\tau}(t_r - t_0)]/(1 + \rho);$$

$$Q_{\kappa} = iN_{\tau}/(\pi D_{cp}),$$

где $\rho = E_{\tau}i(d_{\tau} - s_{\tau})s_{\tau}/(E_{\kappa}s_{\kappa}D_{cp})$; i — число труб, закрепленных в решетке; D_{cp} — средний диаметр кожуха, мм.

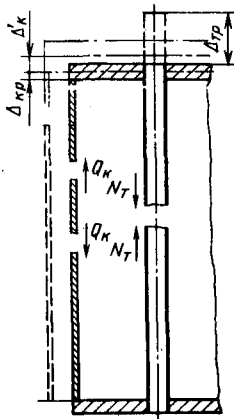


Рис. 1.30. Схема к определению деформации элементов теплообменника под действием давления

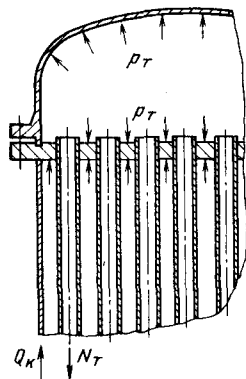


Рис. 1.31. Схема равновесия элемента теплообменника

Очевидно, что в общем случае поступательное перемещение трубной решетки может быть обусловлено действием не только разности температур труб и кожуха, но и давлений в трубном и межтрубном пространствах.

Рассмотрим независимые перемещения кожуха и системы «трубная решетка — трубы» под действием давления. В этом случае под действием разности давлений снаружи и изнутри теплообменной трубы в ней возникают окружные напряжения

$$\sigma_{тр} = 0,5 (p_t - p_m) (d_t - s_t) / s_t;$$

соответствующая осевая деформация

$$\Delta_{тр} = \mu \sigma_{тр} L / E_t = 0,5 \mu (p_t - p_m) (d_t - s_t) L / (E_t s_t); \quad (1.13)$$

где μ — коэффициент Пуассона; p_t и p_m — давления соответственно в трубном и межтрубном пространствах, МПа.

Аналогично действие давления в межтрубном пространстве приводит к возникновению кольцевых напряжений в обечайке кожуха

$$\sigma_{кр} = 0,5 p_m D_{ср} / s_k$$

и осевой деформации кожуха

$$\Delta_{кр} = \mu \sigma_{кр} L / E_k = 0,5 \mu p_m D_{ср} L / (s_k E_k). \quad (1.14)$$

Условие совместности деформаций кожуха и труб при действии только давления имеет вид (рис. 1.30): $\Delta_{кр} + \Delta'_k = -\Delta'_t + \Delta_{тр}$.

В этом случае условие равновесия трубной решетки можно записать в виде

$$\pi D_{ср} Q_k = -Q_m + Q_t + i N_t, \quad (1.15)$$

где Q_m — сила, действующая на трубную решетку со стороны межтрубного пространства, Н; $Q_m = p_m (\pi a^2 - 0,25 \pi d_t^2)$ (здесь

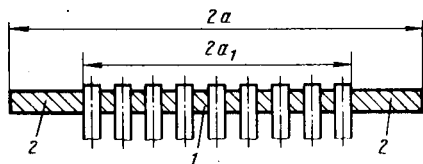


Рис. 1.32. Схема и определение размеров трубной решетки

a — внутренний радиус кожуха, мм); $Q_T = 0,25p_T l \pi (d_T - 2s_T)^2$ — неуравновешенная сила, возникающая от давления в трубном пространстве и действующая на трубную решетку со стороны греющей камеры, Н (рис. 1.31).

Таким образом, уравнение (1.15) примет вид

$$\pi D_{cp} Q_K = -p_M (\pi a^2 - 0,25 \pi d_T^2) + 0,25 p_T l \pi (d_T - 2s_T)^2 + i N_T. \quad (1.16)$$

При совместном влиянии разности температур (корпуса и труб) и разности давлений (в трубном и межтрубном пространствах) условие совместности деформаций имеет вид

$$\Delta_{Kt} + \Delta_{Kp} + \Delta_K^* = -\Delta_T^* + \Delta_{Tt} + \Delta_{Tp}. \quad (1.17)$$

Подставив (1.8)—(1.11), (1.13) и (1.14) в (1.17), получим

$$\alpha_K (t_K - t_0) + 0,5 \mu p_M D_{cp} / (s_K E_K) + Q_K / (s_K E_K) = \alpha_T (t_T - t_0) + 0,5 \mu (p_T - p_M) (d_T - s_T) / (E_T s_T) - N_T / [\pi (d_T - s_T) s_T E_T], \quad (1.18)$$

где Q_K и N_T — осевые силы в кожухе и трубах при совместном действии давления и температуры.

Решив совместно (1.18) и (1.16), можно получить искомые значения Q_K и N_T . В ОСТ 26 1185—81 решение этой системы приведено в виде

$$Q_K = 0,5a [p_T - p_0 / (1 + \rho' K_d)]; \quad (1.19)$$

$$N_T = (\pi \alpha_1^2 / i) [(\eta_M p_M - \eta_T p_T) + f_0 p_0], \quad (1.20)$$

где Q_K в Н/мм; N_T — в Н; a — в мм; $p_0 = [\alpha_K (t_K - t_0) - \alpha_T (t_T - t_0)] K_y L + [\eta_T - 1 + 0,15i (d_T - s_T)^2 / a_1^2 + m_n (m_n + 0,5\beta K_d)] p_T - [\eta_M - 1 + 0,15i (d_T - s_T)^2 / a_1^2 + m_n (m_n + 0,3\rho' K_p)] p_M$ — в МПа [здесь $K_y = E_T (\eta_T - \eta_M) / L$; $\eta_T = 1 - 0,25i (d_T - 2s_T)^2 / a_1^2$; $\eta_M = 1 - 0,25id_T^2 / a_1^2$; $m_n = a / a_1$; $\rho' = K_y a_1 L / (E_K s_K)$; $K_d = K_p = 1$]; a_1 — расстояние от оси кожуха до наиболее удаленной трубы, мм; $f_0 \approx 0,4$ — для аппаратов с неподвижными трубными решетками.

В рассматриваемом случае предполагаем, что решетка состоит из центральной перфорированной части 1 диаметром $2a_1$ и наружного неперфорированного кольцевого пояса 2 шириной $a - a_1$ (рис. 1.32).

Упрощенный расчет элементов аппарата. Выполненный анализ теплообменников жесткой конструкции позволил разработать упрощенный метод расчета основных элементов теплообменного аппарата (ОСТ 26 1185—81). Такой расчет выполняют для аппа-

Рис. 1.33. Зависимость f_1 от A' и B'

ратов, предназначенных для работы под давлением не более 6,4 МПа и перепаде температур труб и кожуха не более 40 °С. Расчет применим при $(a - a_1)/s_p \leq 3$ (где s_p — толщина трубной решетки) и отсутствии дополнительных требований к жесткости трубной решетки.

Для теплообменных аппаратов с неподвижными трубными решетками, компенсатором или расширителем на кожухе толщина трубной решетки, мм,

$$s_p = f_1 s_k / (\eta_T - \eta_M) + c, \quad (1.21)$$

где $f_1 = f_1(A', B')$ — вспомогательная функция (рис. 1.33); s_k — толщина стенки кожуха аппарата, мм; η_T и η_M — коэффициенты влияния давления на трубную решетку [см. (1.20)]; c — конструктивная прибавка, мм;

$$A' = 0,5 p_o / ([\sigma_a]_p \varphi_p); \quad B' = \psi_o L / s_k,$$

$[\sigma_a]_p$ — допускаемое напряжение для материала решетки в условиях малоциклового нагружения, МПа; $\varphi_p = 1 - d_o/t_p$ — коэффициент ослабления трубной решетки (d_o — диаметр отверстия в решетке, мм; t_p — шаг отверстий для труб в решетке, мм); ψ_o — коэффициент жесткости перфорированной плиты:

η_T	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
ψ_o	0,12	0,20	0,30	0,44	0,59

Для аппарата с U-образными трубами, плавающей головкой и компенсатором на плавающей головке толщина трубной решетки, мм,

$$s_p = \frac{D_{сп}}{4,2} \sqrt{\frac{p}{\varphi_p [\sigma]_p}} + c, \quad (1.22)$$

где $D_{сп}$ — средний диаметр прокладки, мм; $p = \max \{p_M; p_T; p_T - p_M\}$; $[\sigma]_p$ — допускаемое напряжение для материала решетки, МПа.

Расчетная толщина трубной решетки должна обеспечивать возможность крепления труб в решетке и во всех случаях

$$s_p \geq 0,5 D_E \sqrt{(p_T - p_M) / [\sigma]_p} + c, \quad (1.23)$$

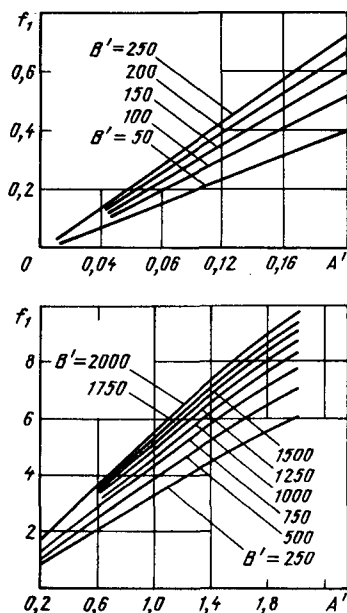
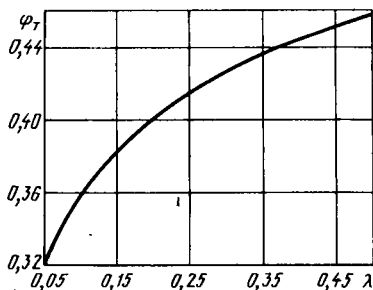


Рис. 1.34. Зависимость φ_T от λ 

где s_p — в мм; D_E — максимальный диаметр окружности, вписанной в площадь решетки, не занятой трубами, мм.

Толщина решетки, выполненной за одно целое с фланцем, должна быть не менее толщины кольца ответного фланца.

Для аппаратов, многоходовых по трубному пространству, толщина трубной решетки в сечении канавки, мм,

$$s_n \geq (s_p - c) \max \left\{ \left[1 - \sqrt{\frac{d_o}{b_n} \left(\frac{t_n}{t_p} - 1 \right)} \right]; \sqrt{\varphi_p} \right\} + c,$$

где t_n — шаг расположения отверстий в зоне паза (канавки), мм; b_n — ширина паза под прокладку, мм.

Условие прочности кожуха в месте присоединения к решетке имеет вид

$$0,5K_\sigma \sigma_{\max} \leq [\sigma]_K, \quad (1.24)$$

где K_σ — эффективный коэффициент концентрации напряжений, зависящий от способа крепления решетки к фланцу или кожуху (по ОСТ 26 1185—81); $\sigma_{\max} = \max \{ \sigma_1; \sigma_2 \}$ (здесь $\sigma_1 = Q_R/s_R$; $\sigma_2 = |p_M|a/s_R$); $[\sigma]_K$ — допускаемое напряжение для материала кожуха в условиях малоциклового нагружения, МПа.

При $Q_R < 0$ кожух проверяют на устойчивость по ГОСТ 14249—80. Теплообменные трубы, сжатые (растянутые) силой N_T , рассчитывают на прочность по условию

$$\frac{N_{Ti}}{\pi (d_T - s_T) s_T} \leq [\sigma]_T,$$

где $[\sigma]_T$ — допускаемое напряжение для материала труб, МПа.

Если $N_{Ti} < 0$, то трубы проверяют на устойчивость по условию

$$\frac{N_{Ti}}{\varphi_T \pi (d_T - s_T) s_T} \leq [\sigma]_T,$$

где φ_T — коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе, определяемый по рис. 1.34 в зависимости

от $\lambda = 1,3 \sqrt{\frac{[\sigma]_T}{E_T} \frac{L_p}{(d_T - s_T)}}$ (здесь $L_p = L$ для аппаратов без перегородок в кожухе; $L_p = \max \{ L_{2R}; 0,7L_{1R} \}$ для аппаратов с перегородками (L_{2R} — максимальное расстояние между перегородками; L_{1R} — максимальная длина трубы между решеткой и перегородкой)).

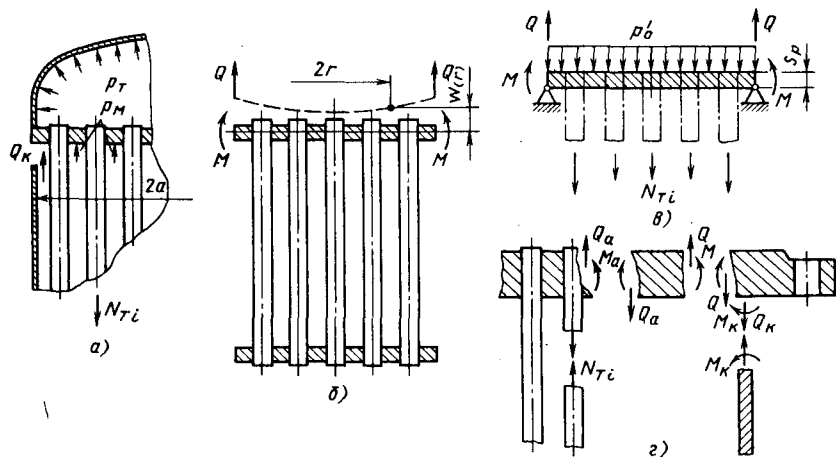


Рис. 1.35. Схемы деформации элементов теплообменника

Условием прочности крепления труб в решетке является выражение $N_T \leq [N_T]$, где $[N_T]$ — допускаемое усилие в соединении трубы с решеткой. Для развальцованных труб

$$[N_T] = \pi d_T l_B [q],$$

где l_B — глубина развальцовки труб, мм; $[q]$ — удельная нагрузка на единицу площади соединения ($[q] = 14,7$ МПа для гладко развальцованных труб; $[q] = 29,4$ МПа для труб, развальцованных в пазы; $[q] = 39,2$ МПа для труб, развальцованных с отбортовкой).

Для труб, соединенных с решеткой сваркой,

$$[N_T] = 0,3\pi d_T \delta \min \{[\sigma_T]; [\sigma_p]\},$$

где δ — высота сварного шва в месте сварки трубы с решеткой, мм; $[\sigma_T]$ и $[\sigma_p]$ — допускаемые напряжения для материала соответственно труб и решетки, МПа.

Для труб, соединенных с решеткой сваркой с развальцовкой,

$$[N_T] = d_T l_B [q] + 0,57 d_T \delta \min \{[\sigma_T]; [\sigma_p]\}.$$

Деформация трубной решетки. При упрощенном расчете принято, что под действием напряжений от температуры и давления теплоносителей трубная решетка не деформируется, а перемещается поступательно.

Очевидно, трубную решетку можно рассматривать как опертую по контуру перфорированную пластину, испытывающую влияние только распределенной нагрузки (давления) $p'_0 = p_M \eta_M$ — $p_T \eta_T$. Под действием этой нагрузки решетка прогибается, что приводит к возникновению в заделке изгибающего момента M . В реальной ситуации добавляется и влияние сил N_{Ti} .

Для оценки прогиба трубных решеток выделим трубный пучок (рис. 1.35, а). Влияние корпуса и распределительной камеры на трубную решетку можно заменить силой

$$Q = 0,5ap_T - Q_K. \quad (1.25)$$

Пусть трубный пучок растягивается приложенными по контуру трубных решеток силами Q (рис. 1.35, б). При этом решетки под влиянием изгибающих моментов M прогибаются, и вследствие этого в каждой из труб возникает осевая сила $N_{Ti}(r)$. С учетом площади, на которую она действует, можно определить распределенную нагрузку (давление) $p(r) = N_{Ti}(r)/f_i$, где $f_i = \pi a^2/i$ — площадь поверхности решетки, приходящейся на одну трубу.

Удлинение каждой трубы

$$\Delta_T^*(r) = N_{Ti}(r) L / [\pi (d_T - s_T) s_T E_T] \quad (1.26)$$

связано с прогибом $w(r)$ решетки соотношением

$$0,5\Delta_T^*(r) = w(r). \quad (1.27)$$

Поскольку рассматриваем упругие прогибы решетки, распределенная нагрузка $p(r)$ на решетку должна быть пропорциональна ее прогибу, т. е.

$$p(r) = kw(r) = N_{Ti}(r) L / [\pi (d_T - s_T) s_T E_T f_i]. \quad (1.28)$$

Из (1.26)–(1.28) $k = 2E_T f_T / (L f_i)$, где $f_T = \pi (d_T - s_T) s_T$.

В общем случае кроме силы Q и давления $p(r)$ на решетку действует еще и приведенное давление $p'_0 = \eta_m p_m - \eta_T p_T$ (рис. 1.35, в); дифференциальное уравнение, описывающее прогиб в условиях такого нагружения, имеет вид

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{2}{x} \frac{d^3 w}{dx^3} - \frac{1}{x^2} \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{1}{x^3} \frac{dw}{dx} + w = \frac{p'_0}{k},$$

где $x = \beta r$; $\beta = \sqrt[4]{k/D_\Psi}$; $D_\Psi = D_c \Psi_p$; $D_c = E_p s_p^3 / [12(1 - \mu^2)]$ — жесткость неперфорированной круглой пластины с размерами трубной решетки (E_p — модуль упругости материала решетки, МПа).

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид

$$w = p'_0/k + C_1 \operatorname{ber} x + C_2 \operatorname{bei} x,$$

где $\operatorname{ber} x = 1 - (2!)^{-2} (x/2)^4 + (4!)^{-2} (x/2)^8 - \dots$; $\operatorname{bei} x = (x/2)^2 - (3!)^{-2} (x/2)^6 + (5!)^{-2} (x/2)^{10} - \dots$

Постоянные C_1, C_2 в этом решении определим из граничных условий. Предварительно мы условились рассматривать трубную решетку состоящей из двух зон (см. рис. 1.32) — центральной перфорированной части диаметром $2a_1$, испытывающей со стороны упругого основания действие распределенной нагрузки $p(r)$, и кольца шириной $a - a_1$, не испытывающего этой нагрузки. Соответственно изгибающий момент и перерезывающую силу на границе перфорированной и неперфорированной частей ре-

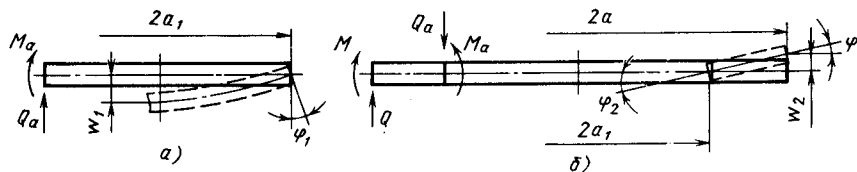


Рис. 1.36. Схемы деформации трубной решетки

шетки обозначим через M_a и Q_a , на внешней границе неперфорированной части — M и Q (рис. 1.35, з).

Из условия, что изгибающий момент на внешнем контуре перфорированной части решетки

$$M(r) = -D_\psi (d^2 w / dr^2 + 0,5\mu dw/dr) = M_a,$$

а перерезывающая сила

$$Q(r) = D_\psi (d^3 w / dr^3 + d^2 w / dr^2 - dw/r dr) = Q_a,$$

получим следующие выражения для постоянных интегрирования

$$C_1 = \frac{1}{\beta^2 D_\psi T} \left[M_a \operatorname{ber}' \omega - \frac{Q_a}{\beta} f_2(\omega) \right];$$

$$C_2 = \frac{1}{\beta^2 D_\psi T} \left[M_a \operatorname{bei}' \omega + \frac{Q_a}{\beta} f_1(\omega) \right],$$

где $T = -f_1(\omega) \operatorname{ber}' \omega - f_2(\omega) \operatorname{bei}' \omega$; $\omega = \beta a$; $f_1(\omega) = \frac{1-\mu}{\omega} \operatorname{ber}' \omega + \operatorname{bei} \omega$; $f_2(\omega) = \frac{1-\mu}{\omega} \operatorname{bei}' \omega - \operatorname{ber} \omega$; штрихом отмечена производная соответствующей функции по x .

В результате найдем

$$w = \frac{Q_a}{\beta^3 D_\psi T} [f_1(\omega) \operatorname{bei} x - f_2(\omega) \operatorname{ber} x] +$$

$$+ \frac{M_a}{\beta^2 D_\psi T} [\operatorname{ber}' \omega \operatorname{ber} x + \operatorname{bei}' \omega \operatorname{bei} x];$$

$$\varphi = \frac{Q_a}{\beta^2 D_\psi T} [f_1(\omega) \operatorname{bei}' x - f_2(\omega) \operatorname{ber}' x] +$$

$$+ \frac{M_a}{\beta D_\psi T} [\operatorname{ber}' \omega \operatorname{ber}' x + \operatorname{bei}' \omega \operatorname{bei}' x],$$

где φ — угол поворота трубной решетки на радиусе r .

Для контура перфорированной части решетки (рис. 1.36, а) при $r = a_1$ эти уравнения приведем к виду

$$w_1 = \frac{1}{ka_1} (\Phi_1 Q_a + \Phi_2 \beta M_a) + \frac{1}{k} (\eta_m p_m - \eta_T p_T);$$

$$\varphi_1 = \frac{\beta l}{ka_1} (\Phi_2 Q_a + \Phi_3 \beta M_a); \quad (1.29)$$

здесь $\Phi_1 = \Phi_1(\beta a_1)$; $\Phi_2 = \Phi_2(\beta a_1)$; $\Phi_3 = \Phi_3(\beta a_1)$ — функции, учитывающие влияние труб и беструбного края решетки на ее

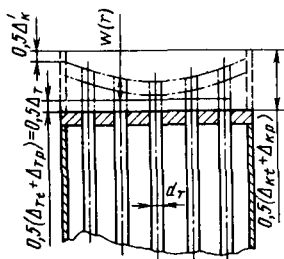


Рис. 1.37. Схема совместной деформации трубной решетки, корпуса и трубы

изгиб (их значения табулированы и приведены в ОСТ 26 1185—81).

Учитывая условие равновесия неперфорированной кольцевой части трубной решетки (рис. 1.36, б) $Q_a = Qa/a_1 + 0,5 (a^2 - a_1^2) (p_m - p_t)/a_1$ и условие совместности деформаций на границе перфорированной и неперфорированной

частей трубной решетки ($\varphi_1 = \varphi_2$), получим выражения для прогибов и углов поворота на наружном контуре трубной решетки (рис. 1.36, а):

$$w_2(r) = (a^2/D_c) [T_{11}Qa + T_{12}M + T_{13}(p_t - p_m)a^2 + (\eta_m p_m - \eta_t p_t)/k]; \quad (1.30)$$

$$\varphi_2(r) = (a/D_c) [T_{12}Qa + T_{22}M + T_{23}(p_t - p_m)a^2], \quad (1.31)$$

где T_{ij} — специальные функции, табулированные в ОСТ 26 1185—81.

Расчет усилий в системе кожух — трубная решетка для аппаратов типа Н. Для определения усилия Q и момента M , возникающих в месте соединения решетки с кожухом или фланцем, запишем условие совместности деформаций труб Δ_T и кожуха Δ_K (рис. 1.37):

$$\Delta_T + 2w(r) = \Delta_K, \quad (1.32)$$

где $\Delta_T = \alpha_T (t_t - t_0) L + (d_T p_m - d_0 p_t) \mu L / (2E_T s_T) = \Delta_{Tt} + \Delta_{Tp}$; $d_0 = d_T - 2s_T$; $\Delta_K = \alpha_K (t_K - t_0) L - (Q_K - \mu a p_m) L / (E_K s_K) = \Delta_{Kt} + \Delta_{Kp} - \Delta'_K$.

Подставив в (1.32) выражение (1.30) и выполнив преобразования, получим

$$(T_{11} + \rho_1) Qa + T_{12}M = \rho_1 a^2, \quad (1.33)$$

где $\rho_1 = [0,5\rho_1 - T_{13} + \rho_3 (2\eta_T f_i / f_T + \mu d_0 / s_T)] p_t - [\mu\rho_1 - T_{13} + \rho_3 (2\eta_m f_i / f_T + \mu d_T / s_T)] p_m + 2 [\alpha_K (t_K - t_0) - \alpha_T (t_t - t_0)] E_T \rho_3$; $\rho_1 = LD_c / (2E_K s_K a^3)$; $\rho_3 = LD_c / (4E_T a^4)$.

Уравнение (1.33) содержит две подлежащие определению величины — a и M . Для нахождения изгибающего момента M на наружном контуре решетки воспользуемся условием равенства углов поворота трубной решетки φ_r и фланца φ_f (в месте их соединения).

Угол поворота фланца φ_f с учетом того, что он поворачивается вместе с ответным фланцем, скрепленным с распределительной камерой, запишем в виде

$$\varphi_f = \frac{a}{R_1 K_\Phi} (m_1 p_m - m_2 p_t - M), \quad (1.34)$$

где K_Φ — коэффициент жесткости фланцевого соединения при изгибе, Н·мм:

$$K_\Phi = \frac{E_1 h_1^3 b_1}{12 R_1^3} + \frac{E_2 h_2^3 b_2}{12 R_2^3} + \frac{\beta_1 a E_K s_K^3}{6 (1 - \mu^2) R_1} \left(1 + \frac{\beta_1 h_1}{2} \right) + \frac{\beta_2 a E_D s_2^3}{6 (1 - \mu^2) R_2} \left(1 + \frac{\beta_2 h_2}{2} \right); \quad (1.35)$$

$m_1 = 0,5 (1 + \beta_1 h_1) / \beta_1^2$; $m_2 = 0,5 (1 + \beta_2 h_2) / \beta_2^2$; $\beta_1 = 1,2 / \sqrt{a s_K}$; $\beta_2 = 1,2 / \sqrt{a s_2}$; E_1, E_2, E_K, E_D — модули упругости материала соответственно фланца, ответного фланца, кожуха и распределительной камеры, МПа; $R_1, R_2, h_1, h_2, b_1, b_2$ — средний радиус, высота и ширина соответственно фланца (индекс 1) и ответного фланца (индекс 2), мм; s_2 — толщина распределительной камеры, мм.

Приравняв Φ и Φ_Φ [см. уравнения (1.31) и (1.34)], получим

$$T_{12} Q a + T_{22} \rho_2 M = \rho_2 a^2, \quad (1.36)$$

где $\rho_2 = T_{23} (\rho_M - \rho_T) + (m_1 \rho_M - m_2 \rho_T) \rho_2 / a^2$; $\rho_2 = D_0 / (K_\Phi R_1)$.

Решив совместно (1.36) и (1.33), найдем

$$M = a^2 \frac{(T_{11} + \rho_1) \rho_2 - T_{12} \rho_1}{(T_{11} + \rho_1) (T_{22} + \rho_2) - T_{12}^2}; \quad (1.37)$$

$$Q = a \frac{(T_{22} + \rho_2) \rho_1 - T_{12} \rho_2}{(T_{11} + \rho_1) (T_{22} + \rho_2) - T_{12}^2}. \quad (1.38)$$

В ОСТ 26 1185—81 эта система приведена к виду

$$M = \left(\frac{a_1}{\beta} \right) \frac{\rho_0 (T_1 + \rho') - \rho_0 T_2}{(T_1 + \rho') + (T_3 + \rho'_1) - T_2^2}; \quad (1.39)$$

$$Q = a_1 \frac{\rho_0 (T_3 + \rho'_1) - \rho'_1 T_2}{(T_1 + \rho') (T_3 + \rho'_1) - T_2^2}, \quad (1.40)$$

где $\beta = (1,8/s_p) \sqrt[4]{K_y s_p / (\Phi_0 E_p)}$; $\rho' = K_y a_1 L / (E_K s_K)$; $\rho'_1 = K_y a a_1 / (\beta^2 K_\Phi R_1)$;

$K_y = E_T (\eta_T - \eta_M) / L$; $\rho'_1 = (m_1 \rho_M - m_2 \rho_T) K_y / (\beta K_\Phi)$. Коэффициенты T_{kj} и T_i табулированы в ОСТ 26 1185—81. Расчет усилий Q_a, Q_K и моментов M_a, M_K не представляет затруднений. Например:

$$Q_a = a Q / a_1 + 0,5 (a^2 - a_1^2) (\rho_M - \rho_T) / a_1; \quad (1.41)$$

$$M_a = M + Q (a - a_1); \quad (1.42)$$

$$Q_K = 0,5 a \rho_T - Q; \quad (1.43)$$

$$M_K = (T_2 Q + T_2 Q + T_3 \beta M) k_1 / (\rho' K_\Phi \beta) - 0,5 \rho_M / \beta_1^2, \quad (1.44)$$

где $k_1 = \beta_1 a E_K s_K^3 / [6 (1 - \mu^2) R_1]$.

Уточненный расчет элементов теплообменных аппаратов типа Н и К выполняют для конструкций, не отвечающих требованиям упрощенного расчета.

Коэффициент A

$m_n = a/a_1$	Значения A при $\omega = \beta a$							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	10
-0,6	0,45	0,47	0,50	0,52	0,55	0,55	0,55	0,55
-0,4	0,31	0,33	0,36	0,38	0,40	0,39	0,39	0,38
-0,2	0,17	0,19	0,27	0,35	0,31	0,27	0,29	0,31
0	0,13	0,27	0,40	0,45	0,38	0,37	0,39	0,41
0,2	0,27	0,41	0,53	0,56	0,47	0,48	0,51	0,54
0,4	0,41	0,55	0,66	0,67	0,58	0,61	0,64	0,67
0,6	0,55	0,68	0,78	0,78	0,71	0,72	0,78	0,81
0,8	0,69	0,82	0,91	0,88	0,83	0,88	0,92	0,96
1,0	0,83	0,96	1,04	0,99	0,96	1,03	1,07	1,12

Таблица 1.3

Коэффициент B

$m_n = a/a_1$	Значения B при $\omega = \beta a$							
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	10
0,9	0,82	0,93	1,00	0,95	0,94	1,00	1,04	1,08
0,8	0,80	0,91	0,96	0,91	0,91	0,97	1,01	1,05
0,7	0,79	0,88	0,92	0,87	0,88	0,94	0,98	1,02
0,6	0,78	0,86	0,88	0,84	0,86	0,92	0,95	0,99
0,5	0,76	0,82	0,84	0,80	0,84	0,89	0,92	0,96
0,4	0,75	0,80	0,80	0,78	0,82	0,87	0,90	0,94
0,3	0,74	0,77	0,76	0,75	0,80	0,85	0,88	0,91
0,2	0,73	0,74	0,73	0,74	0,79	0,84	0,86	0,90
0,1	0,71	0,72	0,71	0,73	0,78	0,82	0,85	0,88
0	0,70	0,70	0,71	0,72	0,78	0,81	0,84	0,87

Прочность перфорированной части трубной решетки рассчитывают из условия

$$\sigma_{\max} = \frac{6M_{\max}}{\varphi_p s_p^2} \leq 2[\sigma]_p, \quad (1.45)$$

где $M_{\max} = A |Q_a|/\beta$ при $-0,7 \leq m = \beta M_a/Q_a < 1$; $M_{\max} = B |M_a|$ при $0 \leq n = Q_a/(\beta M_a) < 1$ (A и B — коэффициенты — табл. 1.2 и 1.3).

Условие прочности трубной решетки в месте соединения с кожухом имеет вид

$$\sigma = K_\sigma (6M/s_p^2) < 2[\sigma]_p. \quad (1.46)$$

При развальцовке теплообменных труб кожухотрубчатых теплообменников иногда происходит коробление трубных решеток.

Такое явление наиболее характерно для теплообменников большого диаметра, имеющих относительно малую толщину трубных решеток. Это происходит вследствие того, что в перемычках перфорированной части трубной решетки, нагруженных по контуру после развальцовки труб остаточным давлением $p_{ост}$, возникают напряжения сжатия $\sigma = (1 + \mu) \xi^2 p_{ост} / [1 - \mu (1 + \mu) \xi^2]$, где $\xi = (d_T - 2s_T)/d_T$, т. е. материал трубной решетки после развальцовки в ней труб находится в условиях квазиизотропного сжатия. Следовательно, решетка может терять устойчивость аналогично сжатой по контуру кольцевой пластине, если напряжения сжатия достигнут критического значения $\sigma_{кр} = K_\sigma D_\psi / (4a^2 s_p)$.

Поскольку метод крепления теплообменных труб развальцовкой используют для пластичных материалов, можно считать, что остаточные напряжения в теплообменных трубах не превышают предела текучести, т. е. $0,5 d_T p_{ост} / s_T \leq \sigma_{т.т.}$, где $\sigma_{т.т.}$ — предел текучести материала трубы, МПа.

Очевидно, условие устойчивости трубной решетки можно записать в виде

$$\sigma \leq \sigma_{кр} / n_\gamma,$$

где $n_\gamma = 1,8$ — коэффициент запаса устойчивости, принятый в отрасли.

Отсюда

$$s_p = 2a \sqrt{\frac{1,8 (1 + \mu) (1 - \mu^2) \xi^2 \sigma_{т.т.} s_T}{0,7 [1 - \mu + (1 + \mu) \xi^2] \psi_0 E_p d_T}}. \quad (1.47)$$

В соответствии с изложенным выше толщину трубной решетки проверяем на устойчивость по условию

$$s_p \geq s_{p \min}, \quad (1.48)$$

где $s_{p \min} = 0,655 \sqrt{14,2 a^2 \sigma_{т.т.} / [\psi_0 (1,3 + 0,7 \xi^2) E_p]}$.

Прочность кожуха в месте присоединения к решетке или фланцу рассчитаем по условию (1.24), где

$$\sigma_{\max} = \max \left\{ \frac{|Q_K|}{s_K} + \frac{6 |M_K|}{s_K^2}; \frac{|p_M| a}{s_K} + \frac{1,8 |M_K|}{s_K^2} \right\}.$$

Если условие прочности кожуха в месте соединения с решеткой не выполняется, можно установить переходный пояс увеличенной толщины высотой не менее $2 \sqrt{2 a s_K}$.

Проверку прочности устойчивости труб и узла крепления труб в решетке выполняют так же, как и при упрощенном расчете.

§ 1.6. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

Проблема интенсификации работы кожухотрубчатых теплообменников связана главным образом с выравниванием термических сопротивлений $(\beta F)^{-1}$ на противоположных сторонах

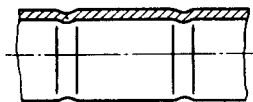


Рис. 1.38. Труба с кольцевыми канавками

теплообменной поверхности. Этого достигают либо увеличением поверхности теплообмена F , например оребрением ее со стороны теплоносителя с меньшим коэффициентом теплоотдачи β , либо увеличением коэффициента теплоотдачи рациональным подбором гидродинамики

теплоносителя. Последнее должно приводить к выравниванию скоростей и температур по сечению потока теплоносителя и, следовательно, к уменьшению термического сопротивления его пограничного слоя. Результаты исследований показывают, что именно сопротивление пограничного слоя является главным фактором, снижающим интенсивность теплопередачи. Рассмотрим два случая теплопередачи, при которых термическое сопротивление определяется межтрубным и трубным пространствами. В первом случае наибольший эффект теплопередачи достигается при поперечном омывании пучка труб, расположенных в шахматном порядке. При этом если критерий Рейнольдса $Re = 120 \dots 1000$, в межтрубном пространстве создается устойчивый турбулентный режим движения, а ламинарный пограничный слой теплоносителя сохраняется лишь на небольшом участке поверхности труб.

Теплообмен значительно улучшается также при ликвидации застойных зон в межтрубном пространстве. Особенно часто такие зоны образуются вблизи трубных решеток, поскольку штуцера ввода и вывода теплоносителя из межтрубного пространства расположены на некотором расстоянии от них. Наиболее радикальный способ исключения образования таких зон — установка распределительных камер на входе и выходе теплоносителя из межтрубного пространства.

Для интенсификации теплообмена иногда используют турбулизаторы — элементы, турбулизирующие или разрушающие пограничный слой теплоносителя на наружной поверхности труб.

Эффект теплоотдачи на наружной поверхности труб существенно повышают кольцевые канавки (рис. 1.38), интенсифицирующие теплообмен в межтрубном пространстве примерно в 2 раза турбулизацией потока в пограничном слое.

В теплообменниках с передачей теплоты от жидкости в трубном пространстве к вязкой жидкости или газу в межтрубном пространстве коэффициенты теплоотдачи с наружной стороны труб примерно на порядок меньше, чем с внутренней стороны. Например, в газожидкостных теплообменниках коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости ($\beta_{ж}$) может достигать $6 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, а со стороны газа ($\beta_{г}$) не превышает $0,1 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Естественно, что применение гладких труб в таких теплообменниках приводит к резкому увеличению их массы и размеров. Стремление интенсифицировать теплоотдачу со стороны малоэффективного теплоно-

Рис. 1.39. Трубы с оребрением

сителя (газы, вязкие жидкости) привело к разработке различных конструкций оребренных труб.

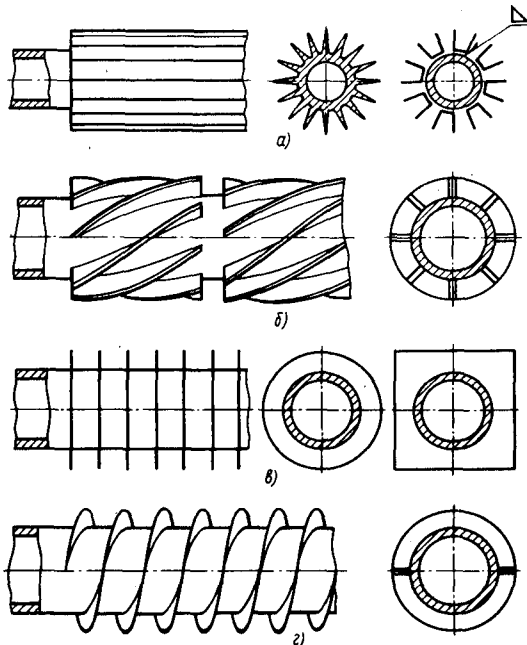
Установлено, что оребрение увеличивает не только теплообменную поверхность, но и коэффициент теплоотдачи от оребренной поверхности к теплоносителю вследствие турбулизации потока ребрами. При этом, однако, надо учитывать возрастание затрат на прокачивание теплоносителя. Применяют трубы с продольными (рис. 1.39, а) и разрезными (рис. 1.39, б) ребрами, с поперечными ребрами различного профиля (рис. 1.39, в). Оребрение на трубах можно выполнить в виде спиральных ребер (рис. 1.39, г), иголок различной толщины и др. Оребрение наиболее эффективно, если обеспечивается соотношение $\beta_{\Gamma} F_{\Gamma} = \beta_{\text{ж}} F_{\text{ж}}$, где F_{Γ} и $F_{\text{ж}}$ — поверхности теплообмена со стороны соответственно газа и жидкости.

Эффективность ребра, которую можно характеризовать коэффициентом теплоотдачи, зависит от его формы, высоты и материала. Если требуется невысокий коэффициент теплоотдачи, необходимую эффективность могут обеспечить стальные ребра, при необходимости достижения больших коэффициентов целесообразно применение медных или алюминиевых ребер.

Эффективность ребра резко снижается, если оно не изготовлено за одно целое с трубой, не приварено или не припаяно к ней.

Если термическое сопротивление определяется трубным пространством, используют методы воздействия на поток устройствами, разрушающими и турбулизирующими внутренний пограничный слой. Это различного рода турбулизирующие вставки (спирали, диафрагмы, диски) и насадки (кольца, шарики), помещаемые в трубу. Естественно, что при этом возрастает гидравлическое сопротивление трубы.

Турбулизирующие вставки в виде диафрагмы (рис. 1.40, а) размещают в трубе на определенном расстоянии одна от другой. При наличии таких вставок переход к турбулентному течению



в трубах происходит при $Re = 140$ (для труб без вставок при $Re = 2300$), что позволяет приблизительно в 4 раза интенсифицировать теплообмен. Вставки в виде дисков (рис. 1.40, б) с определенным шагом укрепляют на тонком стержне, вставленном в трубы. По своему воздействию на поток такие вставки близки к диафрагмам. Спиральные вставки (рис. 1.40, в) обычно изготавливают из тонких алюминиевых или латунных лент. При низких значениях Re они позволяют повысить коэффициент теплоотдачи в 2—3 раза.

Кроме вставок и насадок теплообмен в трубах можно интенсифицировать применением шероховатых поверхностей, накаткой упомянутых кольцевых канавок, изменением поперечного сечения трубы ее сжатием. В этом случае даже при ламинарном режиме течения теплоносителя теплоотдача в трубах на 20—100 % выше, чем в гладких трубах.

Если коэффициент теплоотдачи от среды, проходящей в трубах, на порядок ниже, чем коэффициент для наружной стороны труб, весьма выгодно использование в теплообменниках труб с внутренним оребрением. Примером является конструкция, показанная на рис. 1.41, а. При теплообмене в системе газ—газ рационально в качестве теплообменной поверхности использовать пучки труб с внешними и внутренними ребрами (рис. 1.41, б). Для обеспечения направленного потока газа между наружными ребрами труб помещены треугольные вставки.

Кроме перечисленных методов, в отечественной и зарубежной практике делают попытки интенсифицировать теплопередачу и другими способами, например использованием вращающихся турбулизаторов.

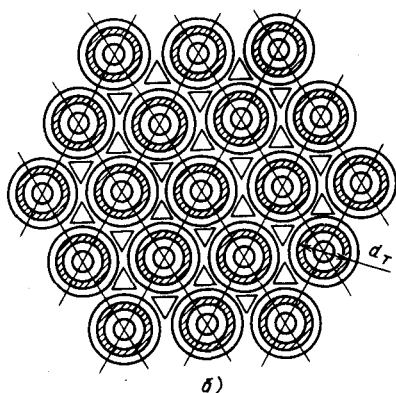
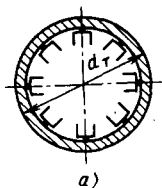
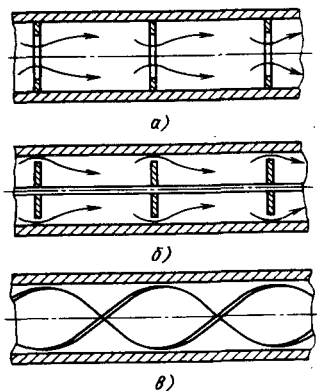


Рис. 1.40. Трубы с турбулизирющими вставками

Рис. 1.41. Варианты внутреннего (а) и наружного (б) оребрения труб

§ 1.7. АППАРАТЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

Выше указано, что кожухотрубчатые теплообменники — наиболее распространенная конструкция теплообменной аппаратуры в химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Однако в последнее время все более широко применяют теплообменники из листового материала, главным образом пластинчатые и спиральные.

Теплообменники из труб конструктивно просты и могут быть использованы в довольно широком диапазоне давлений и температур рабочих сред, но имеют ряд серьезных недостатков. Кожухотрубчатые теплообменники малотехнологичны в условиях производства широкого ряда типоразмеров. Коэффициент унификации, т. е. отношение числа узлов и деталей, одинаковых для всего размерного ряда, к общему числу узлов и деталей в аппарате, для этих теплообменников составляет 0,13. Для сравнения, аналогичный коэффициент для пластинчатых теплообменников равен 0,9.

По сравнению с аппаратами, изготовленными из листового металла, кожухотрубчатые теплообменники более металлоемки.

Эти и ряд других преимуществ, например легкость очистки, делают аппараты из листового металла перспективными и эффективными аппаратами общего назначения.

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

Наиболее широко применяют разборные пластинчатые теплообменники, в которых пластины отделены одна от другой прокладками. Монтаж и демонтаж этих аппаратов осуществляют достаточно быстро, очистка теплообменных поверхностей требует незначительных затрат труда. Пластины полуразборных теплообменников попарно сварены, и доступ к поверхности теплообмена возможен только со стороны хода одной из рабочих сред. Пластины неразборных теплообменников сварены в блоки, соединенные на прокладках в общий пакет.

Основные размеры и параметры наиболее распространенных в промышленности пластинчатых теплообменников определены ГОСТ 15518—83. Их изготавливают с поверхностью теплообмена от 2 до 600 м² в зависимости от типоразмера пластин; эти теплообменники используют при давлении до 1,6 МПа и температуре рабочих сред от —30 до +180° С для реализации теплообмена между жидкостями и парами (газами) в качестве холодильников, подогревателей и конденсаторов.

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

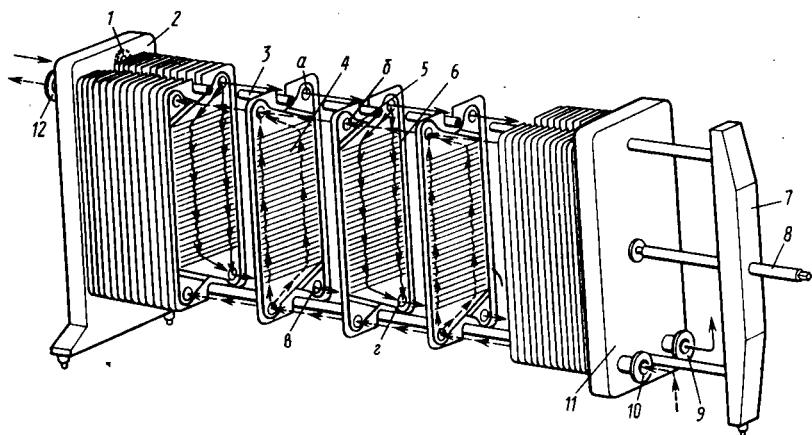


Рис. 1.42. Разборный пластинчатый теплообменник на двухпорной раме

Разборные пластинчатые теплообменники изготавливают в пяти исполнениях, в том числе на консольной раме (исполнение 1), на двухпорной раме (исполнение 2), на трехпорной раме (исполнение 3).

Разборный пластинчатый теплообменник на двухпорной раме (исполнение 2) показан на рис. 1.42. Аппарат состоит из ряда теплообменных пластин 4, размещенных на верхней и нижней горизонтальных штангах 3. Концы штанг закреплены в неподвижной плите 2 и на стойке 7. Нажимной плитой 11 и винтом 8 пластины сжимаются, образуя теплообменную секцию.

Теплообменные пластины имеют четыре проходных отверстия (а, б, в, г), которые образуют две изолированные одна от другой системы каналов. Для уплотнения пластин и каналов имеются резиновые прокладки. Прокладка б уложена в паз по контуру пластины и охватывает два отверстия на пластине, через которые происходят приток и вывод теплоносителя в канал между

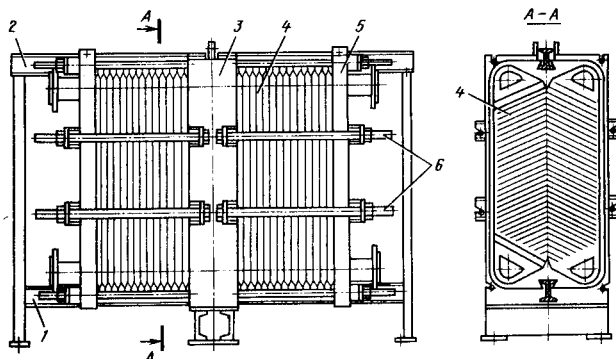


Рис. 1.43. Пластинчатый теплообменник на трехпорной раме

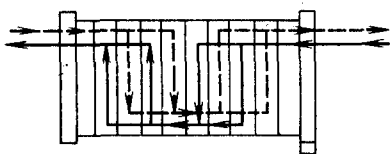


Рис. 1.44. Схема компоновки пластинчатого теплообменника в два симметричных пакета

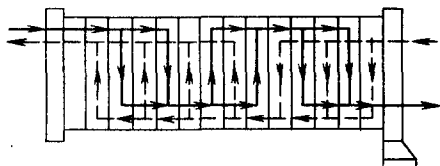


Рис. 1.45. Несимметричная схема компоновки пластин

смежными пластинами, а прокладки 5 герметизируют два других отверстия на пластине. Для ввода теплоносителей в аппарат и вывода предназначены штуцера 1, 9, 10, 12, расположенные на неподвижной и подвижной плитах.

Теплообменник на трехопорной раме (исполнение 3) состоит из неподвижной плиты 3 (рис. 1.43), в которой закреплены верхняя 2 и нижняя 1 горизонтальные штанги. На штангах размещены теплообменные пластины 4 и подвижные плиты 5. Для сжатия пакета пластин предназначены стяжки 6.

В изображенном на рис. 1.44 теплообменнике пластины скомпонованы в два симметричных пакета — каждый для одного из теплоносителей.

Такой схеме компоновки теплообменника соответствует обозначение $Sx [(2 + 2)/(2 + 2)]$. В общем случае схему компоновки пластин обозначают так: $Sx \left[\sum_{i=1}^k m_1^i / \sum_{j=1}^n m_2^j \right]$; здесь m_1 и m_2 — число каналов в пакете для соответственно охлаждаемого и нагреваемого теплоносителя; k и n — число последовательно включенных пакетов в аппарате для соответственно охлаждаемого и нагреваемого теплоносителя.

При заданном расходе теплоносителя требуемой скорости движения его по каналам между пластинами достигают подбором числа пластин в пакете.

Если расходы теплоносителей значительно различаются, то для поддержания постоянного гидравлического сопротивления каналов применяют несимметричные схемы компоновки пластин; при этом число каналов и пакетов для каждого теплоносителя неодинаково. Примером может служить схема компоновки теплообменника $Sx [(2 + 2 + 2)/(4 + 3)]$ (рис. 1.45).

Для конденсации паров из смеси с неконденсирующимися газами используют схему компоновки $Sx [(m_1^I + m_1^{II})/m_2]$ (рис. 1.46, а). Сконденсировавшаяся фаза IV выделяется из парогазовой смеси II в каналах в и г первого пакета и выводится из аппарата, а несконденсировавшиеся газы I попадают в каналы а и б второго пакета, охлаждаются и выводятся из аппарата. Охлаждающая фаза III (вода) движется по каналам одного пакета. Такие конденсаторы парогазовых смесей работают с более высо-

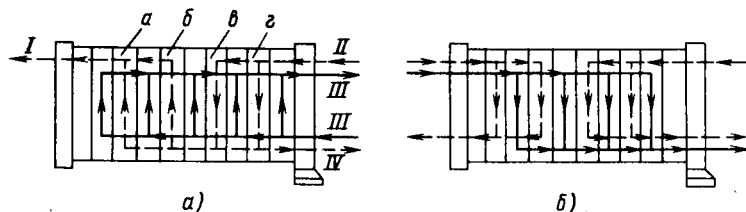


Рис. 1.46. Схемы специальных пластинчатых аппаратов:
а — конденсатор; б — теплообменник для трех теплоносителей

ким коэффициентом теплоотдачи, чем стандартные кожухотрубчатые аппараты.

При соответствующей компоновке можно получить многосекционный аппарат, в котором теплообмен между одним теплоносителем и двумя другими осуществляется в соответствующих зонах (рис. 1.46, б).

Теплообменные пластины различаются расположением в них отверстий для теплоносителей на пластины с диагональным (рис. 1.47) и односторонним (рис. 1.48) расположением отверстий, и те, и другие выполняют правыми и левыми. Благодаря чередованию в пакете левых и правых пластин образуются две изолированные системы каналов.

Пластины с односторонним расположением отверстий взаимозаменяемы. При сборке правые пластины получают поворотом их относительно левых на 180° . Левые и правые пластины с диагональным расположением отличаются расположением прокладки и поэтому не являются взаимозаменяемыми.

Кроме рассмотренных теплообменных пластин в аппаратах используют граничные пластины, устанавливаемые на концах пакетов.

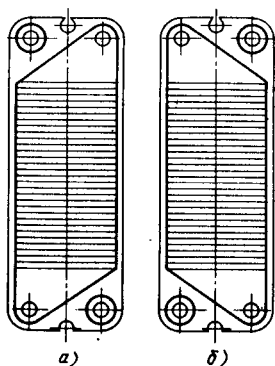


Рис. 1.47. Пластины с диагональным расположением отверстий:
а — левая; б — правая

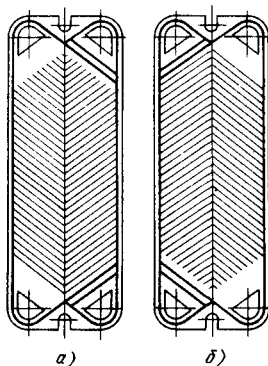
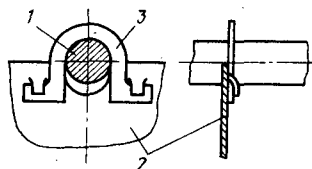


Рис. 1.48. Пластины с односторонним расположением отверстий:
а — левая; б — правая

Рис. 1.49. Узел крепления пластины на верхней штанге



Серийно выпускаемые пластинчатые теплообменники комплектуют пластинами, штампованными из листового металла толщиной 1 мм. Гофры пластин обычно имеют в сечении профиль равносностороннего треугольника высотой 4—7 мм и основанием длиной 14—30 мм (для вязких жидкостей до 75 мм). Гофры выполняют горизонтальными, «в елочку», под углом к горизонтали и др.

Материал пластин — оцинкованная или коррозионно-стойкая сталь, титан, алюминий, мельхиор.

В разборных теплообменниках пластины 2 (рис. 1.49) обычно крепят скобой 3 на верхней штанге 1. Нижняя штанга не несет нагрузки от массы пластин и служит лишь для фиксации их в заданном положении. Такое закрепление пластин позволяет легко извлечь их из пакета или вставить в него без снятия подвижной плиты и остальных пластин.

Прокладки пластинчатых теплообменников (рис. 1.50) изготовляют из резины формованием и укрепляют в пазу пластины на клею. Стойки и прижимные плиты пластинчатых теплообменников изготовляют из углеродистых сталей толщиной 8—12 мм.

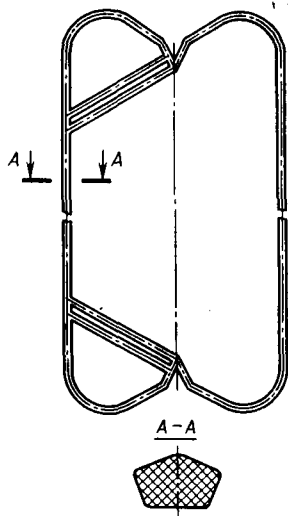


Рис. 1.50. Прокладка пластинчатого теплообменника

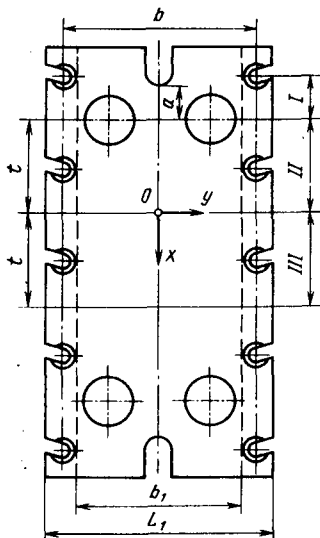


Рис. 1.51. Схема к расчету неоребреной плиты пластинчатого теплообменника

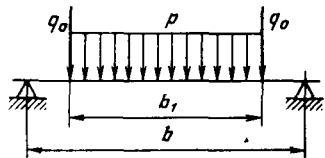


Рис. 1.52. Схема нагружения пластины

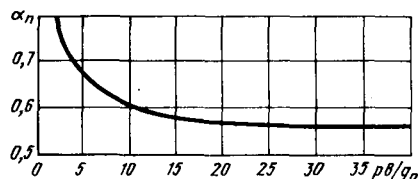


Рис. 1.53. Зависимость α_n от pb/q_0

К недостаткам пластинчатых теплообменников следует отнести невозможность использования их при давлении более 1,6 МПа.

Расчет на прочность пластинчатых теплообменников сводится к расчету нажимных и промежуточных плит, пластин, штанг, стяжных болтов, коллекторов, днищ и крышек. Расчет проводят по РД РТМ 26-01-86—83.

В качестве примера рассмотрим расчет неоребрённых нажимных плит.

При расчете плиту условно разбивают на панели — крайнюю I (рис. 1.51), промежуточную II и среднюю III — в зависимости от реакции прокладок.

Расчетное давление (МПа) на крайнюю панель I

$$p = q_0 L_{\text{п}} / F_{\text{п}} + p_{\text{р}}, \quad (1.49)$$

где q_0 — реакция прокладки, Н/мм; $L_{\text{п}}$ — длина прокладки, приходящаяся на рассматриваемую панель, мм; $F_{\text{п}}$ — площадь пластины, приходящаяся на рассматриваемую панель, мм²; $p_{\text{р}}$ — давление в рабочей полости, МПа.

Расчетное давление для промежуточной панели

$$p = q_0 L_{\text{п}} / (b_1 t) + p_{\text{р}}, \quad (1.50)$$

где b_1 — расстояние между осями прокладки, мм; t — ширина панели, мм.

Так как длина прокладки, приходящаяся на среднюю панель, незначительна, для нее принимают

$$p = p_{\text{р}}. \quad (1.51)$$

При выводе уравнений для расчета толщины нажимной плиты последнюю рассматривают как плоскую, опертую в точках установки стяжных болтов пластину, нагруженную распределенной по поверхности нагрузкой $p = p_{\text{р}}$ и распределенной по контуру пластины реакцией прокладки q_0 (рис. 1.52).

Толщину крайней панели можно рассчитать по формуле

$$s \geq \sqrt{\frac{3}{2} \frac{p F_{\text{п}} (b - 0,5 b_1)}{n_{\text{р}} \sigma_{\text{та}}}}, \quad (1.52)$$

где b — расстояние между осями стяжных болтов, мм; $n_{\text{р}}$ — коэффициент нагрузки (принимают $n_{\text{р}} = 1,0$ для рабочего режима

Коэффициенты α_1' , α_1'' , α_2' и α_2''

$\alpha = \frac{b}{t}$	$x = 0,5t;$ $y = 0$		$x = 0;$ $y = 0,5t$		$\alpha = \frac{b}{t}$	$x = 0,5t;$ $y = 0$		$x = 0;$ $y = 0,5t$	
	α_1'	α_1''	α_2'	α_2''		α_1'	α_1''	α_2'	α_2''
0,3	0,2590	0,200	0,940	0,3990	1,0	0,0920	0,129	0,169	0,0718
0,4	0,2060	0,178	0,574	0,2440	1,1	0,0873	0,127	0,153	0,0650
0,5	0,1670	0,161	0,403	0,1710	1,2	0,0839	0,126	0,140	0,0595
0,6	0,1400	0,150	0,311	0,1320	1,3	0,0815	0,125	0,129	0,0548
0,7	0,1210	0,142	0,254	0,1080	1,4	0,0797	0,124	0,119	0,0506
0,8	0,1080	0,136	0,217	0,0922	1,5	0,0784	0,124	0,111	0,0472
0,9	0,0985	0,132	0,190	0,0807					

и $n_p = 1,4$ для режима гидроиспытаний); σ_T — предел текучести материала плиты, МПа; a — ширина крайней панели (см. рис. 1.51), мм.

Для промежуточной и средней панелей существенное значение имеют условия опирания, поэтому рассматривают варианты:

расстояние между отверстиями значительно и критические напряжения возникают между отверстиями пластины ($\alpha = b/t < \alpha_n$);

расстояние между отверстиями мало, опирание близко к непрерывному, и критические напряжения возникают в центре пластины ($\alpha > 1,5$);

критические напряжения возникают в центре пластины, но схема не эквивалентна непрерывному опиранию пластины ($\alpha_n \leq \alpha \leq 1,5$).

График функции $\alpha_n = \alpha_n(pb/q_0)$ приведен на рис. 1.53.

С учетом указанных вариантов толщину плиты для промежуточной и средней панелей при $\alpha < \alpha_n$, $\alpha_n \leq \alpha < 1,5$ и $\alpha \geq 1,5$ рассчитывают по уравнениям соответственно:

$$s = \sqrt{\frac{6}{n_p \sigma_T} q_0 b \left(\alpha_2' + \frac{pb}{q_0} \alpha_2'' \right)}; \quad (1.53)$$

$$s = \sqrt{\frac{6}{n_p \sigma_T} q_0 b \left(\alpha_1' + \frac{pb}{q_0} \alpha_1'' \right)}; \quad (1.54)$$

$$s = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{pb_1(b - 0,5b_1) + 2q_0(b - b_1)}{n_p \sigma_T}}; \quad (1.55)$$

где α_1' , α_1'' , α_2' , α_2'' — коэффициенты (табл. 1.4).

Полученные расчетные формулы для неоребреной плиты применимы при условиях $b/s \geq 5$ и $L_1/b \geq 2$, где L_1 — расстояние между крайними отверстиями для стяжек (см. рис. 1.51).

Спиральные теплообменники изготавливают с поверхностью теплообмена 10—100 м²; они работают как под вакуумом, так и при

давлении до 1 МПа при температуре рабочей среды 20—200 °С. Их можно использовать для реализации теплообмена между рабочими средами жидкость—жидкость, газ—газ, газ—жидкость, а также конденсации паров и парогазовых смесей.

Все большее распространение этих теплообменников в последнее время объясняется главным образом простотой изготовления и компактностью конструкции. В таком аппарате один из теплоносителей (рис. 1.54) поступает в периферийный канал аппарата и, двигаясь по спирали, выходит из верхнего центрального канала. Другой теплоноситель поступает в нижний центральный канал и выходит из периферийного канала.

Площадь поперечного сечения каналов в таком теплообменнике по всей длине постоянна, поэтому он может работать с загрязненными жидкостями (загрязнение смывается потоком теплоносителя).

В спиральных теплообменниках поверхность теплообмена образована двумя стальными лентами 1, 2 толщиной 3,5—6 мм и шириной 400—1250 мм (рис. 1.55), свернутыми в спираль так, что получаются каналы *a* и *б* прямоугольного профиля, по

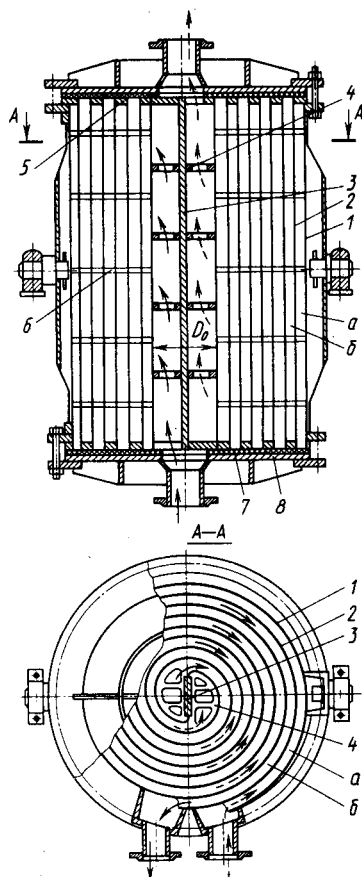
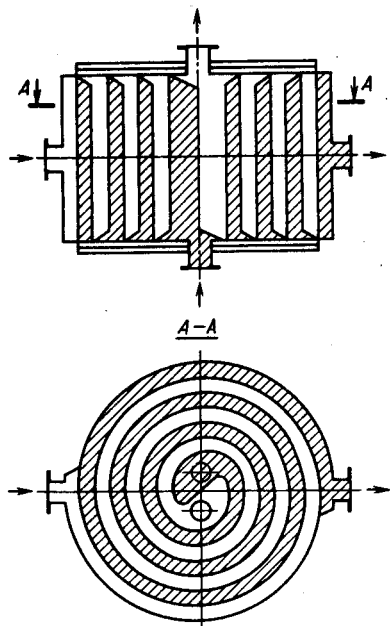


Рис. 1.54. Схема движения теплоносителей в спиральном теплообменнике

Рис. 1.55. Спиральный теплообменник

которым противоточно движутся теплоносители. Первый (от центра аппарата) виток спирали закреплен распорными дисками 4, которые фиксируются продольными распорками 3. На поверхности спирали с шагом 70—100 мм приварены штифты 6 для придания теплообменнику жесткости. Кроме штифтов при навивке спирали между ее витками устанавливают полосовые дистанционные вставки 5. Эти вставки вместе со штифтами обеспечивают требуемый зазор между лентами, который для стандартных теплообменников составляет 8—12 мм. С торцов аппарат закрыт крышками 8 на прокладках 7. В зависимости от способа уплотнения спиральных каналов с торцов различают теплообменники с тупиковыми и сквозными каналами.

Тупиковые каналы (рис. 1.56, а) образуют приваркой полосовых вставок 2 к торцу спирали; с торцов каналы закрыты крышками 3 с прокладкой 1. После снятия крышек и прокладок оба канала можно прочистить. Такой способ уплотнения каналов исключает возможность смешения теплоносителей при прорыве прокладки и поэтому наиболее распространен.

Сквозные каналы (рис. 1.56, б) с обоих торцов закрыты крышками 2 с прокладками 1, легко поддаются чистке, но не исключают возможность смешения теплоносителей.

Спиральные теплообменники с тупиковыми каналами изготавливают в двух вариантах: с плоской крышкой (для теплообмена между жидкостями и газами) и с конической или сферической крышкой (для конденсации паров и нагрева высоко-

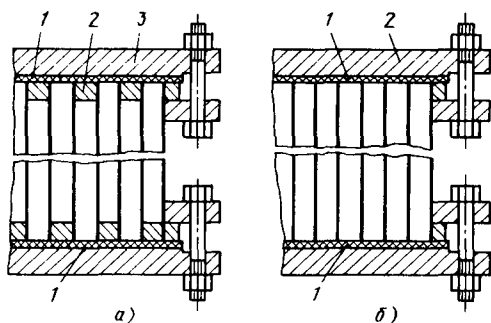


Рис. 1.56. Спиральные теплообменники с тупиковыми (а) и сквозными (б) каналами

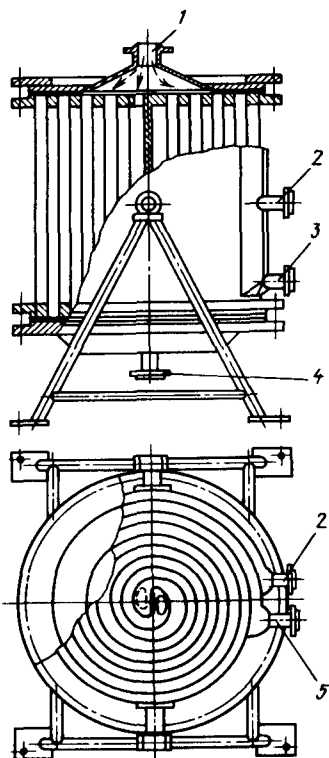


Рис. 1.57. Спиральный конденсатор

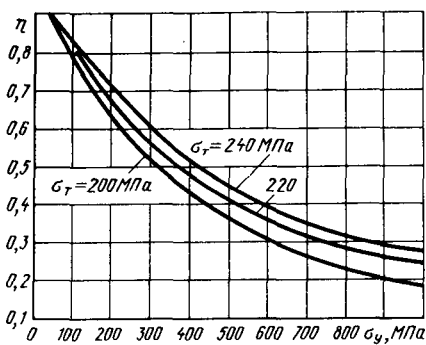


Рис. 1.58. Зависимость η от $\sigma_{кр}$

вязких жидкостей). В аппаратах с плоской крышкой обеспечивается противоточное движение фаз, в аппаратах с конической и сферической крышкой — перекрестное.

Теплообменники с тупиковыми каналами и конической крышкой, используемые как конденсаторы, обычно устанавливают вертикально (рис. 1.57). Вертикальное расположение каналов исключает образование пробок конденсата и гидравлические удары. Благодаря конической крышке парогазовая смесь (рабочая среда) подается в аппарат сверху через штуцер 1. Образующийся конденсат стекает по вертикальной стенке канала, собирается в нижней части аппарата и сливается через штуцер 3. Несконденсировавшиеся газы проходят несколько наружных витков, охлаждаются и выводятся через штуцер 2 на корпусе. Хладагент подается в аппарат через штуцер 5 и выводится через штуцер 4.

Расчеты на прочность и устойчивость элементов теплообменника включают в основном расчеты спирали, фланцевого соединения и крышек. Толщину s наружного витка спирали (корпуса) теплообменника рассчитывают по формуле, используемой для расчета на прочность стальной цилиндрической обечайки:

$$s = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi - p} + C, \quad (1.56)$$

где p — расчетное давление, МПа;

$$D = D_0 + [2\sqrt{(0,5D_0/t)^2 + L/(\pi t)} - D_0/t - 1]t -$$

внутренний диаметр наружного витка спирали (D_0 — диаметр «центровика» — см. рис. 1.55, мм; t — шаг спирали, мм; L — длина ленты одного канала, мм); $[\sigma]$ — допускаемое напряжение для материала спирали, МПа; φ — коэффициент прочности сварного шва (для спирали, выполненной из цельного листа, $\varphi = 1$); C — конструктивная прибавка, мм.

При расчете спирали на устойчивость необходимо обеспечить условие

$$[p] = \eta p_{кр} \geq p_{исп}, \quad (1.57)$$

где $[p]$ — допускаемое давление, МПа; $\eta = \eta(\sigma_{кр})$ — определяют по рис. 1.58, где $\sigma_{кр} = 0,95p_{кр}R/(s - c)$; $p_{кр}$ — критическое дав-

ление; $p_{\text{исп}}$ — расчетное давление, принимаемое равным давлению при испытании, МПа;

$$p_{\text{кр}} = 1,81 \cdot 10^6 \eta_1 \frac{(s-c)^3}{R l_1^2} \left[\alpha + \frac{\beta l_1^4}{R^2 (s-c)^2} \right], \quad (1.58)$$

где $R = 0,5D$; $\eta_1 = \eta_1 (\sqrt{0,5R (s-c)/l_1^2})$; $\alpha = (1+t)^2/(1+0,3t)$; $\beta = 0,123t/[1(1+0,3t)(2,86+t)]$; $t = (l_1/l)^2$.

Значения l и l_1 выбирают в зависимости от вида укрепления спирали: для спирали без укреплений $l = B$ и $l_1 = 1,5 \sqrt[3]{Rl(s-c)}$; для спирали, укрепленной штифтами, $l = B$, $l_1 = b$ (B — ширина спирали, мм; b — расстояние между штифтами по направлению длины ленты, мм). Для других видов крепления спирали значения l и l_1 , а также значения η_1 приведены в РТМ 26-01-58—73.

§ 1.8. ТЕПЛООБМЕННИКИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ, «ТРУБА В ТРУБЕ», ОРОСИТЕЛЬНЫЕ, ПОГРУЖНЫЕ ЗМЕЕВИКОВЫЕ И БЛОЧНЫЕ

Аппараты воздушного охлаждения. В химической и особенно нефтехимической промышленности большую часть теплообменных аппаратов составляют конденсаторы и холодильники. Использование для конденсации и охлаждения различных технологических продуктов аппаратов водяного охлаждения, кожухотрубчатых или оросительных, связано со значительными расходами воды и, следовательно, с большими эксплуатационными затратами. Применение аппаратов воздушного охлаждения в качестве холодильников-конденсаторов имеет ряд преимуществ: исключаются затраты на подготовку и перекачку воды; снижается трудоемкость и стоимость ремонтных работ; не требуется специальной очистки наружной обтекаемой воздушным потоком поверхности труб; облегчается регулирование процесса охлаждения и др.

Горизонтальный аппарат воздушного охлаждения (рис. 1.59) снабжен сварной рамой 1, на которой размещен ряд теплообменных секций 2. Они состоят из пучка поперечно оребренных труб, в которых прокачивается конденсируемая (охлаждаемая) среда. Снизу к раме прикреплены диффузор 3 и коллектор 6, в центре которого находится осевой вентилятор 5. Вентилятор вместе с угловым редуктором 9 и электродвигателем 7 смонтирован на отдельной раме 8. Воздух, нагнетаемый вентилятором, проходит через теплообменные секции, омывая наружную поверхность оребренных труб и обеспечивая при этом конденсацию и охлаждение пропускаемой по трубам среды.

Для повышения эффективности аппарата в его конструкции предусмотрены распыливающие водяные форсунки 4, автоматически включающиеся при повышенной температуре окружающей среды в летний период работы. При низких температурах

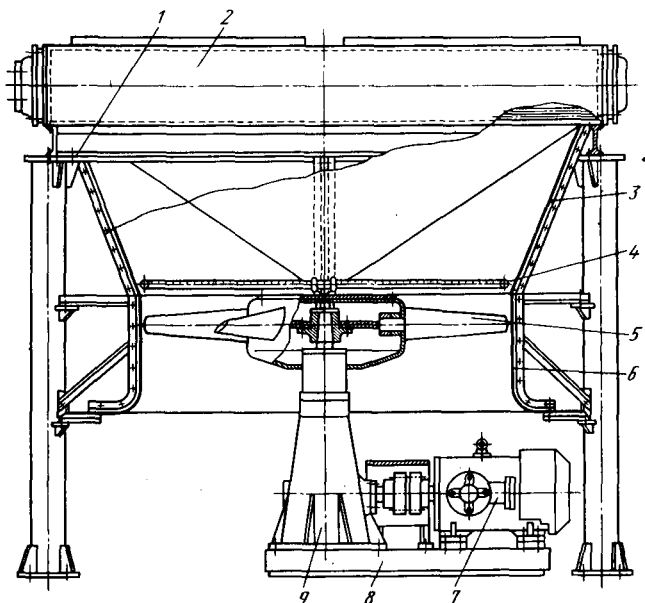


Рис. 1.59. Горизонтальный аппарат воздушного охлаждения

(зимой) можно отключать электродвигатель и вентилятор; при этом конденсация и охлаждение происходят естественной конвекцией.

Кроме этого интенсивность теплосъема можно регулировать, меняя расход прокачиваемого воздуха изменением угла наклона лопастей вентилятора. Для этого в аппаратах воздушного охлаждения предусмотрены механизм дистанционного поворота лопастей с ручным или пневматическим приводом и жалюзи, установленные над теплообменными секциями. Жалюзийные заслонки можно поворачивать вручную или автоматически с помощью пневмопривода.

В зимнее время возможна опасность переохлаждения конденсируемого в аппарате продукта. Во избежание этого под теплообменными секциями можно устанавливать змеевиковый подогреватель воздуха, выполненный также из оребренных труб.

Теплообменная секция аппарата воздушного охлаждения (рис. 1.60) состоит из четырех, шести или восьми рядов труб 3, размещенных по вершинам равносторонних треугольников в двух трубных решетках 1. Трубы закреплены развальцовкой или развальцовкой со сваркой. Секции могут быть одно- и многоходовыми. В многоходовых секциях воздушного охлаждения, где объем охлаждаемой среды уменьшается по мере его движения по трубам, последовательно по ходам уменьшается и число труб.

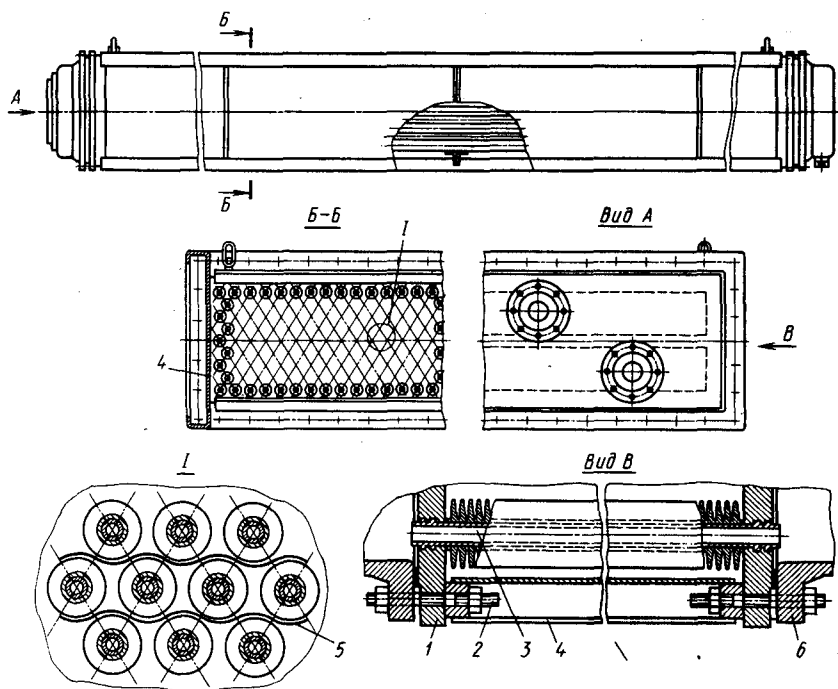


Рис. 1.60. Теплообменная секция

Для обеспечения жесткости трубного пучка секция укреплена металлическим каркасом 4. Однако при эксплуатации гайки на шпильках 2, соединяющих решетку с каркасом, должны быть отвинчены на расстояние, превышающее возможное температурное удлинение труб. В трубном пучке каждая труба может иметь индивидуальный прогиб. Для исключения контакта ребер верхнего ряда труб с ребрами труб нижнего ряда между соседними рядами в нескольких местах по длине трубы помещают дистанционные прокладки 5 шириной около 15 мм из алюминиевой ленты толщиной 2 мм.

Крышки 6 крепят к трубным решеткам теплообменных секций при высоком давлении неразъемно или на шпильках. Если секция аппарата многоходовая, крышки снабжают перегородками, которые делят трубный пучок на ходы. Съемные крышки обычно выполняют литыми из стали.

Как указано, трубы в аппаратах воздушного охлаждения имеют оребрение по наружной поверхности, поскольку коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности труб примерно на порядок меньше коэффициента для внутренней поверхности. Увеличение теплообменной поверхности труб оребрением компен-

сирует низкую теплоотдачу со стороны воздуха. Коэффициент оребрения таких труб, характеризующий отношение наружной поверхности оребренной трубы к поверхности гладкой трубы того же диаметра, колеблется от 10 до 20.

В аппаратах воздушного охлаждения используют вентиляторы с диаметром колеса до 7 м. Колеса вентиляторов изготавливают сварными из алюминия или из стеклопласта, диффузор — из листовой стали толщиной 2 мм.

Электродвигатели привода могут быть одно- и двухскоростными. При использовании двухскоростных электродвигателей с понижением температуры окружающей среды можно работать при меньшей частоте вращения вентилятора.

Теплообменные аппараты «труба в трубе» используют главным образом для охлаждения или нагревания в системе жидкость—жидкость, когда расходы теплоносителей невелики и последние не меняют своего агрегатного состояния. Иногда такие теплообменники применяют при высоком давлении для жидких и газообразных сред, например, в качестве конденсаторов в производстве метанола, аммиака и др.

По сравнению с кожухотрубчатыми теплообменники «труба в трубе» имеют меньшее гидравлическое сопротивление межтрубного пространства. Однако при равных теплообменных характеристиках они менее компактны и более металлоемки, чем кожухотрубчатые.

Теплообменники «труба в трубе» могут быть разборными или неразборными, одно- и многопоточными.

Однопоточный неразборный теплообменник (рис. 1.61) состоит из отдельных звеньев, в каждый из которых входят трубы наружная (или кожуховая) 1 и внутренняя (или теплообменная) 2. Наружная труба двумя приварными кольцами связана с внутренней трубой 2 в звено. Звенья в свою очередь собраны в вертикальный ряд и составляют теплообменную секцию. При этом внутренние трубы соединены между собой коленами 3, а наружные — штуцерами 4 на фланцах или сваркой. Звенья закреплены скобами на металлическом каркасе 5.

Нетрудно видеть, что неразборные теплообменники являются конструкцией жесткого типа, поэтому при разности температур более 70 °С их не используют. При большей разности температур труб, а также при необходимости механической очистки межтрубного пространства применяют теплообменники с компенсирующим устройством на наружной трубе. В этом случае кольцевую щель между трубами с одной стороны наглухо заваривают, а с другой — уплотняют сальником 6.

В разборных конструкциях теплообменников обеспечивается компенсация деформаций теплообменных труб. На рис. 1.62 показана конструкция разборного многопоточного теплообменника «труба в трубе», напоминающего кожухотрубчатый теплообменник типа У.

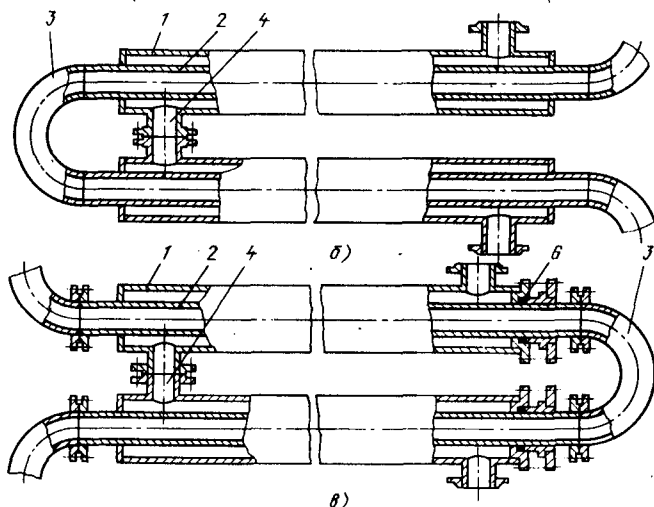
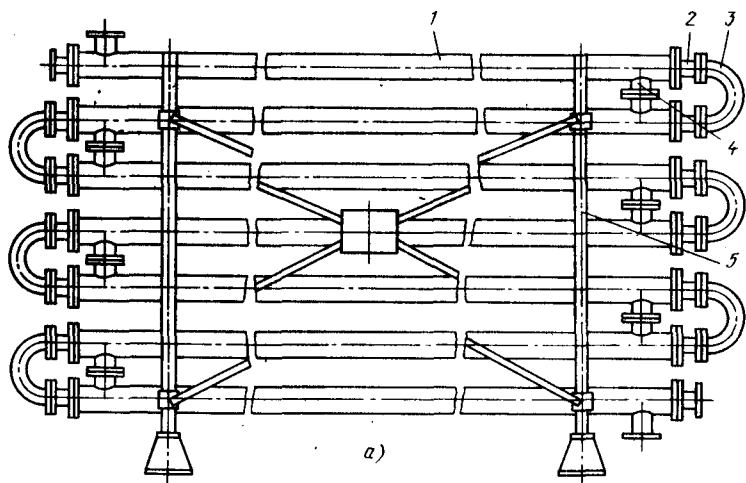


Рис. 1.61. Теплообменник «труба в трубе»:

a — общий вид; *б* — вариант жесткого крепления труб; *в* — вариант крепления труб с компенсирующим устройством

Аппарат состоит из кожуховых труб 5, развальцованных в двух трубных решетках: средней 4 и правой 7. Внутри кожуховых труб размещены теплообменные трубы 6, один конец которых жестко связан с левой трубной решеткой 2, а другой — может перемещаться. Свободные концы теплообменных труб попарно соединены коленами 8 и закрыты камерой 9. Для распределения потока теплоносителя по теплообменным трубам служит распределительная камера 1, а для распределения теплоносителя в межтрубном пространстве — распределительная камера 3. Пластину 11 кожуховые трубы жестко связаны с опорами 10.

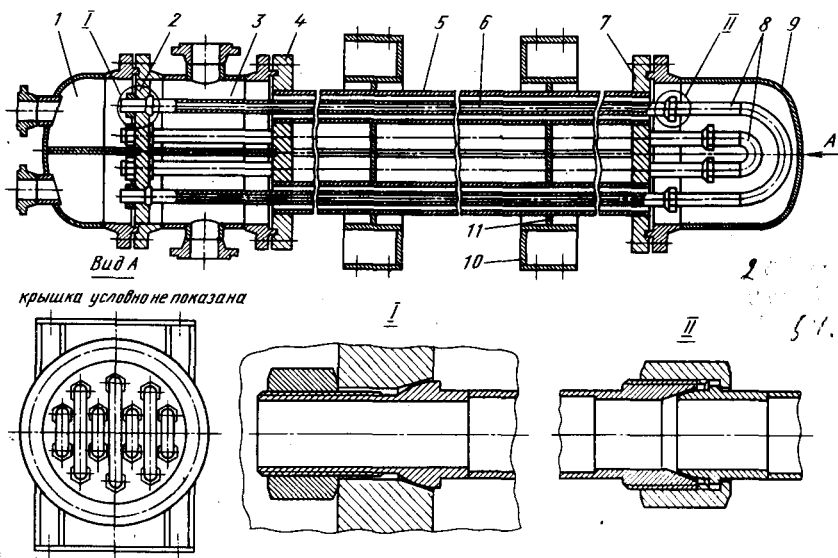


Рис. 1.62. Разборный двухпоточный теплообменник «труба в трубе»

Теплообменник имеет два хода по внутренним трубам и два по наружным. Узлы соединения теплообменных труб с трубной решеткой (узел I) и с коленами (узел II) уплотнены за счет прижима и деформации полусферовых ниппелей в конических гнездах.

Эти аппараты могут работать за загрязненными теплоносителями, так как внутреннюю поверхность теплообменных труб можно подвергать механической очистке. Поскольку возможность температурных удлинений кожуховых труб из-за жесткого соединения их с опорами ограничена, перепад температур входа и выхода среды, текущей по кольцевому зазору, не должен превышать 150°C .

Оросительные теплообменники состоят из нескольких рядов труб, расположенных одна над другой, по наружной поверхности которых тонкой пленкой стекает охлаждающая их вода (рис. 1.63). Трубы 2, через которые прокачивается охлаждаемая рабочая среда, соединены коленами 3. Для распределения орошающей воды над верхней трубой установлен желобковый или трубчатый ороситель 1. В трубчатых оросителях вода вытекает многочисленными струями через отверстия трубы, в желобковых — через прорези в верхней кромке желоба. При большом числе труб в ряду или большом расстоянии между трубами оросители можно устанавливать и между рядами труб. Внизу теплообменника расположен поддон 4 для сбора воды.

Теплообменники, устанавливаемые вне здания, во избежание уноса воды ветром, имеют ограждения. Теплота перекачиваемой по трубам рабочей жидкости в оросительных теплообменниках

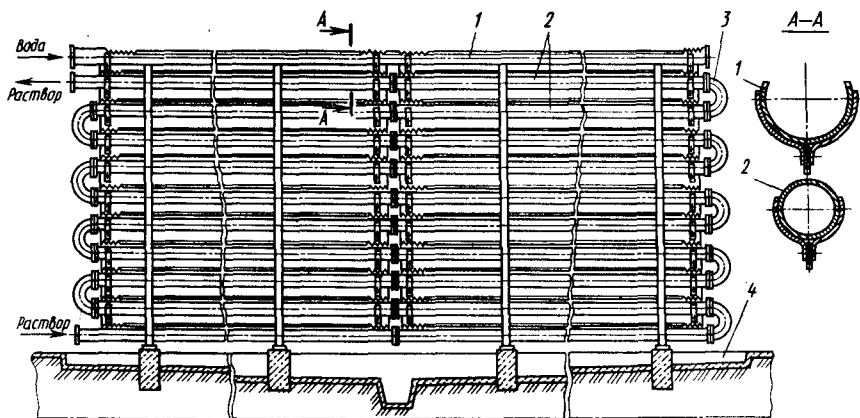


Рис. 1.63. Оросительный теплообменник

отводится за счет нагрева орошающей воды и частично за счет ее испарения, вследствие чего расход воды несколько меньше, чем для теплообменников других типов.

В химической промышленности подобные теплообменники используют для охлаждения химически агрессивных сред, например серной кислоты, поскольку они просты в изготовлении и могут быть выполнены из коррозионно-стойкого дешевого материала, плохо поддающегося обработке, например из кислотоупорного ферросилида.

Оросительные теплообменники имеют низкую эффективность, но, как отмечено, просты в изготовлении и ремонте.

Погружные змеевиковые теплообменники используют в химической промышленности для теплообмена между средами, одна из которых находится под высоким давлением. Эти теплообменники состоят из плоских или цилиндрических змеевиков, погруженных в сосуд с жидкой рабочей средой. Другая жидкая или газообразная среда под давлением пропускается по трубам.

Змеевиковый холодильник (рис. 1.64), предназначенный для охлаждения азотоводородной смеси, состоит из четырех кольцевых секций 1, включенных параллельно по ходу газа и воды. К наружной и внутренней обечайкам кожуха 5 каждой секции крепятся коллекторы 3 для подвода и вывода из секций охлаждающей воды. Коллекторы секций смещены один относительно другого на 90° . Газ подводится в каждую секцию сверху по вертикальному коллектору 2 и распределяется по 14 приваренным к нему плоско-спиральным змеевикам 4, расположенным один над другим. Охлажденная газовая смесь выводится по такому же коллектору у внутренней обечайки кожуха. Между змеевиками установлена спиральная перегородка из листовой стали, сообщающая воде направление движения по спирали вдоль витков змеевиков противоточно газу.

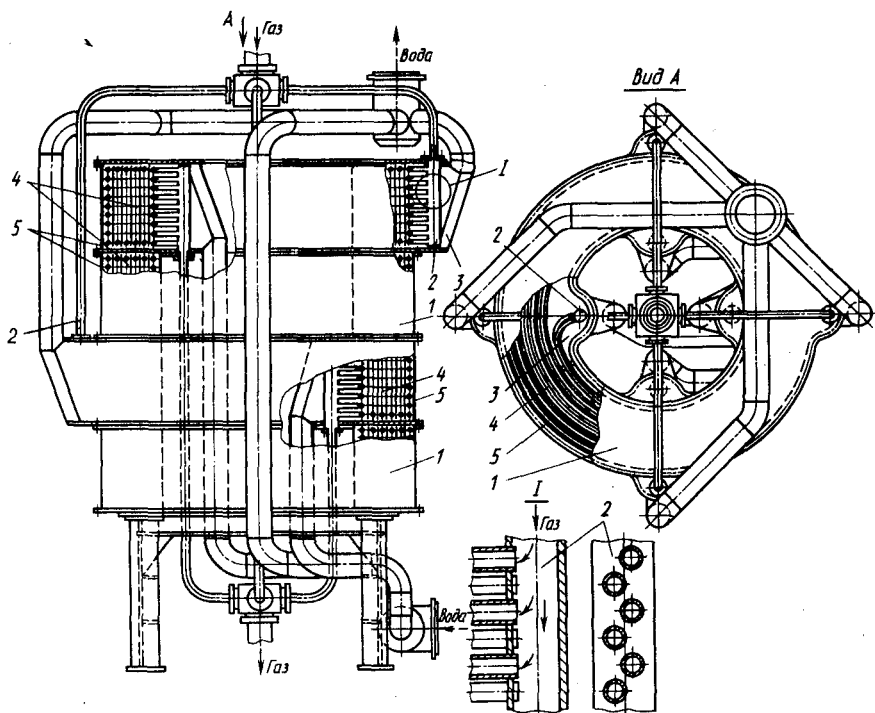


Рис. 1.64. Змеевиковый холодильник для охлаждения азотоводородной смеси

Эти теплообменники характеризуются хорошей способностью к самокомпенсации температурных напряжений и низким гидравлическим сопротивлением. Их недостаток — сложность изготовления и монтажа.

Блочные теплообменные аппараты изготовляют в основном из искусственного графита или графитопласта — пластмассы на основе фенолформальдегидной смолы, в которой в качестве наполнителя использован мелкодисперсный графит. Аппараты обладают рядом ценных свойств: они эффективны, так как по теплопроводности графит в 4 раза превосходит коррозионно-стойкую сталь; обладают высокой стойкостью к агрессивным средам (кислотам, щелочам, органическим и неорганическим растворителям); относительно дешевы. К их недостаткам следует отнести низкую прочность при растяжении и изгибе материала, из которого их изготовляют, невозможность соединения деталей из этого материала способами, аналогичными пайке или сварке металлов. Основной метод соединения деталей на основе графита — склеивание искусственными смолами.

Теплообменные аппараты такого типа (рис. 1.65) изготовляют из отдельных прессованных блоков 1, соединенных между собой

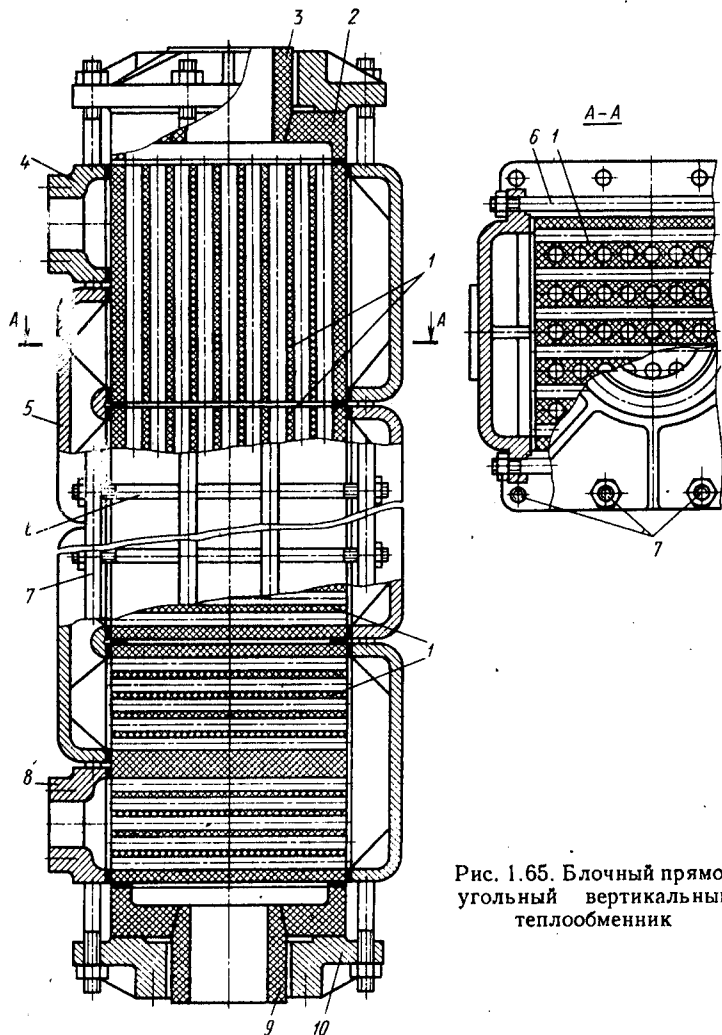


Рис. 1.65. Блочный прямоугольный вертикальный теплообменник

специальной замазкой. В блоках имеются горизонтальные и вертикальные каналы для прохода теплоносителей. Узлы соединения блоков можно уплотнять также прокладками из термо- и коррозионно-стойкой резины или фторопласта. Аппарат имеет распределительные камеры 2, скрепленные с блоками и между собой крышками 10 и стяжками 7. Горизонтальные каналы сообщаются с боковыми переливными камерами 5, соединенными между собой шпильками 6; при этом достигается зигзагообразное движение, как правило, неагрессивной среды по высоте аппарата. Патрубки 3 и 9 служат для ввода и вывода агрессивной, а патрубки 8 и 4 — неагрессивной рабочей среды.

Такие аппараты используют в качестве теплообменников и конденсаторов для агрессивных сред.

§ 1.9. ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕПЛООБМЕННАЯ ТЕХНИКА

Новая конструкция теплообменного аппарата должна обеспечивать по сравнению с прототипом более высокие коэффициенты теплопередачи и коррозионную стойкость, низкие металлоемкость и энергозатраты на прокачивание теплоносителей.

Один из путей создания таких теплообменников — разработка аппаратов с теплообменной поверхностью из листа, способной разрушать лимитирующие теплоотдачу пограничные слои теплоносителя. В связи с этим определенный интерес представляют отечественные пластинчато-спиральные теплообменники. Это спиральные теплообменники с теплообменной поверхностью в виде гофрированных листов, обеспечивающих разрушение пограничных слоев теплоносителя благодаря генерации гофрами в пристенной зоне активных вторичных течений и возникновению центробежных сил в потоках теплоносителей при их движении по изогнутым каналам.

Пластинчато-спиральный теплообменник (рис. 1.66) состоит из гофрированных листов 5, изогнутых по спирали и образующих каналы (закрытые с торцов крышками 2, 3) для циркуляции теплоносителей, и штуцеров 1, 4, 6, 7 для ввода и вывода теплоносителей.

При противотоке один из теплоносителей подается в штуцер 6 и, пройдя по каналу, образованному гофрированными листами 5, выводится из аппарата через штуцер 4. Другой теплоноситель подается в штуцер 1 и, пройдя по каналу,

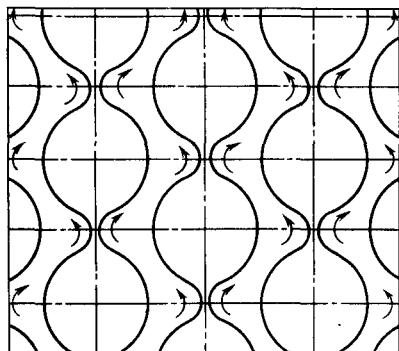
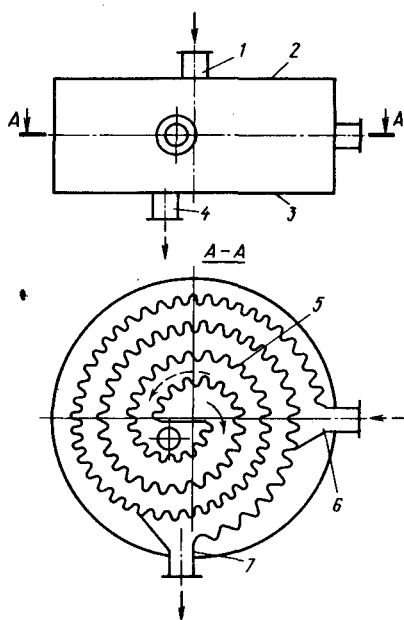


Рис. 1.66. Схема пластинчато-спирального теплообменника

Рис. 1.67. Трубный пучок комбинированного теплообменника типа «Бабекс»

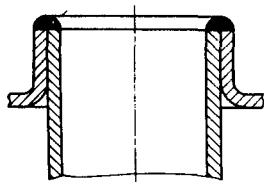
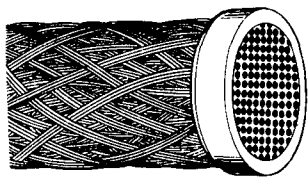


Рис. 1.68. Теплообменный элемент с трубами из фторопласта

Рис. 1.69. Узел крепления трубы к трубной решетке

образованному листами 5, выводится из аппарата через штуцер 7. Пластинчато-спиральные теплообменники имеют повышенные теплоэнергетические характеристики. Так, мощность, затрачиваемая на единицу теплообменной поверхности, примерно на порядок меньше, чем у обычных кожухотрубчатых аппаратов без турбулизаторов.

Другой пример аппаратов с теплообменной поверхностью, разрушающей пограничные слои теплоносителя, — теплообменник типа «Бабекс», разработанный фирмой «Бавария Анлагенбау» (ФРГ). Теплообменник, представляющий собой сочетание кожухотрубчатого и пластинчатого аппаратов, состоит из блоков, изготовленных из металлических штампованных листов толщиной 0,2—1,0 мм. Штамповкой на листе выполняют полукруглые канавки. Листы, последовательно соединенные зеркально-симметричными сторонами, образуют трубное и межтрубное пространства (рис. 1.67), где среда, обтекая гофры снаружи, движется волнообразно. Из листов (необходимое число 1500 и более) составляют блок, теплообменная поверхность которого может достигать 7200 м². Теплообменник разработан на давление в межтрубном пространстве до 8,4 МПа, в трубном 10,5 МПа и температуру 130—760 °С.

Многие процессы химической технологии отличаются высокой коррозионной активностью рабочих сред, поэтому необходимо использовать дорогостоящие материалы.

Освоение производства фторопласта отечественной промышленностью позволило конструировать коррозионно-стойкую химическую теплообменную аппаратуру нового вида. Разработаны опытные образцы фторопластовых теплообменников с трубками малых диаметров (2—5 мм). Эти аппараты пригодны для реализации теплообмена между средами при давлении до 1 МПа и перепаде температур до 200 °С. Такие теплообменные аппараты изготовляют погружными и кожухотрубчатыми.

Основная рабочая часть такого аппарата — теплообменный элемент (ТОЭ), состоящий из пучка гибких полимерных труб (рис. 1.68), концы которых соединены сваркой в коллектор (фторопластовую решетку). Последний служит для закрепления ТОЭ в корпусе аппарата и подвода к нему рабочей среды.

Фторопластовые теплообменники применяют в производстве серной кислоты, хлорорганических продуктов, медицинских препаратов.

Один из методов совершенствования стальных кожухотрубчатых теплообменников — разработка трубного пучка с трубными решетками, толщина которых соизмерима с толщиной стенки теплообменных труб.

Иллюстрируемый рис. 1.69 способ крепления теплообменных труб в решетке позволяет исключить концентрацию напряжений в местах крепления труб. Температурные деформации в таких аппаратах компенсируются прогибом трубной решетки, что позволяет обходиться без линзового компенсатора.

Повышение эффективности теплообменных процессов, основанных на применении традиционных методов энергоотвода, связано с большими трудностями, так как возможности во многом уже исчерпаны.

Перспективно использование энергии излучения электромагнитного поля в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) в качестве источника тепловой энергии.

СВЧ-нагрев относится к процессам с так называемым внутренним источником теплоты, каким является СВЧ-волна, проникающая в объект нагрева. Энергия электромагнитных колебаний преобразуется в тепловую непосредственно внутри самого продукта. Это обеспечивает высокую скорость нагрева, безынерционность управления процессами, исключает опасность повреждения поверхностного слоя вещества.

Перспективно использование СВЧ-нагрева для размораживания различных сред, в том числе биологических. Как показывают результаты исследований, при СВЧ-энергоподводе обеспечивается равномерное распределение температуры по всему объему размораживаемой среды.

Значительные трудности возникают при нагреве обычными методами вязких веществ в трубах. В этом случае из-за низкого коэффициента теплоотдачи со стороны вязкого теплоносителя образуется нагар на теплообменных поверхностях. Этого удастся избежать в СВЧ-установках, в которых обрабатываемый продукт прокачивается через фторопластовые трубки, расположенные по оси цилиндрического СВЧ-резонатора.

Массообменными называют процессы, при которых вещество из одной фазы переходит в другую путем диффузии при определенных рабочих условиях. К таким процессам относятся ректификация, абсорбция, десорбция, адсорбция, экстракция и сушка. В общем случае аппараты, в которых протекают указанные процессы, называются массообменными.

В химической, нефтехимической и смежных отраслях промышленности массообменные аппараты составляют значительную долю всего оборудования. Конструкции массообменных аппаратов весьма разнообразны. Ниже рассмотрены наиболее типичные для процессов ректификации и абсорбции колонные аппараты, а также экстракторы и сушилки.

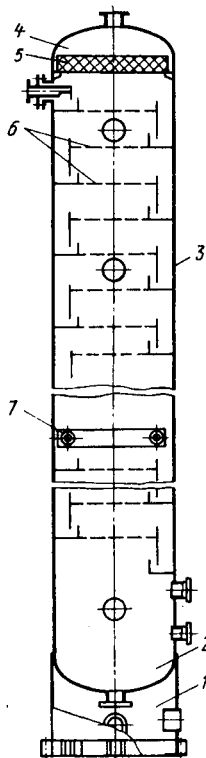
§ 2.1. ТАРЕЛЬЧАТЫЕ МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ РЕКТИФИКАЦИИ И АБСОРБЦИИ

В зависимости от способа организации контакта фаз колонные аппараты подразделяют на тарельчатые, насадочные и пленочные, а в зависимости от рабочего давления — на работающие под давлением, атмосферные и вакуумные. Около 60 % изготавливаемых в СССР аппаратов для абсорбции и ректификации представляют собой тарельчатые колонны, остальные — насадочные колонны. Последние при правильной организации гидродинамики процесса часто более экономичны, чем тарельчатые.

Из-за сложности изготовления и высокой стоимости пленочные аппараты мало используют в промышленности, поэтому здесь не рассматриваются.

Тарельчатые колонные аппараты (рис. 2.1) состоят, как правило, из вертикального корпуса 3, сферической или эллиптической крышки 4, днища 2 и жестко скрепленной с корпусом опорной обечайки 1 цилиндрической или конической формы. Использование конических опор для высоких колонн небольшого диаметра способствует повышению их устойчивости и уменьшению нагрузки на опорную поверхность фундаментного кольца. Внутри корпуса колонны смонтированы тарелки 6, устройство 7 для ввода сырья, отбойное устройство 5 и штуцера для жидкости и пара.

Рис. 2.1. Тарельчатая ректификационная колонна



Для удобства монтажа и ремонта тарелок расстояние между ними желательно принимать не менее 450 мм. Монтаж и обслуживание тарелок в аппаратах с цельносварным корпусом выполняют через люки. Люки на корпусе колонны рекомендуется располагать через каждые пять-десять тарелок в зависимости от диаметра аппарата и типа контактных устройств. Диаметр люков может колебаться от 450 до 600 мм, а расстояние между тарелками в месте установки люка от 800 до 1000 мм.

Корпуса тарельчатых колонных аппаратов изготавливают большей частью с постоянным по высоте диаметром, хотя для колонн больших размеров в случае, если нагрузка по жидкости и пару (газу) значительно изменяется по высоте колонны, корпус может быть выполнен ступенчатым, т. е. состоящим из частей разного диаметра, соединенных конусными переходами.

На корпусе, например, ректификационной колонны предусматривают штуцера: ввода продукта и вывода пара, ввода флегмы и пара из кипятильника, вывода кубового остатка и циркулирующей кубовой жидкости в кипятиль-

ник. Кроме того, аппарат снабжают штуцерами для измерения давления и температуры по высоте аппарата, уровня жидкости, отбора проб и др.

Места ввода сырья и вывода промежуточных фракций зависят от состава сырья; поэтому предусматривают несколько запасных штуцеров по высоте колонны.

Корпус тарельчатой колонны может быть выполнен либо сварным, либо состоящим из царг.

Корпуса аппаратов, работающих при больших рабочих давлениях, а также аппаратов диаметром более 1200 мм выполняют цельносварными. Аппараты диаметром 400—1000 мм изготавливают в царговом исполнении, если рабочее давление в них не превышает 1,6 МПа.

Аппараты в царговом исполнении снабжают неразъемными тарелками (рис. 2.2), представляющими собой отбортованный металлический диск с устройствами (отверстия, клапаны, колпачки) для ввода пара (газа) на тарелку и слива жидкости. Для создания необходимого уровня жидкости на тарелке 4 установлены сливная 2 и переливная 3 перегородки. Высота переливной перегородки постоянна; она образует так называемый переливной карман, в который погружена сливная труба 1 расположенной

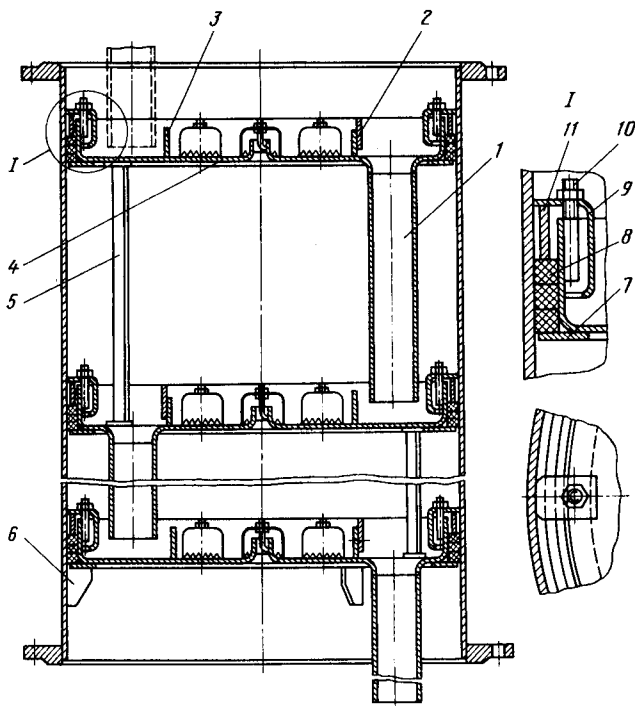


Рис. 2.2. Царга тарельчатой колонны

выше тарелки. Высоту сливной перегородки можно регулировать для поддержания необходимого уровня жидкости на тарелке.

Нижняя тарелка в царге установлена на кронштейнах 6, а остальные — на стойках 5. Упорные кольца 7 предназначены для герметизации тарелок. В зазоре между тарелкой и корпусом колонны установлены прокладки 8 из асбестового шнура, закрепленные нажимным кольцом 11, скобами 9 и шпильками 10.

В аппаратах диаметром 1200 мм и более используют тарелки разборной конструкции. Они состоят из отдельных секций 4, которые крепятся к опорной раме 1 (рис. 2.3) струбцинами 2, винтами 3 и прижимными планками 5. Опорная рама приварена к корпусу колонны. Герметичность соединений секций тарелки с опорной конструкцией обеспечивают прокладки 6.

Конструкция узла ввода сырья в колонну зависит от фазового состояния поступающей смеси. Жидкое питание, а также орошающая жидкость (флегма), вводятся непосредственно в переливные карманы тарелок. Переливные карманы, в которые вводится жидкость, обычно углублены ниже тарелки примерно на 300 мм. Иногда для гашения энергии струи в переливном кармане устанавливают отражательную пластину 2 (рис. 2.4, а).

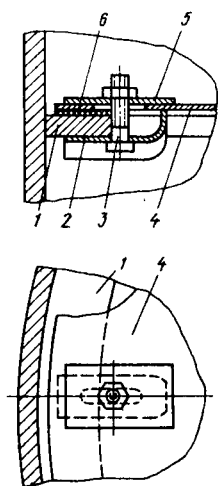


Рис. 2.3. Узел крепления секции тарелки к корпусу аппарата

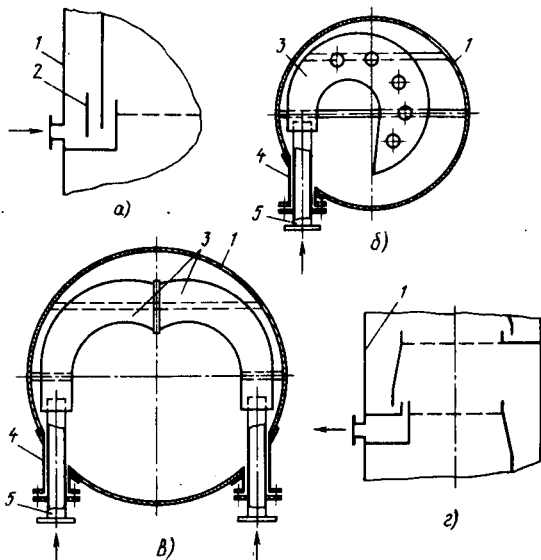


Рис. 2.4. Варианты ввода и вывода продуктов из колонны

При подаче сырья в парожидкостном состоянии энергия струи может быть весьма большой и вызывает изнашивание корпуса 1 колонны. Для защиты корпуса аппарата от эрозионного воздействия струи сырье подается через специальное устройство — улитку. Форма улитки должна обеспечивать равномерное распределение пара по сечению аппарата. На рис. 2.4, б показана конструкция улитки для ввода сырья одним потоком, на рис. 2.4, в — двумя потоками. В этих конструкциях улитка 3 крепится к корпусу колонны 1. Штуцера 4 ввода сырья в колонну быстро изнашиваются, поэтому их защищают гильзой 5, замена которой при ремонте колонны не сложна.

В колонне с боковыми выводами, предназначенной для разделения смеси на несколько компонентов, вывод жидкости из колонны осуществляется так же, как и ввод — из углубленных переливных карманов (рис. 2.4, г). Выводная труба должна быть погружена в жидкость во избежание выхода через нее паров.

При использовании двух- и четырехпоточных сливов жидкость, как правило, отбирают из карманов центральных сливов.

Корпуса серийно выпускаемых аппаратов для неагрессивных сред изготавливают из углеродистых сталей (ВСт3сп5, 20К, 16ГС), аппаратов для агрессивных сред — из коррозионно-стойких ста-

лей (08Х22Н6Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т) или из сталей с плакирующим слоем. Кроме того, аппараты можно изготавливать из чугуна, меди, керамики, стекла и других материалов.

§ 2.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТНЫХ МАССООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

В химической и других отраслях промышленности, где применяют массообменную аппаратуру для процессов абсорбции и ректификации, используют различные конструкции контактных устройств (тарелок).

Например, в производстве стирола и искусственных волокон требуется обеспечить разделение под вакуумом термолабильных смесей на основные компоненты с высокой степенью чистоты в объемах, измеряемых сотнями кубических метров в час, при высокой скорости паровой фазы и небольшой производительности по жидкости.

В области газоразделения, наоборот, обработка больших объемов продукции происходит при значительном избыточном давлении, высокой производительности по жидкости и сравнительно небольших скоростях газа.

Отдельные отрасли химии требуют разработки массообменных аппаратов для разделения термостойких продуктов в объемах, исчисляемых несколькими килограммами или десятками килограммов в час.

Несмотря на разнообразие условий, в которых протекают массообменные процессы в системе газ—жидкость (пар—жидкость), можно найти ряд общих параметров, характеризующих работу контактных устройств, для оценки возможности использования контактных устройств в конкретных условиях. При оценке контактных устройств массообменных аппаратов используют следующие параметры.

Производительность по жидкости L , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, рассчитанная на площадь свободного сечения колонны, и производительность по пару, или F -фактор пара,

$$F = w' / \sqrt{\rho_{\text{п}}},$$

где F — в $(\text{м}/\text{с})(\text{кг}/\text{м}^3)^{-0.5}$; w' — скорость пара (газа), рассчитанная на свободное сечение колонны, $\text{м}/\text{с}$; $\rho_{\text{п}}$ — плотность пара (газа), $\text{кг}/\text{м}^3$.

Эффективность контактного устройства, которую для тарельчатых аппаратов оценивают через КПД по Мерфи, представляющий собой отношение изменения доли паровой y (или жидкой x) фазы на тарелке к изменению долей этих фаз при достижении равновесия:

$$\eta = (y_{\text{к}} - y_{\text{н}}) / (y^* - y_{\text{н}}),$$

где y_k , y_n , y^* — конечная, начальная и равновесная концентрации легколетучего компонента на тарелке в паровой фазе, %.

Гидравлическое сопротивление контактных устройств Δp (Па) характеризует энергетические затраты на проведение процесса. Отношение Δp к КПД контактного устройства характеризует гидравлическое сопротивление теоретической тарелки.

Диапазон устойчивой работы контактного устройства — отношение максимальной и минимальной производительности по газу (пару), при котором устройство работает без заметного снижения эффективности. Этот показатель весьма важен в условиях, когда изменение производительности по пару значительно по высоте аппарата.

При оценке контактного устройства можно учитывать и такие параметры, как возможность работы на средах, склонных к полимеризации, технологичность, удельная металлоемкость и др. Но в большинстве случаев работу конструкции оценивают по указанным выше четырем параметрам. Выбор контактного устройства определяется условиями проведения процесса. Для процессов, протекающих под давлением, решающее значение имеют капитальные затраты на оборудование. Для уменьшения размеров оборудования стремятся к увеличению скоростей по жидкости и пару. При выборе контактного устройства для вакуумных колонн решающее значение имеет гидравлическое сопротивление теоретической тарелки ($\Delta p/\eta$).

§ 2.3. КОНСТРУКЦИИ КОНТАКТНЫХ МАССООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ

Тарельчатые контактные устройства можно классифицировать по многим признакам; например, по способу передачи жидкости с тарелки на тарелку различают тарелки с переточными устройствами и тарелки без переточных устройств (пропальные).

Тарелки с переточными устройствами имеют специальные каналы, по которым жидкость перетекает с одной тарелки на другую, причем по этим каналам не проходит газ. На пропальных тарелках нет переливных устройств, и жидкость, и газ проходят через одни и те же отверстия или прорези в полотне тарелки. Эти прорези работают периодически: в определенный момент времени одни прорези пропускают пар, другие — жидкость; затем их роли меняются.

По характеру взаимодействия газового и жидкостного потоков различают тарелки барботажного и струйного типов. Тарелки, на которых сплошной фазой является жидкость, а дисперсной — газ или пар, называют барботажными. На струйных тарелках дисперсной фазой является жидкость, сплошной — газ; потоки взаимодействуют в прямоточном режиме на поверхности капель и жидкостных струй, взвешенных в газовом потоке.

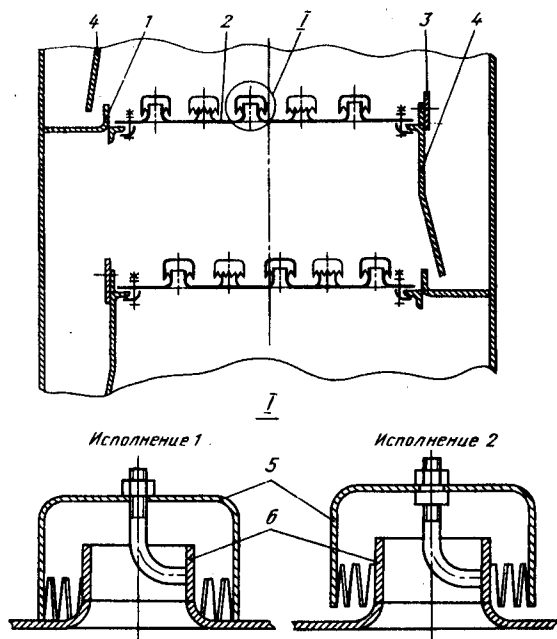


Рис. 2.5. Колпачковая тарелка

В зависимости от конструкции устройств ввода пара (газа) в жидкость различают тарелки клапанные, колпачковые, ситчатые, язычковые, решетчатые, с прямоточно-скоростными контактными элементами и др. Одни из этих тарелок могут работать только в барботажном режиме (колпачковые), другие — только в струйном (язычковые), третьи и в том, и в другом режимах (клапанные).

В химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающих отраслях промышленности наиболее распространены барботажные и струйные тарелки с переливами.

Колпачковые тарелки с капсульными колпачками до недавнего времени считали лучшими контактными устройствами для ректификационных и абсорбционных аппаратов благодаря простоте эксплуатации и универсальности.

Основной частью колпачковой тарелки (рис. 2.5) является стальной диск 1 (или полотно тарелки) с отверстиями для паровых патрубков 6. Патрубки приварены к диску. Над патрубками установлены колпачки 5 диаметром 60 или 80 мм. Колпачки имеют прорезы высотой 15; 20 или 30 мм.

Для создания необходимого уровня жидкости на тарелке последнюю снабжают сливной перегородкой 3. Переливная перегородка 1 образует переливной карман а, в который погружается сливная планка 4 тарелки, расположенной выше.

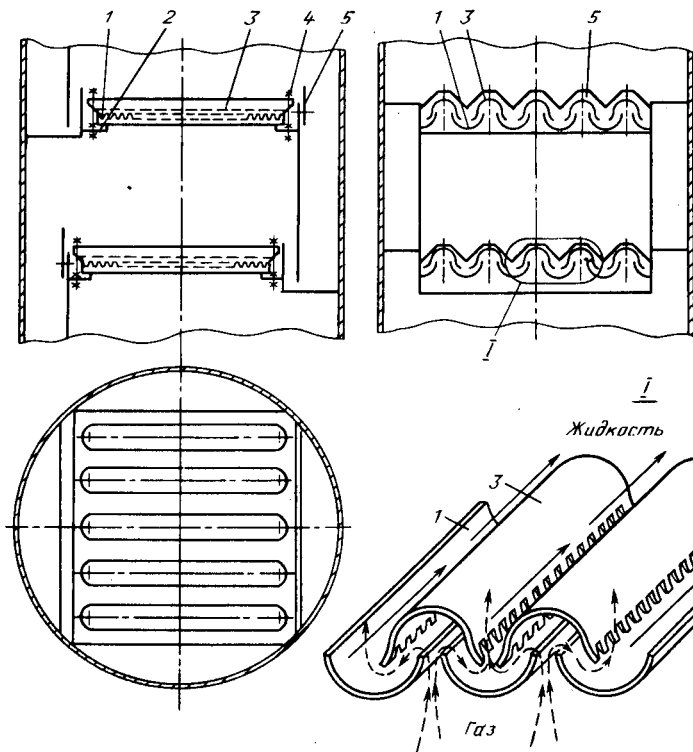


Рис. 2.6. Тарелка с туннельными колпачками

Применяют два варианта крепления колпачка к тарелке. В исполнении 1 положение колпачка можно регулировать по высоте, в исполнении 2 регулирование невозможно, и нижние кромки прорезей в этом случае упираются в полотно тарелки.

Тарелка работает следующим образом. Поступающая жидкость заполняет тарелку на высоту, определяемую сливной перегородкой 3, при этом прорези колпачков должны быть погружены в жидкость. Пар проходит через паровые патрубки, щели колпачков и барботирует сквозь слой жидкости. Газ и жидкость взаимодействуют в перекрестном токе: жидкость движется по тарелке от переливного кармана к сливной перегородке и далее на расположенную ниже тарелку, а газ — вверх по оси колонны.

Колпачковые тарелки можно изготавливать из чугуна, меди, керамики, углеграфита, пластмасс и др.

Тарелки с капсульными колпачками имеют относительно высокий КПД (0,75—0,80) и работают в широком диапазоне производительностей по газу. Их можно использовать при нестабильных нагрузках по жидкости и пару. Для этих тарелок $F \approx 1 \text{ (м/с) (кг/м}^3\text{)}^{-0,5}$, а гидравлическое сопротивление, зависящее

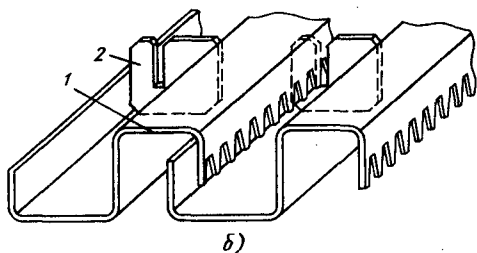
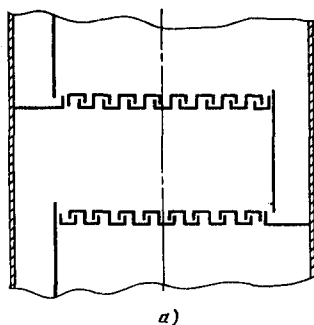


Рис. 2.7. Тарелка с S-образными элементами:
а — общий вид; б — схема

от глубины погружения колпачка, не превышает 1 кПа. К недостаткам этих тарелок следует прежде всего отнести значительные металлоемкость и трудоемкость изготовления.

В ректификационных аппаратах нефтеперерабатывающих производств используют тарелки с туннельными колпачками (рис. 2.6). Такие тарелки собирают из штампованных желобов 1, уложенных по ходу жидкости на опорные уголки 2 и накрытых колпачками 3 так, что между ними образуются паровые каналы. Для равномерного распределения пара колпачки в нижней части имеют трапецеидальные прорези. Колпачки крепят на полотне тарелки шпильками 4. Для равномерного распределения жидкости на тарелке сливную планку 5 также выполняют с прорезями.

Основное преимущество этих тарелок — небольшое число колпачков и возможность их очистки. Остальные показатели этих тарелок низкие, поэтому в настоящее время их заменяют более современными контактными устройствами.

В настоящее время в нефтеперерабатывающих колоннах используют и тарелки с S-образными элементами 1 (рис. 2.7), установленными перпендикулярно направлению движения жидкости на тарелке. Для того, чтобы закрыть каналы с торцов и увеличить жесткость тарелки, между S-образными элементами устанавливают пластины 2.

В зависимости от диаметра аппарата такие тарелки бывают одно- и многосливными. Характерная особенность этих тарелок состоит в том, что пар выходит из контактных элементов в направлении движения жидкости. Это способствует уменьшению разностей уровней жидкости на тарелке у сливной и переливной перегородок.

Металлоемкость тарелок с S-образными элементами почти вдвое меньше, а производительность на 20—30 % больше по сравнению с тарелками с капсульными колпачками. Эффективность сравниваемых тарелок примерно одинаковая (КПД равен

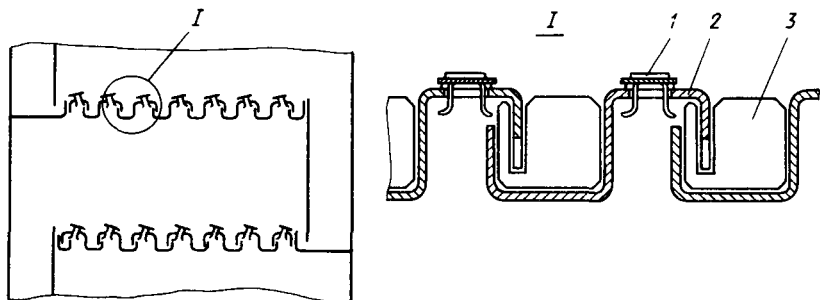


Рис. 2.8. Тарелка с S-образными элементами и клапанами

0,6—0,8). Оптимальная нагрузка по газу для этой тарелки на 10—25 % меньше, чем для колпачковой. Для повышения диапазона устойчивой работы и производительности таких тарелок S-образные элементы 2 (рис. 2.8) снабжают прямоточными клапанами 1 прямоугольной формы, размещенными на верхней площадке S-образного элемента. Для увеличения жесткости тарелки устанавливают пластины 3. По производительности эти тарелки примерно на 10 % превосходят клапанные прямоточные.

Клапанные тарелки также широко применяют в нефтехимической промышленности. Основные преимущества этих тарелок — способность обеспечить эффективный массообмен в большом ин-

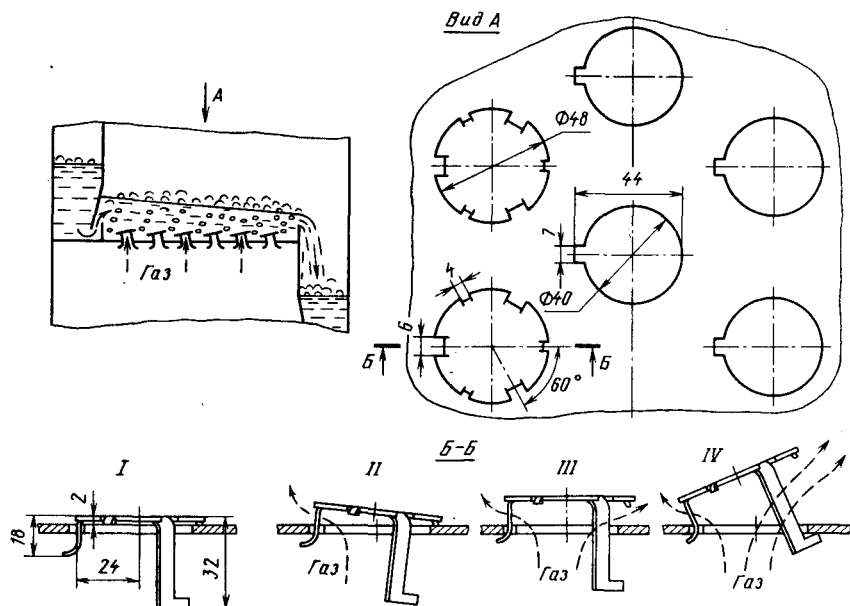


Рис. 2.9. Клапанный-прямоточная тарелка

Рис. 2.10. Клапанная балластная тарелка

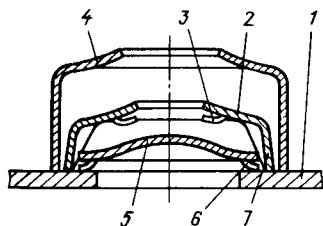
тервале рабочих нагрузок, несложность конструкции, низкая металлоемкость и невысокая стоимость.

Клапанные тарелки изготавливают с дисковыми и прямоугольными клапанами; работают тарелки в режиме прямооточного или перекрестного движения фаз. В отечественной промышленности наиболее распространены клапанные прямооточные тарелки с дисковыми клапанами. На клапанной прямооточной тарелке (рис. 2.9) в шахматном порядке расположены отверстия, в которых установлены саморегулирующиеся дисковые клапаны диаметром 50 мм, способные подниматься при движении пара (газа) на высоту до 6—8 мм.

Дисковый клапан снабжен тремя направляющими, расположенными в плане под углом 45° ; две из этих направляющих имеют большую длину. Кроме того, на диске клапана штамповкой выполнены специальные упоры, обеспечивающие начальный зазор между диском и тарелкой; это исключает возможность «прилипания» клапана к тарелке (рис. 2.9, а, положение I). При небольшой производительности по пару поднимается легкая часть клапана (рис. 2.9, положение II) и пар выходит через щель между клапаном и лотком тарелки в направлении, противоположном направлению движения жидкости по тарелке. С увеличением скорости пара клапан поднимается и зависает над тарелкой (рис. 2.9, положение III); теперь пар барботирует в жидкость через кольцевую щель под клапаном. При дальнейшем увеличении производительности по пару клапан занимает положение, при котором пар выходит в направлении движения жидкости, уменьшая разность уровней жидкости на тарелке (рис. 2.9, положение IV). При этом короткая направляющая фиксируется в специальном вырезе на кромке отверстия, обеспечивая заданное положение клапана при его подъеме.

Эффективность клапанных прямооточных тарелок (КПД) 0,70—0,85, $F \leq 2,5$ (м/с) $(\text{кг/м}^3)^{-0.5}$, диапазон устойчивой работы 3,5. В области саморегулируемой работы тарелки обладают относительно небольшим гидравлическим сопротивлением.

Для увеличения производительности и диапазона устойчивой работы клапанные тарелки выполняют балластными (рис. 2.10). Над отверстием тарелки 1 на специальных ножках установлены ограничители подъема 4, а внутри их — на ножках 7 легкий клапан 5 и балласт 2. Для исключения прилипания клапана к балласту имеются упоры 3 и 6. При малой производительности по газу тарелка работает как обычная с дисковыми клапанами меньшей массы; при увеличении нагрузки клапан 5 упирается в балласт и работает совместно с ним как один утяжеленный клапан.



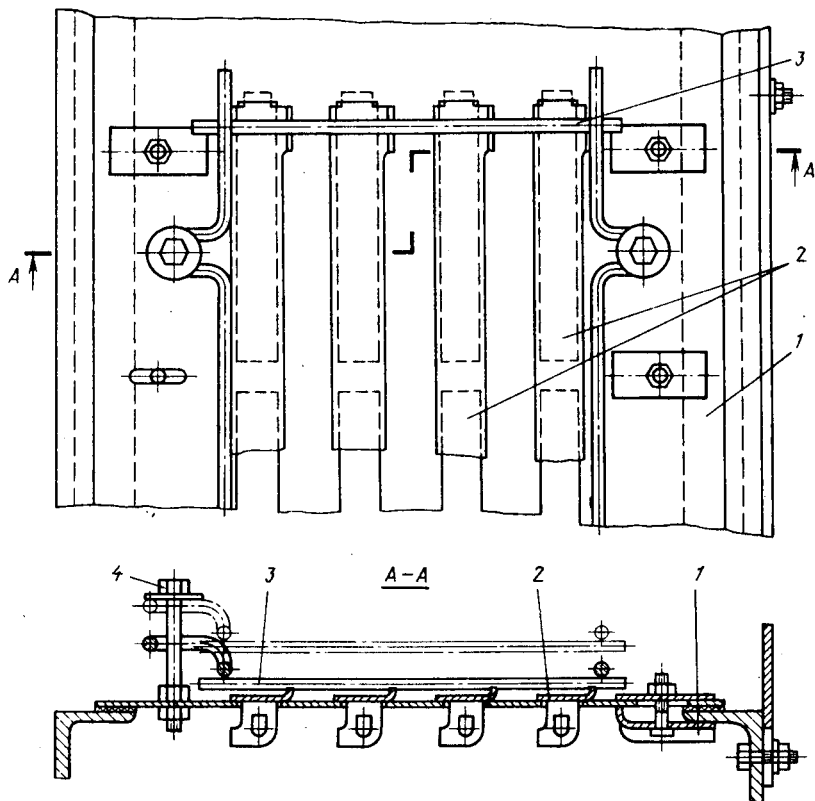


Рис. 2.11. Тарелка с групповым балластом

Балластные клапанные тарелки можно выполнять как с индивидуальным, так и с групповым балластом. Примером последнего варианта могут служить балластные тарелки ректификационных колонн (рис. 2.11). Такая тарелка 1 имеет расположенные в несколько рядов прямоугольные вырезы, закрытые клапанами 2 прямоугольной формы. Большие размеры клапанов (154×45 мм) позволяют уменьшить их число по сравнению с дисковыми клапанами в 2—4 раза. Над клапанами расположен общий подвижный балласт 3, выполненный из прутка диаметром 8 мм. При работе таких тарелок вначале поднимается пластина клапана, затем она упирается в балласт и поднимается вместе с ним до упора в головку винта 4.

Клапанная тарелка со штампованными клапанами цилиндрической формы показана на рис. 2.12, а. Клапан 1, лежащий на полотне тарелки 2, представляет собой часть цилиндра с ограничителями подъема 3. Клапан расположен в гнезде, имеющем отогнутую полку 4. Масса клапана, его конфигурация и положение центра тяжести подобраны так, что при достижении опреде-

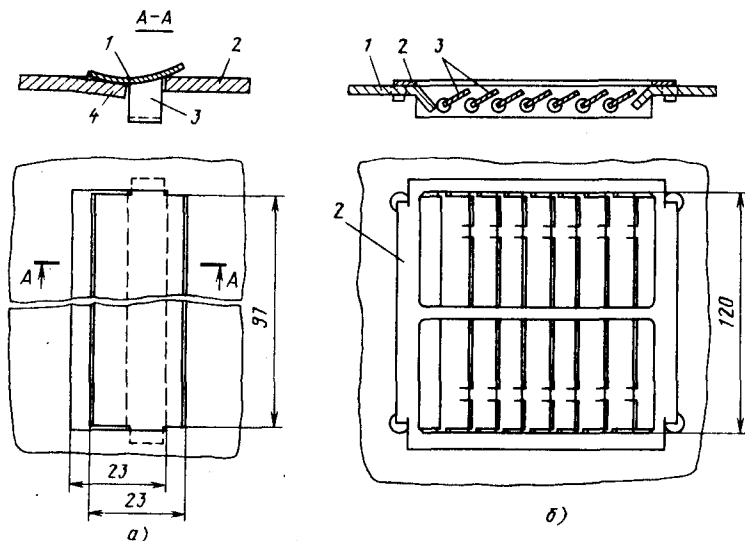


Рис. 2.12. Тарелки клапанные

ленной скорости пара клапан перекачивается по поверхности отогнутой полки. При этом между плоскостью тарелки и клапаном образуется щель, через которую в направлении слива жидкости выходит пар. При значительной производительности по пару клапан поднимается и зависает над тарелкой.

В жалюзийно-клапанной тарелке (рис. 2.12, б) щель для входа газа на тарелку 1 образуется при повороте плоских клапанов-жалюзей 3 вокруг их оси, укрепленной в рамке 2.

Ситчатые и решетчатые тарелки. Ситчатые тарелки со сливным устройством применяют в колонных аппаратах диаметром 400—4000 мм при расстоянии между тарелками от 200 мм и более. Основной элемент таких тарелок — металлический диск с отверстиями диаметром 2—6 мм, расположенными по вершинам равносторонних треугольников (рис. 2.13).

В колоннах диаметром более 800 мм тарелки состоят из отдельных секций. По креплению секций тарелки к корпусу и устройству переливов такие колонны аналогичны аппаратам с колпачковыми и клапанными тарелками. Преимущество ситчатой тарелки — большое свободное (т. е. занятое отверстиями) сечение тарелки, а следовательно, и высокая производительность по пару, простота изготовления, малая металлоемкость. По производительности по пару (газу) эти тарелки на 30—40 % превосходят колпачковые. Недостаток — высокая чувствительность к точности установки. Аппараты с ситчатыми тарелками не рекомендуется использовать для работы на загрязненных средах; это может вызвать забивание отверстий.

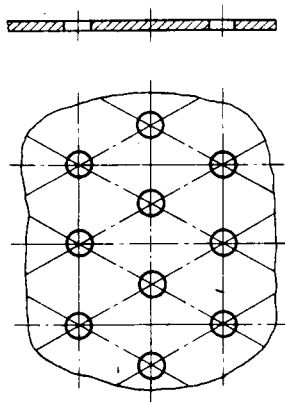


Рис. 2.13. Элемент ситчатой тарелки

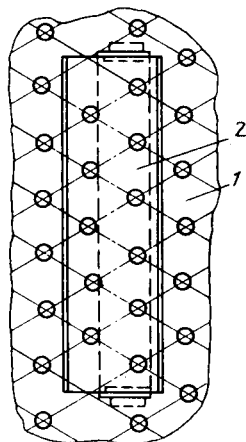
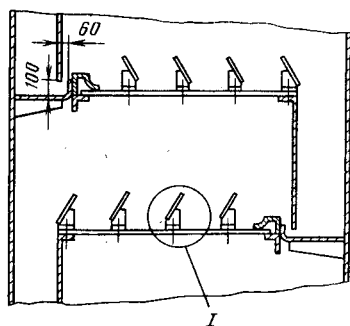
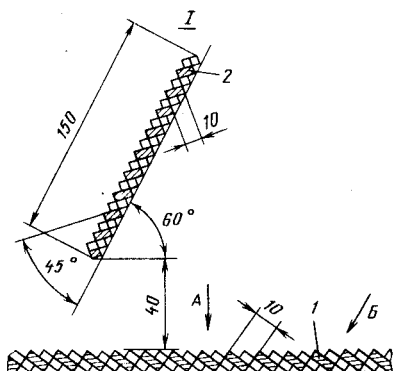


Рис. 2.14. Элемент ситчато-клапанной тарелки



Вид А



Вид Б

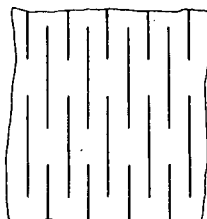
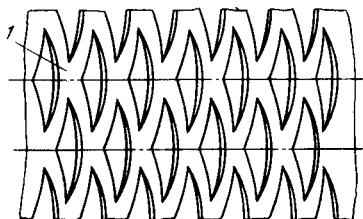


Рис. 2.15. Тарелка с просечно-вытяжными отверстиями

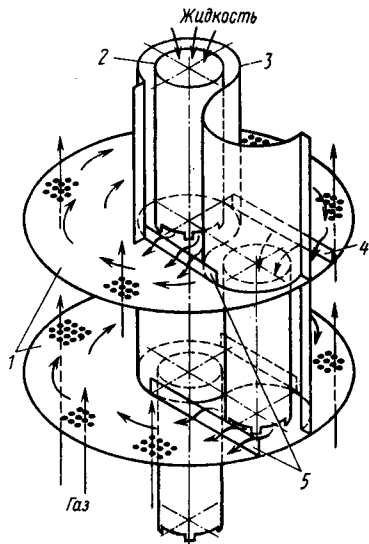
Рис. 2.16. Ситчатая тарелка с S-образной перегородкой

Для уменьшения гидравлического сопротивления и расширения диапазона устойчивой работы ситчатых тарелок их комбинируют с клапанными устройствами (рис. 2.14); в результате повышается эффективность работы тарелки при малой и большой производительности по пару. При малых нагрузках тарелка работает как обычная ситчатая, с увеличением нагрузки открывается клапан 2 и между клапаном и тарелкой 1 образуется щель, откуда под некоторым углом к горизонтали выходит пар, обеспечивая перемещение жидкости по тарелке в направлении слива и уменьшая разность уровней жидкости на тарелке. Ситчато-клапанная тарелка обеспечивает большой диапазон устойчивой работы при небольшом гидравлическом сопротивлении, что делает ее пригодной для процессов, протекающих под вакуумом.

Ситчатые тарелки с просечно-вытяжными отверстиями (рис. 2.15) используют в колонных аппаратах диаметром 1200—4000 мм. Такие тарелки состоят из отдельных секций 1, изготовляемых из листа толщиной 2—3 мм с просечно-вытяжными отверстиями. Тарелка работает как струйная прямоточная. Для уменьшения брызгоуноса под углом 60° над тарелкой устанавливают отбойные элементы 2.

Свободное сечение тарелки, выбираемое из условия отсутствия «провала» жидкости, должно быть достаточно большим (не менее 30 % сечения колонны), чтобы тарелка обладала невысоким гидравлическим сопротивлением. Благодаря этому такие тарелки используют в вакуумных колоннах. Минимальное расстояние между тарелками в колонне 450 мм.

Ситчатые тарелки наиболее распространены в качестве контактных устройств ректификационных колонн воздухоразделительных установок, работающих при низкой температуре. В аппаратах небольшого диаметра применяют S-образные ситчатые тарелки (рис. 2.16). Такая тарелка представляет собой перфорированный лист 1, к которому припаяна S-образная перегородка 3, делящая тарелку на две части. Стекающая с верхней тарелки жидкость через прорези в сливном стакане 2 и далее через переливную перегородку 5 поступает на тарелку и движется в направлении, указанном стрелками, контактируя с паром, поднимаю-



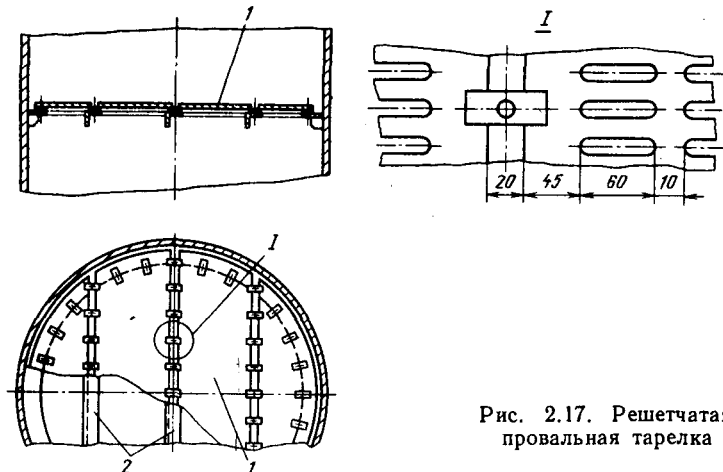


Рис. 2.17. Решетчатая провальная тарелка

щимся через отверстия в листе 1. Подойдя к перегородке 3 с другой стороны, жидкость стекает на следующую тарелку через сливную перегородку 4 и сливной стакан.

Решетчатые провальные тарелки (рис. 2.17) используют в установках, рабочая производительность которых отклоняется от расчетной не более чем на 25 %.

К преимуществам этих тарелок следует, прежде всего, отнести простоту конструкции и малую металлоемкость. Кроме того, тарелки имеют большую пропускную способность по жидкости и, при достаточной ширине щели, могут быть использованы для обработки загрязненных жидкостей, оставляющих осадок на тарелке. По эффективности решетчатые провальные тарелки обычно не уступают тарелкам с переливом. К недостаткам относятся узкий диапазон устойчивой работы и сложность обеспечения равномерного распределения орошения по поверхности тарелок в начале процесса.

Конструктивно тарелка представляет собой плоский, перекрывающий все сечение колонны диск 1 с выштампованными в нем прямоугольными щелями, уложенный на опорную конструкцию 2. Обычно площадь прорезей составляет 10—30 % всей площади тарелки. Прорези (как правило, размерами 4×60 мм) располагаются на поверхности тарелки с шагом $t = 10 \dots 36$ мм.

При работе колонны под давлением поступающих паров на полотно тарелки создается слой жидкости, через которую барботирует пар. При этом часть жидкости протекает через прорези на расположенную ниже тарелку. Прорези работают периодически: места стока жидкости и прохода пара произвольно перемещаются по полотну тарелки.

Секционированные массообменные устройства. Одно из направлений технического прогресса в химической, нефтехимиче-

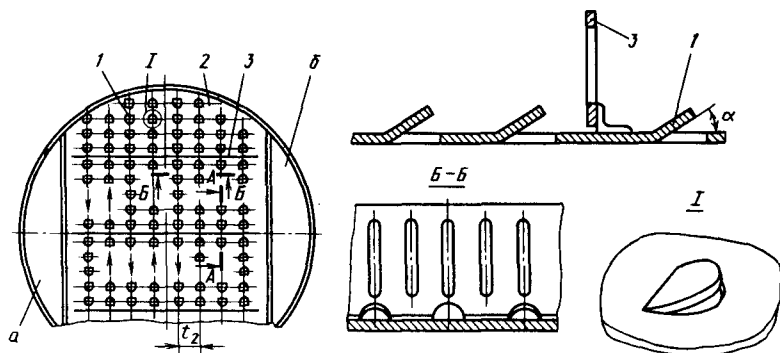


Рис. 2.18. Продольно-секционированная тарелка с просечными элементами

ской и нефтеперерабатывающей промышленности — разработка и применение аппаратов большой единичной мощности. До недавнего времени повышение эффективности и производительности колонн обеспечивали увеличением их высоты и диаметра. Однако с увеличением диаметра колонны возрастает неупорядоченность движения взаимодействующих фаз: на тарелке появляются «байпасные» потоки, «мертвые» зоны, возникает поперечная неравномерность скорости газового потока и высоты жидкости на тарелке. Все это снижает эффективность массообмена в колонне. В связи с этим производительность аппарата следует повышать не увеличением размеров аппарата, а созданием контактных устройств, обладающих высокой производительностью по жидкости и пару, в частности, продольным и поперечным секционированием этих устройств.

Известно, что производительность тарелок повышается при контактировании фаз в прямотоке. Однако при прямоточном взаимодействии и большой скорости пара (газа) жидкость смещается в направлении к сливному карману, что затрудняет работу сливных устройств.

Для компенсации прямоточного движения фаз и исключения его распространения на всю тарелку можно устанавливать на тарелке продольные и поперечные перегородки, обеспечивающие зигзагообразное движение жидкости на тарелке от перелива к сливу, а также создающие условия для движения потоков парожидкостной смеси по тарелке в противоположных или пересекающихся направлениях.

Примером может служить продольно-секционированная тарелка с просечными элементами (рис. 2.18). На полотне тарелки 2 выштампованы просечки 1, отогнутые под углом α . Тарелка секционирована вдоль потока жидкости вертикальными перегородод-

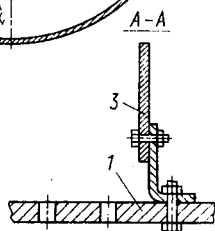
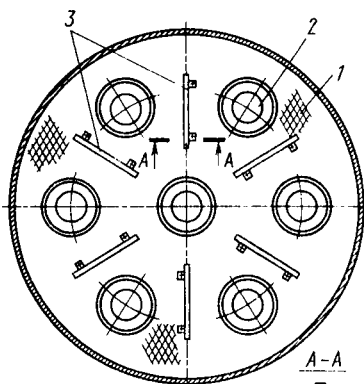
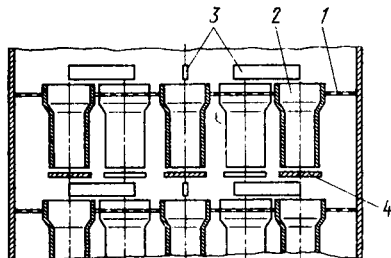
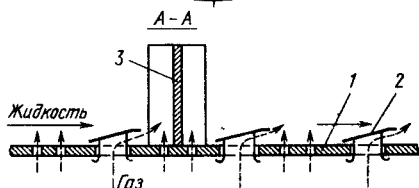
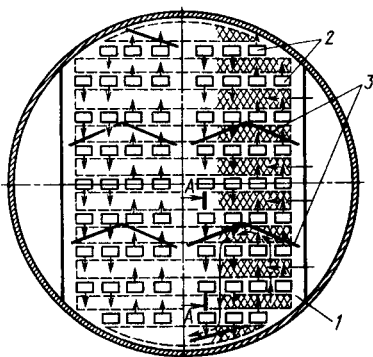
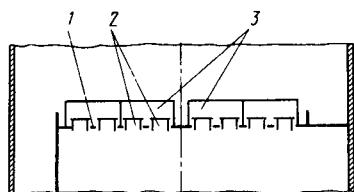


Рис. 2.19. Комбинированная клапанная тарелка

Рис. 2.20. Тарелка с двумя зонами контакта

ками 3, причем для создания постоянного гидравлического сопротивления по всей тарелке перегородки перфорированы.

При скорости газа до 1,5 м/с тарелки работают аналогично ситчатой и колпачковой: жидкость из переливного кармана *a* поступает на рабочую часть тарелки, газ вводится через просечки, барботирует через слой жидкости, аэрирует ее и на тарелке образуется газожидкостный слой. При скорости газа более 1,5 м/с газовые струи, выходящие из просечек, и создаваемые ими потоки жидкости движутся к вертикальным перегородкам или стенкам колонны, ударяются о них, сепарируются и газ покидает тарелку. При этом жидкость совершает сложное зигзагообразное движение от переливного *a* к сливному *б* карману.

Вариантом массообменного устройства с продольным секционированием является клапанная тарелка с продольными пере-

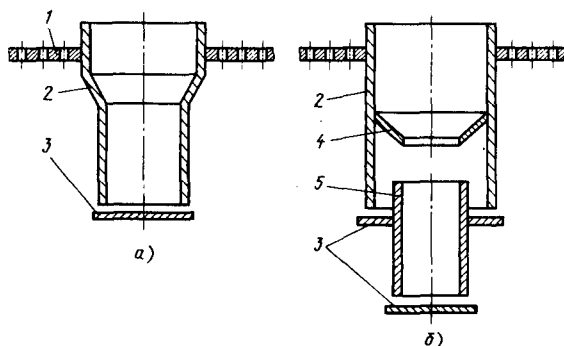


Рис. 2.21. Однощелевые (а) и двухщелевые (б) карманы

городками 3 (рис. 2.19), которая отличается от тарелки с просечными элементами тем, что на полотне 1 тарелки вместо просечек смонтированы клапаны 2 с боковыми стенками, обеспечивающие направленное движение жидкостного потока.

По производительности такие тарелки превосходят обычные клапанные тарелки без продольного секционирования в 1,4 раза, а по эффективности массообмена в 1,25—1,3 раза.

При высокой плотности орошения [более $50 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$], когда работа тарелок лимитируется производительностью переливных устройств, целесообразно применение многосливной продольно-секционированной тарелки, или тарелки с двумя зонами контакта фаз (рис. 2.20). Последняя представляет собой комбинацию барботажной тарелки (ситчатой, клапанной) с устройством, в котором реализуется зона контакта фаз, формирующаяся в пространстве между тарелками при перетекании жидкости. Тарелка состоит из перфорированного основания 1 с установленными на нем сливными карманами 2 (могут быть одно-, двух- и трехщелевыми), направляющих планок 3 и отбойных дисков 4.

Однощелевой сливной карман, установленный на тарелке 1 (рис. 2.21, а), состоит из патрубка 2 и отбойного диска 3, укрепленного так, что между ними образуется кольцевая щель шириной $h_{\text{щ}} = 4 \dots 12 \text{ мм}$. Через эту щель вытекает кольцевая струя жидкости, образуя дополнительную зону контакта. При установке двухщелевого сливного кармана (рис. 2.21, б) жидкость переливается через сливную перегородку, протекает по внутренней стенке наружного патрубка 2 и конусу 4 во внутренний патрубок 5 и вытекает из нижней щели кольцевой струей, образуя дополнительную зону контакта.

С увеличением производительности по жидкости уровень ее в патрубке 5 повышается, жидкость заполняет пространство в трубке 2 и начинается истечение из верхней щели. В пространстве между тарелками образуется вторая кольцевая струя. Таким образом, многощелевой слив позволяет значительно расширить диапазон нагрузок по жидкости.

Тарелки с двумя зонами контакта фаз позволяют повысить эффективность массообмена примерно на 30 % благодаря образованию дополнительной зоны контакта в пространстве между тарелками.

§ 2.4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ТАРЕЛЬЧАТЫХ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ

Анализ работы тарельчатых контактных устройств, выполненный УкрНИИХиммашем, позволил установить для некоторых тарелок описанных конструкций области применения в зависимости от технологического назначения и параметров работы.

УкрНИИХиммашем для тарелок шести типов определены области применения (табл. 2.1) и область устойчивой работы (рис. 2.22).

Установлено, что ситчатые тарелки эффективны в процессах, протекающих при стабильных режимах работы (диапазон устойчивой работы тарелки до 2) и производительности L по жидкости до $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Эти тарелки нельзя использовать для обработки жидкостей, вызывающих забивание осадком отверстий тарелок. Ситчатые многосливные тарелки применяют для процессов, требующих эффективного контакта при большой удельной нагрузке по жидкости L до $180 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, ситчато-клапанные — для процессов, проводимых под вакуумом и при атмосферном давлении, при $L < 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $F < 2,5 \text{ (м/с)}$ $(\text{кг/м}^3)^{-0,5}$. Эти тарелки в меньшей степени подвержены забиванию твердыми включениями, которые под действием прямоочной составляющей скорости пара, выходящего из-под клапанов, сдуваются с поверхности тарелки.

Клапанные прямоочные тарелки применяют в процессах, протекающих при атмосферном и повышенном давлении, при $L < 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $F < 2,5 \text{ (м/с)}$ $(\text{кг/м}^3)^{-0,5}$. Диапазон устойчивой работы этих тарелок 3,5.

Т а б л и ц а 2.1

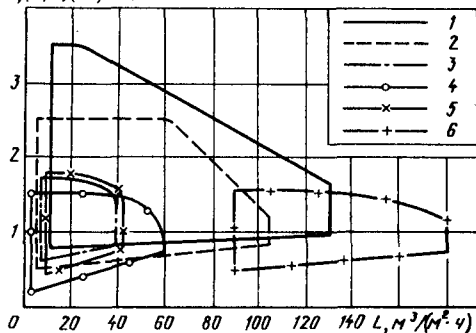
Области применения тарелок различных типов

Тарелка	Диаметр, мм	Условия проведения процесса
Ситчато-клапанная	400—4000	Вакуум; атмосферное давление
Ситчатая		Любое давление, стабильный режим
Клапанная		Атмосферное и повышенное давление
Колпачковая	1000—4000	Любое давление, нестабильный режим
Жалюзийно-клапанная	1600—4000	Атмосферное и повышенное давление
Ситчатая многосливная		Высокоэффективные процессы, большие удельные нагрузки по жидкости — до $180 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Рис. 2.22. График к определению области устойчивой работы тарелки:

1 — ситчато-клапанной; 2 — ситчатой; 3 — клапанной; 4 — жалюзийно-клапанной; 5 — колпачковой; 6 — ситчатой многосливной

$$F, (м/с) (кг/м^3)^{-0,5}$$



Жалюзийно-клапанные тарелки, обладающие высокой эффективностью, имеют несколько более высокое гидравлическое сопротивление, чем ситчато-клапанные, и применяются в основном для проведения процессов под давлением, при $L < 130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $F < 3,75 \text{ (м/с) (кг/м}^3)^{-0,5}$. Диапазон устойчивой работы достигает 4,5. Колпачковые тарелки применяют в производствах относительно небольшой мощности, а также при небольших нагрузках по жидкости. В этих условиях тарелки обеспечивают поддержание определенного запаса жидкости в контактной зоне.

§ 2.5. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН

Процесс ректификации проводят в колонных аппаратах, снабженных тарелками для организации взаимодействия между противоточно движущимися неравновесными потоками пара и жидкости. На каждой тарелке встречные потоки пара и жидкости обмениваются массой и энергией, а затем разделяются (сепарируются). Эффективность работы тарелок характеризуется степенью приближения к равновесию отсепарированных после взаимодействия потоков, которая может быть задана эмпирическим коэффициентом эффективности или определена по уравнениям, учитывающим кинетические закономерности процесса массо-теплообмена. В любом случае необходимый элемент расчета — определение равновесного состояния парожидкостной системы на тарелке.

Процесс ректификации рассчитывают, как правило, в несколько этапов.

1. Обоснование требований к качеству продуктов разделения и составление уравнений материального баланса разделения с учетом этих требований.

2. Расчет основных технологических параметров (давления процесса, числа тарелок, их распределения по секциям, флегмового и парового чисел, тепловых нагрузок на дефлегматор и испаритель и др.), обеспечивающих выполнение требований к качеству продуктов.

3. Распределение паровых и жидкостных потоков по испаряющей и укрепляющей секциям аппарата и расчет необходимой площади наиболее нагруженных сечений.

4. Гидравлический расчет контактных устройств и выбор размеров аппарата.

5. Расчет вспомогательного оборудования (кубовый испаритель, дефлегматор, насосы и др.).

6. Выбор конструкционных материалов и расчет на прочность и устойчивость, определение исполнительных размеров элементов проектируемой аппаратуры.

7. Технико-экономическое обоснование (ТЭО) принятого проектного решения.

Окончательное заключение об эффективности проектного решения можно сделать лишь после ТЭО. При этом на каждом этапе расчета можно получить информацию, требующую уточнения результатов предыдущих этапов и, более того, их пересмотра. В этом проявляется суть проектирования — его итерационный характер, поэтому применение ЭВМ на всех этапах проектирования очень эффективно.

Наиболее ответственные и трудоемкие из перечисленных — этапы 2 и 3. Именно на этих этапах наиболее часто получают информацию, требующую корректировки предыдущих результатов. Это объясняется тем, что заданное качество продуктов разделения может быть достигнуто при различных сочетаниях технологических параметров. Так, уменьшение числа тарелок в колонне можно компенсировать увеличением флегмового и парового чисел, т. е. увеличением теплоподвода к кубовому испарителю и теплоотвода из дефлегматора, использованием двухпоточного ввода сырья при разных температурах и т. д. В связи с этим выбор наилучшего варианта предполагает оптимизационное решение, что также требует использования ЭВМ.

Основные технологические параметры ректификации, обеспечивающие выполнение заданных требований к разделению исходной смеси, относительно просто рассчитать лишь для простых ректификационных колонн, разделяющих один поток сырья на два продукта (дистиллят и кубовый остаток). В этом случае для расчета технологических параметров ректификации можно использовать известные корреляционные зависимости, связывающие параметры двух гипотетических (предельных) режимов работы простых колонн: режима полного орошения (флегмовое число равно бесконечности, число тарелок минимально, т. е. $R = \infty$, $N = N_{\min}$) и режима минимального орошения (флегмовое число минимально, число тарелок равно бесконечности, т. е. $R = R_{\min}$, $N = \infty$) [3, 10].

При расчете сложных колонн, под которыми понимают аппараты с несколькими вводами питания, несколькими уровнями подвода (отвода) энергии, несколькими уровнями отвода продуктов, математическое описание процесса существенно усложняется.

Решение в этом случае находят, как правило, методом организованного перебора реализуемых вариантов разделения сырьевых потоков на требуемые продукты.

Для определения равновесных температур и составов парожидкостных систем широко распространена процедура расчета процесса однократного испарения (ОИ). Уравнения ОИ получают совместным решением уравнений:

общего и покомпонентного материального баланса

$$F = G + L, \quad (2.1)$$

$$Fz_i = Gy_i + Lx_i; \quad (2.2)$$

равновесия

$$y_i = K_i x_i \quad (2.3)$$

и условий:

$$\sum_{i=1}^n z_i = 1; \quad \sum_{i=1}^n y_i = 1; \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1. \quad (2.4)$$

В этих уравнениях F , G и L — мольные расходы соответственно питания, паровой и жидкой фаз (кмоль/ч); z_i , y_i , x_i — доли соответствующих фаз; K_i — константа фазового равновесия; n — число компонентов; i — номер компонента.

Обозначив через $E = G/F$ относительный выход паровой фазы из питания, можно получить выражения для расчета процесса ОИ, из которых наиболее удобно

$$f = \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \frac{z_i (K_i - 1)}{1 + E (K_i - 1)}. \quad (2.5)$$

Константа фазового равновесия зависит от температуры, давления и состава системы. Во многих случаях зависимостью константы от состава можно пренебречь; тогда $K_i = \varphi(p, t)$, где p и t — давление и температура системы. Таким образом, уравнение (2.5) связывает состав питания, долю отгона паровой фазы и константу фазового равновесия. Очевидно, что в соответствии с физическим смыслом функция (2.5) должна тождественно сводиться к нулю; поэтому задача расчета процесса ОИ заключается в нахождении сочетаний E , p и t , обеспечивающих выполнение данного условия. Это позволяет рассчитывать процесс ОИ в нескольких постановках (при заданном составе сырья): 1) заданы t и E — находим p ; 2) заданы p и E — находим t ; 3) заданы p и t — находим E .

Все три постановки задачи используют при расчете технологических параметров ректификации. Так, при расчете давления конденсации паров дистиллята используют первую постановку задачи, при расчете температур верха и низа колонны — вторую, при расчете фазового состояния питания — третью.

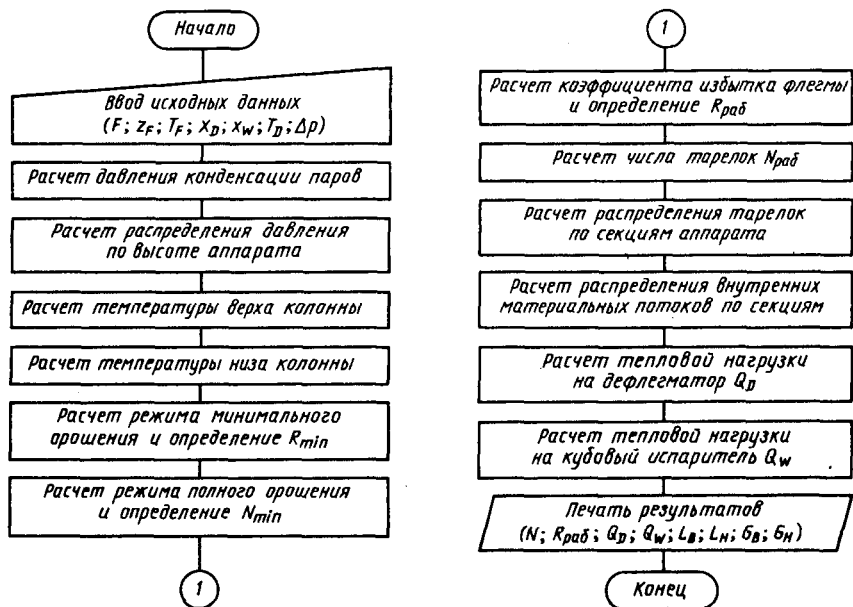


Рис. 2.23. Алгоритм расчета технологических параметров ректификации

Решение находят методом последовательных приближений, например методом Ньютона. В соответствии с этим методом новое приближение для искомого параметра находят через производную функции f по соответствующей переменной. Так, для третьей постановки задачи ОИ

$$E_{k+1} = E_k - f_k / (df_k / dE_k), \quad (2.6)$$

где k — номер приближения;

$$\frac{df_k}{dE_k} = - \sum_{i=1}^n \frac{z_i (K_i - 1)^2}{[1 + E_k (K_i - 1)]^2}.$$

Производные функции f по другим параметрам можно рассчитывать. Например, производная по температуре

$$df/dt = [f(t + \Delta t) - f(t)] / \Delta t.$$

Алгоритм расчета технологических параметров ректификации, основанный на анализе гипотетических режимов работы колонны и использовании процедуры расчета ОИ, приведен на рис. 2.23. Исходные данные в алгоритме: расход питания F (кмоль/ч), его состав z_{Fi} , температура t_F , °С, состав продуктов разделения (дистиллята x_{Di} , остатка x_{wi}), температура конденсации дистиллятных паров t_D , перепад давлений по высоте аппарата Δp .

Рис. 2.24. Схема модельного ректификационного аппарата

От гипотетических режимов работы колонны к рабочему переходят с помощью корреляционных уравнений [1, 4], что позволяет найти рабочие значения флегмового числа $R_{\text{раб}}$ и требуемое для разделения при $R_{\text{раб}}$ число тарелок $N_{\text{раб}}$.

В качестве результатов расчета помимо указанных выводят тепловые нагрузки на испаритель и дефлегматор и расходы внутренних материальных потоков в колонне: L_n , L_b — расходы жидкого орошения соответственно в нижней и верхней секциях аппарата (кмоль/ч); G_n , G_b — то же, для парового орошения (кмоль/ч).

Для расчета сложных колонн предложены различные методы [1]. Наибольшей универсальностью характеризуется метод встречной релаксации, позволяющий учесть взаимодействие всех внешних и внутренних материальных потоков, поступающих на конкретную тарелку. На рис. 2.24 приведена схема модельного аппарата, состоящего из аппаратов однократного испарения (АОИ); работу таких аппаратов можно описать рассмотренными уравнениями (индекс j соответствует номеру АОИ). Каждый отдельно взятый АОИ моделирует работу одной тарелки сложной колонны, а первый и последний АОИ моделируют соответственно кубовый испаритель и дефлегматор. В каждый АОИ может поступать поток внешнего питания F_j , подводиться или отводиться тепловой поток q_j , входить поток пара G_{j-1} с АОИ, расположенного ниже, и поток жидкости L_{j+1} с АОИ, расположенного выше. Из каждого АОИ отводятся потоки пара и жидкости, причем часть из них можно отводить в виде целевого продукта (L'_j). Рассмотренная модель легко описывает любой вариант разделения в сложной колонне.

Общая система уравнений, описывающих процесс разделения в j -м АОИ, включает:

уравнение общего материального баланса

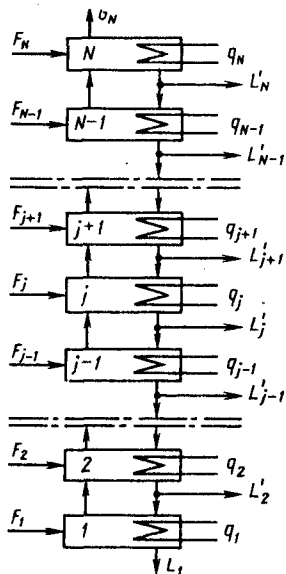
$$L_{j+1} + G_{j-1} + F_j = G_j + L_j; \quad (2.7)$$

уравнение покомпонентного материального баланса

$$L_{j+1}x_{i,j+1} + G_{j-1}y_{i,j-1} + F_jz_{i,j} = G_jy_{i,j} + L_jx_{i,j}; \quad (2.8)$$

уравнение фазового равновесия

$$y_{i,j} = K_{i,j}x_{i,j}; \quad (2.9)$$



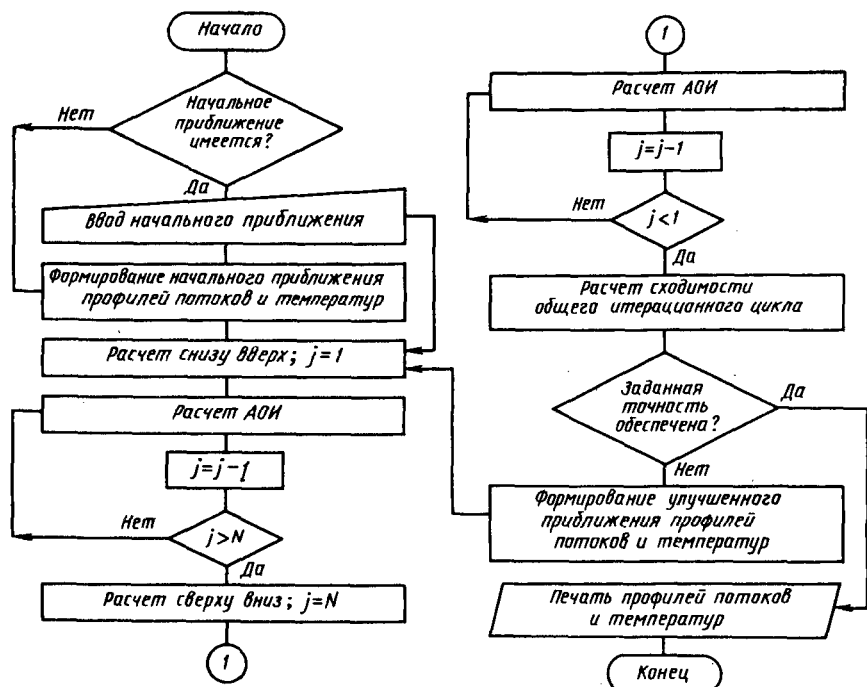


Рис. 2.25. Алгоритм расчета сложного ректификационного аппарата методом встречной релаксации

уравнение теплового баланса

$$L_{j+1}h_{j+1} + G_{j-1}H_{j-1} + F_jH_{F,j} + q_j = G_jH_j + L_jh_j; \quad (2.10)$$

ограничения

$$\sum_{i=1}^n y_{i,j} = 1; \quad \sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1. \quad (2.11)$$

При допущении достижения термодинамического равновесия в АОИ и независимости констант фазового равновесия от состава

$$K_{i,j} = \varphi(p_j, t_j^*); \quad t_j^* = t^n = t_j^*. \quad (2.12)$$

В этих уравнениях L , G , F — расходы жидкости, пара и внешнего питания (если они есть) на входе и выходе из АОИ; h , H и H_F — соответствующие энтальпии, Дж/кмоль; q — количество теплоты, Дж/ч; K — константа фазового равновесия; x , y , x_F — доли жидкого, парового потоков, внешнего питания; i и j — номера соответственно компонента и АОИ; $*$ — равновесное значение.

Уравнения (2.7)—(2.11) принципиально не отличаются от уравнений (2.1)—(2.4), если под F и z в уравнениях (2.1) и (2.2) понимать суммарный расход материальных потоков в АОИ с номером j

и их средний состав. В связи с этим процедуру расчета ОИ можно использовать для расчета АОИ. Однако в этом случае необходимо обеспечить соблюдение материального и теплового балансов; поэтому для расчета процесса разделения, помимо итерационного поиска значения E_j , обеспечивающего соблюдение материального баланса, необходим и поиск температуры t_j^* , обеспечивающей соблюдение теплового баланса, причем цикл расчета E_j входит в цикл расчета t_j^* .

Метод встречной релаксации позволяет проводить поверочные расчеты ректификации не только для простых, но и для сложных колонн с несколькими вводами материальных и тепловых потоков, отбором целевых продуктов с разных уровней и т. д.

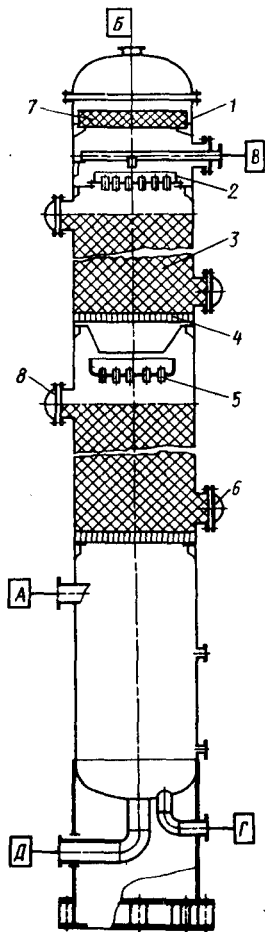
Алгоритм расчета сложной колонны приведен на рис. 2.25. Расчет заключается в применении процедуры ОИ для всех ступеней контакта при последовательном переходе от ступени 1 до ступени N (снизу вверх) и от N до 1 (сверху вниз) и последующей корректировке составов пара и жидкости на тарелках методом простых итераций (или более совершенным методом). Поскольку на всех этапах расчета составы входных материальных и тепловых потоков фиксированы, решение стремится (релаксирует) к некоторому пределу, который и является общим решением.

Релаксационный метод отличается устойчивой сходимостью, легко может быть приспособлен для создания универсальных алгоритмов расчета абсорбции, десорбции, хемосорбции, ректификации многокомпонентных смесей в аппаратах любой сложности и с этой точки зрения незаменим при создании систем автоматизированного проектирования (САПР).

§ 2.6. НАСАДОЧНЫЕ МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Диаметр насадочных колонн обычно не превышает 4000 мм. Для колонн большого диаметра трудно достичь высокой эффективности из-за сложности обеспечения равномерного распределения газовой и жидкой фаз по сечению аппарата. Однако известны отдельные конструкции насадочных аппаратов диаметром до 12 м.

Корпус 1 абсорбционной насадочной колонны (рис. 2.26) выполняют либо цельносварным, либо из отдельных царг с приварными или съемными крышками. Насадочные аппараты весьма чувствительны к неравномерности орошения, поэтому жидкость для орошения насадки подается через распределительную тарелку 2. Насадку 3 располагают по высоте аппарата в несколько слоев (секций) и укладывают на опорные решетки 4. Для загрузки и выгрузки насадки в верхней и нижней частях каждой секции обычно устанавливают люки 6 и 8. При больших нагрузках по газу и перепаде давлений 400—700 Па на 1 м высоты насадки сверху на каждый слой насадки укладывают удерживающую решетку, предотвращающую выброс насадки. В верхней части ко-



лонны размещено отбойное устройство 7. Газ и жидкость движутся в насадочной колонне противотоком. При этом газ вводится в колонну снизу через штуцер А, а выводится через штуцер Б, орошающая жидкость вводится сверху через штуцер В, а выводится через штуцеры Г или Д.

При стекании жидкости по насадке происходит ее перераспределение и на некотором расстоянии от распределительной тарелки равномерность орошения может резко уменьшиться; при этом жидкость течет вдоль стенки аппарата, а центральная часть насадки остается неорошенной. Для исключения этого явления насадочное пространство разделяют на слои и устанавливают между слоями перераспределительные тарелки 5, которые собирают жидкость и распределяют ее вновь по сечению аппарата.

В настоящее время используют насадки различных видов. По существующей классификации их можно отнести либо к регулярной (правильно уложенной), либо к нерегулярной (засыпанной навалом).

Корпус и внутренние устройства серийно выпускаемых насадочных аппаратов изготовляют из тех же материалов, что и для тарельчатых массообменных аппаратов.

Нерегулярную насадку применяют в процессах массообмена, протекающих под давлением или в условиях неглубокого вакуума. Эта насадка обладает рядом преимуществ, одно из которых состоит в практическом отсутствии проблемы выбора материала; насадку можно изготовить из металлов, полимеров, керамики. Полимерная и керамическая насадка наиболее приемлема для обработки агрессивных сред. Нерегулярная насадка имеет существенные преимущества по сравнению с регулярной по технологии изготовления, транспортирования и монтажа.

По конструктивным признакам эту насадку можно разделить на кольца и седла, хотя в отечественной и зарубежной практике применяют насадочные тела и другой формы.

В настоящее время в отечественной химической и нефтехимической промышленности наиболее распространена нерегулярная насадка в виде колец Рашига и их модификаций. Насадка Рашига

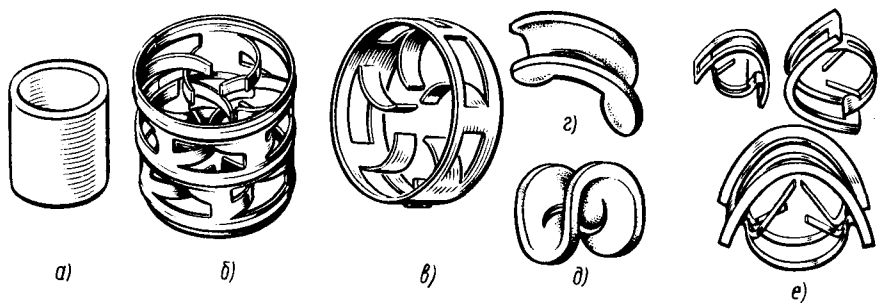


Рис. 2.27. Нерегулярные насадки

имеет небольшую стоимость, но малоэффективна. Эти кольца из металла, фарфора, керамики, пластмасс изготовляют самых различных размеров (диаметр 5—150 мм), хотя в промышленных колоннах чаще используют кольца диаметром 25 и 50 мм (рис. 2.27, а). Кольца меньшего размера обладают значительным гидравлическим сопротивлением, большего размера менее эффективны.

Для повышения эффективности массообмена кольцевую насадку изготовляют перфорированной и с внутренними перегородками.

В ФРГ предложена кольцевая насадка размером 50×50 мм из коррозионно-стойкой стали — так называемые кольца Палля (рис. 2.27, б). На цилиндрической поверхности насадки выштампованы и отогнуты вовнутрь лепестки шириной 10 мм. Механическую прочность насадки обеспечивают кольцевые гофры, служащие также для перераспределения жидкости.

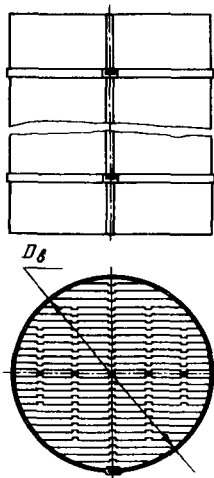
Разновидностью колец Палля является выпускаемая в США насадка «Хай-пак», отличающаяся от рассмотренной числом и расположением лепестков. К кольцевой насадке с перфорированной цилиндрической частью и внутренними перегородками относится насадка «Каскад-мини-ринг» (рис. 2.27, в).

Отечественная промышленность изготовляет кольцевую нерегулярную насадку в форме колец Рашига, а также кольца Палля из пропилена размерами 50×50 мм и из металла размерами 25×25 и 35×35 мм.

Седлообразная насадка имеет большую удельную поверхность и высокую способность к перераспределению жидкости по сечению колонны. Такую насадку выпускают главным образом в виде седел «Инталокс» (рис. 2.28, г) и Берля (рис. 2.28, д) из керамики и пластмассы. Пластмассовая насадка «Сюпе торус садлес» отличается от седла «Инталокс» наличием отверстий в центре седла, что повышает ее эффективность, и гофр на краях, улучшающих перераспределение жидкости.

Особое место среди седловидных насадок занимает насадка «Инталокс металл» (рис. 2.28, е), обладающая высокой эффектив-

Рис. 2.28. Плоскопараллельная насадка



ностью и малым гидравлическим сопротивлением, что позволяет использовать ее в процессах, проводимых под вакуумом.

В СССР изготавливают седловидную насадку «Инталокс» из керамики (размеры 37×37 мм и 50×50 мм).

Регулярная насадка (правильно уложенная) отличается от нерегулярной меньшим гидравлическим сопротивлением и поэтому особенно пригодна для процессов вакуумной ректификации. К недостаткам аппаратов с регулярной насадкой нужно отнести их высокую чувствительность к равномерности орошения.

Простейшая регулярная насадка — плоскопараллельная (рис. 2.28) — представляет собой пакеты, набираемые из плоских вертикальных, обычно металлических пластин толщиной 0,4—1,2 мм, расположенных параллельно с одинаковым зазором 10—20 мм. Высота пакета пластин 400—1000 мм. Наружный диаметр пакета соответствует внутреннему диаметру колонны D_v . Для повышения равномерности распределения жидкости в колонне пакеты устанавливают один над другим взаимно повернутыми на угол 45° — 90° . Насадка может устойчиво работать в широком диапазоне производительности по газу [$F = 3,5 \dots 8$ (м/с) $\times$ $\times$ (кг/м³)^{-0,5}] и по жидкости [$L = 0,3 \dots 50$ м³/ (м²·ч)]. В зависимости от производительности насадка обеспечивает высоту, эквивалентную одной теоретической ступени, в пределах 0,6—1,5 м при гидравлическом сопротивлении 1 м насадки 70—300 Па. Недостатки этой насадки — высокая металлоемкость, плохое перераспределение жидкости, сравнительно низкая эффективность.

Для устранения последнего недостатка листы плоскопараллельной насадки выполняют с рифлением или с различными турбулизирующими элементами. Так, насадка конструкции ЛТИ им. Ленсовета (рис. 2.29, а) состоит из вертикальных, параллельно расположенных листов, имеющих поперечные окна с отогнутыми лепестками; соседние по высоте лепестки отогнуты в противоположные стороны и делят колонну в продольном направлении на контактные камеры. Газ, поднимаясь по колонне, проходит через камеры, многократно меняя направление движения при ударе о лепестки. Жидкость, стекая по насадке с лепестка на лепесток, распыляется восходящим газовым потоком.

Основное преимущество гофрированной насадки (рис. 2.29, б), состоящей из вертикальных металлических листов с рифлением, по сравнению с плоскопараллельной насадкой — меньший брызгоунос. Это объясняется тем, что гофрированная насадка беспро-

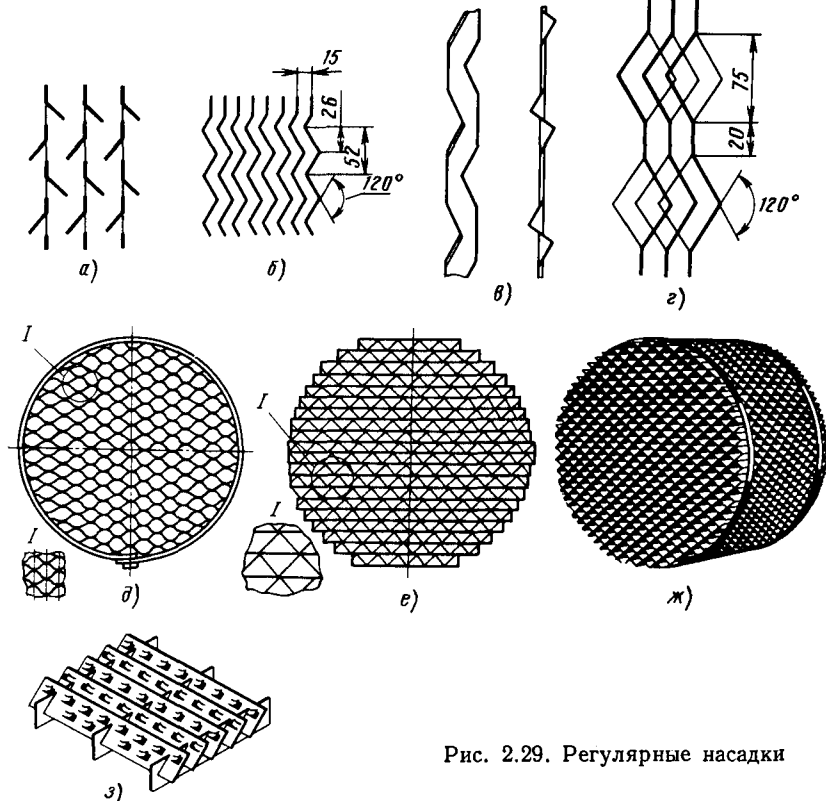


Рис. 2.29. Регулярные насадки

вальна. Зазоры между листами иногда обеспечивают дистанционными планками (рис. 2.29, в), установленными вертикально на расстоянии 250 мм одна от другой и приваренными к листам точечной сваркой.

Разновидностью гофрированной насадки является Z-образная насадка, изготавливаемая из перфорированного листа (рис. 2.29, г). По основным технологическим параметрам эта насадка на 15—20 % превосходит плоскопараллельную.

Щелевая, или сотовая, насадка (рис. 2.29, д) образована из гофрированных вертикальных листов, сдвинутых один относительно другого так, что по высоте пакета образуются изолированные вертикальные каналы. Листы соединены в пакеты высотой 400—1000 мм точечной сваркой. К преимуществам этой насадки относятся значительно более высокая (в 2—3 раза), чем у плоскопараллельной насадки, удельная поверхность, а также возможность нагревать или охлаждать контактирующие фазы, поскольку каналы, образованные гофрами, пригодны для подачи в них теплоносителя или хладагента. К недостаткам насадки следует отнести неравномерность толщины пленки жидкости в канале. Накопление жидкости в углах канала несколько ухудшает эксплуатационные качества этой насадки.

Сравнительная характеристика насадок различных типов

Тип насадки	Производи- тельность	Эффектив- ность	Гидравличе- ское сопро- тивление
Кольца Рашига ($d = 25$ мм)	1	1	1
Кольца Палля ($d = 25$ мм)	1,4—1,5	1,00—1,25	0,70—0,75
Седла Берля	1,08—1,25	1,11	0,6—0,7
Седла «Инталокс»	1,2—1,4	1,3	0,45—0,50
«Гудлоу»	1,15—1,20	3,5	0,13
«Зульцер»	≈ 2	2,5	0,25—0,45

Хорошие характеристики имеют насадки из проволоочной сетки. Примером может служить насадка Гудлоу — пакеты свернутой в рулон гофрированной проволоочной сетки (диаметр проволоки 0,1 мм). Гофры расположены под углом 60° к вертикали, высота пакета насадки 100—200 мм.

В СССР насадка из гофрированной сетки (рис. 2.29, е) рекомендована для процессов ректификации, проводимых под вакуумом. Пакеты такой насадки высотой 150—200 мм изготовляют из тканой проволоочной сетки толщиной 0,2 мм.

А последнее время за рубежом разработаны различные виды новой высокоэффективной насадки, способной работать при удельной нагрузке по жидкости $L < 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $F = 5 \dots 8 \text{ (м/с)} \times (\text{кг/м}^3)^{-0,5}$. Насадка обеспечивает значительное (до 5—6) число теоретических ступеней на 1 м высоты и небольшое гидравлическое сопротивление (до 150 Па на 1 м высоты). Примерами может служить насадка «Импульс пакинг» из металла и полимерных материалов, насадка «Зульцер» (рис. 2.29, ж) из гофрированной сетки толщиной 0,16 мм, а также регулярная насадка «Роли пак», образованная ярусами наклонных листов с прорезями (рис. 2.29, з).

В таблице 2.2 дана сравнительная характеристика насадок различных видов.

Область применения насадок. При выборе насадки для проведения конкретного процесса контактирования в системе пар (газ)—жидкость руководствуются обычно следующим правилом: регулярную насадку, гидравлическое сопротивление которой меньше, чем нерегулярной, используют в процессах вакуумной ректификации, нерегулярную — в процессах неглубокого вакуума и под давлением. Регулярной насадке отдают также предпочтение при обработке продуктов, время пребывания которых в аппарате ограничено, например, из-за склонности к разложению.

Регулярную насадку используют в вакуумных стальных колонных аппаратах диаметром 400—3600 мм, предназначенных для разделения термически нестойких и легко полимеризующихся

Области применения насадки

Тип насадки	Область применения
Плоскопараллельная	Процессы ректификации, требующие до пяти теоретических ступеней разделения и перепада давлений на одну теоретическую ступень до 0,06 кПа
Сотовая	Процессы ректификации, требующие до 15 теоретических ступеней разделения и перепада давлений на одну теоретическую ступень до 0,05 кПа
Из гофрированной сетки	Процессы ректификации чистых жидкостей, требующие большого числа (более 15) теоретических ступеней разделения и перепада давлений на одну теоретическую ступень до 0,03 кПа
Z-образная	Процессы ректификации и абсорбции загрязненных жидкостей, требующие до 15 теоретических ступеней разделения и перепада давлений на одну теоретическую тарелку до 0,05 кПа

П р и м е ч а н и е. Перепад давлений на одну теоретическую ступень принят при F -факторе, равном $2 \text{ (м/с) (кг/м}^3\text{)}^{-0,5}$.

органических смесей при остаточном давлении рабочей среды 0,25—98 кПа и температуре от 0 до 300 °С. Области применения основных типов насадок указаны в табл. 2.3.

При выборе типа аппарата, работающего при атмосферном или повышенном давлении, необходимо учитывать следующее. В аппаратах с регулярной насадкой обеспечивается больший F -фактор, чем при использовании нерегулярной насадки. Однако максимальная нагрузка по жидкости в аппаратах с нерегулярной насадкой достигает $300 \text{ м}^3\text{/(м}^2 \cdot \text{ч)}$, что почти на 30 % больше, чем для аппаратов с регулярной насадкой.

При небольшой нагрузке по газу [$F = 4 \dots 5 \text{ (м/с) (кг/м}^3\text{)}^{-0,5}$] допустимо и целесообразно использование нерегулярной насадки. При больших объемах газа необходимо использовать регулярную насадку с каналами, обеспечивающими преимущественный проход газовой фазы. Поскольку обычно F -фактор меняется по высоте колонны, можно использовать аппараты с комбинированной насадкой: в той части аппарата, где F -фактор меньше, размещают нерегулярную насадку, а там, где F -фактор больше, — регулярную. Таким образом, можно обеспечить оптимальные условия работы по всей высоте колонных аппаратов.

Устройства для распределения жидкости и пара (газа) в насадочных колоннах, перераспределительные устройства. Основное условие эффективной работы насадочного аппарата — смачивание всей насадки и равномерное распределение жидкой и паровой фазы по сечению аппарата.

Следует отметить, что орошение насадочных колонн должно быть не только равномерным, но и достаточным; поэтому для насадочных аппаратов существует понятие минимальной плотности орошения $q'_{\min}$. По мнению некоторых исследователей, для большей части насадок $q'_{\min} = 10 \dots 12 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Если по условиям работы невозможно обеспечить плотность орошения $q'_{\min}$, то следует работать с рециркуляцией жидкости, т. е. возвращать часть ее в систему.

С другой стороны, орошение насадочного аппарата не должно быть избыточным; это вызывает «затопление» насадки и увеличение ее гидравлического сопротивления при одновременном ухудшении массообменных характеристик. Обычно максимальная плотность орошения $q'_{\max} = (4 \dots 6) q'_{\min}$.

Используемые на практике оросители насадочных колонн аналогичны оросителям колонн с тарелками провального типа. В основном это распределительные тарелки, желоба, коллекторы, отражатели, центробежные распылители и форсунки.

Распределительная тарелка, показанная на рис. 2.30, рекомендована в качестве типовой конструкции для аппаратов с насыпной насадкой (кольцами Рашига) при диаметре колонны 400—2800 мм. Тарелка крепится на опорах 6 к корпусу колонны и представляет собой стальной отбортованный диск 1 (диаметром 0,6—0,7 диаметра колонны) с переливными патрубками 2. Отверстия под переливные патрубки располагаются по концентрическим окружностям. Диаметр патрубков зависит от диаметра колонны и колеблется от 32 до 57 мм, а число патрубков — от 12 (при диаметре колонны 400 мм) до 330 (при ее диаметре 2800 мм).

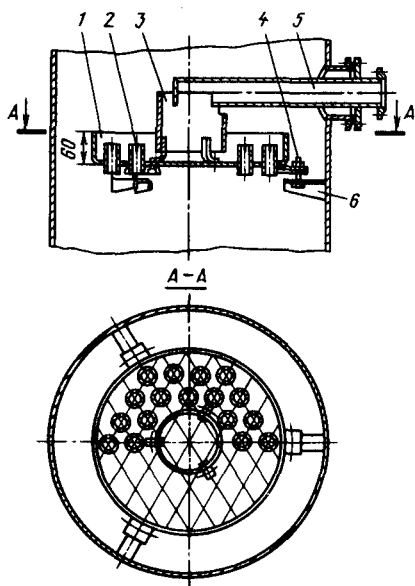


Рис. 2.30. Распределительная тарелка

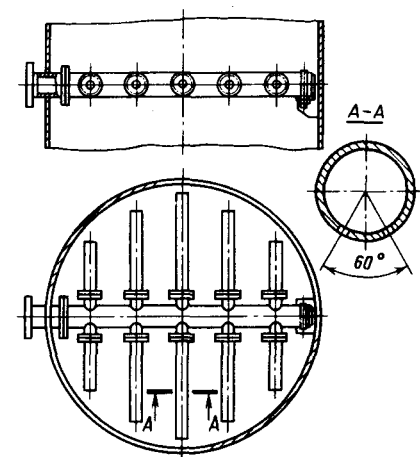


Рис. 2.31. Перфорированный коллектор

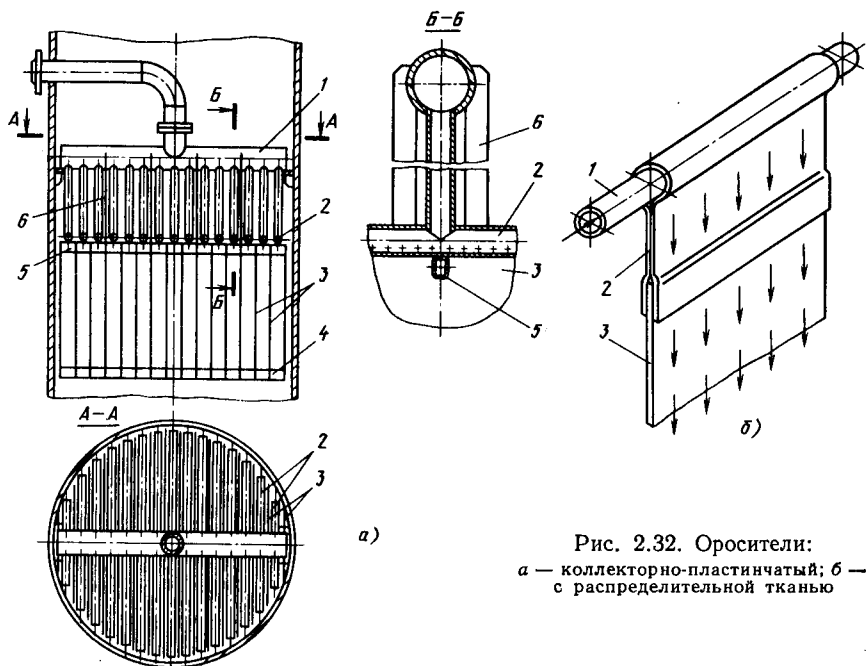


Рис. 2.32. Оросители:
а — коллекторно-пластинчатый; б —
с распределительной тканью

Жидкость поступает на тарелку через штуцер 5. В переливных патрубках выполняют вертикальные прорезы, через которые жидкость выходит с тарелки. Такая конструкция менее чувствительна к некоторому отклонению тарелки от горизонтального положения. В центре тарелки закреплен сливной стакан 3 (в который из штуцера 5 поступает орошающая жидкость), обеспечивающий равномерное распределение жидкости по тарелке. Правильность установки тарелки обеспечивают винтами 4. Как следует из рисунка, периферийные участки колонны не орошаются; они будут заполнены жидкостью при растекании ее в слое насадки.

В качестве распределителей часто используют перфорированные коллекторы, которые располагают в колонне на высоте около 1 м над насадкой (рис. 2.31). Эти устройства обычно применяют для орошения провальных тарелок и нерегулярной насадки.

Для регулярной насадки, в частности плоскопараллельной, разработаны конструкции коллекторных оросителей: коллекторно-пластинчатый (рис. 2.32, а) и с распределительной тканью (рис. 2.32, б).

В коллекторно-пластинчатом распределителе жидкость из коллектора 1 поступает в оросительные трубки 2 с отверстиями диаметром 3 мм. Трубки установлены над распределительными пластинами 3 в промежутках между ними. Вытекающая из трубок жидкость отдельными струями попадает на пластины, формируя на их поверхности равномерную пленку. В нижней части распре-

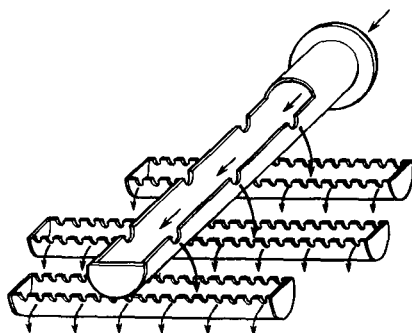


Рис. 2.33. Желобчатый ороситель

делителя имеется пластина жесткости 4. Распределитель устанавливают непосредственно на пакет насадки. Такой распределитель может работать с загрязненной жидкостью. Жесткость конструкции обеспечивают ребра 6 и балка 5.

В коллекторе с распределительной тканью распределительные трубки 1, имеющие

внизу щель, установлены над распределительными пластинами 3. Каждая трубка обтянута тканевым чехлом 2, который плотно обжимает ее по краям так, чтобы вся жидкость проходила только через поры ткани и не могла вытекать через неплотности. Свисающие концы ткани опускаются на верхний край пластины по обе стороны от нее. Вытекающая из щели распределительной трубки жидкость равномерно распределяется по свисающим полотнищам и формирует однородную пленку на пластинах. Ороситель с распределительной тканью используют только для чистых жидкостей.

Достаточно распространены в промышленности желобчатые оросители (рис. 2.33). Такие оросители, устанавливаемые на расстоянии 1,2—1,4 м от слоя насадки, используют главным образом в колоннах с нерегулярной насадкой. Ороситель представляет собой набор горизонтально-расположенных желобов с вырезами в боковой стенке; один из желобов (основной) расположен над другими. Жидкость, вытекающая из вырезов основного желоба, стекает в расположенные под ним вспомогательные желоба и распределяется по насадке. Желобчатые оросители конструктивно просты, но для их надежной работы должна быть обеспечена высокая точность изготовления и расположения.

Для орошения насадочных аппаратов и колонн с провальными тарелками можно использовать также разбрызгиватели в виде форсунок, вращающиеся оросители и др.

Установлено, что при стекании жидкости по насадке характер распределения жидкости меняется по высоте аппарата. Даже при равномерном орошении верхних слоев, в орошении нижних слоев возможна значительная неравномерность; орошающая жидкость растекается к стенкам аппарата и при достаточно большой высоте насадочного слоя внутри него образуется так называемый «сухой конус» (неорошенное сечение аппарата), в который устремляется паровой поток.

Как показывает опыт, степень растекания жидкости по насадке зависит от длины H пути жидкости в насадке, диаметра D колонны и диаметра d насадочных тел. Степень растекания жидко-

сти по насадке можно оценить по критической высоте $H_{кр}$ насадочного слоя. Под $H_{кр}$ подразумевают высоту насадочного слоя, при которой появляются признаки минимально допустимой поперечной неравномерности.

Для насадок разного типа получены следующие соотношения между диаметром D аппарата и критической высотой $H_{кр}$: для колец Рашига $H_{кр} = (2,5 \dots 3,0) D$ при $d < 0,033 D$; для колец Палля $H_{кр} = (5 \dots 10) D$ при $d \leq (0,1 \dots 0,066) D$; для седел Берля и «Инталокс» $H_{кр} = (5 \dots 8) \times \times D$ при $d > 0,066 D$.

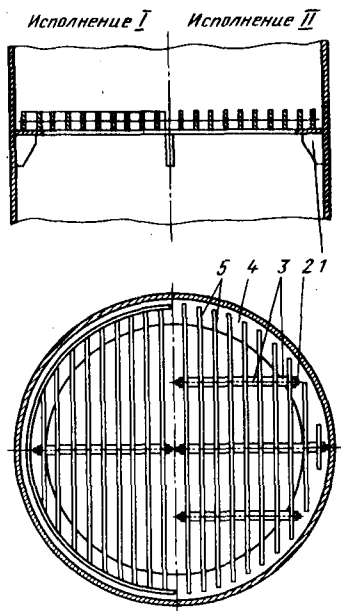
Для регулярной насадки $H_{кр}$ больше, чем для нерегулярной, обычно принимают $H_{кр} = (8 \dots 10) D$.

Если высота H насадочного слоя, рассчитанная из условия обеспечения требуемого массообмена, превышает $H_{кр}$, то насадку разделяют на слои или секции высотой $H_i \leq H_{кр}$. Для орошения каждой секции насадки либо используют отдельные оросители, либо специальные перераспределители, собирающие и перераспределяющие стекающую по колонне жидкость.

Перераспределение пара между секциями насадки не требует установки каких-либо устройств: равномерное распределение пара легко достигается в колосниковых решетках под насадкой при условии, что свободное сечение решетки больше аналогичного параметра насадки. На рис. 2.34 показана типовая колосниковая решетка под насадку (кольца Рашига) для колонн диаметром 400—4000 мм. Решетка собрана из колосников (толщина 4—10 мм, высота 50 мм), изготовленных из полосовой углеродистой или легированной стали. Расстояние между колосниками решетки на 25—30 % меньше размеров насадочных тел для исключения их попадания под решетку.

Между колосниками 5 решеток исполнения II установлены дистанционные втулки 3 и весь пакет стянут шпильками 2. Применяют также решетки цельносварной конструкции (исполнение I). Такие решетки укладывают на опорное кольцо 4, которое поддерживается приваренными к корпусу аппарата косынками 1, или приваренными к корпусу опорными балками. Под колосниковой решеткой между слоями насадки устанавливают перераспределительные тарелки.

Типовая перераспределительная тарелка для жидкости (рис. 2.35) представляет собой отбортованный диск 1 (основание



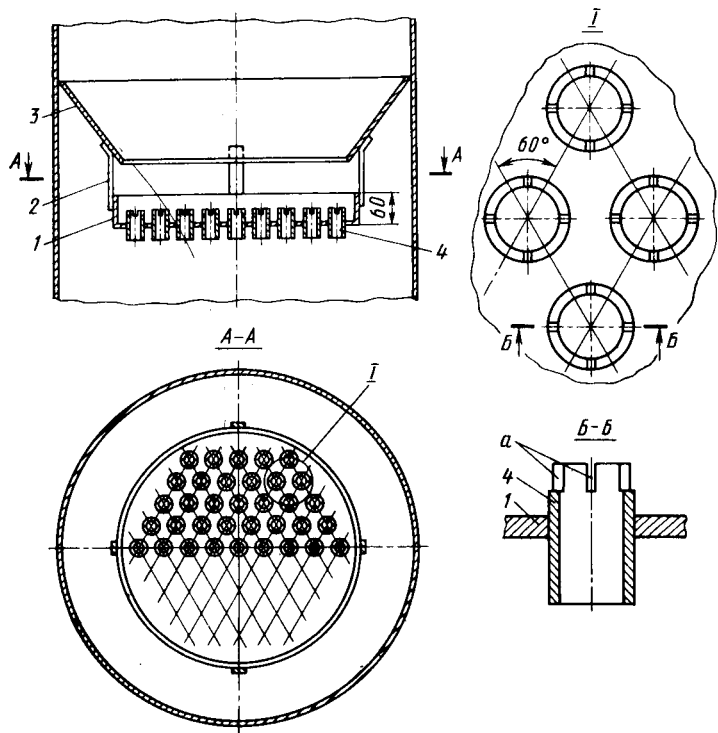


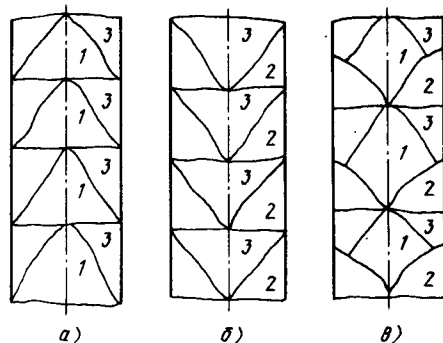
Рис. 2.35. Перераспределительная тарелка

тарелки) с переливными патрубками 4, с прорезями *a*, соединенный на подвесках 2 с конусом 3, собирающим поток жидкости со стенок аппарата и направляющим его на орошение расположенного ниже слоя насадки. Такие тарелки рекомендуются для колонн диаметром 400—2500 мм.

На распределение орошающей жидкости влияет и способ засыпки насадки (рис. 2.36): из центра колонны (слой 1), от стенок колонны (слой 2) подсыпка до горизонтального уровня (слой 3). При засыпке насадочных тел по варианту, показанному на рис. 2.36, *a*, плотность укладки их на границе слоев 1 и 3 наименьшая, что способствует стеканию жидкости к стенкам. Засыпка по способу рис. 2.36, *б*, наоборот, способствует стеканию орошающей жидкости к центру колонны. При равномерном начальном орошении хорошие результаты дает вариант, соответствующий рис. 2.36, *в*, сочетающий предыдущие два способа.

Следует отметить, что равномерность распределения жидкости в любой насадке значительно зависит от смачиваемости материала, из которого эта насадка изготовлена; поэтому в ряде случаев

Рис. 2.36. Варианты засыпки насадки



рекомендуют увеличивать смачиваемость материала нанесением гидрофильных покрытий, травлением или специальной механической обработкой листовых материалов. Однако эти методы эффективны только при условии, что в процессе эксплуатации насадка не покрывается слоем осадка, выделяющегося из рабочих сред. В противном случае смачиваемость насадки определяется свойствами осадка.

§ 2.7. УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЕПАРАЦИИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ

Выброс газовым потоком орошающей жидкости из массообменных аппаратов нежелателен, так как снижает качество разделения и приводит к потере ценных продуктов. Кроме того, если в установках газоочистки колонна установлена в конце технологической схемы, выброс абсорбента приводит к экологическим проблемам.

Унос жидкости может вызвать также коррозию газопроводов и их «зарастание», известны случаи полного зарастания газопроводов при большом уносе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в процессах газоочистки.

Для исключения уноса жидкости из аппарата в верхней части насадочной колонны, над оросителем, устанавливают сепарационные устройства: инерционные, центробежные или комбинированные сепараторы. Чаще для выделения капельной взвеси из газового потока используют инерционные сепараторы или насадку, называемую отбойной, а также слои металлической сетки.

Процесс улавливания капельной влаги слоем насадки происходит за счет укрупнения мельчайших капель, оседающих на поверхности насадки при ударах и поворотах газожидкостного потока, и последующего стекания в виде крупных капель, струй, пленок.

На рис. 2.37 показаны некоторые конструкции инерционных отбойников, используемых в колонных аппаратах. Отбойники из пластин и уголков имеют относительно небольшое свободное сечение, поэтому в высокопроизводительных установках их не используют. При большой производительности по газу более эффективны жалюзийные отбойники. Такой отбойник, выполненный из гофрированных листов 1 с карманами 2 для жидкости, снабжен сливной трубой 3, погруженной в жидкость гидрозатвора 4 для исключения проскока газа.

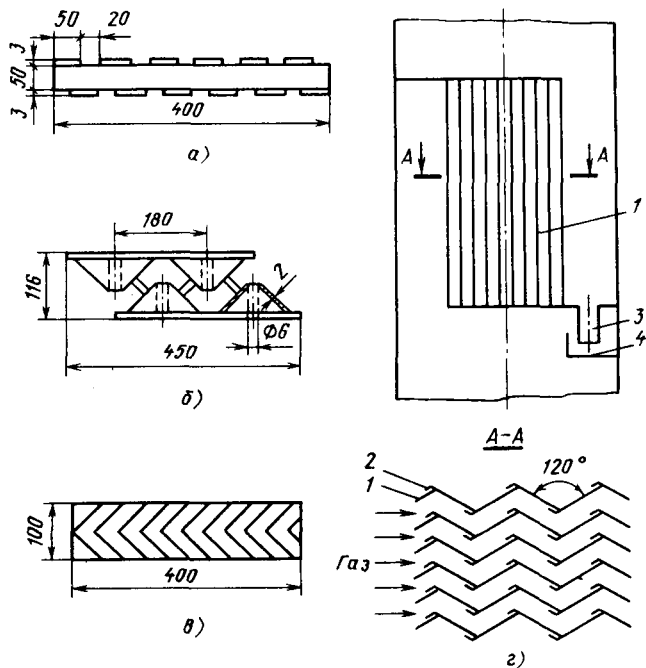


Рис. 2.37. Инерционные отбойники:
а — из пластин; б, в — из уголков; г — жалюзийный

Работа центробежных сепараторов основана на выделении жидкой фазы из вращающегося газожидкостного потока под действием центробежных сил. Примером является показанный на рис. 2.38 прямоточно-центробежный сепаратор. Газожидкостная смесь, поступающая через тангенциальные прорези *а* в нижней части патрубков *1*, укрепленных на тарелке *2*, получает и осевое и вра-

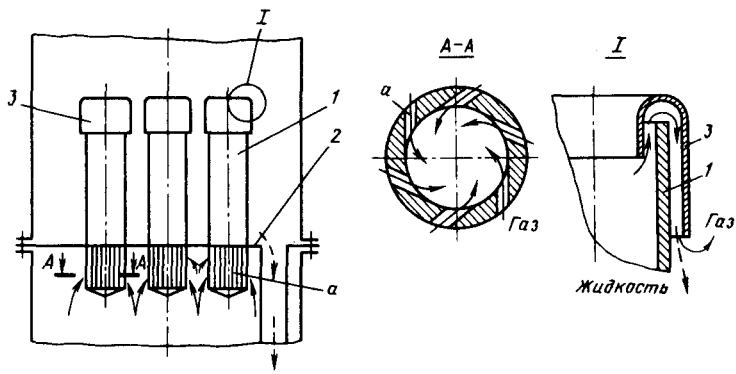


Рис. 2.38. Прямоточно-центробежный сепаратор

щательное движения, в результате жидкость концентрируется на периферии патрубков и отбойником 3 отводится в межпатрубковое пространство. Отсепарированный газ выходит через центральное отверстие патрубков.

В центробежном сепараторе циклонного типа газожидкостная смесь проходит через встроенную в аппарат циклонную камеру.

§ 2.8. РАСЧЕТ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ

Элементы колонных аппаратов, наиболее металлоемкие и ответственные из которых корпус колонны и опорная обечайка, могут находиться в самых различных условиях нагружения от внутреннего или наружного давлений p , осевой сжимающей силы Q и изгибающего момента M (например, от ветровых нагрузок).

При расчете колонны на прочность и устойчивость выбирают следующие основные расчетные сечения (рис. 2.39):

поперечные сечения корпуса колонны ($I-I$, $II-II$, ..., $z-z$), в которых меняются толщина стенки или диаметр аппарата;

поперечное сечение $z-z$ корпуса колонны — для аппаратов с постоянными толщиной стенки и диаметром;

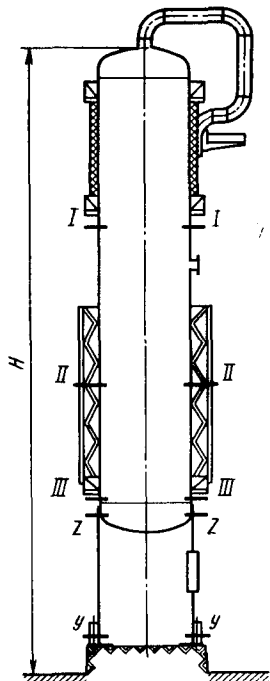
поперечное сечение $y-y$ опорной обечайки в месте установки опорного кольца.

Колонный аппарат рассчитывают для трех условий работы: рабочие условия, условия испытания и условия монтажа.

При этом учитывают следующие нагрузки (H): G_1 — вес колонны в рабочих условиях, включая вес обслуживающих площадок, изоляции, внутренних устройств и рабочей среды;

G_2 — вес колонны при гидротестировании с учетом массы жидкости, заполняющей колонну; G_3 — максимальная нагрузка колонны от собственного веса в условиях монтажа; G_4 — минимальная нагрузка колонны от собственного веса в условиях монтажа (после установки колонны в вертикальное положение).

Кроме того, при расчете колонных аппаратов учитывают изгибающие моменты ($H \cdot м$); M_G — максимальный изгибающий момент от действия эксцентрических нагрузок (в том числе от присоединяемых трубопроводов) в соответствующем расчетном сечении; M_v и M_R — изгибающие моменты от ветровой нагрузки



Сочетание нагрузок при различных условиях работы аппарата

Индекс условий работы	Условия	Давле- ние p , МПа	Осевое сжимающее усилие, Н	Расчетный изгибающий момент, Н·м
1	Рабочие	p_1	$Q_1 = G_1$	$M_1 = M_{G_1} + M_{v1}$ Для районов с сейсмичностью 7 баллов и более принимают большее из двух значений: $M_1 = M_{G_1} + M_{v1}$ и $M_1 = M_{G_1} + M_{R1}$
2	Испыта- ния	$p_2; p_H$	$Q_2 = G_2$	$M_2 = M_{G_2} + 0,6M_{v2}$
3	Мон- тажа	0	$Q_3 = G_3$	Большее из двух значений: $M_3 = M_{G_3} + M_{v3}$ и $M_3 = M_{G_3} + 0,8M_{v4}$. Для районов с сейсмичностью 7 баллов и более принимают большее из трех значений: $M_3 = M_{G_3} + M_{v3}$; $M_3 = M_{G_3} + 0,8M_{v4}$ и $M_3 = M_{G_3} + M_{R3}$
			$Q_4 = G_4$	

и сейсмического воздействия в соответствующем расчетном сечении.

Сочетание нагрузок при трех указанных условиях работы аппарата указано в табл. 2.4.

При расчете моментов M_{v1} и M_{R1} исходят из общей нагрузки в рабочих условиях, при расчете момента M_{v2} — из общей нагрузки в условиях испытания, а при расчете моментов M_{v3} и M_{R3} — из общей нагрузки в условиях монтажа. Момент M_{v4} рассчитывают с учетом изоляции.

Здесь не будем рассматривать вопросы, связанные с методикой расчета на прочность и устойчивость всех элементов колонных аппаратов (опорных обечаек, крышек, днищ и др.); ограничимся лишь знакомством с методикой расчета корпусов колонн в соответствии с ГОСТ 24757—81 и ГОСТ 14249—80.

Толщину стенки цилиндрического корпуса аппарата, нагруженного давлением p , рассчитывают из условия прочности в соответствии с ГОСТ 14249—80 по формуле

$$s = \frac{pD_B}{2[\sigma]\varphi - p} + c, \quad (2.13)$$

где s — толщина стенки, мм; D_B — внутренний диаметр корпуса, мм; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение материала корпуса, МПа; φ — коэффициент прочности сварного шва; c — сумма прибавок, учитывающих коррозию (эрозию), минусовой допуск на прокат и технологическую прибавку, мм.

Из этого уравнения легко определить допускаемое давление при заданной толщине стенки корпуса

$$[p]_p = \frac{2[\sigma] \varphi (s - c)}{D_B + (s - c)}. \quad (2.14)$$

Если аппарат подвержен воздействию, помимо внутреннего или внешнего давления, осевой сжимающей силы и изгибающего момента, необходимо выполнить проверку на прочность с учетом всех силовых факторов. При расчете корпусов колонн на прочность напряжения в расчетных сечениях определяют для рабочих условий ($M = M_1$, $Q = Q_1$; $p = p_1$) и условий монтажа ($Q = Q_3$, $M = M_3$, $p = 0$).

В этом случае окружные и меридиональные напряжения определяют по формулам соответственно:

$$\sigma_1 = \frac{p(D_B + s)}{2(s - c)} \quad \text{и} \quad \sigma_2 = \frac{p(D_B + s)}{4(s - c)} - \frac{Q}{\pi D_B(s - c)} \pm \frac{4M}{\pi D_B^2(s - c)},$$

где знак плюс относится к наветренной стороне, знак минус — к подветренной.

Эквивалентные напряжения при двухосном напряженном состоянии материала согласно энергетической теории можно определить по формуле $\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$. Корпус колонны проверяют на прочность по условию

$$\max \{ |\sigma_1|; |\sigma_2| \} \leq [\sigma]_K,$$

где $[\sigma]_K$ — допускаемое напряжение для материала корпуса колонны, МПа.

Проверку на устойчивость корпусов колонн выполняют также для каждого из расчетных сечений при рабочих условиях, условиях испытаний и монтажа:

для аппаратов, работающих под наружным давлением,

$$p/[p] + Q/[Q] + M/[M] \leq 1; \quad (2.15)$$

для аппаратов, работающих под внутренним избыточным давлением или без давления,

$$Q/[Q] + M/[M] \leq 1,$$

где $[p]$ — допускаемое наружное давление при нагружении корпуса только наружным давлением; $[Q]$ — допускаемая осевая сжимающая сила при нагружении корпуса только осевой сжимающей силой; $[M]$ — допускаемый изгибающий момент при нагружении корпуса только изгибающим моментом.

Рассмотрим устойчивость гладких (не подкрепленных кольцами жесткости) корпусов колонных аппаратов, нагруженных наружным давлением.

Критическое давление $p_{кр}$ для гладких коротких цилиндрических оболочек, теряющих устойчивость в области упругих деформаций, определено Исанбаевой-Муштари как

$$p_{кр} = 0,92k \frac{RE}{l} \frac{[(s-c)R^{-1}]^{2,5}}{1-0,9\theta}, \quad (2.16)$$

где $k = f(\theta)$; $R = 0,5D_{в}$ — внутренний радиус обечайки, мм; E — модуль упругости материала корпуса аппарата, МПа; l — расчетная длина обечайки, мм; $\theta = l^{-1} \sqrt{0,5R(s-c)}$.

Зависимость $k = f(\theta)$ имеет экстремальный характер, но для наиболее часто встречающихся на практике случаев ($\theta = 0,036 \dots 0,10$) k можно считать постоянным и равным 0,65. Подставив это значение в (2.16) при значении θ , соответствующем середине указанного интервала ($\theta = 0,068$), получим для обечаек

$$p_{кр} = 0,64E \frac{R}{l} \left(\frac{s-c}{R} \right)^{2,5}.$$

Из этого уравнения легко определить допускаемое наружное давление при расчете коротких обечаек, которое в соответствии с ГОСТ 14249—80 имеет вид

$$[p]_E = \frac{p_{кр}}{n} = \frac{18 \cdot 10^{-6}E}{n} \frac{D_{в}}{l} \left[\frac{100(s-c)}{D_{в}} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s-c)}{D_{в}}}, \quad (2.17)$$

где n — коэффициент запаса устойчивости (обычно принимают $n = 2,4$); коэффициент 100 введен для удобства вычислений.

Формула (2.17) применима, если соблюдается соотношение $l/D_{в} \leq 8,15 \sqrt{D_{в}/[100(s-c)]}$. Кроме того, при работе обечайки в области упругих деформаций необходимо, чтобы критические напряжения не превышали предела текучести материала при расчетной температуре, т. е. $\sigma_{кр} \approx 0,5p_{кр}D_{в}/(s-c) \leq \sigma_T^t$ или

$$\frac{l}{D_{в}} \geq 0,9 \frac{E}{\sigma_T^t} \sqrt{\left(\frac{s-c}{D_{в}} \right)^3}. \quad (2.18)$$

Для длинных цилиндров критическое давление рассчитывают по формуле Бресса

$$p_{кр} = \frac{E}{4(1-\mu^2)} \left(\frac{s-c}{R} \right)^3.$$

Приняв $\mu = 0,3$ и заменив R внутренним диаметром оболочки, после преобразований получим расчетную формулу для определения допускаемого наружного давления

$$[p]_E = \frac{p_{кр}}{n} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}E}{n} \left[\frac{100(s-c)}{D_{в}} \right]^3, \quad (2.19)$$

справедливую при соблюдении условия $l/D_{в} > \sqrt{0,5D_{в}/(s-c)}$, а также при условии потери устойчивости оболочки в области упругих деформаций материала.

При внешней нагрузке, соответствующей пределу текучести, материал оболочки находится в состоянии неустойчивости, и любое внешнее возмущение может внезапно вызвать «течение» материала, которое в конечном счете явится причиной потери устойчивости первоначальной формы равновесия оболочки. Определение устойчивости оболочек за пределами упругости представляет собой достаточно сложную задачу. Для инженерных расчетов используют приближенный подход, основанный на том, что за пределами упругости в качестве критического напряжения принимают предел текучести материала, т. е. $\sigma_{кр} = \rho_{кр} R / (s - c) = \sigma_{\tau}^t$, откуда

$$\rho_{кр}^* = \sigma_{\tau}^t (s - c) / R. \quad (2.20)$$

Допускаемое давление

$$[p] = \rho_{кр}^* / n^* \quad (2.21)$$

совпадает (при $n = 1,5$) со значением давления, рассчитанного из условия прочности (2.14).

Результаты экспериментальных исследований показывают, что влияние несовершенства изготовления оболочек на устойчивость тем выше, чем меньше толщина стенок. В связи с этим для определения устойчивости за пределами упругости целесообразно ввести переменный коэффициент запаса устойчивости, уменьшающийся с уменьшением параметра λ , характеризующего геометрические параметры оболочки:

$$\lambda = (l/D_B) [0,5 D_B / (s - c)]^{1,5}. \quad (2.22)$$

Коэффициент запаса

$$n^* = \alpha' + \beta' \lambda^2,$$

где α' и β' — коэффициенты.

При $\lambda = 0$ коэффициент запаса принимают так же, как в расчетах на прочность, т. е. $n^* = 1,5$; при $\sigma_{кр} = \sigma_{\tau}^t$ и $\lambda_{пр} = 0,3 E / \sigma_{\tau}^t$ [см. (2.18), (2.22)] коэффициент запаса устойчивости $n^* = 2,4$. Таким образом, $n^* = \alpha' + \beta' \cdot 0 = 1,5$; $n^* = \alpha' + \beta' \lambda_{пр}^2 = 2,4$. Решив эти уравнения, получим

$$n^* = 1,5 + 12,2 (\sigma_{\tau}^t / E)^2 \lambda^2. \quad (2.23)$$

Тогда допускаемое давление из условия устойчивости за пределами упругости материала [см. (2.22) и (2.23)]

$$[p] = \frac{\rho_{кр}^*}{n^*} = \frac{2 \sigma_{\tau}^t (s - c)}{D_B [1,5 + 12,2 (\sigma_{\tau}^t / E)^2 \lambda^2]}. \quad (2.24)$$

Это уравнение применимо только при $0 \leq \lambda < \lambda_{пр}$. При $\lambda > \lambda_{пр}$ допускаемое давление следует определять по формуле (2.17). Допускаемую внешнюю нагрузку можно выбирать из условия $[p] = \min \{ \rho_{кр} / n; \rho_{кр}^* / n^* \}$.

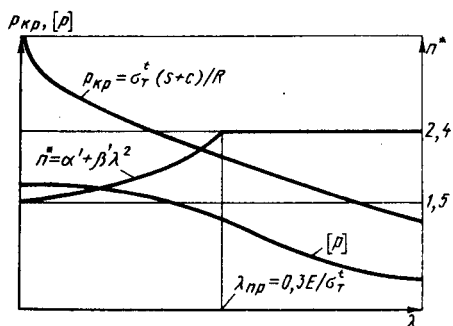


Рис. 2.40. Зависимость критического и допускаемого давлений, а также коэффициента запаса устойчивости корпуса аппарата от параметра λ

На рис. 2.40 приведены зависимости критического давления в области упругих и пластических деформаций, допускаемого давления и коэффициента запаса устойчивости от λ . Как видно из графика, можно

подобрать общее уравнение, связывающее между собой допускаемые внешние давления для области упругих и пластических деформаций материала корпуса аппарата. Простейшая аппроксимация такой зависимости — уравнение (см. ГОСТ 14249—80)

$$[p] = [p]_p / \sqrt{1 + [p]_p^2 / [p]_E^2}, \quad (2.25)$$

где $[p]_p$ — допускаемое давление из условия прочности, определяемое по формуле (2.14); $[p]_E$ — допускаемое давление из условия устойчивости, определяемое в соответствии с формулой (2.17) или (2.19).

Аналогичные формулы приведены в ГОСТ 14249—80 для определения допускаемых осевой силы сжатия $[Q]$ и изгибающего момента $[M]$.

Так, допускаемая осевая сжимающая сила

$$[Q] = [Q]_p / \sqrt{1 + [Q]_p^2 / [Q]_E^2}, \quad (2.26)$$

где $[Q]_p = \pi (D_B + s - c) (s - c) [\sigma]$ — допускаемая осевая сила, определяемая из условия прочности; $[Q]_E$ — допускаемая осевая сила, определяемая из условия устойчивости в области упругих деформаций корпуса аппарата:

$$[Q]_E = \min \{ [Q]_{E1}; [Q]_{E2} \}. \quad (2.27)$$

В формуле (2.27) допускаемую осевую сжимающую силу $[Q]_{E1}$ определяют из условия местной устойчивости в пределах упругости по полуэмпирической формуле

$$[Q]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} D_B^2 E}{n} \left[\frac{100 (s - c)}{D_B} \right]^2 \sqrt{\frac{100 (s - c)}{D_B}}. \quad (2.28)$$

Допускаемую осевую сжимающую силу $[Q]_{E2}$ определяют из условия общей устойчивости по аналогии со стержнями, нагруженными осевым сжимающим усилием

$$Q_{E2} = \frac{\pi (D_B + s - c) (s - c) E}{n} \left(\frac{\pi}{\lambda^*} \right)^2, \quad (2.29)$$

где λ^* — гибкость, определяемая по ГОСТ 14249—80; для корпусов колонных аппаратов можно принять $\lambda^* = 5,66l/(D_B + s - c)$.

При $l/D_B < 10$ формула (2.27) принимает вид $[Q]_E = [Q]_{E1}$.
Допускаемый изгибающий момент

$$[M] = [M]_p / \sqrt{1 + [M]_p^2 / [M]_E^2},$$

где допускаемый изгибающий момент
из условия прочности

$$[M]_p = 0,25\pi D_B (s + D_B - c) (s - c) [\sigma] = 0,25 D_B [Q]_p,$$

из условия устойчивости

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} E D_B^3}{n} \left[\frac{100 (s - c)}{D_B} \right]^2 \sqrt{\frac{100 (s - c)}{D_B}} = \frac{D_B}{3,5} [Q]_{E1}.$$

Найденные таким образом значения $[p]$, $[Q]$ и $[M]$ при раздельном действии на корпус аппарата внешнего давления, осевой сжимающей силы и изгибающего момента позволяют по уравнению (2.15) проверить оболочку на устойчивость в условиях комбинированного нагружения.

Кроме выбора расчетных сечений и нагрузок и расчета корпусов колонн, ГОСТ 24757—81 определяет порядок расчета опорной обечайки, анкерных болтов и нижнего опорного узла аппарата. Определение расчетных усилий в аппаратах колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий регламентировано ГОСТ 24756—81.

§ 2.9. ЭКСТРАКЦИОННЫЕ АППАРАТЫ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИДКОСТЬ—ЖИДКОСТЬ

Жидкостную экстракцию, т. е. процесс разделения жидких компонентов с помощью жидкого растворителя (экстрагента), широко применяют в процессах переработки нефти, для разделения ароматических и алифатических углеводородов, для обезвоживания уксусной кислоты, при разделении редкоземельных элементов и др. Процесс экстракции осуществляется в аппаратах, называемых экстракторами.

Экстракторы, в которых взаимное движение и сепарация контактирующих фаз генерируется силами гравитации, называются гравитационными, или колонными, в отличие от центробежных экстракторов, где взаимодействие и сепарация фаз обусловлены полем центробежных сил.

Колонные экстракторы для системы жидкость—жидкость разделяют на аппараты без подвода энергии и с подводом энергии.

К первым относятся распылительные, насадочные и ситчатые экстракторы, ко вторым — смесительно-отстойные, роторные, пульсационные, вибрационные и др.

Распылительные экстракционные аппараты представляют собой полые колонны, в которых одна из фаз движется сплошным

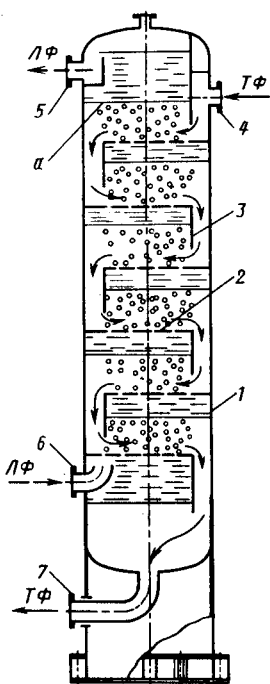


Рис. 2.41. Ситчатая экстракционная колонна

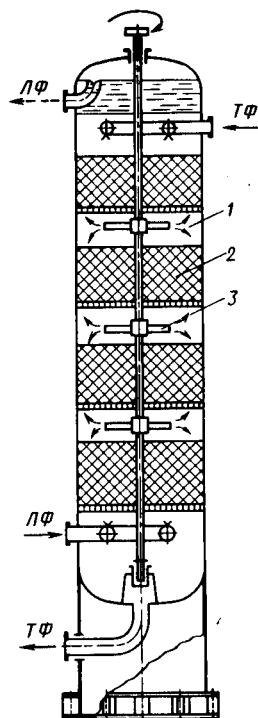


Рис. 2.42. Экстракционная колонна Шайбеля

потоком, а другая — в виде капель. Эти аппараты просты по конструкции, но мало эффективны. Насадочные экстракционные колонны по конструкции аналогичны рассмотренным выше насадочным колоннам для процессов ректификации и абсорбции. В качестве насадки в них используют преимущественно кольца Рашига, которые укладывают на опорные решетки колосникового типа.

Ситчатая экстракционная колонна (рис. 2.41) имеет вертикальный цилиндрический корпус 1 и перфорированные (ситчатые) тарелки 2, снабженные переливными устройствами 3. Колонна работает следующим образом. Тяжелая фаза $ТФ$ через штуцер 4 подается непрерывно в колонну, сплошным потоком опускается по колонне и удаляется через штуцер 7. Легкая фаза $ЛФ$ непрерывно поступает через штуцер 6 в колонну под нижнюю тарелку 2. Проходя через отверстия тарелки, эта фаза диспергируется и в виде капель поднимается под следующую тарелку. В верхней части дисперсная фаза коалесцирует в сплошной слой, образуя уровень раздела фаз a и удаляется через штуцер 5. В процессе образования капель и их движения осуществляется процесс массообмена.

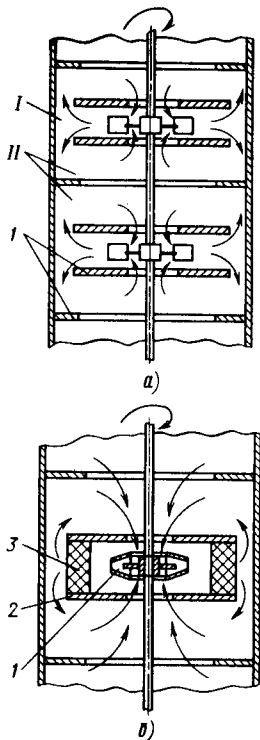


Рис. 2.43. Экстракционные колонны с мешалками

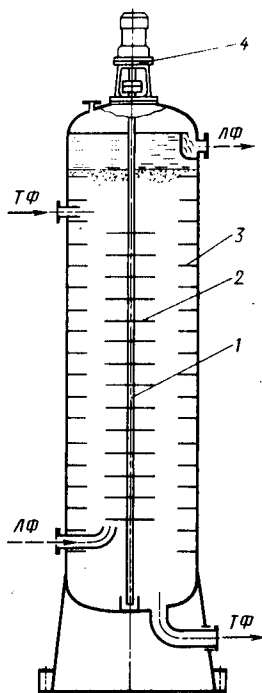


Рис. 2.44. Роторно-дисковый экстрактор

Из аппаратов, работающих с подводом энергии, выделим прежде всего роторные экстракторы.

Одной из первых конструкций роторных экстракторов является колонна Шайбеля (рис. 2.42), состоящая из чередующихся смесительных 1 и отстойных 2 секций. Для перемешивания в смесительных секциях размещены закрепленные на валу мешалки 3. Отстойные секции заполнены насадкой (плетеной сеткой с крупными ячейками).

В конструкции, показанной на рис. 2.43, а, смесительная секция 1 изолирована от отстойной секции II горизонтальными статорными кольцами 1. В более поздних конструкциях колонн Шайбеля (рис. 2.43, б) перемешивание фаз осуществляется турбинными мешалками 1 в зоне между неподвижными кольцевыми перегородками 2 и слоем проволочной сетки 3. Роторно-дисковый экстрактор (рис. 2.44) представляет собой колонну, по оси которой установлен ротор в виде вертикального вала 1 с круглыми горизонтальными дисками 2. Диски вращаются в полости секции,

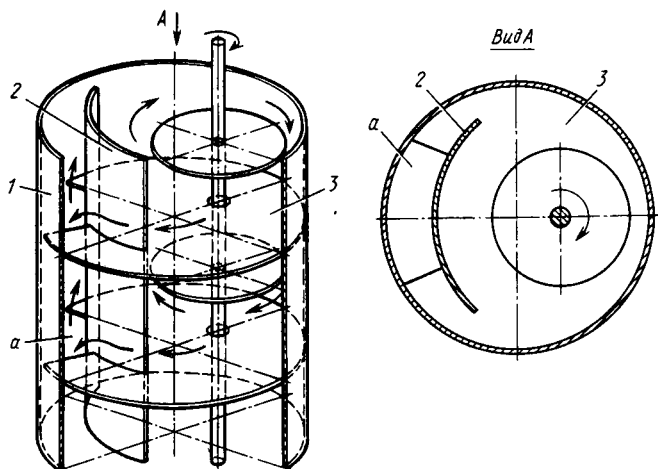


Рис. 2.45. Роторно-дисковый экстрактор с асимметрично расположенным валом

образованной закрепленными на корпусе статорными кольцами 3. Ротор приводится во вращение от электропривода 4. Легкая фаза *ЛФ* вводится в аппарат снизу, а тяжелая *ТФ* — сверху.

Под действием вращающихся дисков фазы в секциях совершают сложное циркуляционное движение, при котором совмещены радиальное и осевое движение жидкости. Дисперсная и сплошная фазы движутся противотоком; капли дробятся дисками, отбрасываются на периферию колонны, сталкиваются со стенками колонны и между собой. Одновременно с дроблением капель происходит их коалесценция.

На рис. 2.45 показан роторно-дисковый экстрактор с асимметричным расположением вала. В корпусе 1 аппарата смешительные секции отделены одна от другой статорными кольцами 3. Из одной секции в другую фазы перемещаются через отстойные зоны *а*, отделенные от смешительных зон вертикальным экраном 2.

В пульсационных экстракторах интенсификацию массообмена между контактирующими фазами обеспечивают сообщением им колебательного движения определенных амплитуды и частоты. Независимо от типа насадки экстракционную колонну в этом случае снабжают генератором пульсаций (пневматическим, механическим и др.) Так, в установке с пневматической системой пульсаций (рис. 2.46) воздух или инертный газ от компрессора 2 через ресивер 5 и золотниково-распределительный механизм 3 пневматического пульсатора поступает в пульсационную камеру 1 экстрактора 4. При прямом импульсе уровень жидкости в пульсационной камере снижается, вследствие чего жидкость в колонне поднимается при обратном импульсе—камера соединяется с атмосферой и жидкость в колонне опускается. В аппаратах

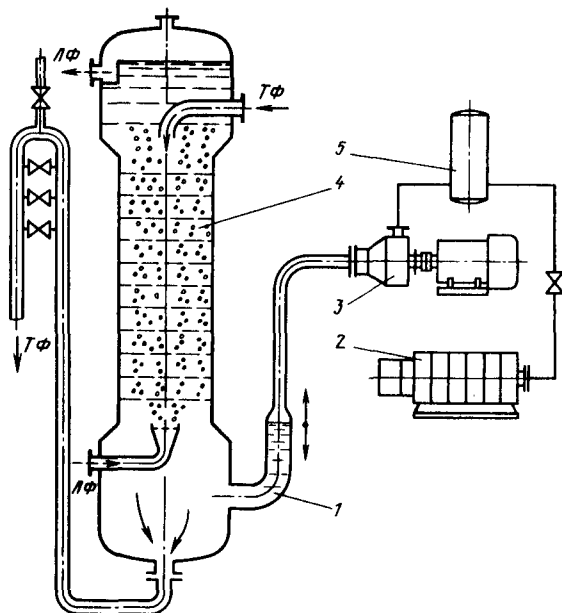


Рис. 2.46. Экстракционная установка с пневматической системой пульсации

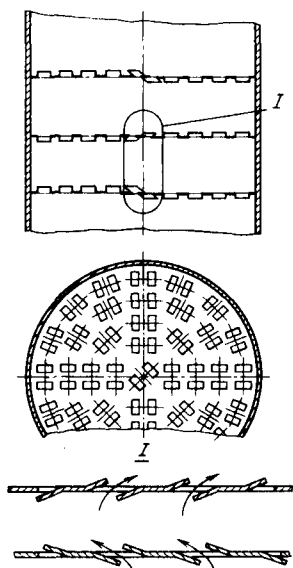


Рис. 2.47. Тарелка типа КРИМЗ

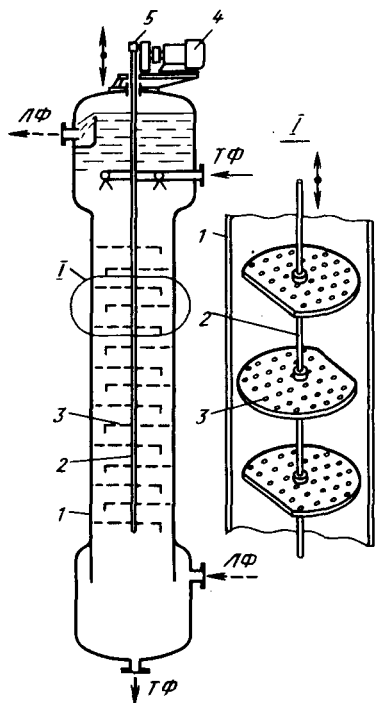
этого типа не требуется устанавливать переливные устройства на тарелках, так как при подъеме столба жидкости в колонне через отверстие тарелки проходит легкая фаза ЛФ, а при опускании — тяжелая фаза ТФ.

В пульсационных экстракторах используют обычно ситчатые тарелки, а также тарелки типа КРИМЗ. Последняя более эффективна и представляет собой плоский диск (рис. 2.47), на котором отштампованы прямоугольные отверстия с отбортовкой в виде наклонных направляющих лопаток. Отверстия размещены по концентрическим окружностям, причем лопатки соседних тарелок наклонены в противоположные стороны.

В вибрационных экстракторах эффективный массообмен обеспечивается возвратно-поступательным движением пакета перфорированных тарелок, через которые жидкость проталкивается в виде распадающихся на капли струй. В отличие от пульсаций столба жидкости вибрации тарелок происходят с меньшей амплитудой и большей частотой.

На рис. 2.48 показан вибрационный экстрактор. Как и в пульсационных аппаратах, тяжелая ТФ и легкая ЛФ фазы движутся противоточно. В верхней части колонны 1 размещен электропривод 4 с эксцентриком 5. При вращении вала эксцентрик передает возвратно-поступательное движение штоку 2, с которым жестко соединены перфорированные тарелки 3.

Рис. 2.48. Вибрационный экстрактор



В нашей стране применяют вибрационные экстракторы конструкции ГИАП с фасонными тарелками, напоминающими тарелки типа КРИМЗ.

Центробежные экстракторы являются перспективным оборудованием для проведения процессов жидкостной экстракции. Поскольку ускорение генерируемого в них центробежного поля превышает ускорение свободного падения в 10^3 — 10^4 раз, в этих экстракторах достигаются большие скорости взаимодействия обрабатываемых жидкостей, высокая эффективность массообмена и четкая сепарация выходных потоков. В связи с этим такие аппараты компактны, в них невелики объемы участвующих в массообмене жидкостей, минимальна пожаро- и взрывоопасность установок. Поскольку время контак-

та в этих аппаратах невелико, они незаменимы при обработке нестойких продуктов, а также легкоэмульгируемых жидкостей и смесей компонентов с мало отличающимися плотностями.

Исследования, проведенные в Казанском химико-технологическом институте (КХТИ), показали, что центробежные экстракторы можно успешно использовать при обработке вязких жидкостей, например, при селективной очистке смазочных масел.

Центробежные экстракторы можно разделить на две основные группы:

камерные или дискретно-ступенчатые, состоящие из отдельных ступеней (камер), в каждой из которых происходят последовательно смешение и разделение противоточно движущихся фаз; дифференциально-контактные, в которых процесс протекает при непрерывном контактировании противоточно движущихся фаз.

Примером аппаратов первой группы является экстрактор «Лувеста» (ФРГ) (рис. 2.49).

Экстрактор работает следующим образом. Тяжелая фаза ТФ подается в установленный на валу 2 ротор 1 экстрактора по каналу б узла подачи 13. Сюда же через диск 9 ступени 11 и канал а подается легкая фаза ЛФ. Смесь жидкостей проходит под глухой тарелкой 3 и поступает в сепарационное пространство в, где фазы

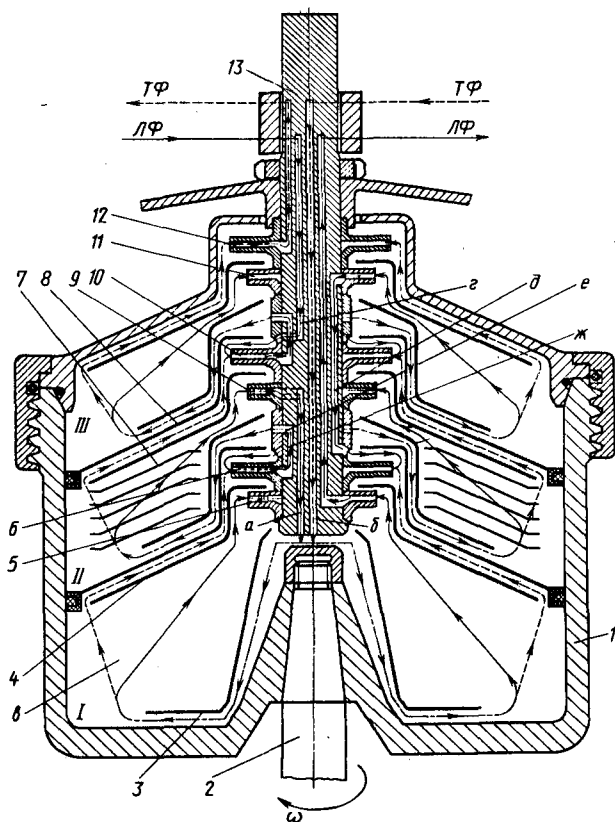


Рис. 2.49. Трехступенчатый ротор экстрактора «Лувеста»

разделяются (пакет сепарационных тарелок 7 показан условно лишь в ступени II). Легкая фаза ЛФ под действием центробежных сил выводится из ступени I через диск 5, а тяжелая фаза ТФ отбрасывается к периферии ступени и направляется по каналу между глухими тарелками 4 и 8 к диску 6. К этому же диску со ступени III (через диск 11 по каналу д) подается легкая фаза. Образовавшаяся смесь жидкостей направляется по каналу ж через переточное отверстие е в сепарационное пространство ступени II. Аналогично протекают процессы смешения и разделения фаз в ступени III, причем к напорному диску 10 по каналу з поступает исходная легкая фаза (обычно свежий экстракт). Тяжелая фаза выводится из аппарата верхним диском 12, а легкая — диском 5. Для передачи легкой фазы из ступени II в ступень I служит напорный диск 9.

Таким образом, в пределах каждой ступени происходит проточное смешение фаз, в то время как в целом по аппарату обеспечивается их противоток. В каждой ступени достигается равно-

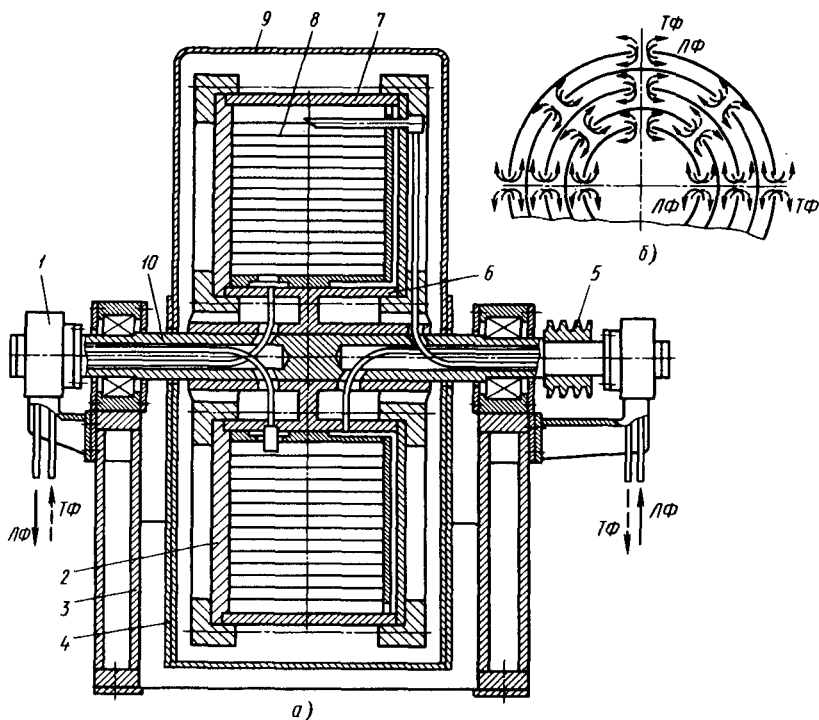


Рис. 2.50. Центробежный экстрактор Подбильняка:
 а — общий вид; б — схема насадки в виде концентрических цилиндров

весие, примерно соответствующее по эффективности одной теоретической ступени разделения.

При необходимости достижения большой эффективности разделения и особенно большой производительности наиболее приемлемы аппараты второй группы — центробежные экстракторы дифференциально-контактного типа, получившие некоторое распространение в химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Типичный пример центробежных экстракторов дифференциально-контактного типа — экстрактор Подбильняка (рис. 2.50, а). Экстрактор имеет цилиндрический ротор 2, жестко закрепленный на полом валу 10. Ротор заключен в кожух 4 со съемной крышкой 9 и вращается совместно с валом в двух опорах станины 3. На концах полого вала имеются каналы, через которые легкая ЛФ и тяжелая ТФ фазы раздельно подаются в ротор и отводятся из него. Полый вал отделен от неподвижных коллекторов специальными торцовыми уплотнениями 1. Вал получает вращение от электродвигателя через клиноременную передачу 5. Корпус ротора состоит из внутренней 6 и наружной 7 концентрических обе-

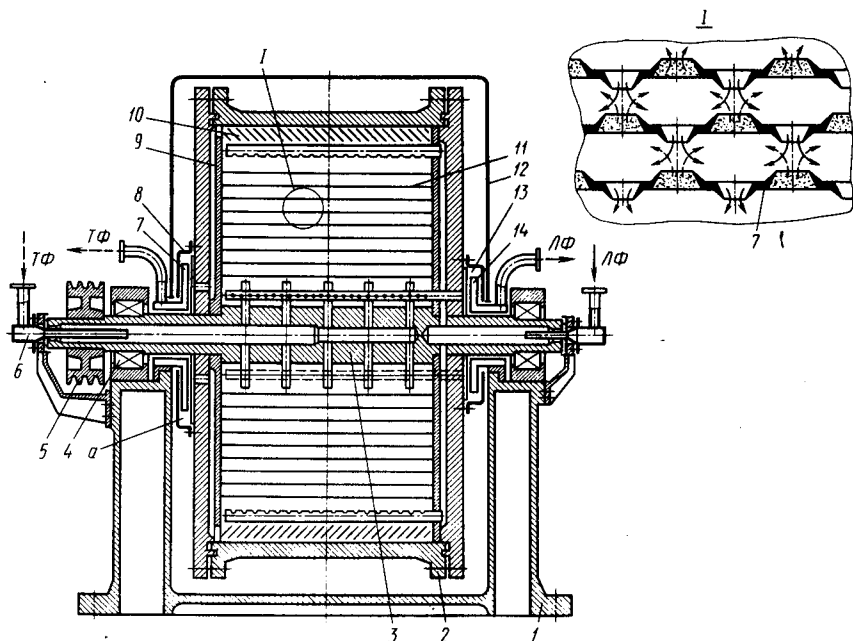


Рис. 2.51. Безнапорный центробежный экстрактор

чаек, закрытых с торцов боковыми стенками. Внутри ротора находится пакет 8 перфорированных концентрических цилиндров. От формы перфораций существенно зависит эффективность массообмена.

Жидкости подаются в аппарат под избыточным давлением, причем тяжелая фаза поступает в ротор через сопла у его внутренней обечайки 6, а легкая — через сопла у наружной обечайки 7. Через контактные элементы (перфорированные цилиндры) — рис. 2.50, б — жидкости движутся противотоком, многократно смешиваясь и разделяясь в каналах между цилиндрами. Прокontaktировавшие фазы удаляются через каналы в полном валу 10.

Уровень раздела фаз в этих аппаратах регулируют изменением давления на выходе тяжелой фазы. Центробежные экстракторы такого типа относятся к напорным аппаратам, поскольку жидкость в них подается под избыточным давлением.

Примером безнапорного экстрактора дифференциально-контактного типа может служить центробежный экстрактор, разработанный для селективной очистки смазочных масел (рис. 2.51). Аппарат состоит из цилиндрического ротора 2, заключенного в кожух 1 и опирающегося на подшипники 4. Вал 3 ротора приводится от электродвигателя через клиноременную передачу 5. На обоих концах вала расположены устройства 6 подвода жидко-

сти. Внутри ротора с переменным шагом размещены контактные цилиндры 11. Ротор закрыт кожухом 12.

Тяжелая *ТФ* и легкая *ЛФ* фазы жидкости самотеком через устройства 6 поступают в полый вал 3, откуда под действием центробежных сил перемещаются: легкая фаза — по радиальным каналам в диске 9 к периферии ротора, а тяжелая — к первому от оси аппарата контактному цилиндру. Легкая фаза сплошным потоком перемещается из периферийной зоны к центру аппарата, попадает в приемный карман 13 и заборным диском 14 удаляется из аппарата. Тяжелая фаза, диспергируясь при истечении из отверстий вала 3, перемещается к стенкам контактного цилиндра. На периферии ротора дисперсная фаза сепарируется на тарелках 10, коалесцирует, образует сплошной слой и отводится по каналам в диске 9 в приемный карман *a* (образованный крышкой 8) для тяжелой фазы, откуда удаляется заборным диском 7.

Положение уровня раздела фаз в этом экстракторе регулируют изменением радиуса отвода тяжелой фазы из аппарата в приемный карман *a*.

§ 2.10. АППАРАТЫ ДЛЯ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ

Сушка — это удаление паров влаги, образующихся при подводе теплоты к высушиваемым материалам (сыпучим, жидким и пастообразным). Интенсивность сушки зависит от способа подвода теплоты к высушиваемому материалу и отвода испаряющейся влаги, а также от скорости перемещения влаги из глубинных слоев материала к его поверхности. Последний показатель в свою очередь определяется теплофизическими свойствами высушиваемого материала и формой связи с ним влаги.

Вследствие большой номенклатуры подлежащих высушиванию материалов (в химической промышленности сушат более 200 тысяч видов материалов) используют много различных по конструкции сушильных аппаратов, что затрудняет их четкую классификацию и типизацию.

Сушилки, применяемые в химической промышленности, обычно классифицируют по способу подвода теплоты к высушиваемому материалу следующим образом: конвективные (для сушки материала в слое, барабанные вращающиеся, для сушки материала в режиме псевдоожиженного и фонтанирующего слоев, для сушки материала в режиме пневмотранспорта, распылительные); кондуктивные (полочные, барабанные вращающиеся, вальцовые); специальные (терморadiационные, высокочастотные, сублимационные).

Из этих сушилок наиболее распространены работающие при атмосферном давлении конвективные сушилки, в которых в качестве сушильного агента используют топочные газы, подогретый воздух или их смесь. Доля этих сушилок в общем объеме применяемых сушильных аппаратов составляет около 80 %. Процесс сушки в таких аппаратах может идти в условиях прямо-

точного или противоточного движения теплоносителя и материала, а также при перекрестном их движении. Наиболее экономичны по теплотратам противоточные сушилки; прямоток используют лишь в тех случаях, когда высушиваемый материал нельзя подвергать воздействию высокой температуры в конце процесса сушки.

Наибольшую долю конвективных сушилок в химической промышленности составляют барабанные сушилки (около 40 %). Однако эти аппараты можно применять только для сушки сыпучих материалов.

В настоящее время все более широко используют аппараты для сушки в режиме псевдоожиженного или «кипящего» и фонтанирующего слоев (удельный вес 25 %) и аппараты для сушки в режиме пневмотранспорта (примерно 7 %); в них можно интенсивно сушить сыпучие материалы, а также пастообразные и жидкие растворы.

Примерно 10 % общего числа конвективных сушилок в химической промышленности составляют распылительные сушилки, чуть больше — аппараты для сушки материала в слое (полочные, туннельные, ленточные и вальцеленточные сушилки).

Из кондуктивных сушилок наиболее распространены полочные вакуум-сушильные шкафы, барабанные и вальцевые сушильные аппараты.

Кондуктивные атмосферные сушилки применяют для сушки продуктов, для которых недопустим контакт материалов с теплоносителем, например, для исключения загрязнения. Кондуктивные вакуумные сушилки используют для сушки термочувствительных материалов, удаления из материала органических растворителей, сушки токсичных и легковоспламеняющихся веществ, когда необходима герметизация процесса.

Вальцевые атмосферные кондуктивные сушилки используют для сушки пастообразных продуктов с большой начальной влажностью, а также для сушки влажных продуктов, чувствительных к температурным воздействиям.

Доля специальных сушилок в химической промышленности невелика (около 1 %). Компактные и эффективные терморadiационные сушилки требуют большого расхода энергии; их используют для сушки тонколистого материала и лакокрасочных покрытий. Высокочастотные сушилки применяют для сушки толстослойных материалов, когда необходимо регулировать температуру и влажность на поверхности и в глубине материала. Сублимационные сушилки — наиболее дорогие; их используют, если высушиваемый материал не выдерживает обычной тепловой сушки.

Конвективные аппараты для сушки материала в слое могут быть непрерывного (туннельные, ленточные, петлевые, шахтные) и периодического (камерные, полочные) действия.

Аппараты непрерывного действия представляют собой теплоизолированную камеру, по которой транспортирующим устрой-

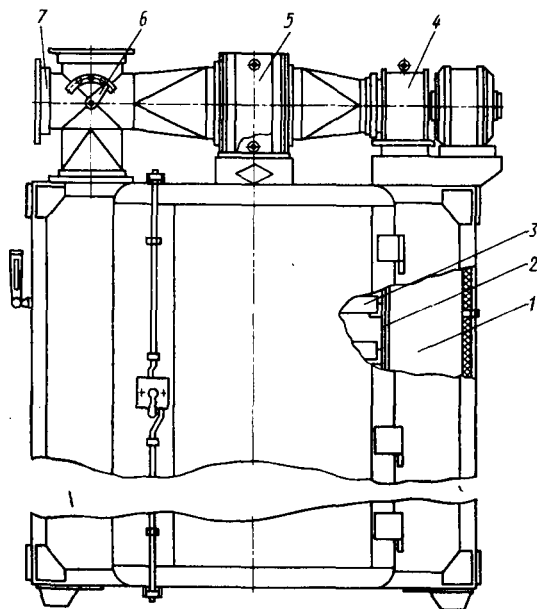


Рис. 2.52. Полочная сушилка

ством от загрузочного конца камеры к разгрузочному перемещается высушиваемый материал, контактируя при этом с сушильным агентом. В некоторых конструкциях аппаратов высушиваемый материал перемещается под действием сил тяжести.

Из аппаратов периодического действия наиболее просты полочные калориферные сушилки, предназначенные главным образом для сушки материалов в малотоннажных про-

изводствах, когда необходимо с большой точностью регулировать режим сушки. Полочная сушилка (рис. 2.52) представляет собой прямоугольную камеру 1, внутри которой установлена этажерка 2 с полками. На этажерке размещены противни 3 с материалом. Сушильный агент подвергается многократной циркуляции с промежуточным подогревом (центробежным вентилятором 4 и паровым калорифером 5). Воздух поступает в камеру и проходит в горизонтальном направлении между полками. Шибер 6 предназначен для регулирования количества воздуха, идущего на рециркуляцию. Отработанный воздух удаляется через патрубок 7.

Температуру сушки регулируют изменением количества подаваемого пара в калорифер и количества возвращаемого в камеру теплоносителя.

В туннельных сушилках высушиваемый материал перемещается в сушильной камере (туннеле) вагонетками, тележками, люльками, захватами подвесных конвейеров. Длина туннеля может достигать нескольких десятков метров (25—60 м), высота 2,0—2,5 м. Параллельно оси туннеля или перпендикулярно оси циркулирует сушильный агент (нагретый воздух, топочные газы, перегретый пар).

На рис. 2.53 приведена схема двухсекционной туннельной сушилки, работающей с рециркуляцией отработанного теплоносителя. В первой по ходу материала секции теплоноситель и материал движутся прямоточно, во второй, где температура теплоносителя ниже, — противоточно.

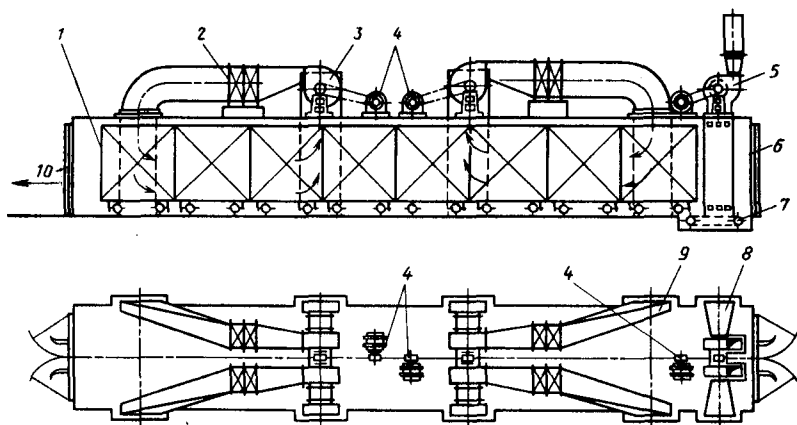


Рис. 2.53. Туннельная сушилка

Нагреваемый в калориферах 2 воздух вентиляторами 3, снабженными приводом 4, по газоходу 9 подается в секции сушилки. Отработанный воздух через газоходы 8 удаляется из туннеля вентилятором 5.

Вагонетки 1 установлены вплотную одна к другой по всей длине туннеля, снабженного дверями 6 и 10 на загрузочном и разгрузочном концах. Вагонетки перемещаются по наклонному полу камеры или специальным толкателем 7, установленным со стороны загрузки и снабженным автономным приводом.

Ленточные сушилки предназначены главным образом для сушки штучных изделий, полуфабрикатов и сыпучих материалов. Исключение составляют тонкодисперсные пылевидные материалы, так как пыль не удерживается на полотне и оседает на поверхностях калориферов, а органическая пыль даже обугливается и загорается. В качестве сушильного агента в этих аппаратах обычно используют нагретый воздух или топочные газы.

Ленточные сушилки (аппараты непрерывного действия) изготовляют в виде одного или нескольких расположенных один над другим ленточных конвейеров, размещенных внутри прямоугольной сушильной камеры. В качестве несущего полотна конвейера обычно используют металлическую плетеную сетку или перфорированные пластины; лента может быть и сплошной (холст, бельтинг).

Высушиваемый материал, насыпанный на полотно конвейера, продувается сушильным агентом. В сушилках со сплошной лентой теплоноситель движется над слоем высушиваемого материала в направлении, противоположном движению ленты.

В пятисекционной одноярусной сушилке (рис. 2.54) материал транспортируется ленточным конвейером 1. Воздух, нагреваемый в паровом калорифере 4, центробежным вентилятором 5

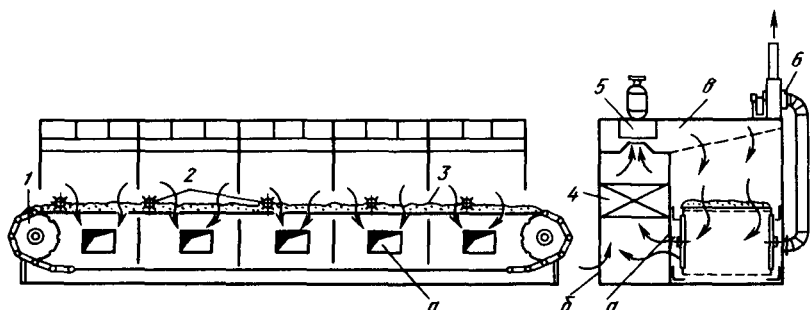


Рис. 2.54. Одноярусная ленточная сушилка

подается в распределительный канал *в*, проходит через слой материала *3* сверху вниз и через окна *а* возвращается на рециркуляцию. Часть отработанного воздуха отводится вентилятором *б*, а свежий воздух в необходимом количестве подсасывается через окна *б*. Для выравнивания влажности материала по высоте слоя установлены ворошители *2* (валки с пальцами).

Вальцеленточные сушилки (рис. 2.55) применяют для сушки пастообразных материалов. Сушилка состоит из ленточного конвейера и формовочно-сушильного вальца. На поверхности вальца, предназначенного для предварительного формования и подсушки материала, нанесены кольцевые канавки трапецеидального профиля. Паста, поступающая из бункера *2*, пресс-валком *1* впрессовывается в канавки сушильного вальца *3*. Валец и пресс-валик обогреваются паром. За один оборот вальца паста подсушивается, снимается специальными ножами *4*, имеющими форму гребенки, поступает на конвейер *5*, а затем на конвейер ленточной сушилки *6*.

Петлевые сушилки применяют при сушке тонких гибких материалов (пленки, бумаги, тканей и др.). В этом случае сушиль-

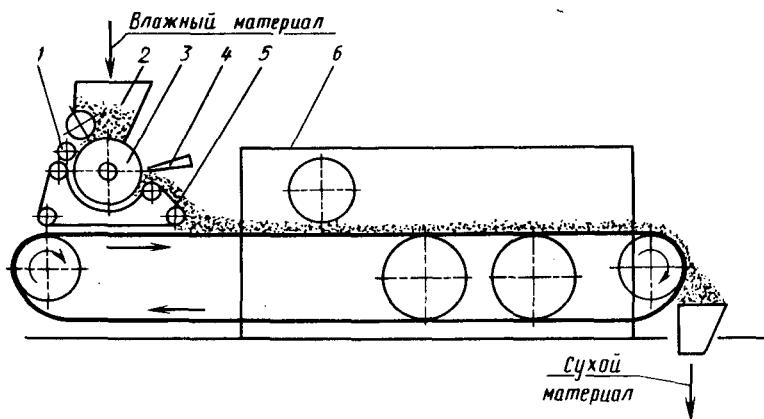


Рис. 2.55. Схема вальцеленточной сушилки

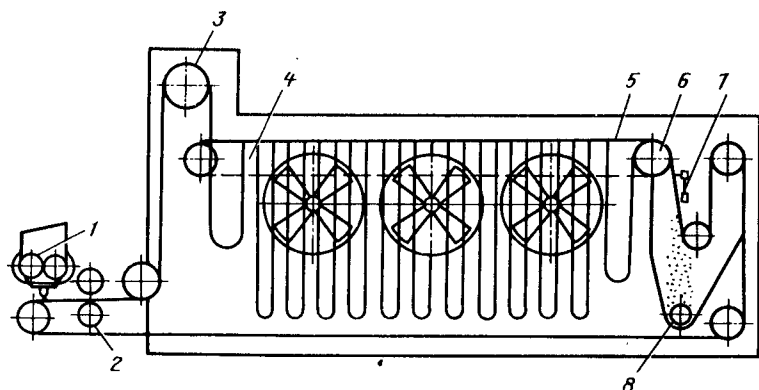


Рис. 2.56. Схема петлевой сушилки

ный аппарат представляет собой камеру прямоугольного сечения, в которой в виде петель перемещается высушиваемый материал, провисающий на поперечных планках, закрепленных в цепном конвейере. Петлевые сушилки успешно используют и для сушки паст (химически осажденного мела, красителей некоторых типов и др.).

Сушилка такого типа показана на рис. 2.56. Внутри сушильной камеры проходит бесконечная стальная лента 4 из металлической сетки с глубиной ячеек 10—15 мм. Паста из бункера-питателя 1 подается на обогреваемые паром вальцы 2, вдавливающие материал в ячейки ленты. Пройдя направляющий барабан 3, лента с впрессованным материалом поступает в сушильную камеру и образует петли благодаря специальным, закрепленным на ней поперечным планкам, которые опираются на размещенный в верхней части сушильной камеры цепной конвейер 5. Далее направляющим роликом 6 лента отводится к ударному устройству 7 и сухой продукт из ячеек сетки стряхивается в бункер, откуда шнеком 8 выводится из сушилки. Сушильный агент в петлевых сушилках обычно движется перпендикулярно ленте. В этих аппаратах материал сушится достаточно интенсивно, поскольку сушка происходит в слое небольшой толщины при двустороннем омывании ленты теплоносителем с предварительным прогревом материала горячими вальцами.

Общие недостатки ленточных, вальцеленточных и петлевых сушилок — громоздкость, сложность обслуживания и перебои в работе из-за перекоса ленты.

Конвективные барабанные сушилки широко используют в химической промышленности для сушки сыпучих материалов топочными газами или подогретым воздухом в условиях прямоточного или противоточного движения теплоносителя и высушиваемого материала. Эти аппараты отличаются боль-

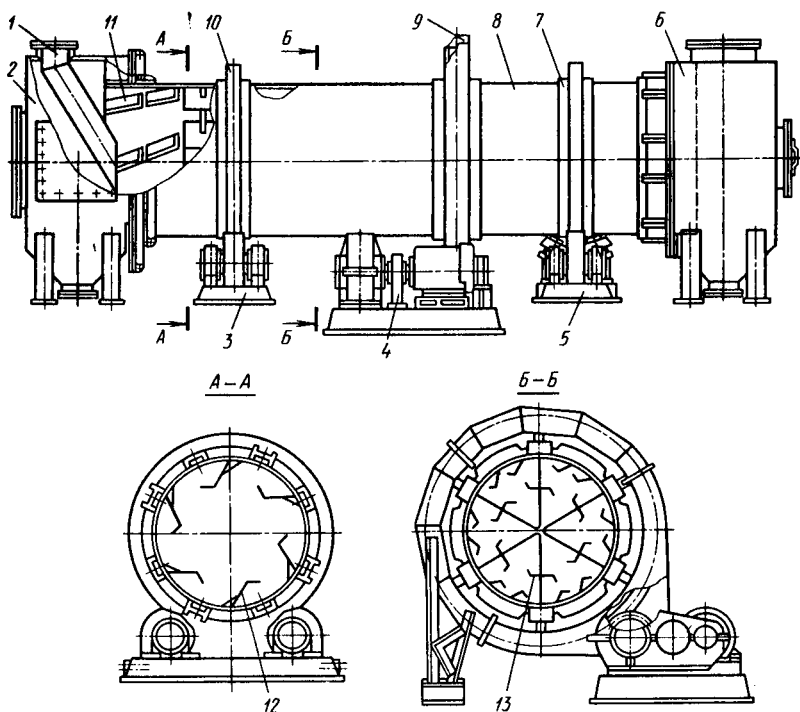


Рис. 2.57. Барабанная сушилка

шой экономичностью благодаря возможности использования высокотемпературных теплоносителей. Кроме этого, они имеют значительную производительность, надежны в работе (работая по 6000—8000 ч без капитального ремонта).

Барабанная конвективная сушилка (рис. 2.57) представляет собой установленный под углом (около 4°) к горизонту вращающийся барабан 8, на который надеты два бандаж 10 и зубчатый венец 9 привода. Аппарат опирается бандажими на свободно вращающиеся ролики, закрепленные на опорной раме 3 и опорно-упорной станции 5. Два упорных ролика, установленных на раме опорно-упорной станции, ограничивают осевое смещение корпуса барабана.

Барабан вращается от моторно-редукторной группы 4 через зубчатый венец 9. Частота вращения барабана 2—12 об/мин. На концах барабана установлены загрузочная камера 2 для ввода влажного продукта и теплоносителя и разгрузочная камера 6 для вывода продукта и отработанного теплоносителя из аппарата.

При противоточном движении высушиваемого материала и теплоносителя последний вводится в разгрузочной камере, а выводится в загрузочной.

Для загрузки вращающихся барабанов предназначены питатели, установленные над загрузочной камерой. Материал подается из питателя в барабан по наклонным лоткам 1 (угол наклона 60—70°), что обеспечивает сыпание материала в барабан.

Между камерами и барабаном устанавливают уплотнения для исключения подсоса наружного воздуха. Подсос воздуха в барабанной сушилке особенно нежелателен со стороны подачи горячего теплоносителя, так как при этом снижается температура теплоносителя и возрастает скорость его движения в барабане.

В барабане установлены насадки, обеспечивающие равномерное распределение материала по сечению барабана. Со стороны поступления материала в барабане расположена приемно-винтовая насадка 11, далее — основная насадка. В сушильных барабанах диаметром 1000—1600 мм для материалов с хорошей сыпучестью и размером частиц до 8 мм в качестве основной насадки рекомендуется использовать секторную насадку 13, а для сыпучих материалов с большим размером частиц или склонных к слипанию материалов — лопастную 12. Если материал в ходе сушки восстанавливает сыпучие свойства, то в качестве приемно-винтовой используют лопастную насадку, а в качестве основной — секторную.

Теплота передается материалу конвекцией от газов и теплопроводностью от нагретой поверхности насадки и внутренней поверхности барабана. Объем барабана заполняют материалом обычно на 20 %. Материал движется вдоль вращающегося барабана, так как он наклонен к горизонтали, а также под действием проходящих через сушилку газов. Для исключения уноса значительного количества высушиваемого материала относительная скорость газа в барабанной сушилке составляет 2—5 м/с.

Высушенный продукт выводится из разгрузочной камеры лопастным затвором или шнеком. Отработанные газы проходят систему пылеочистки и отводятся в атмосферу.

Барабан сушилки представляет собой стальную цилиндрическую обечайку толщиной 8—20 мм. Как показывает опыт, барабан при работе имеет тенденцию несколько сплющиваться, особенно в сечениях под опорами. Во избежание этого барабан снабжают одной или несколькими широкими кольцевыми накладками 7, приваренными к корпусу. Толщина накладок в 1,5—2 раза превышает толщину барабана. Таким образом, образуется подбандажная обечайка — мощное жесткое кольцо, препятствующее деформации барабана. Иногда подбандажную обечайку изготавливают как единое толстое кольцо, свариваемое с пролетной обечайкой барабана кольцевым швом.

Бандажи обычно изготавливают из стали 40; они представляют собой кольца прямоугольного профиля и служат для передачи давления от вращающихся частей аппарата на опорные и упорные ролики. Последние отливают из чугуна СЧ18 или СЧ 21. Неравнопрочность роликов и бандажей приводит к ускоренному изнаши-

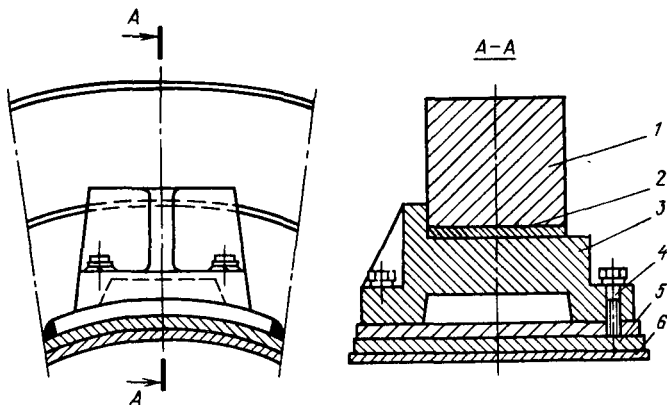


Рис. 2.58. Узел крепления бандажа к барабану

ванию роликов, изготовить которые дешевле и проще, чем бандаж. Бандажи 1 (рис. 2.58) обычно закрепляют на барабане 6 башмаками 3, которые присоединяют к кольцевым накладкам 5 сваркой или болтами 4. Выступы двух соседних башмаков повернуты в разные стороны, что предотвращает осевое смещение бандажа вдоль барабана. Зазор между башмаком 3 и бандажом 1 регулируют подкладками 2.

Опорно-упорная станция (рис. 2.59) состоит из основной плиты 4, на которой укреплены четыре подшипниковых узла 3 для опорных роликов 2, а также упорные ролики 5, расположенные под углом к вертикали. Бандаж 1 упирается в ролики 5 своими торцовыми поверхностями.

Барабанные сушилки обычно работают при низком вакууме (50—250 Па) для исключения выхода в цех запыленных топочных

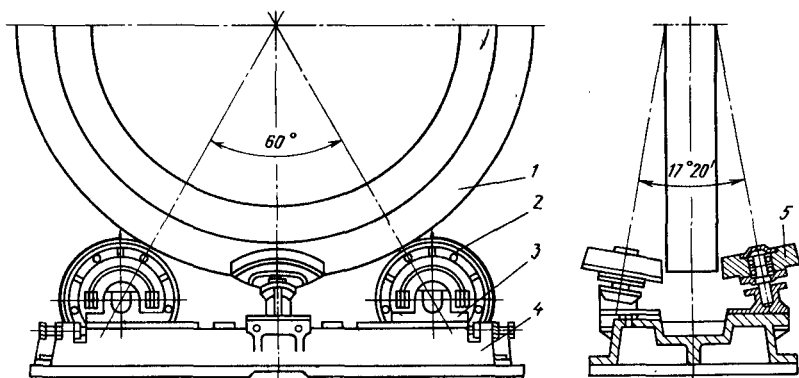


Рис. 2.59. Опорно-упорная станция

газов; в связи с этим стыки барабана с камерами уплотняют. По ОСТ 26 01-441—85 в местах соединения барабана с загрузочной и разгрузочной камерами устанавливают сальниковые, ленточные или секторные уплотнения. В аппаратах диаметром 1000—2800 мм и температурой стенки барабана до 90 °С рекомендуется использовать ленточное уплотнение (рис. 2.60), а при более высокой температуре — сальниковое. В аппаратах большего диаметра рекомендуется использовать секторное уплотнение (рис. 2.61).

В ленточном уплотнении один конец многослойной ленты 2 (см. рис. 2.60) закреплен на неподвижном кольце 5 камеры, а другой — заведен на кольцо 1, укрепленное на барабане. Лента прижата к подвижному кольцу проволоочным кольцом 3 через накладку 4. Секторное уплотнение (см. рис. 2.61) состоит из подвижного, вращающегося вместе с барабаном, кольца 2 и неподвижного кольца 1. К подвижному кольцу 2 пружинами 4 прижимаются десять секторов 3. Упорами для пружин 4 служат станы 5.

Аппараты для сушки материала в псевдооживленном (кипящем) слое. Проведение процесса сушки в кипящем слое позволяет значительно интенсифицировать удаление влаги из материала, поскольку при этом увеличивается поверхность контакта между частицами материала и сушильным агентом, выравниваются температура и влажность материала в объеме слоя. Вследствие этого аппараты псевдооживленного слоя вытесняют барабанные сушилки, например, при сушке известняка, каменного угля и пр. В установках с кипящим слоем можно одновременно проводить несколько процессов (сушку и обжиг, сушку и грануляцию и др.). К недостаткам таких сушилок можно отнести повышенный удельный расход энергии, пылеобразование материала и связанную с этим опасность возникновения его взрывоопасных концентраций в воздухе. Сушилки с кипящим слоем могут быть одно- и многосекционными. Односекционные аппараты наиболее просты в конструктивном и эксплуатационном отношении. Их используют главным образом для удаления несвязанной влаги из сыпучих материалов. Многосекционные аппа-

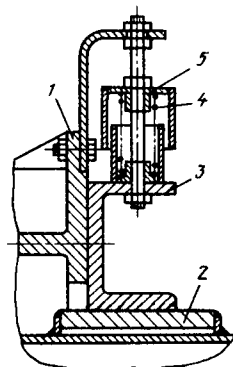
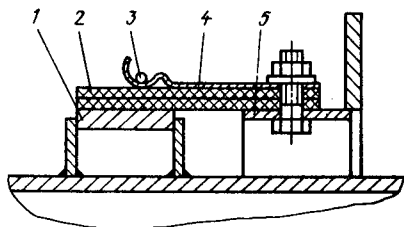
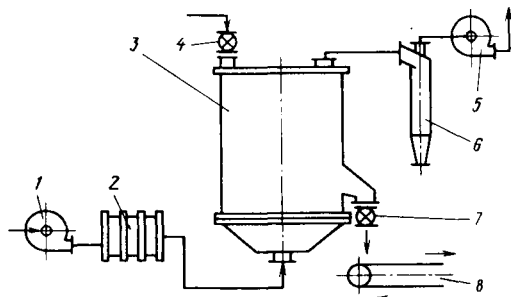


Рис. 2.60. Ленточное уплотнение

Рис. 2.61. Секторное уплотнение

Рис. 2.62. Схема однокамерной установки для сушки сульфата аммония в псевдоожиженном слое



раты применяют для удаления связанной влаги из материалов, для которых требуется высокая равномерность сушки.

Простейшая однокамерная сушилка представляет собой вертикальный аппарат круглого или прямоугольного сечения, снабженный в нижней части распределительной решеткой, через которую поступает теплоноситель.

Как известно, при отсутствии теплоносителя или при очень малой его скорости зернистый материал лежит на решетке неподвижным плотным слоем. С увеличением скорости подачи теплоносителя наблюдается узкая область скоростей, в пределах которой слой сначала разбухает, но остается неподвижным, а затем при достижении теплоносителем некоторой критической скорости, называемой скоростью псевдоожижения, слой приходит в состояние кипения, или псевдоожижения. С дальнейшим увеличением скорости теплоносителя псевдоожижение переходит в пневмотранспорт, начало которого характеризуется скоростью газового потока, называемой «скоростью уноса».

На рис. 2.62 показана установка для сушки сульфата аммония горячим воздухом в псевдоожиженном слое. Влажный материал секторным питателем 4 загружается в сушильную камеру 3, куда из калорифера 2 вентилятором 1 нагнетается воздух, нагретый до температуры 120 °С. Высушенный продукт через выгрузочное устройство 7 поступает на конвейер 8. Отработанный воздух проходит через циклон 6 и выбрасывается в атмосферу вентилятором 5.

Сушильная камера этой установки (рис. 2.63) представляет собой прямоугольный короб 2. Через люк 1 в нижнюю часть короба установлено газораспределительное устройство. Нагретый воздух поступает через горловину 6 и отводится через патрубок 3, огибая отбойник 4 (первичный сепаратор), который направляет поток газа для подсушки загружаемого продукта. Переливной порог 5 обеспечивает заданный уровень кипящего слоя.

На рис. 2.64 приведены схемы двухсекционных сушилок.

Аппараты кипящего слоя в последнее время успешно применяют для сушки пастообразных материалов, растворов и суспензий. В этом случае в качестве слоя зернистого материала используют гранулы высушиваемого продукта или инертный носитель (песок, фарфоровые шарики, фторопластовая крошка).

Рис. 2.63. Сушилка с псевдооживенным слоем

Процесс сушки паст на гранулах высушиваемого материала можно приблизительно представить следующим образом. Жидкий или пастообразный материал подается через форсунки на поверхность псевдооживленных гранул высушиваемого продукта, вследствие чего происходит увеличение их размера. Влага из материала удаляется и в кипящем слое за счет истирания и раскалывания сухих гранул образуются новые частицы, которые являются центрами образования новых гранул. Сушилки снабжают сепаратором, выводящим из аппарата крупные частицы и возвращающим мелкие.

Основное условие успешной реализации сушильного процесса в аппаратах с кипящим слоем — равномерное распределение влажного материала и сушильного агента по сечению аппарата, что обеспечивают выбором конструкции питателей влажного материала, затворов на линии выгрузки сухого продукта и газораспределительных устройств.

Газораспределительные устройства (решетки) выполняют двойную функцию — равномерно распределяют газовый поток по сечению аппарата и поддерживают слой при остановке сушилки, т. е. исключают попадание материала в подрешеточное пространство.

В качестве газораспределительных устройств используют провальные и беспровальные решетки. Провальные решетки — это

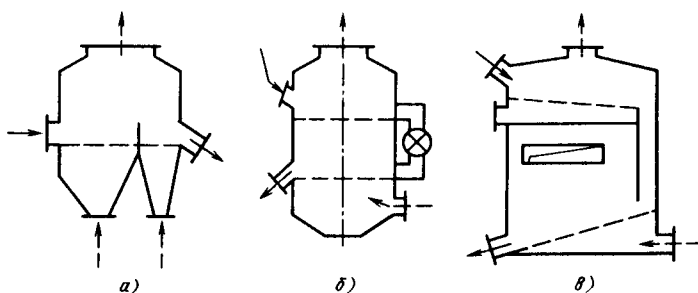
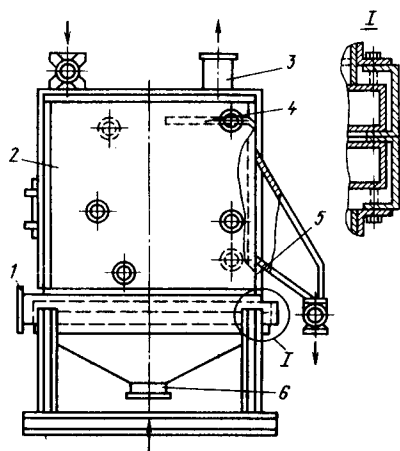


Рис. 2.64. Схемы двухсекционных сушилок с псевдооживленным слоем (сплошные и штриховые стрелки соответствуют материалу и теплоносителю):

а — горизонтальной; б — вертикальной с выносным переточным устройством; в — вертикальной с внутренним переточным устройством



Рис. 2.65. Схемы беспроводных газораспределительных решеток:
а — плоская; б — желобчатая; в — щелевая

перфорированные плиты с диаметром отверстий 2—3 мм (иногда до 5 мм) и свободным сечением 3—10 %.

На рис. 2.65 приведены схемы беспроводных газораспределительных решеток. Плоская решетка (рис. 2.65, а), состоящая из ряда перекрывающихся одна другую пластин, обеспечивает перемешивание материала вблизи решетки, т. е. в зоне наиболее высоких температур. Теплота отводится от решетки интенсивно, застойные зоны отсутствуют, практически исключено попадание материала под решетку. Опыт эксплуатации этих решеток в аппаратах с площадью поперечного сечения до 10 м² показал их высокую надежность. Такие решетки рекомендуется использовать для комкующихся материалов.

Для волокнистых продуктов следует предпочесть желобчатую решетку (рис. 2.65, б). Газ подается в решетку тангенциально; при этом достигается интенсивное перемешивание частиц высушиваемого материала.

Беспровальная решетка щелевого типа (рис. 2.65, в) представляет собой два ряда колосников. Оси щелей верхнего и нижнего ряда колосников взаимно смещены. Недостатки этой конструкции те же, что и у перфорированных плит.

При температуре поступающего теплоносителя до 400 °С решетка может быть сплошной. При более высоких температурах решетку следует изготавливать из отдельных колосников для возможности компенсации их температурных деформаций.

Для выгрузки материала из аппаратов кипящего слоя и удаления пыли из циклонов применяют затворы лопастные, шнековые и затворы-мигалки (рис. 2.66). Для улучшения герметизации аппарата иногда ставят по два затвора-мигалки на одном вертикальном участке. Надежность их работы повышается с увеличением расстояния между ними. Для увеличения надежности можно установить лопастной затвор и шнек.

Для загрузки сушилок кипящего слоя сыпучими материалами обычно используют лопастные и шнековые питатели, а для подачи растворов, суспензий и паст — форсунки.

Аэрофонтанные сушилки. Для удаления слабо-связанной влаги из дисперсных материалов неоднородного гранулометрического состава в условиях, когда скорость витания частиц (скорость обтекания частицы газом, при котором сила его гидродинамического воздействия на частицу уравнивается ее силой тяжести) значительно меняется в процессе сушки, при-

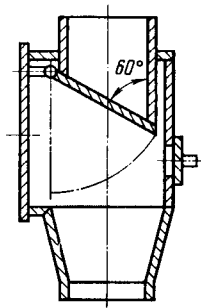


Рис. 2.66. Затвор-мигалка

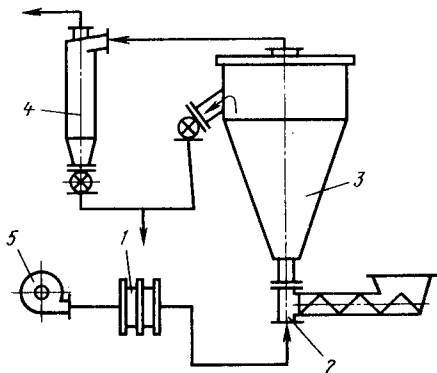


Рис. 2.67. Схема установки с аэрофонтанной сушилкой

меняют аэрофонтанные сушилки. Они представляют собой аппараты цилиндроконической формы, в конической части которых частицы высушиваемого материала циркулируют в потоке теплоносителя до тех пор, пока вследствие удаления влаги их скорость витания не станет меньше скорости газового потока.

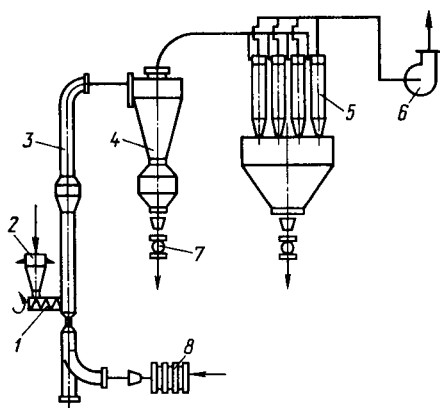
Высушенный материал выгружают через боковое отверстие в цилиндрической части сушилки либо по мере высыхания он пневмотранспортом выносится из аппарата в пылеулавливающую систему.

Установка для сушки материала в режиме фонтанирующего слоя (рис. 2.67) включает аэрофонтанную сушилку 3, в которую вентилятором 5 подается воздух, нагреваемый в калорифере 1. Горячий сушильный агент подхватывает влажный материал, поступающий из питателя 2, и подает его в нижнюю часть конуса сушилки 3. В верхней части конуса скорость воздуха уменьшается, и материал начинает перемещаться в обратном направлении, вдоль стенок аппарата, что приводит к интенсивной циркуляции. Для очистки воздуха предназначен циклон 4.

Аэрофонтанные сушилки можно выполнять с газораспределительной решеткой и без нее; в последнем случае скорость газа в узкой части аппарата принимают равной устойчивой скорости пневмотранспорта $w_n = (1,5 \dots 2,0) w_v$, где w_v — скорость витания частиц. В широкой части аппарата в обоих случаях скорость газа близка к скорости псевдооживления.

Аппараты для сушки материалов в режиме пневмотранспорта. Пневматическую сушку, или сушку в режиме пневмотранспорта, сыпучих материалов, из которых в процессе сушки удаляется свободная или слабо-связанная влага, широко используют в химической промышленности. Для сушки материала с крупными частицами (более 8—10 мм), а также для удаления из материала связанной влаги эти аппараты непригодны.

Рис. 2.68. Схема установки для сушки в режиме пневмотранспорта



в этих аппаратах весьма велика (10—40 м/с), поэтому время сушки, как правило, составляет несколько секунд и материал не перегревается, не спекается и не прилипает к стенкам сушилки. На рис. 2.68 приведена схема установки для сушки минеральных солей в режиме пневмотранспорта. Материал из бункера 2 двухшнековым питателем 1 подается в трубу 3, в которую из калорифера 8 поступает горячий воздух. Материал подхватывается теплоносителем и транспортируется в циклон 4. В трубе 3 происходит интенсивная сушка материала. Из циклона высушенный материал выгружается через затвор 7, а сушильный агент, пройдя систему 5 тонкой пылеочистки, выбрасывается в атмосферу вентилятором 6.

В таких сушилках процесс особенно интенсивен на начальном, или нестационарном, участке трубы, где относительная скорость газа и твердых частиц еще велика; в дальнейшем по мере уменьшения этой скорости эффект тепло- и массообмена резко снижается. Хотя длина нестационарного участка в трубах-сушилках постоянного сечения невелика (1,5—2,0 м), на нем удаляется основная (до 55 %) часть влаги. Для интенсификации сушки создают нестационарные условия движения газовой взвеси по длине пневмотрубы, для чего ее снабжают расширителями, внутренними винтовыми вставками и пр. Так, труба 3 (см. рис. 2.76) имеет посередине расширитель, за которым происходит резкое увеличение относительной скорости материала и теплоносителя.

Трубы-сушилки особенно эффективны при рециркуляции твердой фазы или при многоступенчатой сушке; в последнем случае при правильном выборе параметров режима сушки на каждой ступени можно получать продукт с более низкой остаточной влажностью.

В промышленности широко используют аппараты, сочетающие предварительную сушку в пневмотрубах с дополнительной сушкой материала в аппаратах другого типа, например в сушилках кипящего слоя.

Рис. 2.69. Сушилка типа «циклон—кипящий слой»

Комбинированные сушилки. В рассмотренных сушилках степень использования теплоты сушильного агента невелика из-за непродолжительного контакта его с материалом. Наиболее полно потенциал сушильного агента используют в комбинированных сушильных установках.

Примером может служить комбинированная сушилка типа «циклон — кипящий слой», разработанная для обезвоживания полимерных материалов.

Влажный материал (рис. 2.69) подается отработанным сушильным агентом через пневмопитатель 1 в циклон 2, где происходят подсушивание и смешивание влажного материала с частицами сухого материала, уносимыми с предыдущей ступени сушки. Это препятствует слипанию и комкованию материала в циклоне. Ставший сыпучим материал подхватывается в питателе 3 свежим сушильным агентом и поступает в пневмотрубу 4, где удаляется несвязанная влага, а затем в сушилку 5 кипящего слоя. Заданная конечная влажность продукта достигается созданием кипящего слоя соответствующей высоты.

Разработана комбинированная сушильная установка (рис. 2.70) на базе вихревых сушилок и дезагрегаторов-подсушивателей, обеспечивающих дезагрегацию-измельчение слипающихся и комкующихся материалов и их предварительное подсушивание. Это исключает налипание материала на стенки вихревой сушилки. Нагретый в калориферах 9 воздух поступает на сушку двумя потоками: основным и вспомогательным. Вспомогательный поток воздуха поступает в дезагрегатор-подсушиватель 2,

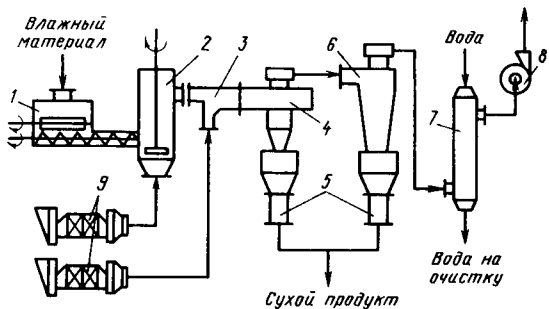
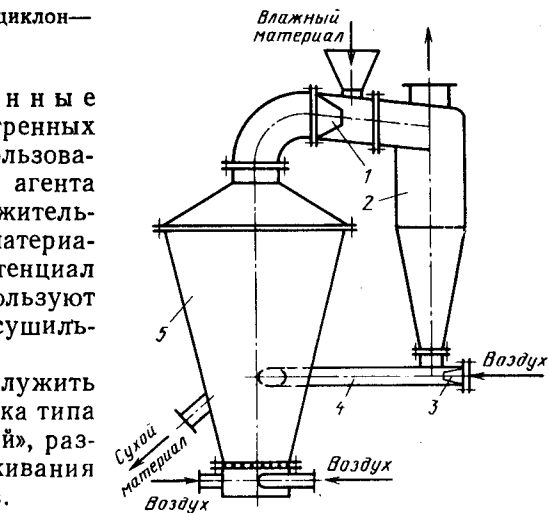


Рис. 2.70. Схема комбинированной сушильной установки

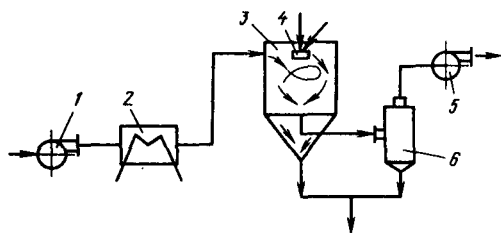


Рис. 2.71. Схема установки с распылительной сушилкой

в который через питатель-дозатор 1 подается влажный материал. Образуемая взвесь материала направляется в смеситель 3, куда

подается также основной поток воздуха. Далее взвесь поступает в вихревую сушилку 4. Высушенный продукт отделяется от воздуха в самой сушилке и в циклоне 6 и выводится через затвор 5. Для дополнительной очистки отработанного воздуха используют скруббер 7, откуда воздух отсасывается вентилятором 8.

Распылительные сушилки предназначены для сушки растворов и суспензий с получением готового продукта в виде порошков или гранул. Аппараты обеспечивают интенсивное удаление влаги из материалов при кратковременном, обычно прямоточном, контакте с сушильным агентом, поэтому их применяют для сушки термочувствительных продуктов биологического и органического синтеза с большой начальной влажностью. В этих аппаратах благодаря тонкому распылению материала достигается настолько значительная поверхность испарения, что процесс высушивания завершается чрезвычайно быстро (за 15—20 с) и, вследствие этого, несмотря на высокую температуру сушильного агента, температура на поверхности материала сравнительно невысокая. Из-за кратковременности процесса и мягких условий сушки свойства материала не изменяются.

Схема установки с распылительной сушилкой приведена на рис. 2.71.

Воздух вентилятором 1 через калорифер 2 подается в распылительную сушилку 3. Сушилка представляет собой цилиндрическую камеру, в верхней части которой установлено распылительное устройство 4 в виде центробежно-распылительного механизма или форсунки (пневматической или механической). Коническое или плоское днище сушильной камеры снабжено специальными гребками, обеспечивающими выгрузку продукта.

Сушильный агент из аппарата, пройдя пылеочистное устройство 6 (циклон, рукавный фильтр), вентилятором 5 выбрасывается в атмосферу.

По способу распыления исходного материала типовые распылительные сушильные аппараты классифицируют на центробежно-распылительные сушилки (РЦ) и форсуночно-распылительные (РФ).

Центробежные распылительные сушилки имеют специальные центробежные распылительные механизмы, состоящие из электродвигателя, повышающего редуктора и вертикального вала с уста-

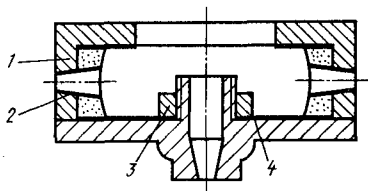


Рис. 2.72. Диск для распыления эрозивных материалов

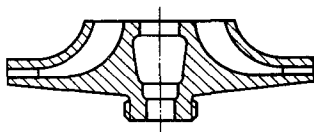


Рис. 2.73. Лопастной распылительный диск

новленным на нем распыливающим диском. В некоторых конструкциях диск приводится паровой или газовой турбинкой. Жидкость распыливается при подаче ее на быстро вращающийся распыливающий диск.

Применяют распыливающие диски различной конструкции, выбор которой зависит от свойств обрабатываемого материала и производительности аппарата.

Диск для распыления эрозивных материалов (рис. 2.72) состоит из стального корпуса 1, сменных сопел 2 и защитной сменной пластины 4, прижимаемой к основанию диска гайкой 3. Отличительная особенность диска — сопло углублено на 10—20 мм; поэтому твердые частицы создают на поверхности диска защитный слой и свежая пульпа перемещается к соплам по слою материала. Лопастной диск (рис. 2.73) обычно используют для распыления суспензии, не обладающих заметными эрозивными свойствами.

Форсуночно-распылительные сушилки оснащают пневматическими или механическими форсунками.

Механические форсунки работают при давлении 3—20 МПа. Они отличаются высокой экономичностью, компактностью и бесшумностью в работе, обеспечивают тонкое и равномерное распыление. Расход энергии при распылении механическими форсунками невелик, однако производительность этих форсунок трудно регулировать; их выходные отверстия часто засоряются, поэтому механические форсунки непригодны для распыления суспензий и паст.

Механическая форсунка (рис. 2.74) состоит из корпуса и трех плотно прилегающих один к другому дисков. Первый диск 1 представляет собой распределитель раствора, имеет восемь отверстий и кольцевой канал, из которого раствор поступает во второй диск 2. По тангенциальным каналам последнего раствор движется в вихревую камеру, расположенную в центре этого диска. Закрученная струя раствора выходит из отверстия в третьем нижнем диске 3 и под действием центробежных сил распадается на мелкие капли.

Пневматические форсунки предназначены для распыления эмульсий, растворов и суспензий с широким диапазоном изме-

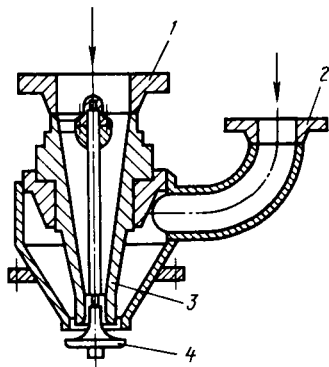
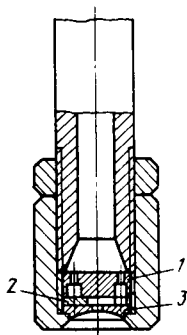


Рис. 2.74. Механическая форсунка Рис. 2.75. Пневматическая форсунка

нения дисперсности твердой фазы. Для распыливания используют сжатый воздух или водяной пар давлением 0,5—0,6 МПа. Пневматическими форсунками можно распыливать жидкость любой вязкости. Они надежны в работе; их производительность просто регулировать. К недостаткам пневматических форсунок следует отнести неоднородность распыления и повышенный расход электроэнергии.

В пневматической форсунке (рис. 2.75) сжатый воздух подается через патрубок 1, распыливаемый раствор — через патрубок 2. На выходе из форсунки раствор подхватывается воздухом, истекающим из кольцевой щели между корпусом 3 и тарелкой 4.

В верхней части сушильной камеры 1 центробежно-распылительной сушилки размещено центробежно-распылительное устройство 2 (рис. 2.76). Горячий сушильный агент по газоходу 3 подается к факелу распыла высушиваемой суспензии. Отработанный сушильный агент удаляется через газоход 5, а готовый продукт — через затвор 4 в нижней части конического днища.

Распылительные сушильные аппараты с центробежными дисками и форсунками резко различаются. Диаметр форсуночных распылительных сушилок меньше, отношение длины H камеры к ее диаметру D для форсуночных камер обычно составляет $H/D = 1,5 \dots 2,5$, а в специальных случаях (например, при получении готового продукта в виде гранул грубым распылением) может достигать 5. Для сушилок с дисковым распылом $H/D = 0,8 \dots 1,0$. Как правило, сушильная камера этих аппаратов представляет собой вертикальную цилиндрическую обечайку с плоской крышкой и коническим или плоским днищем, в котором находится разгрузочное устройство.

Кондуктивные сушилки отличаются тем, что в них вся теплота передается высушиваемому материалу теплопроводностью от нагретой поверхности, а воздух или другие газы предназначены

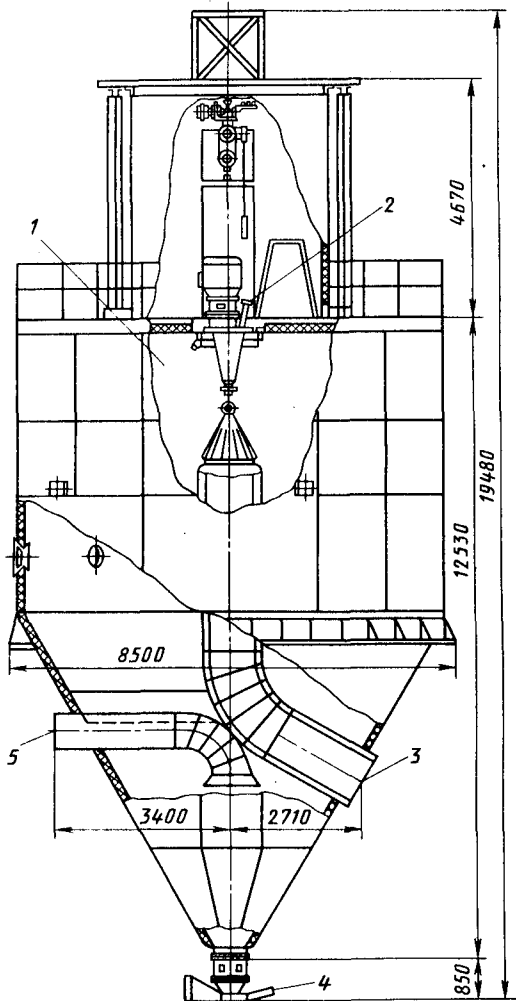
Рис. 2.76. Центробежно-распылительная сушилка

только для удаления испарившейся влаги из рабочего объема аппарата. В качестве источника теплоты в этих аппаратах используют водяной пар, высококипящие органические растворители, а также расплавы солей и металлов.

Процесс сушки в кондуктивных сушильных аппаратах может происходить при атмосферном давлении или при вакууме. Последний вариант используют при сушке материалов легко окисляющихся (необходимость защиты их от действия кислорода воздуха), а также термолабильных, токсичных, пожаро- и взрывоопасных.

В химической промышленности из периодически действующих кондуктивных сушилок наиболее распространены полочные вакуумные и барабанные вакуумные, из непрерывно действующих — барабанные контактные и вальцевые. Полочная кондуктивная сушилка представляет собой горизонтальный цилиндрический аппарат с откидной крышкой, внутри которого на стойках размещены полые греющие плиты, в которых циркулирует теплоноситель. Материал, поступающий на сушку, загружают на противни, которые устанавливают на греющие плиты. Процесс сушки в этих аппаратах может длиться десятки часов. Для предотвращения коркообразования материала аппарат периодически открывают и материал перемешивают.

Более интенсивно сушка материала в вакууме протекает в барабанных вращающихся сушильных аппаратах. Преимущество



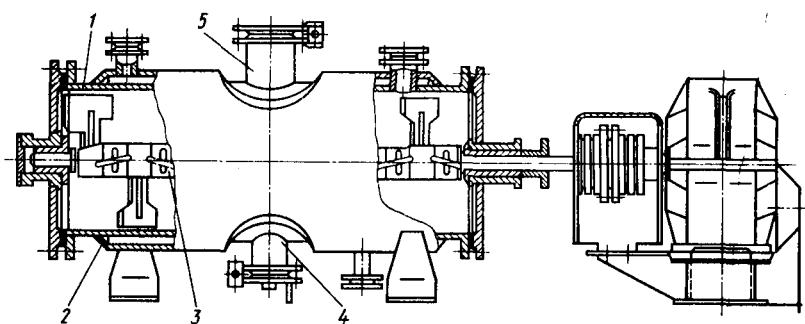


Рис. 2.77. Барабанная роторная сушилка

этих аппаратов, кроме перемешивания материала медленно вращающимися мешалками, — механизация загрузки и выгрузки материала.

Серийно выпускают барабанные вакуумные сушилки с плавающим барабаном и роторные. Роторная барабанная вакуумная сушилка (рис. 2.77) представляет собой горизонтальный цилиндрический барабан 1 с рубашкой 2, внутри которого установлен ротор 3 (или перемешивающее устройство). Реверсивное вращение ротора — автоматическое: направление вращения меняется через каждые 5—8 мин. Гребки ротора изогнуты на одной половине барабана в одну сторону, на другой половине — в противоположную так, что при вращении ротора в одну сторону материал, загруженный через люк 5, сначала перемещается к периферии барабана, а затем при вращении ротора в другую сторону — к разгрузочному люку 4, расположенному в середине барабана.

Вальцевые сушильные аппараты предназначены для сушки вязких и пастообразных продуктов при атмосферном давлении или вакууме. Это аппараты непрерывного действия; их основной рабочий элемент — полые обогреваемые изнутри вальцы. На наружную поверхность вальцов снизу или сверху поступает пастообразный или жидкий материал, обладающий адгезией к металлу. Сушка материала происходит кратковременно, в тонком слое, что создает условия для равномерного высушивания материала и исключает возможность его повреждения.

В одновальцевой сушилке (рис. 2.78) вращается полый гладкий обогреваемый валец 2, нижняя часть которого погружена в корыто 5 с высушиваемым материалом. Внутрь вальца через цапфу 1 подается греющий пар, а через трубку 4 выводится конденсат. Валец получает вращение через шестерни, установленные на цапфах сушилки. Частоту вращения вальца выбирают в зависимости от продолжительности процесса сушки. При вращении вальца материал тонкой пленкой налипает на горячую поверхность и высыхает за один его оборот. Высушенный материал

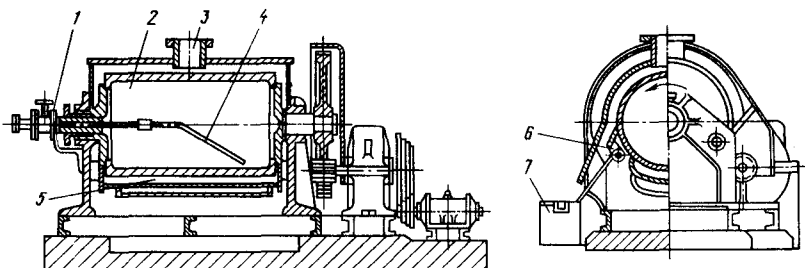


Рис. 2.78. Одновальцовая сушилка

срезается ножом 6 и поступает в шнек 7. Испаренная влага отводится через штуцер 3 вентилятором.

Вакуумные вальцовые сушилки работают так же, но в них рабочие элементы расположены внутри герметичного кожуха, соединенного с вакуумной системой.

Выбор типа сушильного аппарата зависит, главным образом, от свойств высушиваемого материала, формы связи с ним влаги, начальной влажности и объема производства. Влажные материалы, как объекты сушки, характеризуются рядом показателей: термической стойкостью, способностью к образованию зарядов статического электричества, агрегатным состоянием (сыпучий, жидкий, пастообразный), способностью к взаимодействию отдельных частиц материала между собой (адгезия) или с твердой стенкой (когезия), теплоемкостью, гранулометрическим составом и др. Наличие этих данных — обязательное условие правильного выбора аппарата.

Особый интерес при этом, однако, представляют те свойства продукта, которые определяют интенсивность процесса сушки, поскольку определение ее продолжительности для достижения требуемой остаточной влажности продукта вызывает, как правило, наибольшие затруднения.

Скорость процесса сушки лимитируется либо внешней диффузией, т. е. условиями подвода теплоты и отвода паров влаги с поверхности материала, либо внутренней диффузией, т. е. условиями вывода влаги из глубинных слоев материала к его поверхности.

Если высушиваемый материал — это пористое тело с капиллярами радиусом $r \geq 0,1$ нм, то перенос влаги в нем подчиняется законам молекулярной диффузии, при меньших размерах капилляров ($r < 0,1$ нм) закономерности переноса определяются режимом течения, при котором преимущественным является соударение молекул со стенками капилляров, а не между собой, как при обычной диффузии. Молекулы жидкости, ударяясь о стенки пор, как бы поглощаются ими и затем вновь испаряются. При очень малых капиллярах (порах), соизмеримых по размерам с молекулами влаги, механизм диффузии меняется; в этом случае

большую роль начинают играть силы отталкивания, затрудняющие прохождение молекул в порах.

Таким образом, в зависимости от механизма переноса в порах высушиваемые материалы можно разделить на четыре группы в порядке уменьшения критического диаметра пор:

непористые и широкопористые сыпучие материалы с порами размером более 0,01 нм;

материалы с порами размером от 0,01 до 6 нм;

тонкопористые и микропористые материалы с порами размером от 6 до 2 нм;

ультрамикропористые материалы (размер микропор менее 2 нм).

Разумеется, реальный, подлежащий высушиванию материал может содержать поры всех четырех групп.

Характер процесса сушки зависит от начальной влажности материала. Если начальная влажность материала u_n больше критической $u_{кр}$ при заданной температуре сушки, а конечная влажность меньше $u_{кр}$, то сушка проходит в двух периодах: в первом и во втором. Если и начальная, и конечная влажность материала больше критической $u_{кр}$, то процесс сушки завершается в первом периоде, если она меньше критической, то сушка происходит только во втором периоде.

Длительность первого периода сушки в аппарате можно рассчитать из уравнений теплового баланса при условии, что известен коэффициент теплопередачи от агента сушки к материалу. Длительность второго периода сушки можно определить по эмпирическим данным сушки в конкретном аппарате модельного материала, для которого известно число пор каждой из указанных четырех групп. В качестве такого модельного материала предложена катионитовая смола КУ-2-8И.

На изложенных принципах основана методика определения длительности сушки, предложенная в РТМ 26-01-131—81 «Аппараты сушильные. Методика выбора типа сушилок». Согласно этому документу в аппарате с активным гидродинамическим режимом длительность τ_I первого периода сушки можно определить при известном коэффициенте теплоотдачи β из уравнения

$$\tau_I = (u_n - u_k) / N_I,$$

где $N_I = 6\beta \Delta t_{ср} / d_{эв} \rho_m q_0$ — скорость сушки в первом периоде, c^{-1} ; β — коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$; $\Delta t_{ср}$ — средняя разность температур поверхности материала и теплоносителя, $^\circ C$; $d_{эв}$ — эквивалентный диаметр частиц материала, м; ρ_m — плотность материала, $кг/м^3$; q_0 — удельный расход теплоты на 1 кг испаряемой влаги, $Дж/кг$.

Если коэффициент теплоотдачи неизвестен, то скорость сушки можно определить по кинетической кривой сушки модельного материала в аппарате:

$$N_{I\text{ ис}} = N_{I\text{ м}} \left(\frac{d_{эв. м}}{d_{эв. ис}} \right)^{1,5} \left(\frac{\rho_{м. м}}{\rho_{м. ис}} \right) \left(\frac{\Delta t_{ср. ис}}{\Delta t_{ср. м}} \right),$$

где индексы «м» и «ис» относятся соответственно к модельному и исследуемому материалу.

Время сушки исследуемого материала во втором периоде сушки

$$\tau_{II} = \left(\sum_{i=1}^4 \tau_{II}^i k^i \right) \frac{d_{\text{экр. м}}}{d_{\text{экр. ис}}},$$

где τ_{II}^i — экспериментальное время удаления влаги из пор i -группы модельного материала, с; k^i — отношение доли пор i -й группы в модельном материале к доле этих пор в исследуемом материале.

Полное время сушки материала $\tau = \tau_I + \tau_{II}$.

На основании данных о характеристиках материала, времени сушки и требуемой производительности аппарата (табл. 2.5) можно предварительно выбрать типовую сушилку. Оптимальный вариант соответствует типу аппарата, для которого сумма баллов по горизонтали максимальна. Если для заданных условий эксплуатации аппарату соответствует оценка 0 баллов, то возможность использования аппарата исключена; при оценке 5 баллов применение аппарата рекомендуется, а при оценке 3 балла допустимо, но использование связано с дополнительными мерами подготовки продукта или изменением конструкции сушилки. В таблице нет таких характеристик материала, как непожароопасные, не склонные к пылеобразованию, нетоксичные, невзрывоопасные — для таких материалов пригодны сушилки всех типов.

При выборе типа сушилки необходимо обращать внимание на следующие обстоятельства. Малотоннажные (производительность до 250 кг/ч) и среднетоннажные (до 3500 кг/ч) производства целесообразно укомплектовывать типовыми аппаратами, а для крупнотоннажных (производительность свыше 3500 кг/ч) производств требуются индивидуальные разработки с учетом особенностей производства.

Сушилки периодического действия предпочтительны, когда обрабатывают небольшие количества продуктов при значительном ассортименте, а также при сушке материала, требующего изменения режима в процессе сушки. Жидкие и хорошо текучие материалы (растворы и суспензии) сушат в распылительных сушилках. Получаемый при этом продукт можно досушивать в аппаратах с псевдоожижением. Пасты сушат главным образом на вальцеленточных и петлевых сушилках, а при небольших масштабах производства — в аппаратах псевдоожиженного слоя с инертным теплоносителем. Сушка этих материалов вызывает наибольшие трудности: налипание пастообразного материала на рабочие поверхности аппаратов резко снижает интенсивность процесса и вызывает перегревание материала. В связи с этим используют, в частности, следующие приемы: формование; смешивание с мел-

Данные к выбору сушильного аппарата

Характеристика материала: параметры сушки	Оценка (число баллов) для сушки											
	полочной	полочной ва- куумной	распылительной с центробеж- ным распылом	распылительной с форсуноч- ным распылом	валцовой	барабанной вращающейся	барабанной вращающейся	ленточной однострунной	валцеленточ- ной	псевдооживлен- ного слоя	фонтанирующе- го слоя	трубной пнев- матической
Материал:												
кусовой (до 75 мм)	5	5	0	0	0	5	3	5	0	3	0	0
зернистый (5—0,5 мм)	5	5	0	0	0	5	5	5	0	5	5	5
порошкообразный	5	5	0	0	0	3	3	0	0	3	5	5
пастообразный	5	5	3	5	3	3 ^{*1}	0	0	5	0	0	0
жидкий	0	3	5	5	5	0 ^{*1}	0	0	0	0	0	0
термолабильный	5	5	5	5	3	5 ^{*2}	5	5	5	5	5	5
термостойкий	5	3	5	5	5	5 ^{*3}	5	5	5	5	5	5
склонный к адгезии	3	3 ^{*4}	3	3	3	3	0	3	5	0	0	0
не склонный к адгезии	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5
склонный к когезии	5	5	5	5	5	3	0	5	5	0	0	5
склонный к пылеобразованию	3	5	5	5	5	3	3	3	5	3	0	3
пожароопасный												
взрывоопасный	0	5	5	5	0	3	5	0	0	3	3	5
смоченный органическими	0	5	3	3	0	0	5	0	0	5	5	5
растворителями												
токсичный	0	5	3	3	0	0	5	3	3	3	3	3

Характеристика материала; параметры сушки	Оценка (число баллов) для сушки												
	полочной /	полочной ва- куумной	распылительной с центробеж- ным распылом	распылительной с форсуноч- ным распылом	вальцовой	барабанной вращающейся	барабанной вращающейся вакуумной	ленточной односторонней секционной	вальцевательной	псевдоожженной слоя	фонтанирующей слоя	трубной пнев- матической	
Объем производства по исход- ному продукту, т/ч: до 0,25 до 3,5 более 3,5	5	5	5	5	5	0	5	5	5	5	5	0	
	0	0	5	5	3	3	5	5	5	5	5	5	
	0	0	5	3	3	5	0	3	3	5	0	5	
Продолжительность сушки до требуемой остаточной влаж- ности в интенсивном режиме, с: 0,5—3 3—30 30—60 60—600 3600	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	5	
	0	0	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	
	3	3	0	0	0	3	3	3	3	5	3	0	
	5	5	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	

* Сушилка с ретуром. ** Сушилка прямоточная. *** Сушилка противоточная. ** Сушилка с дроблением.

ким сухим продуктом (ретуром) для увеличения сыпучести; разбавление жидкостью до жидкотекучего состояния.

Сыпучие материалы, содержащие свободную слабосвязанную влагу, сушат обычно в трубных, вихревых, циклонных сушилках и в аппаратах псевдоожиженного слоя. Для удаления связанной влаги используют сушилки барабанные, ленточные, с псевдоожиженным, фонтанирующим слоями, а в малотоннажных производствах — полочные. Для материалов, содержащих свободную и связанную влагу, целесообразно применять двухступенчатые (комбинированные) сушильные установки.

Токсичные и пожароопасные материалы сушат в кондуктивных вакуумных сушилках.

Как правило, для конкретного материала пригодны аппараты нескольких типов и окончательно тип сушилки выбирают на основании результатов технико-экономического сравнения вариантов сушки по приведенным затратам.

§ 2.11. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ АППАРАТОВ ДЛЯ СУШКИ

Расчет на прочность элементов сушильных аппаратов с вращающимися барабанами выполняют согласно РД 26-01-158—86 «Аппараты сушильные с вращающимися барабанами газовые», где установлены нормы и методы расчета на прочность корпусов, бандажей, опорных и упорных роликов барабанных сушилок, изготавливаемых из углеродистых и низколегированных сталей.

Расчет корпуса на прочность. При расчете корпуса барабанной сушилки принимают, что на него действуют равномерно распределенные по длине силы тяжести корпуса с бандажом и зубчатым венцом G_1 и находящегося внутри корпуса материала G_2 , а также крутящий момент $M_{кр}$, передаваемый зубчатым венцом. Предполагают, что этот момент распределяется по сечениям слева и справа от зубчатого венца пропорционально отношениям длин правой $l_{пр} = l_3 + l_4$ и левой $l_{л} = l_1 + l_2 - l_3$ частей корпуса к его общей длине (рис. 2.79). Кроме того, в подбандажной обечайке, если зазор между бандажом и корпусом недостаточен для свободного температурного расширения последнего, возникают напряжения из-за стесненности температурных деформаций и на бандаж начинают действовать распорные силы.

При проектировании барабанных сушилок задаются толщинами стенки пролетной s_1 и подбандажной s_2 обечайек корпуса из условий $s_1 = (0,007 \dots 0,1) D_1$ и $s_2 = (1,5 \dots 2,0) s_1$ и рассчитывают напряжения в опасных сечениях корпуса (D_1 — наружный диаметр пролетной части корпуса аппарата).

Если температурные деформации корпуса не ограничены, то его рассчитывают как двухопорную балку под действием равномерно распределенной нагрузки $q = (G_1 + G_2)/L$.

Рис. 2.79. Схема к расчету корпуса барабана

Анализ влияния сил, возникающих в зацеплении венца — шестерня показывает, что при работе аппарата результирующая этих сил направлена вверх и частично компенсирует действие сил тяжести; поэтому с допущением в пользу запаса прочности усилиями в зацеплении при расчете корпуса сушилки можно пренебречь.

Эпюры изгибающих моментов M , крутящих моментов $M_{кр}$, а также перерезывающих сил Q , возникающих в корпусе аппарата, приведены на рис. 2.79. Максимальные изгибающие моменты, Н·мм, действующие соответственно в середине пролетной обечайки и в левой подбандажной обечайке:

$$M_1 = \frac{G_1 + G_2}{8} (l_2 - 2l_1) \quad \text{и} \quad M_2 = \frac{G_1 + G_2}{2L} l_1^2.$$

Изгибающий момент, Н·мм, действующий в месте стыка пролетной и подбандажной обечаек соответственно при $L > 4l_1$ и $L < 4l_1$:

$$M_3 = \frac{G_1 + G_2}{8L} (4l_1^2 + b - 4l_1b) \quad \text{и} \quad M_3 = \frac{G_1 + G_2}{8L} (4l_1^2 + b^2 - 2l_2b),$$

где b — ширина подбандажной обечайки, мм.

Крутящий момент $M_{кр1}$, Н·мм, действующий на левую от венца (большей длины) часть корпуса аппарата:

$$M_{кр1} = 9,55 \cdot 10^6 \frac{N\eta}{n_6 L} (l_1 + l_2 - l_3),$$

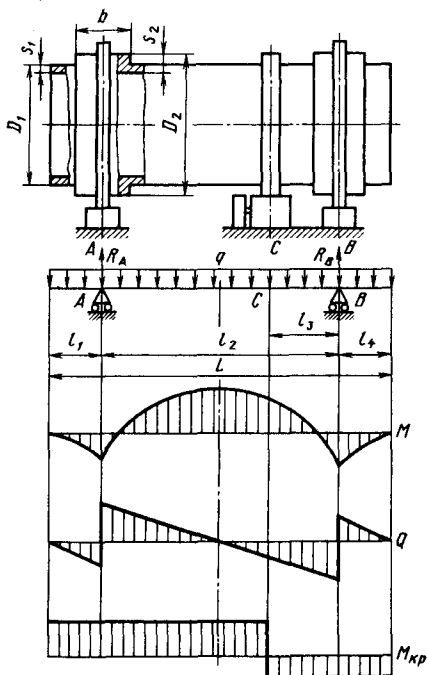
где N — мощность электродвигателя, кВт; η — КПД привода; n_6 — частота вращения барабана, мин⁻¹.

Максимальная перерезывающая сила, Н, действующая в подбандажной обечайке, $Q_1 = 0,5 (G_1 + G_2) l_2/L$. Перерезывающая сила в месте стыка пролетной и подбандажной части $Q_2 = 0,5 (G_1 + G_2) (l_2 - b)/L$.

Расчетные напряжения:

в пролетной части обечайки

$$\sigma_1 = \sqrt{M_1^2 + M_{кр1}^2} / W_{x1};$$



в подбандажной части

$$\sigma_2 = \sqrt{M_2^2 + M_{\text{кр}1}^2} / W_{x2}; \quad \tau_1 = Q_1 S_{x2} / [2I_{x2} (s_2 - c)];$$

в месте стыка пролетной и подбандажной частей обечайки

$$\sigma_3 = \sqrt{M_3^2 + M_{\text{кр}1}^2} / (\varphi W_{x1}); \quad \tau_2 = Q_2 S_{x1} / [2I_{x1} (s_1 - c) \varphi].$$

В этих выражениях $I_{x1} = \pi D_1^3 (s_1 - c) / 8$ и $I_{x2} = \pi D_2^3 (s_2 - c) / 8$ — моменты инерции площади поперечных сечений соответственно пролетной и подбандажной частей обечайки, мм⁴; D_2 — наружный диаметр подбандажной обечайки, мм; $W_{x1} = 2I_1/D_1$ и $W_{x2} = 2I_2/D_2$ — моменты сопротивления поперечных сечений соответственно пролетной и подбандажной обечаек, мм³; $S_{x1} = 0,5D_1^2 (s_1 - c)$ и $S_{x2} = 0,5D_2^2 (s_2 - c)$ — статические моменты поперечного сечения соответственно пролетной и подбандажной частей обечайки, мм³; φ — коэффициент прочности сварного шва.

Условия прочности корпуса имеют вид:

$$\sigma_1 \leq [\sigma]_{\text{к}}; \quad \sigma_2 \leq [\sigma]_{\text{к}}; \quad \sigma_3 \leq [\sigma]_{\text{к}}; \quad \tau_1 \leq [\tau]_{\text{к}}; \quad \tau_2 \leq [\tau]_{\text{к}},$$

где $[\sigma]_{\text{к}}$ — допускаемое напряжение для материала корпуса при расчетной температуре, МПа; $[\tau]_{\text{к}}$ — допускаемое касательное напряжение материала корпуса при расчетной температуре, МПа.

Если расчетные напряжения меньше допускаемых, то принимают меньшие значения s_1 , s_2 и расчет повторяют.

Если зазор Δ между корпусом и бандажом недостаточен, то для компенсации возникающих температурных деформаций, т. е. при $0,5\alpha_{\text{к}} D_1 (t_{\text{к}} - t_0) \geq \Delta$ возникают температурные напряжения в местах посадки бандаж на корпус ($\alpha_{\text{к}}$ — температурный коэффициент линейного расширения материала корпуса, °С⁻¹; $t_{\text{к}}$ — температура корпуса аппарата в рабочих условиях, °С; $t_0 = 20$ °С — температура, при которой выполняют сборку аппарата).

При расчете температурных напряжений будем рассматривать корпус I как бесконечно длинный цилиндр радиусом $r_{\text{к}}$ со сплошной накладкой радиусом $r_{\text{н}}$, на которую установлен без зазора или с недостаточным для свободного температурного расширения корпуса зазором бандаж радиусом $r_{\text{б}}$ (рис. 2.80).

Обозначим температурные коэффициенты линейного расширения накладке и бандаж соответственно $\alpha_{\text{н}}$ и $\alpha_{\text{б}}$, толщины накладки и бандаж — соответственно $s_{\text{н}}$ и $s_{\text{б}}$.

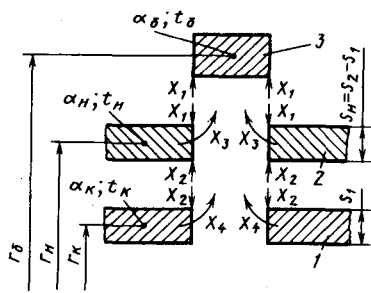


Рис. 2.80. Схема к расчету внутренних факторов в системе корпус—накладка—бандаж

Мысленно рассежем систему корпус 1 — накладка 2 — бандаж 3 по линиям сопряжения элементов, а взаимное их влияние заменим силами X_1 и X_2 и моментами X_3 и X_4 . Тогда радиальные перемещения накладки, бандаж и корпуса соответственно:

$$w_n = -X_1\delta_{11}^n + X_2\delta_{12}^n + X_3\delta_{13}^n + \alpha_n r_n (t_n - t_0);$$

$$w_6 = \alpha_6 r_6 (t_6 - t_0) + 2X_1\delta_{11}^6;$$

$$w_k = -X_2\delta_{22}^k + X_4\delta_{24}^k + \alpha_k r_k (t_k - t_0),$$

где δ_{ij} — перемещение в направлении действия i -го силового фактора под действием единичной силы, заменяющей j -й силовой фактор; t — рабочая температура элементов системы, °C; индексы «н», «б», «к» соответствуют накладке, бандажу, корпусу.

В условиях совместной деформации бандаж и накладки $w_n - w_6 = 0$, т. е.

$$X_1\delta_{11}^n - X_2\delta_{12}^n - X_3\delta_{13}^n - \alpha_n r_n (t_n - t_0) + \\ + \alpha_6 r_6 (t_6 - t_0) + 2X_1\delta_{11}^6 = 0. \quad (2.30)$$

Аналогично запишем равенства:

радиальных перемещений по линии сопряжения накладки и корпуса

$$-X_1\delta_{21}^n + X_2\delta_{22}^n + X_3\delta_{23}^n + X_4\delta_{22}^n - X_4\delta_{24}^k + \alpha_n r_n (t_n - t_0) - \\ - \alpha_k r_k (t_k - t_0) = 0; \quad (2.31)$$

углов поворота по линии сопряжения между накладкой и бандажом

$$-X_1\delta_{31}^n + X_2\delta_{32}^n + X_3\delta_{33}^n = 0; \quad (2.32)$$

углов поворота по линии сопряжения между накладкой и корпусом

$$-X_2\delta_{42}^k + X_4\delta_{44}^k = 0. \quad (2.33)$$

При нагружении полубесконечного длинного цилиндра диаметром $2R$ и толщиной s по краю единичной перерезывающей силой (рис. 2.81) радиальное (мм/Н) и угловое (мм/Н) перемещения края цилиндра соответственно:

$$|\delta_R^P| = (2\beta^3 D)^{-1}; \quad |\delta_\varphi^P| = (2\beta^2 D)^{-1}.$$

При нагружении такого цилиндра по краю единичным изгибающим моментом (рис. 2.82) радиальное (мм/Н) и угловое (1/Н) перемещения края цилиндра соответственно:

$$|\delta_R^M| = (2\beta^2 D)^{-1}, \quad |\delta_\varphi^M| = (\beta D)^{-1};$$

здесь $\beta = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)/\sqrt{Rs}}$ — в мм^{-1} ; $D = Es^3/[12(1-\mu^2)]$ — в $\text{Н}\cdot\text{мм}$.

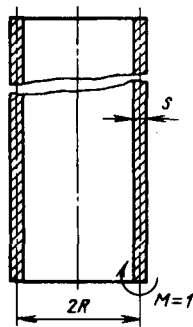
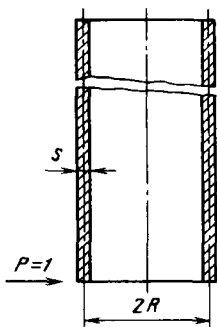


Рис. 2.81. Схема нагружения края цилиндра единичной силой

Рис. 2.82. Схема нагружения края цилиндра единичным моментом

Выше условились рассматривать корпус и накладку как полубесконечный цилиндр, поэтому канонический коэффициент $\delta_{11}^H = (2\beta_H^3 D_H)^{-1}$, где для накладки $\beta_H = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)/\sqrt{r_H s_H}}$; $D_H = E_H s_H^3/[12(1-\mu^2)]$. Аналогично для корпуса $\beta_K = \sqrt[4]{3(1-\mu^2)/\sqrt{r_K s_K}}$; $D_K = E_K s_K^3/[12(1-\mu^2)]$. Здесь E_H и E_K — модули упругости материала соответственно накладки и корпуса, МПа.

Бандаж будем рассматривать как кольцо, нагруженное сосредоточенной единичной силой, которая совпадает по направлению с X_1 . Радиальное перемещение бандажа, $\text{мм}^2/\text{Н}$,

$$\delta_{11}^6 = r_6^2/(E_6 F_6),$$

где E_6 — модуль упругости материала бандажа, МПа; F_6 — площадь поперечного сечения бандажа, мм^2 .

Таким образом, систему уравнений (2.30)—(2.33), называемую канонической системой метода сил, можно представить в виде:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\beta_H^3 D_H} X_1 - \frac{1}{2\beta_H^3 D_H} X_2 - \frac{1}{2\beta_H^3 D_H} X_3 - \alpha_H r_H (t_H - t_0) + \alpha_6 r_6 (t_6 - t_0) + \\ & \quad + \frac{2r_6^2}{E_6 F_6} X_1 = 0; \\ & - \frac{1}{2\beta_H^3 D_H} X_1 + \left(\frac{1}{2\beta_H^3 D_H} + \frac{1}{2\beta_K^3 D_K} \right) X_2 + \frac{1}{2\beta_H^3 D_H} X_3 - \frac{1}{2\beta_K^3 D_K} X_4 + \\ & \quad + \alpha_H r_H (t_H - t_0) - \alpha_K r_K (t_K - t_0) = 0; \\ & - \frac{1}{2\beta_H^3 D_H} X_1 + \frac{1}{2\beta_H^3 D_H} X_2 + \frac{1}{\beta_H D_H} X_3 = 0; \\ & - \frac{1}{2\beta_K^3 D_K} X_2 + \frac{1}{\beta_K D_K} X_4 = 0 \end{aligned} \quad (2.34)$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2\beta_H^3 D_H} + \frac{2r_0^2}{E_0 F_0} & -\frac{1}{2\beta_H^3 D_H} & -\frac{1}{2\beta_H^2 D_H} & 0 \\ -\frac{1}{2\beta_H^3 D_H} & \frac{1}{2\beta_H^3 D_H} + \frac{1}{2\beta_K^3 D_K} & \frac{1}{2\beta_H^2 D_H} & -\frac{1}{2\beta_K^2 D_K} \\ -\frac{1}{2\beta_H^2 D_H} & \frac{1}{2\beta_H^2 D_H} & \frac{1}{2\beta_H D_H} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2\beta_K^2 D_K} & 0 & \frac{1}{\beta_K D_K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \alpha_H r_H (t_H - t_0) - \alpha_0 r_0 (t_0 - t_0) \\ \alpha_H r_H (t_H - t_0) + \alpha_K r_K (t_K - t_0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Решение системы (2.34) не вызывает затруднений и позволяет найти силовые факторы X_1 , X_2 , X_3 , X_4 (перерезывающие силы и изгибающие моменты, действующие по краю накладки и корпуса).

В терминах РД 26-01-158—86 температурные окружные напряжения, вызываемые силовыми факторами $X_2 = Q_T$ и $X_4 = M_T$ в корпусе аппарата,

$$\sigma_t = \pm \mu_K 6 M_T / s_2^2 - 2 \gamma_K \rho_K Q_T / s_2 - 2 \gamma_K^2 M_T / s_2^2,$$

где μ_K — коэффициент Пуассона для материала корпуса; $\gamma_K = \sqrt[4]{3(1 - \mu_K^2)}$; $\rho_K = \sqrt{0,5 D_2 / s_2}$.

Суммарные напряжения, возникающие в корпусе аппарата под действием сил тяжести корпуса и материала в барабане, крутящего момента и температурных воздействий, $\sigma_\Sigma = \sigma_2 + \sigma_t$, а условие прочности имеет вид $\sigma_\Sigma \leq [\sigma]_K$.

Расчет бандажа на контактную прочность. Ширину бандажа и рабочую длину опорного ролика рассчитывают из условия контактной прочности. В этом случае бандаж и ролик рассматривают как два цилиндра длиной b_1 , сжатые силой $T = 0,5 (G_1 + G_2) / \cos \psi$, которая действует в плоскости осей цилиндров (рис. 2.83). При этом считают, что материал цилиндров изотропный, а деформации упругие.

Установлено, что в этих условиях цилиндры сминаются по линии первоначального контакта с образованием полоски шириной $2c$ (рис. 2.84), причем

$$c = 2 \sqrt{T \frac{1 - \mu^2}{\pi b_1} \frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} \frac{rR}{r + R}},$$

где E_1 и E_2 — модули упругости материалов соответственно бандажа и опорного ролика, МПа; b_1 — ширина бандажа, мм; r , R — радиусы соответственно опорного ролика и бандажа, мм.

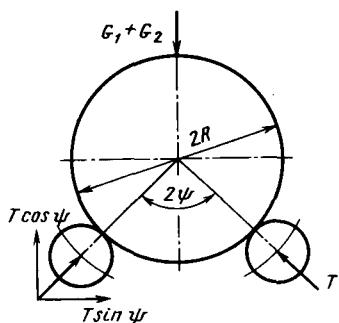


Рис. 2.83. Схема действия сил на ролик

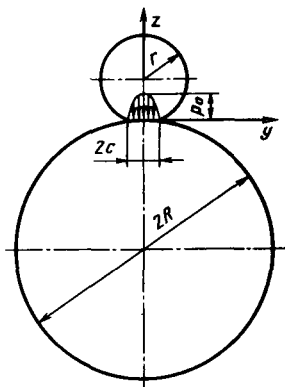


Рис. 2.84. Схема распределения контактного давления в ролике

Давление p , МПа, на площади контакта распределяется по ширине полоски по эллиптическому закону

$$p^2/p_0^2 + y^2/c^2 = 1,$$

где p_0 — максимальное давление при $y = 0$.

$$p_0 = \sqrt{\frac{T}{\pi(1-\mu^2)b_1} \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \frac{-R+r}{Rr}}.$$

Максимальное эквивалентное напряжение в зоне контакта $\sigma_{\text{эkv}} = 0,6p_0$, поэтому условие прочности при расчете бандажей и роликов имеет вид

$$0,6p_0 \leq [\sigma]_6,$$

где $[\sigma]_6$ — допускаемое напряжение для материала бандажа.

В РД 26-01-158—86 условие прочности записано в форме

$$\sigma_{\text{эkv}} = 0,42 \sqrt{\frac{G_1 + G_2}{\pi b(1-\mu^2)\cos\psi} \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \frac{D_6 + d}{D_6 d}} \leq [\sigma]_6,$$

где D_6 и d — наружные диаметры соответственно бандажа и опорного ролика, мм.

Расчет бандажа на прочность при изгибе. При определении изгибающего момента в бандаже согласно РД 26-01-158—86 рассматривают два случая: температурный зазор между бандажом и корпусом позволяет последнему свободно расширяться; этот зазор недостаточен для компенсации температурных деформаций. В первом случае считают, что сила тяжести корпуса с материалом воспринимается только башмаками, расположенными в двух нижних квадрантах (рис. 2.85), в виде сосредоточенных сил в местах установки этих башмаков.

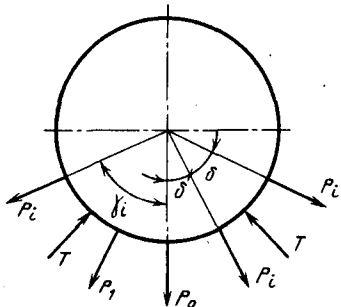


Рис. 2.85. Схема нагружения бандажа при его свободном расширении

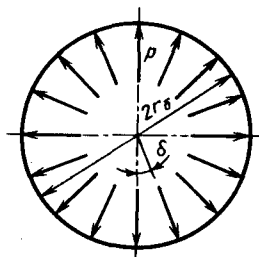


Рис. 2.86. Схема нагружения бандажа при отсутствии температурного зазора

Предполагают также, что реакция P_i на башмак пропорциональна косинусу угла между осью рассматриваемого башмака и вертикалью, т. е.

$$P_i = P_0 \cos \gamma_i,$$

где P_0 — искомая сила.

Из условия равновесия

$$P_0 + 2P_1 \cos \delta + 2P_2 \cos 2\delta + \dots + 2P_k \cos (k\delta) = G_1 + G_2,$$

где k — число пар башмаков; δ — угол между двумя соседними башмаками, °:

$$p_0 = G_1 + G_2 \left/ \left[1 + 2 \sum_{i=1}^k \cos^2 (i\delta) \right] \right.$$

В этом случае изгибающий момент максимален в сечении под опорным роликом:

$$M_{01} = \frac{(G_1 + G_2)(D_3 + D_4)}{4\pi k} \times \left[\frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2} + \frac{2k}{\cos \beta} - \frac{2k}{8} (\pi - \beta) \operatorname{tg} \beta - \frac{\pi}{8} \operatorname{ctg} \beta \right],$$

где D_3 и D_4 — внутренний и наружный диаметры бандажа, мм; $\beta = 2\pi (180 - \psi)/360$; 2ψ — угол между опорными роликами, °.

При расчете бандажей перерезывающими силами обычно пренебрегают и изгибные напряжения в бандаже

$$\sigma_{01} = M_{01}/W_0,$$

где $W_0 = b_1 h^2/6$ — момент сопротивления поперечного сечения бандажа, мм³ (h — высота бандажа, мм).

Определяя изгибающий момент в бандаже при отсутствии температурного зазора или его недостаточной величине, принимают, что усилие контакта между корпусом и бандажом распределено равномерно и передается на бандаж в виде равных сосредоточенных сил P , приложенных в местах установки башма-

ков (рис. 2.86). Эти силы рассчитывают из условия совместности радиальных перемещений бандажа и корпуса при воздействии температуры:

$$\Delta_t - \Delta_P = w, \quad (2.35)$$

где Δ_t — изменение среднего радиуса корпуса под действием температуры, мм; Δ_P — уменьшение среднего радиуса корпуса аппарата под действием силы P , мм; w — радиальное перемещение бандажа относительно его оси, мм, в точке приложения силы;

$$\Delta_t = \alpha_K r_K (t_K - t_0); \quad (2.36)$$

$$\Delta_P = \frac{P k}{\pi r_K} \frac{r_K^2 \beta_K}{2 E_K s_K}; \quad (2.37)$$

$$w = \frac{P r_0^3}{E_0 I_0} \frac{1}{2 \sin^2 \frac{\delta}{2}} \left(\frac{\delta}{4} + \frac{\sin \delta}{4} - \frac{2}{\delta} \sin^2 \frac{\delta}{2} \right), \quad (2.38)$$

где $I_0 = b_1 h^3 / 12$ — момент инерции площади поперечного сечения бандажа, мм⁴.

При расчете изгибающего момента в бандаже в этом случае будем учитывать, что реакция T со стороны ролика направлена противоположно силе P и, следовательно, уменьшает изгибающий момент, обусловленный этой силой.

С упрощением в сторону запаса можно считать $T = 0$ и рассматривать поведение бандажа под действием только сил P . С учетом (2.35)–(2.38) найдем

$$P = \frac{2 \pi E_0 I_0 F_K s_K \sin^2 \frac{\delta}{2} \alpha_K r_K (t_K - t_0)}{\pi r_0^2 E_K s_K \left[\frac{\delta}{4} + \sin \frac{\delta}{4} - \frac{2 \sin^2 \frac{\delta}{2}}{\delta} \right] + k r_K \beta_K E_0 I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}}.$$

Изгибающий момент, Н·мм, обусловленный этой силой, максимален в точке ее приложения:

$$M_{02} = P r_0 \left(k / \pi - 0,5 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{2k} \right),$$

откуда напряжения изгиба, МПа, $\sigma_{02} = M_{02} / W_0$ и условие прочности при изгибе

$$\max \{ \sigma_{01}; \sigma_{02} \} \leq [\sigma]_0.$$

§ 2.12. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В задачу системы автоматизированного проектирования сушильных установок входит выбор оптимальной схемы сушильной установки на базе типовых сушильных аппаратов и серийно выпускаемого комплектующего теплообменного и пылеочистного оборудования.

Процедура формирования схемы сушильной установки состоит из этапов:

выбор рационального типа сушильного аппарата на основе результатов анализа свойств высушиваемого материала и расчет размеров аппарата выбранного образца;

подбор вспомогательного оборудования и его проверочный расчет;

создание на базе выбранного оборудования технологической схемы суши и расчет технико-экономических показателей сушильной установки в целом.

Из-за трудоемкости каждого из этих этапов многовариантная проработка условий суши и выбор наиболее рациональной технологической схемы суши без применения ЭВМ — практически неразрешимые задачи.

В САПР сушильных установок типовой сушильный аппарат выбирают на основе пакета прикладных программ, разработанных на базе РТМ 26-01-131—81. Как указано, параметрам высушиваемого материала соответствуют сушильные аппараты нескольких типов, поэтому для *i*-го конкурентоспособного аппарата ЭВМ формирует технологическую схему суши.

Одновременно ЭВМ составляет уравнения материального и теплового балансов процесса суши и определяет необходимые количества теплоты, пара, сушильного агента и пр.

Далее ЭВМ выполняет расчет для каждого из конкурентоспособных сушильных аппаратов, определяя необходимую поверхность теплообмена и размеры сушильной камеры. Затем ЭВМ переходит к выбору узла подготовки теплоносителя в зависимости от указанных в задании на проектирование источников теплоты, требуемых параметров сушильного агента и схемы его циркуляции (замкнутый или разомкнутый цикл). Источником теплоты может быть топливо (мазут, природный газ), пар, горячая вода и электроэнергия. При использовании в качестве источника теплоты топлива проектируют топку. Если в качестве источника теплоты используют пар давлением более 1,2 МПа, то в системе подготовки сушильного агента предусматривают кожухотрубчатые теплообменники, при давлении пара менее 1,2 МПа узел подготовки агента суши комплектуют паровыми калориферами. Если на входе в калорифер температура сушильного агента ниже 10 °С, то предусматривают предварительный его подогрев отработанным конденсатом.

Если источником теплоты является электроэнергия, то предусматривают установку электрокалориферов. При наличии в качестве источников теплоты и пара, и электроэнергии используют паровые калориферы для предварительного нагрева теплового агента с последующим дополнительным нагревом его в электрокалориферах. Узел нагрева агента комплектуют на основании данных каталогов.

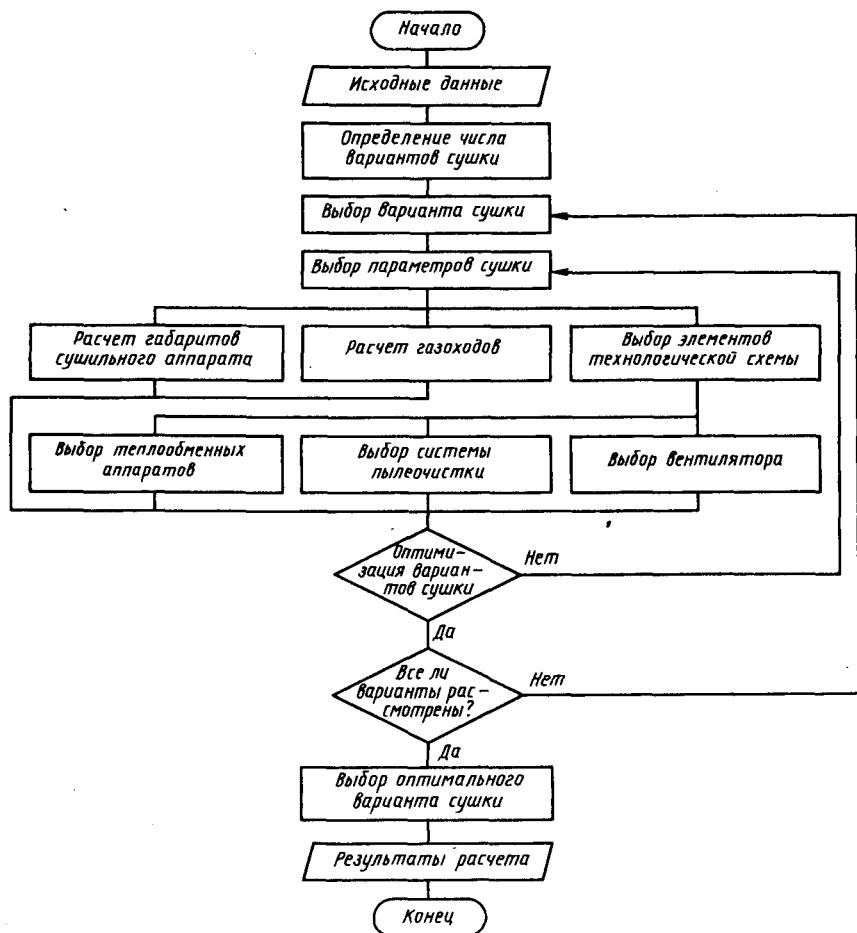


Рис. 2.87 Функциональная схема автоматизированного выбора сушильной установки

Далее установка комплектуется системой очистки отработанного теплоносителя, включающей циклоны (цилиндрические и конические), скрубберы и различные сочетания этих аппаратов.

При одно-, двух- или многоступенчатой грубой очистке используют циклоны, при комбинированной двух- или многоступенчатой очистке после циклонов ставят скрубберы.

При запыленности теплоносителя (содержание пыли $x = 200 \text{ г/м}^3$), требуемой степени очистки $\eta = 88 \dots 90 \%$ и среднем диаметре частиц пыли $d_{\text{ср}} > 10 \text{ мкм}$ в систему пылеочистки включают цилиндрический циклон ЦН-15, при среднем диаметре частиц $d_{\text{ср}} < 10 \text{ мкм}$ — конический циклон СДК-ЦН-33 или СДК-ЦН-34. При прочих равных условиях (при $x \geq 200 \text{ г/м}^3$) предусматривают

многоступенчатую очистку в нескольких циклонах. Степень очистки сушильного агента $\eta > 90\%$ обеспечивается при комбинированной пылеочистке с использованием скрубберов.

Следующий этап расчетов связан с оптимизацией схемы сушильной установки. Задача оптимизации сводится к определению параметров сушки в каждом i -м варианте, обеспечивающих минимум критерия R приведенных затрат:

$$R(t_1, t_2, \theta_2) = \min [c_T G_T(t_1, t_2, \theta_2) + E_K c_c V_c(t_1, t_2, \theta_2)]$$

при ограничениях $t_0 < t_1 < t'$; $\theta_0 < \theta_2 < \theta_1$; $\Delta t_K < (t_2 - \theta_2) < t''$; здесь t_1 и t_2 — температуры теплоносителя соответственно на входе и выходе из сушилки, °C; θ_1 и θ_2 — температуры материала соответственно на входе и выходе из сушилки, °C; c_T — стоимость нагрева 1 кг теплоносителя, руб/кг; G_T — количество теплоносителя, необходимого для сушки, кг/ч; c_c — стоимость единицы объема сушилки, руб/м³; V_c — объем сушильной камеры, м³; $E_K = 0,15$ — коэффициент эффективности капиталовложений; t' , t'' , θ — максимальные температуры соответственно входящего теплоносителя, отходящего теплоносителя и материала, °C; t_0 , θ_0 — минимальные температуры соответственно входящего теплоносителя и материала, °C; Δt_K — минимальная разность температур отходящего теплоносителя и материала на выходе из сушилки, °C.

По критерию приведенных затрат ЭВМ оптимизирует каждый вариант схемы, после чего сравнивает оптимальные значения критериев для каждой из схем и выбирает единственный вариант сушильной установки.

Функциональная схема описанной процедуры автоматизированного выбора схемы сушки приведена на рис. 2.87.

§ 2.13. ПЕРСПЕКТИВНАЯ МАССООБМЕННАЯ ТЕХНИКА

Дальнейшее совершенствование и развитие техники массообмена должно идти главным образом по пути увеличения съема продукции с единицы объема аппарата, уменьшения перепада давлений на одну теоретическую ступень разделения и уменьшения удельной металлоемкости аппаратов.

Разработан ряд тарелок с контактными элементами, которые позволяют увеличить производительность массообменных аппаратов и эффективность разделения. Примером могут служить контактные элементы (рис. 2.88), в которых прямоточное взаимодействие фаз в самом элементе сочетается с эффектом ударного слияния газожидкостных потоков на выходе из этих элементов.

Газ (пар) с тарелки поступает в контактную трубу 2 через патрубок 3 со скоростью 10—40 м/с, инжeksiруя жидкость с тарелки 1 через щель б. Далее газожидкостные потоки, взаимодействуя, движутся прямоточно в трубе 2 и при повороте навстречу один другому соударяются. Попадая в вырез а трубы 2, после ударного слияния потоков жидкость отбрасывается вниз на тарелку,

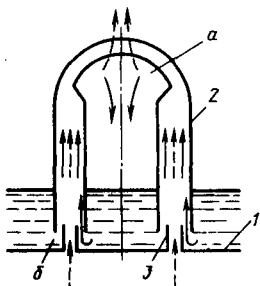


Рис. 2.88. Контактный элемент с соударением газожидкостных потоков

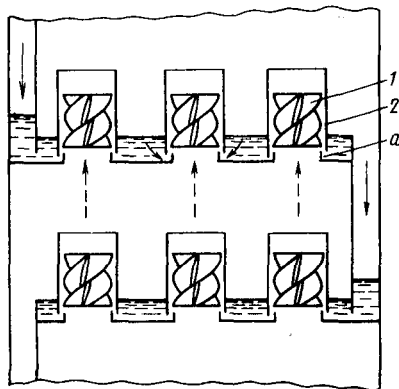


Рис. 2.89. Схема колонны с прямоточными контактными устройствами

а газ выходит в межтарелочное пространство и поднимается на тарелку, расположенную выше.

По пропускной способности абсорбционные и ректификационные колонны, снабженные такими контактными элементами, в 2,5 раза превосходят колонны с колпачковыми тарелками, при этом обеспечивается повышенная эффективность разделения.

Преимущество таких контактных устройств — возможность без больших капитальных затрат использовать их при реконструкции колпачковых колонн заменой колпачков рассмотренными контактными элементами.

Увеличение пропускной способности абсорбционных и ректификационных колонн использованием прямоточного взаимодействия фаз в контактных элементах при сохранении общего противотока по колонне в целом возможно лишь при хорошей сепарации фаз на выходе из контактного элемента. Из большого разнообразия способов обеспечения сепарации фаз заслуживает внимание использование массовых центробежных сил.

В настоящее время разработано большое число контактных элементов, работающих в прямоточном режиме. При этом закрученный поток обеспечивает сепарацию газо- или парожидкостного потока под действием возникающих центробежных сил. На тарелках массообменного аппарата (рис. 2.89) устанавливают колпачок 2 с винтовым завихрителем 1, обеспечивающим вращательное движение газожидкостного потока. Аппарат работает следующим образом. Газ с нижележащей тарелки поступает в патрубок, где инжектирует жидкость с тарелки через щель *a* и, закручиваясь, поднимается вместе с жидкостью, обеспечивая контакт фаз. Под действием возникающих при этом центробежных сил жидкость отбрасывается к периферии колпачка и отделяется от газа.

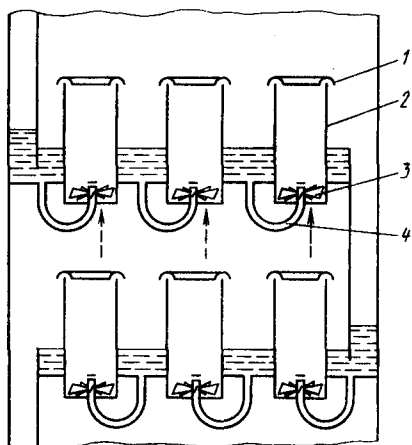


Рис. 2.90. Схема колонны с прямоточными контактными устройствами

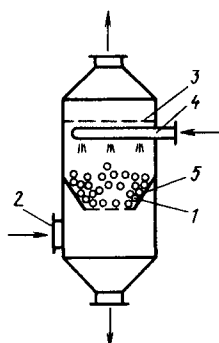


Рис. 2.91. Схема аппарата с фонтанирующей насадкой

На рис. 2.90 показан массообменный аппарат, в котором закручивание газожидкостного потока обеспечивает завихритель 3, образованный профилированными лопастями. Жидкость с тарелки подается в контактный элемент через трубки 4 под действием давления столба жидкости на тарелке. Для отделения жидкости от газа в верхней части колпачка 2 установлен торидальный сепаратор 1.

Такой принцип организации контакта фаз и сепарации газожидкостного потока позволяет обеспечивать пропускную способность аппарата, на порядок превышающую производительность барботажных колонн при высокой степени разделения. Однако гидравлическое сопротивление в таких колоннах несколько больше, чем в барботажных.

Как известно, для абсорбции легко растворимых газов достаточно двух-трех теоретических ступеней контакта. Для этих целей разработан ряд простых массообменных аппаратов, обеспечивающих необходимую степень разделения при большой производительности по газу. В аппарате с фонтанирующей насадкой (рис. 2.91) газ, поступая через штуцер 2, перемещается вверх по аппарату и поднимает шаровую насадку 1, которая фонтанирует в коническом расширителе 5, обеспечивая контакт газа с жидкостью. Последняя поступает в аппарат через коллектор 4. Для предотвращения уноса шаровой насадки из аппарата предусмотрена решетка 3.

Разработан вихревой массообменный аппарат с винтовым факелом орошения (рис. 2.92). Газ, вводимый тангенциально через патрубок 4, поднимается по аппарату закрученным потоком. Для орошения газового потока жидкостью служит дефлекторный

ороситель — центральная труба 2, по которой поступает жидкость. В трубе вдоль спиральной пластины 6 выполнены отверстия, через которые жидкость выходит в виде струй, ударяясь о кромку пластины 6 и образуя при этом расширяющуюся жидкостную пленку.

Закрученный газовый поток разрушает пленку на мелкие капли, которые отбрасываются к стенке аппарата под действием центробежных сил и проникают в зазор между внутренним 3 и наружным 1 цилиндрами через отверстия во внутреннем цилиндре, как бы отсекаясь от газа. Жидкость под действием гравитационных сил опускается в пространстве между внутренним 3 и наружным 1 цилиндрами и удаляется через штуцер 5. Газ, отделенный от жидкости, выводится из аппарата в газоход или атмосферу. Как показали промышленные испытания, в аппарате такого типа обеспечиваются скорость газа по сечению аппарата 18—20 м/с, гидравлическое сопротивление не более 1,6 кПа.

В последние годы все большее внимание уделяют разделению жидких и газовых смесей с использованием полупроницаемых мембран (мембранные методы). Полупроницаемые мембраны обладают замечательным свойством — пропускать одни вещества и задерживать другие. Для использования в крупных промышленных установках разработаны четыре основных типа аппаратов для мембранного разделения:

с трубчатыми мембранными элементами; типа фильтр-пресса с плоскокамерными мембранными элементами; с мембранами в виде полых волокон; с рулонными или спиральными мембранными элементами.

Один из наиболее простых аппаратов с трубчатыми мембранными элементами показан на

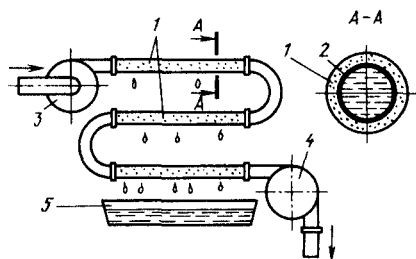
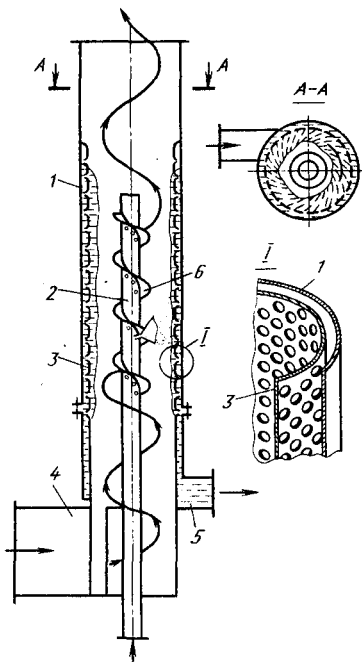


Рис. 2.92. Вихревой массообменный аппарат с винтовым факелом орошения

Рис. 2.93. Установка с трубчатым креплением мембран

Рис. 2.94. Плоскокамерный аппарат

рис. 2.93. Основные узлы аппарата — пористые трубы 1 (металлические, керамические или пластмассовые), на внутреннюю (или внешнюю) поверхность которых нанесена полупроницаемая мембрана 2. Исходный раствор насосом 3 подается в трубы 1, где из раствора через мембрану 2 профильтровывается один или несколько компонентов смеси, образуя фильтрат, попадающий в приемник 5. Сгущенный исходный раствор (концентрат) удаляется насосом 4 из аппарата.

Плоскокамерный аппарат (рис. 2.94) выполнен в виде массивного стального корпуса 2, в котором размещены девять блоков мембранных элементов 4, имеющих общую осевую трубу 1 для отвода фильтрата. Блок мембранных элементов представляет собой набор фильтрующих элементов в виде пластмассовых дисков, состоящих из двух одинаковых пластин толщиной по 1,5 мм, в которых выполнены щели, образующие каналы для сбора и отвода фильтрата. Исходный раствор через штуцер в крышке 5 и каналы в опорной плите 6 поступает в первый блок мембранных элементов 4. Полученный фильтрат через каналы фильтрующих элементов проходит в трубу 1 для отвода фильтрата, а концентрированный исходный раствор через кольцевой зазор, образованный корпусом 2 аппарата и разделительным диском 7, поступает во второй блок мембранных элементов. Здесь процесс фильтрации продолжается; фильтрат также поступает в трубу 1, а более концентри-

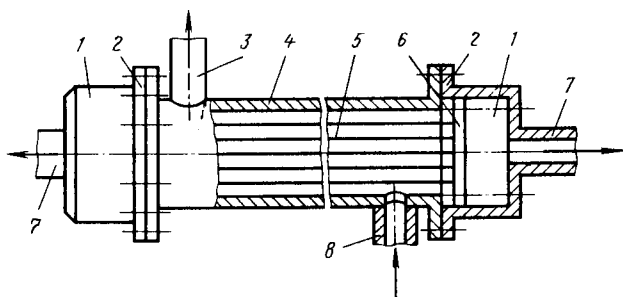
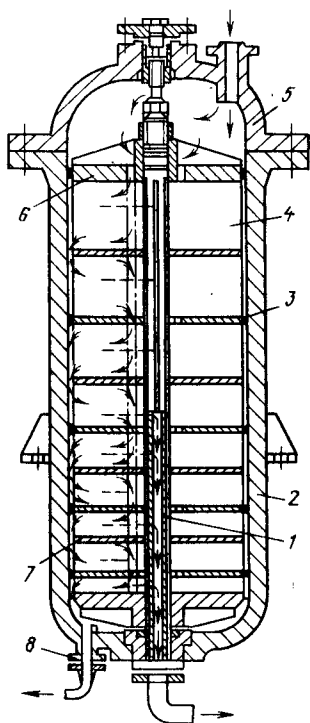


Рис. 2.95. Аппарат с мембранами в виде полых волокон

рованный исходный раствор через каналы в разделительном диске 7 — в следующий третий блок и т. д. Количество исходного раствора уменьшается при переходе его из одного блока в другой, поэтому число мембранных элементов в блоках также последовательно уменьшается. Концентрированный раствор удаляется через штуцер 8. Между корпусом и каждым вторым разделительным диском установлены уплотнительные кольца 3.

Аппараты этого типа отличаются простотой изготовления и сборки, возможностью быстрой замены мембранных элементов; основной их недостаток — относительно невысокая плотность размещения мембран в единице объема ($90\text{—}300\text{ м}^2/\text{м}^3$).

Аппараты с фильтрующими элементами в виде полых мембранных волокон отличаются высокой плотностью размещения мембран в единице объема (до $20\text{—}30\text{ тыс. м}^2/\text{м}^3$). Наружный диаметр волокон $45\text{—}200\text{ мкм}$, толщина стенки $10\text{—}50\text{ мкм}$; волокна выдерживают высокое давление и не требуют применения поддерживающих и дренажных устройств.

Аппарат с полыми мембранными волокнами (рис. 2.95) состоит из корпуса 4, внутри которого размещен пучок волокон 5. Концы волокон закреплены в трубных решетках 6. Сборники 1 фильтра соединены с корпусом фланцами 2. Исходный раствор через штуцер 8 подается в пространство между волокнами, где часть раствора фильтруется через стенки волокон и в виде фильтра выходит через штуцера 7. Концентрированный раствор удаляется из аппарата через штуцер 3.

Основной недостаток аппаратов на основе полых полупроницаемых волокон — трудность их замены при повреждении.

Схема аппарата с рулонными элементами приведена в работе [18].

Разрабатывают новые конструкции мембранных аппаратов, в частности фильтрующие центрифуги, в роторе которых закреплены полупроницаемые мембраны.

ГЛАВА 3

МАШИНЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

В химической технологии часто используют процессы разделения неоднородных, или гетерогенных, систем. Эти системы подразделяют на жидкие и газовые. Жидкие неоднородные системы состоят из жидкой сплошной фазы и взвешенных в ней твердых частиц (суспензии) или жидкой сплошной фазы и взвешенных в ней капель другой жидкости, несмешивающейся с первой (эмульсии). Газовые неоднородные системы, называемые чаще аэрозолями, состоят из газовой сплошной фазы и твердых или жидких взвешенных в ней частиц. К аэрозолям относятся пыли, дымы и туманы.

Процессы разделения неоднородных систем осуществляют в оборудовании, отличающемся большим разнообразием. Для разделения суспензий наиболее широко применяют фильтры, для эмульсий — центрифуги и сепараторы, для грубого разделения суспензий — гидроциклоны, для разделения аэрозолей — аппараты сухой и мокрой пылеочистки и электрофильтры.

§ 3.1. ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ЖИДКОСТЕЙ

В фильтрах проводят процесс разделения неоднородных систем с помощью пористых перегородок, пропускающих одну из фаз системы и задерживающих другую. Разделяемость суспензии в значительной мере зависит от размеров и концентрации твердых частиц, а также от вязкости и плотности сплошной фазы. В зависимости от среднего размера частиц различают грубые (более 100 мкм) и тонкие суспензии (0,5—100 мкм), мути (0,1—0,5 мкм) и коллоидные растворы (от 0,1 мкм до размеров молекул). Все суспензии, кроме коллоидных растворов, в спокойном состоянии способны отстаиваться под действием силы тяжести, образуя осадок на дне сосуда.

В качестве фильтровальных пористых перегородок в фильтрах используют различные ткани, проволочные и полимерные сетки, бумагу, металлические, стеклянные, керамические плоские пористые пластины и полые цилиндры и др. Довольно широко используют также слои зернистого материала — песка, гравия, угля, древесных опилок, диатомита. Зернистый материал используют

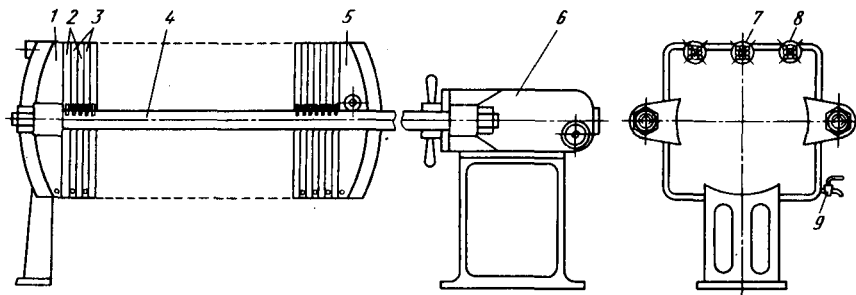


Рис. 3.1. Плиточно-рамный фильтр-пресс

в насыпных фильтрах и фильтрах с намывным слоем зернистого фильтрующего материала.

Размеры пор перегородки зависят от размеров взвешенных твердых частиц, которые не должны проходить через фильтр для получения по возможности чистого фильтрата. Задерживаемые перегородкой твердые частицы обычно образуют на ней слой осадка. В связи с этим сплошная фаза (жидкость или газ) проходит через два слоя: осадок и перегородку. С течением времени толщина осадка увеличивается, возрастает гидравлическое сопротивление и уменьшается скорость процесса.

При заданной производительности размеры фильтра зависят от величины и закона изменения во времени скорости прохождения жидкости через осадок и пористую перегородку, т. е. от скорости фильтрации. Движущей силой фильтрации является создаваемая тем или иным способом разность давлений над осадком и под пористой перегородкой.

В зависимости от величины и способа создания движущей силы различают: вакуум-фильтры; фильтры, работающие при повышенном давлении (фильтр-прессы); фильтры, работающие под наливом (под действием гидростатического давления слоя суспензии). Существуют также фильтры, в которых используют одновременно повышенное давление перед фильтровальной перегородкой и вакуум за ней.

Фильтры периодического действия работают преимущественно при повышенном давлении. К ним относятся рамные и камерные фильтр-прессы, емкостные, листовые; мешочные, патронные фильтры, а также фильтры с зернистым фильтрующим материалом (песчаные, гравийные). Осадок из этих фильтров обычно выгружают вручную, что является их существенным недостатком. Устройствами для механического съема осадка снабжены следующие фильтры периодического действия, работающие также при повышенном давлении: дисковые фильтр-прессы с центробежным сбросом и удалением осадка (шлама); автоматизированные камерные фильтр-прессы.

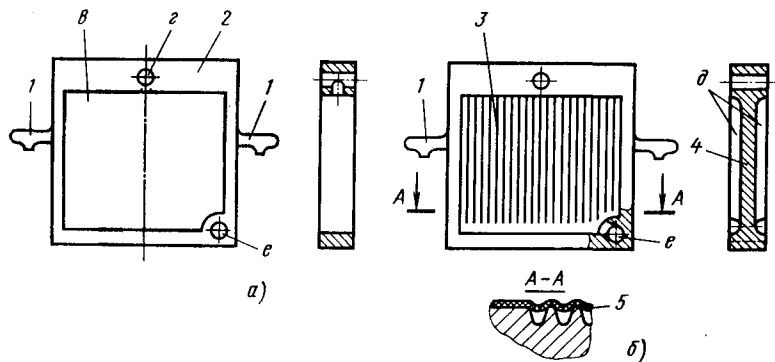


Рис. 3.2. Рама (а) и плита (б) фильтр-пресса

В подавляющем большинстве случаев фильтры непрерывного действия работают под вакуумом. К ним относятся вакуум-фильтры барабанные, дисковые, тарельчатые, карусельные и ленточные.

Рамные и камерные фильтр-прессы. Фильтры периодического действия рамного типа широко используют в промышленности благодаря сравнительно простому устройству и возможности проводить процесс при повышенном давлении (обычно 0,3—0,5 МПа). Типовой конструкцией является плиточно-рамный фильтр-пресс (рис. 3.1). Фильтровальными перегородками в нем служат прямоугольные отрезки ткани, зажатые между чередующимися рамами 2 и плитами 3. Плиты и рамы (обычно чугунные) расположены вертикально и закреплены на опорной конструкции, состоящей из стоек, опорной 1 и прижимной 5 плит, двух опорных брусьев 4 круглого сечения и гидравлического или электромеханического зажима 6. В малых фильтр-прессах используют ручной винтовой зажим. Для подвода суспензии, промывной жидкости и сжатого воздуха опорная плита 1 снабжена штуцерами (бобышками) 7 и 8. Плиты фильтров с отдельным отводом фильтрата снабжены кранами 9.

Рама (рис. 3.2) имеет сквозную полость *в* и гладко обработанные края 2. В плите выполнены две впадины *д*, разделенные стенкой 4; ребра 3 немного не доходят до нижнего края впадин и служат опорой для фильтровальной ткани. Плиты и рамы опираются приливами (ручками) 1 на опорные брусья. В краях плит и рам имеются отверстия *г* и *е*, образующие при сжатии плит каналы для подачи суспензии, сжатого воздуха и промывной жидкости, а также канал для отвода фильтрата. Отверстия *г* для суспензии радиальными отверстиями сообщаются с полостями *в* рам, а отверстия *е* для сбора фильтрата — со впадинами *д* плит.

Используют также фильтр-прессы с отдельным отводом фильтрата из каждой плиты. В этом случае сквозные отверстия *е* отсут-

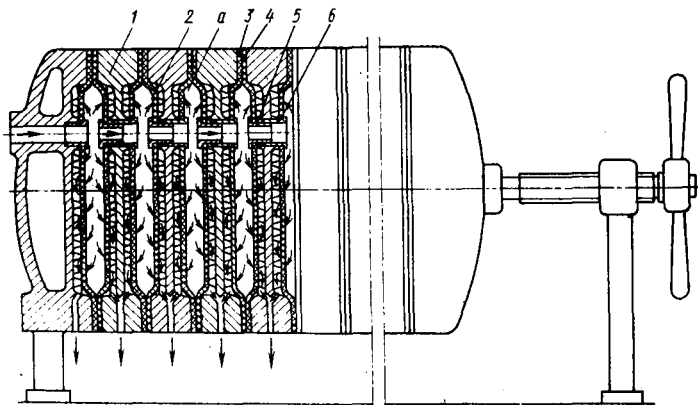


Рис. 3.3. Камерный фильтр-пресс

ствуют, а впадины каждой плиты соединены с отводным отверстием в ее нижней части, снабженным краном. Вытекающий из кранов фильтрат собирается в специальный желоб, откуда отводится по назначению. Таким образом, можно отключить закрытием кранов те плиты, из которых выходит загрязненный фильтрат (например, из-за повреждения фильтровальной ткани).

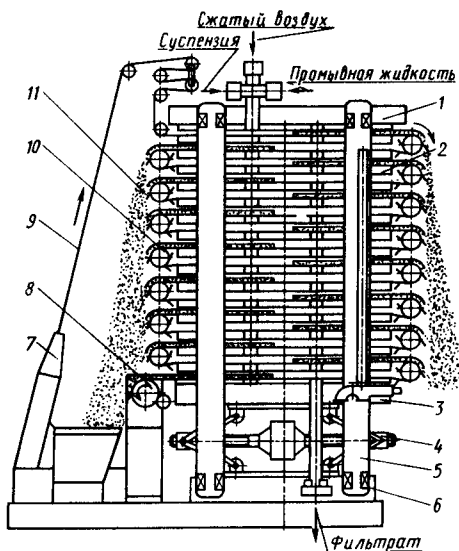
После окончания фильтрации осадок промывается жидкостью. По окончании промывки происходит осушка осадка сжатым воздухом, подаваемым по каналу для суспензии или промывной жидкости. Затем освобождают зажим, плиты и рамы поочередно отодвигают по опорным брускам в сторону зажима и из полостей рам вручную скребком или лопаткой удаляют осадок, падающий в расположенное под фильтром корыто. После выгрузки осадка плиты и рамы вновь собирают, зажимают и цикл работы фильтра повторяется.

Основные преимущества рамных фильтр-прессов — большая удельная поверхность фильтрации, отнесенная к единице массы аппарата, отсутствие движущихся частей, возможность отключать отдельные плиты (при раздельном отводе фильтрата). Благодаря значительной движущей силе фильтр обладает высокой производительностью единицы фильтрующей поверхности.

Сложность и трудоемкость разгрузки фильтра от осадка ограничивает его применимость в основном малоконцентрированными суспензиями. Недопустимо использовать рамный фильтр-пресс, если жидкая фаза суспензии или промывная жидкость являются легколетучими, ядовитыми или пожароопасными веществами, так как фильтр не герметичен.

Камерный фильтр-пресс по устройству аналогичен плиточно-рамному. Основное отличие состоит в том, что чередующиеся плиты и рамы заменены плитами 1 (рис. 3.3), по конструкции несколько отличающимися от плит рамного фильтр-пресса. Глад-

Рис. 3.4. Схема автоматизированного фильтр-пресса ФПАКМ



кая поверхность по краям каждой плиты приподнята над краями ребер 2 во впадинах (над дренающей поверхностью), образуя борт. Между соседними плитами зажаты два листа фильтровальной ткани (две салфетки) 3 и 4. При сжатии плит вследствие деформации фильтровальной ткани в каждой паре плит образуется пространство (камера) а для осадка. Эти камеры играют ту же роль, что и полости рам рамного фильтр-пресса. Суспензия перетекает из камеры в камеру через отверстие в бобышке плиты. Каждая фильтровальная перегородка (салфетка) имеет отверстие, края которого прижаты к плоскости бобышки уплотнительными втулками 5 или 6. Промывная жидкость и сжатый воздух подаются тем же путем, что и суспензия. Фильтрат отводится так же, как в рамном фильтр-прессе; возможен как общий, так и отдельный отвод фильтрата из плит.

Благодаря отсутствию рам камерный фильтр-пресс имеет меньшие размеры, чем рамный с той же поверхностью фильтрации. Малый объем пространства для осадка и значительное допускаемое давление объясняют большее удобство камерных фильтр-прессов по сравнению с рамными при обработке мало-концентрированных труднофильтруемых суспензий.

Автоматизированные камерные фильтр-прессы. Существенный недостаток, затрудняющий использование обычных плиточно-рамных и камерных фильтр-прессов — длительность и трудоемкость выгрузки осадка, проводимой обычно вручную. В связи с этим, несмотря на простоту конструкции, компактность и низкую удельную металлоемкость, их заменяют фильтр-прессами с механической выгрузкой осадка.

Примером может служить автоматизированный камерный фильтр-пресс ФПАКМ (рис. 3.4). Фильтр состоит из пакета горизонтальных фильтровальных плит 2, закрепленных на раме с возможностью вертикального перемещения. Рама состоит из нижней опорной 6 и верхней упорной 1 плит, соединенных четырьмя вертикальными плоскими стяжками 5, которые служат одновременно направляющими для фильтровальных плит. Для поднятия и опускания плит предназначены электромеханический

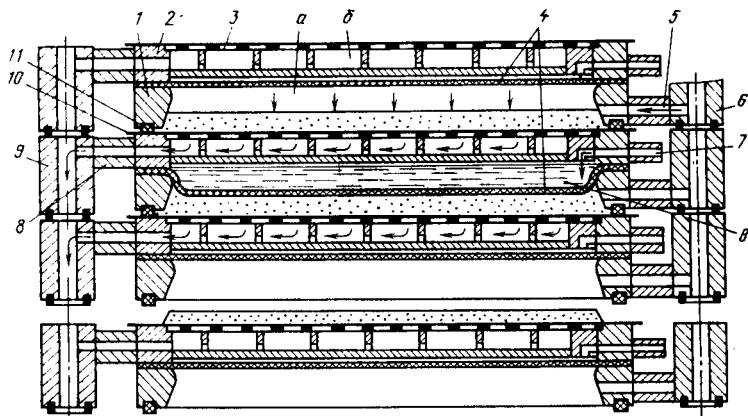


Рис. 3.5. Схема устройства плит фильтр-пресса ФПАКМ

зажим 4 и нажимная плита 3. В поднятом состоянии плиты 2 прижаты одна к другой и зажаты между нажимной 3 и упорной 1 плитами. При опускании плит между ними образуется зазор 45 мм. Время закрытия или раскрытия фильтр-пресса 50—70 с. Фильтровальная ткань 9 в виде непрерывной замкнутой ленты натянута на ряд направляющих валиков (роликов) 10 и протянута между фильтровальными плитами. В стадии фильтрования ткань зажата между сомкнутыми плитами и на ней образуется осадок. При выгрузке осадка плиты раздвигаются, ткань освобождается и приводится в движение приводным валиком 8. Огибая направляющие валики 10, ткань освобождается ножами (скребками) 11 от осадка, который сыпается в бункеры или на конвейеры. Фильтр снабжен специальной камерой 7 регенерации ткани; проходя камеру, ткань оmyвается водой и очищается скребками или щетками.

К фильтровальным плитам приварены патрубки, снабженные уплотнителями, которые при сжатии плит образуют с одной стороны коллектор для подачи суспензии, промывной жидкости и воздуха, а с другой — коллектор для отвода основного и промывного фильтратов. Трубчатый коллектор, отводы которого соединены резиноканевыми шлангами с соответствующими патрубками плит, служит для привода отжимных диафрагм водой, подаваемой под давлением в специальные полости плит.

Устройство плит схематически показано на рис. 3.5. Каждая плита (кроме верхней и нижней) состоит из двух частей 1 и 2, между которыми зажата по краям резиновая отжимная диафрагма 4. Верхняя часть плиты имеет впадину б, закрытую сверху перфорированным листом 3, снабжена патрубками 8 и 9 и служит для сбора фильтрата. На ней имеются также патрубок 7 и отверстия для подачи воды в пространство в между дном верхней части плиты и диафрагмой. Нижняя часть плиты представляет собой

раму с полостью *a* и патрубками *б* и *б* и служит для подачи в нее суспензии и накопления осадка. По периметру плиты снизу выполнена канавка, в которую вставлен резиновый шнур *11*, уплотняющий зазор между плитой и фильтровальной тканью *10*.

В стадии фильтрования при сомкнутых плитах через приемный коллектор, образуемый патрубками *б*, и патрубки *б* в нижние части плит подается суспензия. Проходя через фильтровальную ткань, она разделяется на осадок, остающийся на ткани, и фильтрат, отводимый из верхних полостей *б* нижерасположенных плит через патрубки *в* в патрубки *г*, образующие отводной коллектор. После накопления осадка определенной толщины он подвергается осушке сжатым воздухом, подаваемым также через приемный коллектор. Воздух вытесняет жидкость из полостей *a* и пор осадка. При этом осадок дополнительно отжимается упругими диафрагмами *д*, давящими на осадок. Частицы осадка сближаются, и из его пор вытесняется жидкость. К диафрагмам из специального коллектора через патрубки *ж* в полости *в* подается под давлением вода. По окончании отжима давление в водяном коллекторе уменьшается и диафрагмы выпрямляются. При необходимости таким же образом (через приемный коллектор) осадок промывается и повторно подвергается осушке. По окончании осушки плиты, опускаясь, раздвигаются, включается соответствующий механизм и фильтровальная ткань перемещается. При этом происходит снятие осадка с ткани и ее очистка в камере регенерации.

Основные преимущества фильтра — возможность фильтрации и отжима осадка при давлении до 1,5 МПа и полная автоматизация процесса, позволяющая одному рабочему обслуживать до десяти фильтров. Горизонтальное расположение плит обеспечивает равномерность толщины слоя осадка и эффективную его промывку. Фильтр обладает развитой фильтрующей поверхностью при сравнительно небольшой занимаемой площади. Так, фильтр с поверхностью фильтрации 25 м² занимает 8,6 м² производственного помещения.

Разработаны и используются в промышленности автоматизированные камерные фильтр-прессы с вертикальным расположением плит. Примером является серия разработанных в СССР фильтров ФПАВ с поверхностями фильтрации от 50 до 600 м², предназначенных для установок очистки сточных вод (для обезвоживания шлама отстойников).

Барабанные вакуум-фильтры относятся к аппаратам непрерывного действия. Их рабочий орган — медленно вращающийся цилиндрический барабан с двойной стенкой. Одна из стенок (чаще наружная) перфорирована и снабжена фильтровальной перегородкой (покрыта тканью или сеткой). Полость между стенками с торцов барабана закрыта кольцевыми крышками и служит для сбора фильтрата, отводимого затем из фильтра по дренажным трубкам.

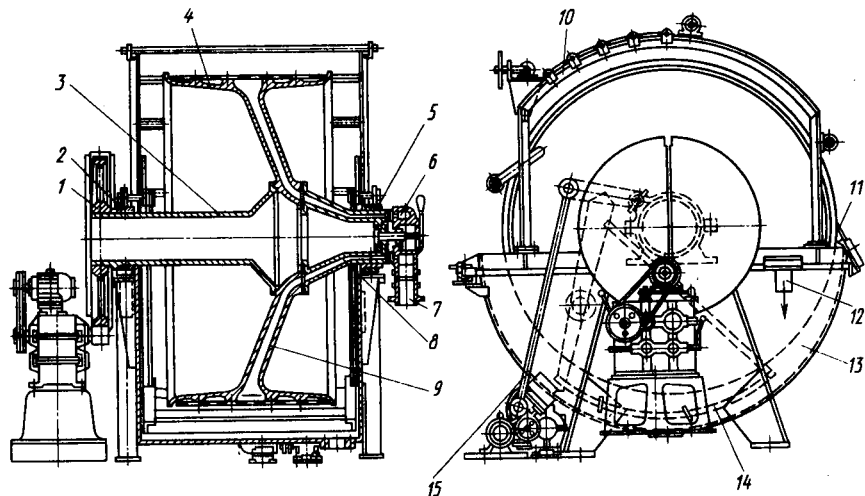


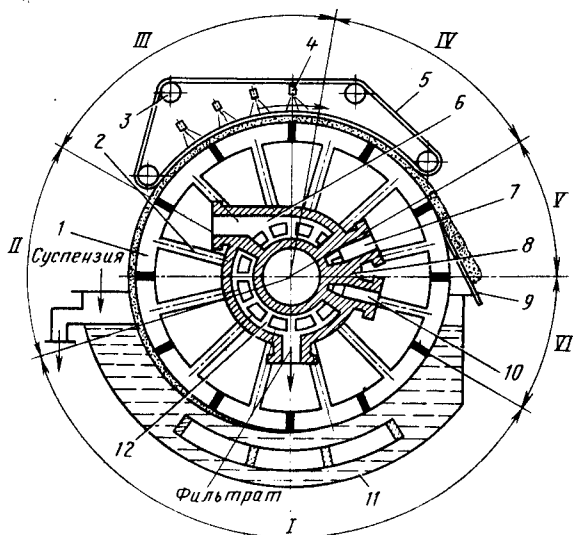
Рис. 3.6. Барабанный ячейковый вакуум-фильтр с наружной фильтрующей поверхностью

Осадок снимается с барабана при его вращении ножом или другим заменяющим его устройством.

Примером такого фильтра может служить барабанный ячейковый вакуум-фильтр с наружной фильтрующей поверхностью — наиболее распространенный фильтр непрерывного действия. Основной рабочий элемент машины — барабан 4 (рис. 3.6), пространство между стенками которого разделено радиальными перегородками на ряд ячеек. Ячейки закрыты перфорированными листами, прикрепленными к перегородкам и бортам винтами с потайными головками.

Снаружи перфорированные листы покрыты фильтровальной тканью. Каждая ячейка снабжена дренажной трубкой 9. Трубки служат одновременно спицами, связывающими барабан со ступицей, к которой крепятся полые цапфы. Обычно трубки образуют сплошной конический диск с каналами, переходящий в ступицу. Цапфами 3 и 8 барабан опирается на подшипниковые узлы 2 и 5, закрепленные на станине фильтра. Барабан приводится во вращение через зубчатое колесо 1, закрепленное на цапфе 3, частота вращения $10\text{--}50\text{ ч}^{-1}$. Нижняя часть барабана погружена в суспензию, подаваемую в корыто 13; последнее снабжено переливной трубой 12. В нижней части корыта под барабаном помещена маятниковая мешалка 14 с приводом 15, закрепленная на шарнирах и совершающая качательное движение. Мешалка препятствует гравитационному осаждению суспензии и образованию осадка на дне корыта. Над барабаном расположено устройство 10 для промывки осадка, состоящее из коллектора, ряда форсунок, разбрызгивающих промывную жидкость, и полосы ткани, натя-

Рис. 3.7. Схема работы
ячейкового барабанного
вакуум-фильтра с наруж-
ной фильтрующей по-
верхностью



нудой на ролики и предохраняющей осадок от размывания. Ячейки фильтра соединены дренажными трубками с продольными каналами в стенке полой цапфы 8. При вращении барабана каждая ячейка через дренажную трубку, канал цапфы и распределительное устройство 6 соединяется через штуцера 7 попеременно со сборниками основного и промывного фильтратов, находящимися под вакуумом, и с источником сжатого воздуха, служащего для отделения (отдувки) осадка от фильтровальной ткани перед снятием его ножом 11 и для регенерации (очистки) фильтровальной ткани. Распределительное устройство состоит из круглого корпуса, ячейковой и распределительной шайб. Корпус разделен перегородками на отсеки и снабжен штуцерами. Ячейковая шайба, закрепленная на цапфе барабана, имеет по окружности ряд отверстий (по числу ячеек фильтра) и вращается вместе с барабаном. Распределительная шайба, закрепленная на неподвижном корпусе распределительного устройства, имеет секторные окна. Шайбы пришлифованы и прижаты одна к другой действием вакуума и пружины.

На каждой ячейке последовательно происходят различные стадии процесса. Ячейки барабана 1 (рис. 3.7), находящиеся в зоне I (фильтрация), погружены в суспензию (в корыто 11) и через распределительное устройство 8 соединены со сборником основного фильтрата и с вакуумной системой. Под действием вакуума происходит фильтрация суспензии. На поверхности ячеек, покрытой фильтровальной тканью, образуется осадок; фильтрат собирается в полостях ячеек и через дренажные трубы 2 и отсек 12 распределительного устройства отводится в сборник. По мере движения ячейки в пределах этой зоны толщина осадка постепенно увеличивается. В зоне II (первое обезвоживание)

ячейки уже не погружены в суспензию, но еще соединены со сборником основного фильтрата. Здесь происходит первое обезвоживание осадка под действием вакуума воздухом, вытесняющим жидкость из пор осадка.

В зоне III (промывка) осадок орошается промывной жидкостью, поступающей на его поверхность из форсунок 4 через поры ткани 5, натянутой на ролики 3. Здесь ячейки через отсек 6 распределительного устройства 8 соединены со сборником промывного фильтрата. Под действием вакуума промывная жидкость фильтруется через осадок, вытесняя из его пор остатки жидкой фазы суспензии.

В зоне IV (второе обезвоживание) осадок не орошается, но ячейки остаются соединенными со сборником промывного фильтрата. Затем в зоне V (удаление осадка) через штуцер 7 в ячейки подается сжатый воздух. При деформации и колебаниях фильтровальной ткани осадок от нее отделяется и падает на нож 9. С ножа осадок соскальзывает в бункер — сборник осадка.

Регенерация (очистка) ткани происходит в зоне VI. Здесь ячейка погружена в суспензию и в нее через штуцер 10 подается сжатый воздух. При барботаже воздуха через суспензию происходит отмывка ткани от частиц, застрявших в ее порах.

Применяют барабаны закрытые с торцов и открытого типа (см. рис. 3.6) — без торцовых стенок. Открытые барабаны проще по конструкции и легче, но их стенки и отводные трубы подвержены коррозионному действию жидкости с внутренней и наружной сторон. Кроме того, при открытом барабане в несколько раз увеличивается объем суспензии, находящейся в корыте фильтра.

Барабан обтянут снаружи фильтровальной тканью в один или два слоя. При использовании двух слоев в качестве нижнего используют ткань более редкого плетения (мешковину, капроновую сетку), в качестве верхнего — более плотную и тонкую (бязь). Поверх ткани барабан обвит стальной проволокой диаметром 1—3 мм с шагом 50—100 мм.

Применяют также посекционное крепление ткани без обвивки барабана проволокой. Для уплотнения ткани в пазах используют резиновый шнур, хлопчатобумажный или пеньковый канат, деревянные рейки. Посекционная система крепления позволяет использовать отдельные отрезки ткани на несколько или даже на одну ячейку и быстро заменять ее на поврежденных участках.

Для снятия осадка с барабана применяют различные устройства. Неподвижный нож в сочетании с пульсационной отдувкой применяют для снятия сравнительно толстых осадков (толщиной $\delta > 8 \dots 10$ мм), т. е. при обработке легкофильтрующихся суспензий. Для увеличения производительности единицы фильтрующей поверхности целесообразно работать с тонкими осадками, увеличив соответственно частоту вращения барабана. При малой толщине осадка уменьшается сопротивление и возрастает средняя скорость фильтрации, а следовательно, и производительность фильтра.

Для снятия более тонких осадков ($\delta = 1,5 \dots 8$ мм) используют подвижный нож, следующий за поверхностью ткани. Нож поворачивается в опорах с легким прижатием к ткани противовесами или пружиной. Иногда для уменьшения износа ткани лезвием ножа служит сменная пластина из твердой резины. Используют также гибкие ножи в виде тонких пластин, специальные валики, шнуры, сетки, перфорированные ролики, туго натянутые струны. В конструкциях фильтров, предназначенных для работы с намывным слоем зернистого материала, используют ножи с микрометрической подачей. В этом случае на барабан фильтрованием вспомогательной суспензии предварительно наносят толстый слой ($\delta = 50 \dots 75$ мм) зернистого материала (диатомита, древесной муки и др.), через который затем фильтруется основная суспензия. За каждый оборот барабана нож срезает тонкий слой (несколько десятых долей миллиметра) зернистого материала с застрявшими в его порах частицами твердой фазы основной суспензии. Цель процесса в этом случае — очистка жидкости от взвешенных в ней мелких твердых частиц (осветление).

В зависимости от назначения барабанные вакуум-фильтры изготовляют с различными углами погружения барабана в суспензию. Фильтры малого погружения (угол погружения $80—100^\circ$) предназначены для легкофильтруемых суспензий и используются в основном в горнорудной промышленности. Для труднофильтруемых (мелкозернистых) суспензий используют фильтры с углом погружения около 200° . Фильтры общего назначения имеют угол погружения в пределах $135—145^\circ$. Наибольший угол погружения ($210—270^\circ$) имеют фильтры для низкоконтцентрированных суспензий с волокнистой твердой фазой.

Реже используют в промышленности барабанные вакуум-фильтры других конструкций: со сходящей фильтровальной тканью, ячейковые без распределительного устройства, безъячейковые, барабанные фильтры-сгустители, с внутренней фильтрующей поверхностью.

Расчет на прочность барабанных вакуум-фильтров. Современные вакуум-фильтры обычно имеют закрытые с торцов барабаны. В связи с этим основными расчетными элементами являются обечайка барабана, торцовые крышки и цапфы. Последние рассчитывают обычным методом одновременно на изгиб и кручение под действием собственного веса барабана, усилий от механизмов отжима и съема осадка, приводного крутящего момента и тормозного момента распределительной головки. Определенные особенности имеют расчеты обечайки (корпуса) барабана и его торцовых крышек.

Обечайка. Погруженная в суспензию часть обечайки барабана испытывает действие распределенной переменной в окружном направлении нагрузки от гидростатического давления суспензии. Кроме того, на обечайку действует равномерно распределенное по длине усилие от механизмов отжима и съема осадка

(условно перемещенное в вертикальную плоскость) и собственный вес барабана. Каждая из этих трех нагрузок создает нормальные напряжения, действующие как в окружном, так и в осевом направлениях.

Обечайка подкреплена продольными ребрами (перемычки между ячейками), а иногда и кольцевыми ребрами; для упрощения расчета влияние ребер обычно не учитывают. При выводе расчетных формул (РТМ 26-01-82—76 «Барабанные вакуум-фильтры. Методы расчета на прочность») использована полумоментная (техническая) теория оболочек В. З. Власова. В этом случае реальную оболочку представляют совокупностью отдельных неразтяжимых колец, которые связаны между собой шарнирами, исключающими взаимное перемещение колец в окружном и осевом направлениях, но не передающими радиально направленных перерезывающих сил и меридиональных изгибающих моментов. Корпус барабана представляют как оболочку, защемленную по концам и нагруженную указанными силами.

Максимальные напряжения (в середине длины барабана, в нижней его части) определяют по следующим формулам.

Осевое и окружное напряжения от гидростатического давления:

$$\sigma_{s1} = \sqrt{3} \rho_c g \frac{R^3}{\pi s^2} \sum_{k=2}^6 \frac{B_k \Phi_k}{k^2 - 1}; \quad (3.1)$$

$$\sigma_{t1} = \pm 6 \rho_c g \frac{R^3}{\pi s^2} \left\{ \left[\sum_{k=2}^6 \frac{(A_k + 1) \Phi_k}{k^2 - 1} \right] \pm 0,0005 \right\}. \quad (3.2)$$

Напряжения от усилий отжима и съема осадка:

$$\sigma_{s2} = \sqrt{3} q \frac{R}{\pi s^2} \sum_{k=2}^6 \frac{B_k}{k^2 - 1}; \quad (3.3)$$

$$\sigma_{t2} = \pm 6q \frac{R}{\pi s^2} \left\{ \left[\sum_{k=2}^6 \frac{A_k + 1}{k^2 - 1} \right] \pm 0,155 \right\}. \quad (3.4)$$

Напряжения от веса барабана:

$$\sigma_{s3} = \pm M_6 / (\pi R^2 s); \quad \sigma_{t3} = \mu \sigma_{s3}. \quad (3.5)$$

В этих уравнениях: ρ_c — плотность суспензии, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; R — внутренний радиус барабана, м; s — толщина стенки обечайки, м; B_k , Φ_k , A_k — функции; $k = 2; 3; 4; 5; 6$; q — усилие от механизмов отжима и среза осадка, Н/м; M_6 — изгибающий момент от веса барабана, Н·м; μ — коэффициент Пуассона.

Момент M_6 определяют в предположении, что вес барабана представляет собой приложенную в середине сосредоточенную

Рис. 3.8. Расчетная схема торцевой стенки

силу. Усилие среза и отжима q можно ориентировочно принять равным 4—5 кН/м. Функция Φ_k зависит от угла погружения барабана φ_0 :

$$\Phi_k = \frac{\sin [(k+1) \varphi_0]}{k+1} + \frac{\sin [(k-1) \varphi_0]}{k-1} - \frac{2 \cos \varphi_0 \sin (k \varphi_0)}{k}. \quad (3.6)$$

Функции A_k и B_k выражают через функции Крылова:

$$A_k = -\frac{F_1}{F_1^2 + 4F_3^2}; \quad B_k = -\frac{4F_3}{F_1 + 4F_3^2}, \quad (3.7)$$

где $F_1 = \operatorname{ch} x \cos x$; $F_3 = 0,5 (\operatorname{sh} x \sin x)$, причем $x = 0,5 \beta_k L$ (где $\beta_k = \frac{1}{R} k \sqrt{k^2 - 1} \sqrt{\frac{s^2}{48R^2}}$; L — длина обечайки, м).

Значения A_k и B_k можно определять по графикам, построенным по таблицам функций F_1 и F_3 или $\operatorname{sh} x$, $\operatorname{ch} x$, $\sin x$, $\cos x$ (в пределах от 0 до π).

В формуле (3.2) знак перед слагаемым 0,0005 выбирают так, чтобы выражение в фигурных скобках было максимально по абсолютной величине. Затем определяют суммарные осевое и окружное напряжения:

$$\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s3}; \quad \sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2} + \sigma_{t3}.$$

Проверку на прочность выполняют по эквивалентному напряжению, определяемому на основании 4-й (энергетической) теории прочности:

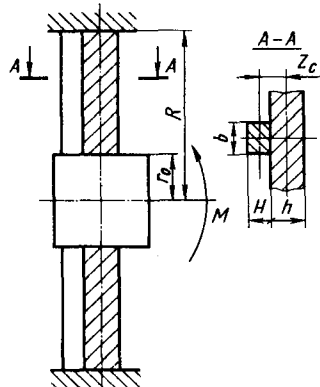
$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_t^2 - \sigma_s \sigma_t}. \quad (3.8)$$

Допускаемое напряжение $[\sigma]$ по пределу выносливости при числе симметричных циклов нагружения 10^6 определяют по таблицам или графикам. При проверке прочности учитывают коэффициент концентрации напряжений K_σ (можно принять $K_\sigma = 2,5$), причем

$$\sigma_3 \leq [\sigma]/K_\sigma. \quad (3.9)$$

Проверку обечайки на устойчивость от действия изгибающего момента, обусловленного собственным весом барабана, выполняют по ГОСТ 14249—80.

Торцовая крышка. Торцовая крышка барабана представляет собой круглую пластину, укрепленную ребрами и снабженную в средней части жесткой ступицей. Пластина нагружена



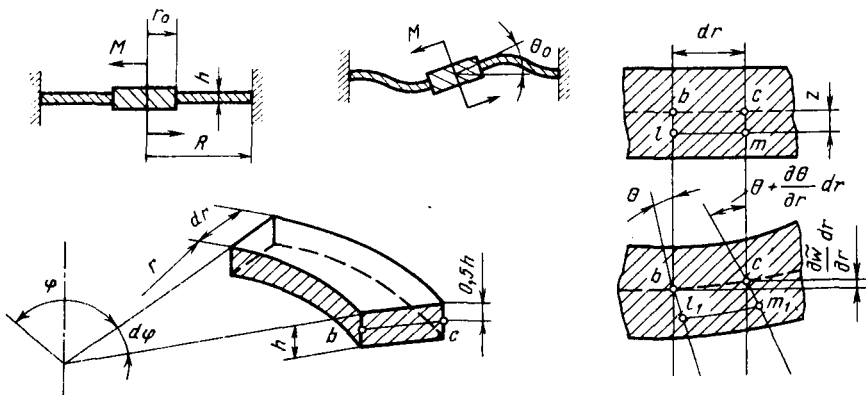


Рис. 3.9. Схемы и выводу уравнений деформации

в центре сосредоточенным изгибающим моментом M от цапфы, равным произведению опорной реакции на расстояние между серединами подшипника и торцевой крышки. Пластина зашкреплена по наружному контуру (рис. 3.8).

Опыт эксплуатации барабанных вакуум-фильтров показывает, что наиболее часто случаи выхода этих фильтров из строя обусловлены растрескиванием торцевой крышки барабана в местах сопряжения ее с цапфой.

Рассмотрим сначала изгиб круглой неоребренной пластины, жестко заделанной (зашкрепленной) по наружному краю и имеющей в средней части жесткий центр, к которому приложен изгибающий момент M (рис. 3.9). Как принято в теории пластин, будем считать напряженное состояние стенки плоским; в ней действуют радиальное σ_r и окружное σ_t напряжения. Примем также, что прямые, нормальные к срединной поверхности пластины до деформации, остаются таковыми после деформации.

Рассмотрим деформацию бесконечно малого отрезка радиуса срединной поверхности; точка b расположена на расстоянии r от оси; точка c — на расстоянии $r + dr$.

Пусть: $\tilde{w}$ и θ — прогиб пластины и угол поворота нормали к срединной поверхности в точке b ; отрезок bc лежит в нейтральном слое пластины, и его длина при деформации не меняется. Найдем радиальную и окружную деформации такого же отрезка lm , лежащего на расстоянии z от нейтрального слоя. На основании простых геометрических соображений получим

$$\varepsilon_r = \frac{l_1 m_1 - lm}{lm} = \frac{(\theta + d\theta)z - \theta z}{dr} = \frac{d\theta}{dr} z. \quad (3.10)$$

Окружная деформация на радиусе r

$$\varepsilon_t = [2\pi(r + \theta z) - 2\pi r] / (2\pi r) = \theta z / r. \quad (3.11)$$

Учитывая, что $\theta = -d\tilde{w}/dr$, и используя уравнения закона Гука, найдем:

$$\varepsilon_r = -\frac{d^2\tilde{w}}{dr^2} z; \quad \varepsilon_t = -\frac{1}{r} \frac{d\tilde{w}}{dr} z; \quad (3.12)$$

$$\sigma_r = -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{d^2\tilde{w}}{dr^2} + \mu \frac{1}{r} \frac{d\tilde{w}}{dr} \right); \quad (3.13)$$

$$\sigma_t = -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{r} \frac{d\tilde{w}}{dr} + \mu \frac{d^2\tilde{w}}{dr^2} \right). \quad (3.14)$$

Дифференциальное уравнение прогиба круглой пластины для рассматриваемого случая имеет вид

$$\left(\frac{\partial}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \varphi^2} \right) = 0. \quad (3.15)$$

Интеграл этого уравнения

$$\tilde{w}(r, \varphi) = [C_1 r + C_2/r + C_3 r^3 + C_4 r \ln(r/R)] \cos \varphi. \quad (3.16)$$

Постоянные интегрирования определим из граничных условий:

$$\tilde{w} = -r_0 \theta_0 \cos \varphi, \quad \partial \tilde{w} / \partial r = -\theta_0 \cos \varphi \quad \text{при } r = r_0;$$

$$\tilde{w} = 0; \quad \partial \tilde{w} / \partial r = \theta = 0 \quad \text{при } r = R. \quad (3.17)$$

Из уравнения (3.15) можно получить соотношение между прогибом и изгибающим моментом:

$$M = -D \left(\frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial r^2} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial r} \right), \quad (3.18)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая жесткость.

С учетом этого соотношения и граничных условий (3.17) найдем постоянные интегрирования:

$$C_1 = \frac{M}{4\pi D} \frac{\rho^2 - 1}{2(\rho^2 + 1)}; \quad C_2 = \frac{M}{4\pi D} \frac{r_0^2 \rho^2}{2(\rho^2 + 1)};$$

$$C_3 = -\frac{M}{8\pi D r_0^2} \frac{1}{\rho^2 + 1}; \quad C_4 = \frac{M}{4\pi D},$$

где $\rho = R/r$.

Энергия деформации неоребреной пластины

$$\tilde{U} = \frac{M^2}{8\pi D} \frac{(\rho^2 + 1) \ln \rho - (\rho^2 - 1)}{\rho^2 + 1}. \quad (3.19)$$

Для определения напряжений и прогиба пластины с радиальными ребрами используем метод минимизации полной энергии

пластины, находящейся под нагрузкой в состоянии устойчивого равновесия. Полная энергия пластины является суммой потенциала нагрузки Z и потенциальной энергии деформации U .

Для решения задачи зададимся некоторой функцией, выражающей зависимость прогиба w оребренной пластины от прогиба $\tilde{w}$ неоребренной пластины и неизвестных пока параметров A и e : $w = w(A, e, \tilde{w})$. Эта функция должна удовлетворять всем граничным условиям (3.17) и, кроме того, условию минимума полной энергии деформированной системы, т. е.

$$\partial\Pi/\partial A = 0 \text{ и } \partial\Pi/\partial e = 0. \quad (3.20)$$

Поскольку пластина имеет одностороннее оребрение и площадь поперечного сечения ребер значительна, то предположение о нерастяжимости срединной поверхности пластины неприменимо. Деформацию такой системы можно представить как ее изгиб относительно нейтральной линии, расположенной на некотором расстоянии e от срединной поверхности.

Примем следующие допущения: 1) деформация пластины равномерна по окружности (это справедливо, если число ребер $n > 6$); 2) прогиб оребренной пластины пропорционален прогибу неоребренной пластины; 3) смещение e нейтрального слоя относительно срединной поверхности постоянно по радиусу.

Учитывая принятую ранее гипотезу о нормальных к срединной поверхности и считая напряженное состояние в пластине двухосным, а в ребрах — одноосным, получим следующие уравнения для деформаций и напряжений в пластине:

$$\varepsilon_r = (d\theta/dr)(z - e) = -(d^2w/dr^2)(z - e); \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\theta}{r}(z - e) = -\frac{1}{r} \frac{dw}{dr}(z - e); \quad (3.22)$$

$$\sigma_r = -\frac{E(z - e)}{(1 - \mu^2)} \left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{\mu}{r} \frac{dw}{dr} \right); \quad (3.23)$$

$$\sigma_t = -\frac{E(z - e)}{(1 - \mu^2)} \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \mu \frac{d^2w}{dr^2} \right). \quad (3.24)$$

Напряжение в ребрах

$$\sigma = E\varepsilon_r = -E(d^2w/dr^2)(z - e). \quad (3.25)$$

Потенциальные энергии деформации пластины $U_{пл}$ и ребер U_p вычислим как интегралы от удельной энергии по объему:

$$U_{пл} = \int_r \int_z 0,5(\sigma_r\varepsilon_r + \sigma_t\varepsilon_t) 2\pi r dr dz;$$

$$U_p = n \int_r \int_F 0,5\sigma\varepsilon_r dF dr,$$

где n — число ребер; F — площадь сечения ребра ($F = bH$ — см. рис. 3.8).

Выразив напряжения и деформации через прогиб и проинтегрировав, получим:

$$U_{\text{пл}} = \frac{D}{2} \left(1 + \frac{12e^2}{h^3} \right) \int_r \left[\left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) - \right. \\ \left. - 2(1 - \mu) \frac{d^2 w}{dr^2} \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right] 2\pi r dr; \quad (3.26)$$

$$U_p = n \frac{EI}{2} \int_r \frac{d^2 w}{dr^2} dr, \quad (3.27)$$

где I — момент инерции сечения ребра относительно нейтральной линии.

При моменте инерции I_0 сечения ребра относительно его собственной центральной оси и расстоянии z_c (см. рис. 3.8) от центра тяжести сечения ребра до срединной поверхности пластины $I = I_0 + F(z_c - e)^2$. Учитывая пропорциональность прогибов орребренной и неорребренной пластин, т. е. соотношение $w = A\tilde{w}$, получим следующие выражения для энергии деформации:

$$U_{\text{пл}} = \left(1 + \frac{12e^2}{h^2} \right) A^2 \frac{D}{2} \int_r \left[\left(\frac{d^2 \tilde{w}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\tilde{w}}{dr} \right)^2 - \right. \\ \left. - 2(1 - \mu) \frac{d^2 \tilde{w}}{dr^2} \frac{1}{r} \frac{d\tilde{w}}{dr} \right] 2\pi r dr;$$

$$U_p = n \frac{EI}{2} A^2 \int_r \left(\frac{d^2 \tilde{w}}{dr^2} \right)^2 dr$$

или

$$U_{\text{пл}} = (1 + 12e^2/h^2) A^2 \tilde{U}; \quad (3.28)$$

$$U_p = 0,5nE [I_0 + F(z_c - e)^2] A^2 i, \quad (3.29)$$

где $\tilde{U}$ — энергия деформации пластины без ребер; $i = \int_r (d^2 \tilde{w}/dr^2)^2 dr$ — интеграл по длине ребра.

При $w = A\tilde{w}$ потенциал внешней нагрузки для орребренной пластины $Z = A\tilde{Z}$, где $\tilde{Z}$ — потенциал внешней нагрузки для пластины без ребер.

Полная энергия системы

$$\Pi = (1 + 12e^2/h^2) A^2 \tilde{U} + 0,5nE [I_0 + F(z_c - e)^2] A^2 i + A\tilde{Z}. \quad (3.30)$$

Параметры A и e найдем из условия минимума полной энергии Π . Для этого продифференцируем последнее выражение по A

и e и приравняем производные нулю. Получим систему уравнений

$$\begin{cases} (1 + 12e^2/h^2) 2A\tilde{U} + nE [I_0 + F(z_c - e)^2] Ai + \tilde{Z} = 0; \\ (24e/h^2) A^2\tilde{U} - nEF(z_c - e) A^2i = 0. \end{cases} \quad (3.31)$$

Решив эту систему с учетом, что $\tilde{Z} = -2\tilde{U}$ и обозначив $i/\tilde{U} = \Phi$, получим:

$$e = z_c \left(1 + \frac{12}{n} \frac{r_0 h}{F} \frac{1}{\Phi} \right)^{-1}; \quad (3.32)$$

$$\frac{1}{A} = 1 + \frac{12e^2}{h^2} + \frac{nE}{r_0 h^3} [I_0 + F(z_c - e)^2] \Phi, \quad (3.33)$$

где

$$\Phi = \frac{3(1 - \mu^2)}{2\pi} \frac{15(\rho - 1)(\rho^2 + 1)^2 + 3(\rho^5 - 1) + 5(2\rho^2 - 9\rho + 2)}{15\rho(\rho^2 + 1)[(\rho^2 + 1)\ln \rho - \rho^2 - 1]}. \quad (3.34)$$

Определив параметры A и e , из уравнений (3.16), (3.24), (3.25) и соотношения $w = A\tilde{w}$ получим формулы для окружного и радиального напряжений в пластине и для напряжения в ребре. Для пластины окружное напряжение максимально в точке $r = r_0$:

$$\sigma_{пл} = \frac{6M}{\pi r_0 h^2} \left(\frac{1}{2} + \frac{e}{h} \right) A \frac{\rho^2 - 1}{\rho^2 + 1}. \quad (3.35)$$

Максимальное напряжение в ребре

$$\sigma_p = \frac{6(1 - \mu^2)M}{\pi r_0 h^2} \left(\frac{H}{h} + \frac{1}{2} - \frac{e}{h} \right) A \frac{\rho^2 - 1}{\rho^2 + 1}. \quad (3.36)$$

Вычислив напряжения, выполним проверку на прочность, как при расчете обечайки фильтра [см. уравнение (3.9)]. Коэффициент концентрации напряжений K_σ также можно принять равным 2,5.

Дисковые вакуум-фильтры. Существенным недостатком барабанных вакуум-фильтров является их громоздкость, обусловленная сравнительно малой поверхностью фильтрации, приходящейся на единицу объема и единицу массы аппарата. В этом отношении более выгодны ячейковые дисковые вакуум-фильтры, в которых фильтрующая поверхность образована несколькими полыми дисками. В каждом диске рабочими являются обе стороны. Конструктивно дисковый вакуум-фильтр во многом сходен с барабанным. Фильтровальные диски 5 (рис. 3.10) насажены на полый ячейковый вал 4, опирающийся на подшипники 3 и 6. Диски почти до уровня вала погружены в корыто 11 для суспензии, сваренное из листовой стали. Корыто закреплено на раме 9. Передняя часть корыта выполнена в виде отдельных камер, промежутки между которыми служат для удаления осадка из фильтра. Для поддержания постоянного уровня суспензии корыто снабжено перелив-

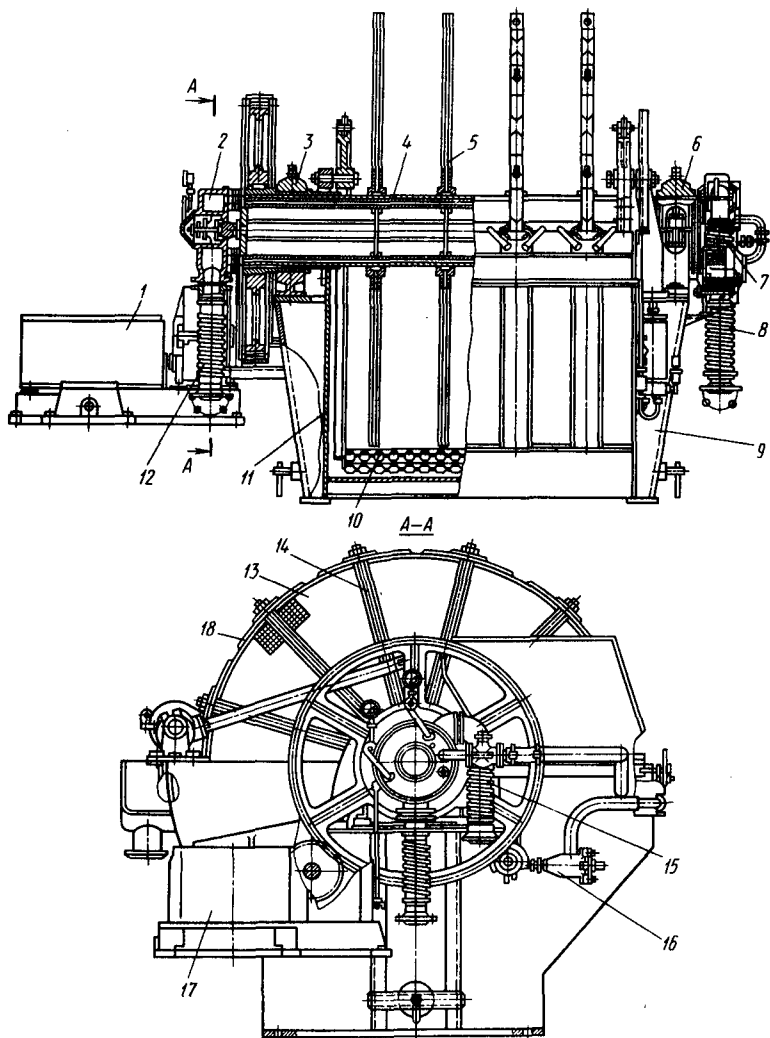


Рис. 3.10. Дискový вакуум-фильтр (ДУ-34-2,5)

ным патрубком; в нижней части торцовых стенок имеются люки для опорожнения корыта при ремонте. Отстаивание суспензии предотвращается маятниковой мешалкой 10. Отвод фильтрата и подача сжатого воздуха в ячейки дисков происходит через штуцеры 8, 12 и 15 распределительных головок 2 и 7 и продольные отверстия в стенке полого ячейкового вала. В фильтрах с малой поверхностью устанавливают одну головку.

Фильтрующие диски собраны из отдельных полых секторов 13, играющих роль ячеек. Они снабжены штуцерами и скреплены

между собой и с валом шпильками 14 и накладками 18. Секторы представляют собой сварную коробчатую конструкцию из рамки, закрытой перфорированными листами. Каждый сектор снабжен фильтрующим элементом в виде трапециевидного мешка, сшитого с боков. Мешок натянут на сектор; узкий конец мешка туго завязывают шпагатом на штуцере, а края широкого конца загибают на цилиндрическую поверхность сектора и зажимают накладками 18. Для замены фильтрующего элемента диск необходимо разбирать на отдельные секторы.

Привод 1 включает электродвигатель, редуктор и вариатор и позволяет регулировать частоту вращения в пределах 0,15—0,9 мин⁻¹. Мешалка фильтра работает от отдельного электропривода 17.

Фильтрация, образование осадка и увеличение его толщины происходят на тех секторах дисков, которые погружены в суспензию и соединены через распределительные головки со сборником фильтрата и вакуум-насосом. На непогруженных секторах происходит осушка осадка. Для съема осадка по обеим сторонам каждого диска установлены ножи. Предусмотрена возможность регулирования зазора между ножом и поверхностью диска. Осадок отделяется от ткани при импульсной подаче сжатого воздуха в соответствующий сектор каждого диска через специальный клапан 16, связанный с приводом фильтра. Продолжительность импульса 2 с. Предусмотрена также подача сжатого воздуха для регенерации фильтровальной ткани в секторы дисков, находящиеся в соответствующей зоне.

Фильтр работает аналогично барабанному ячейковому вакуум-фильтру, за исключением промывки осадка, которая при вертикальном расположении его на дисках невозможна (промывная жидкость смывала бы осадок с дисков) и не предусмотрена конструкцией. В связи с этим дисковые фильтры используют, когда промывка осадка не нужна или осуществляется в других аппаратах.

Дисковые, как и другие фильтры со взаимно перпендикулярными направлениями фильтрации и силы тяжести, затруднительно применять для быстро осаждающихся суспензий. По рекомендации НИИХИММАШа, применение фильтра возможно, если скорость осаждения частиц твердой фазы наиболее крупных классов, в совокупности составляющих не менее 20 % общего количества фазы, не превышает 18 мм/с. Концентрация твердой фазы и другие свойства суспензии должны обеспечивать возможность в условиях фильтрования под вакуумом получить осадок толщиной не менее 8 мм за время не более 3 мин.

Преимущественная область применения — крупнотоннажные производства (обоганительные фабрики) горнорудной, угольной и металлургической промышленности.

Тарельчатые вакуум-фильтры. В отличие от барабанных и дисковых, тарельчатые ячейковые вакуум-фильтры хорошо при-

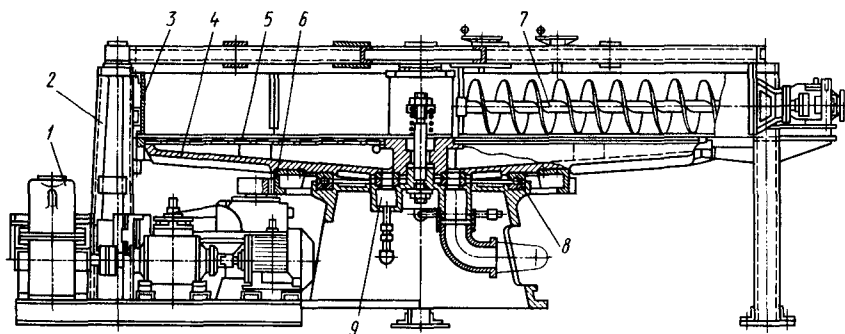


Рис. 3.11. Тарельчатый вакуум-фильтр

способлены для разделения крупнозернистых быстроосаждающихся суспензий, так как в них фильтрация осуществляется сверху вниз, т. е. направления фильтрации и отстаивания суспензии совпадают. Основной рабочий элемент фильтра (рис. 3.11) — круглая полая вращающаяся тарель 4, впадина которой разделена радиальными перегородками на ячейки (обычно их 16), перекрытые сверху опорной решеткой и перфорированным диском 5. Тарель обычно выполняют из четырех секторов, соединяемых болтами. Поверх перфорированного диска уложена фильтровальная сетка или ткань, закрепляемая в кольцевом пазу тарели резиновым шнуром. Тарель установлена горизонтально на упорном шариковом подшипнике 8, нижнее кольцо которого закреплено на станине и получает вращение от привода 1 через зубчатое колесо 6. Суспензия подается из питающего лотка непосредственно на поверхность соответствующей ячейки. Стеkanie суспензии с поверхности тарели предотвращает кольцевой кожух 3, снабженный по периферии уплотнением. Последнее состоит из резинового уплотнителя, закрепленного на нижнем краю кожуха, и находящегося с ним в контакте стального кольца, закрепленного по периферии тарелки. Кожух 3 и устройство 7 для съема осадка закреплены на раме 2.

Устройство для съема и выгрузки осадка представляет собой шнек, частично закрытый кожухом. Вал шнека опирается на шариковые подшипники и имеет индивидуальный электропривод. В некоторых конструкциях тарельчатых фильтров для съема осадка используют нож или гребки. После съема на фильтре остается слой осадка толщиной около 2 мм. Деление тарелки на ячейки и применение распределительной головки 9 (по принципу устройства аналогична применяемой в барабанном вакуум-фильтре) позволяет разделить поверхность тарели на зоны фильтрации, промывки осадка, его осушки, отдувки и выгрузки. Обеспечивается раздельный отвод основного и промывного фильтратов. Предусмотрена зона регенерации ткани (сетки) продувкой ее пор сжатым

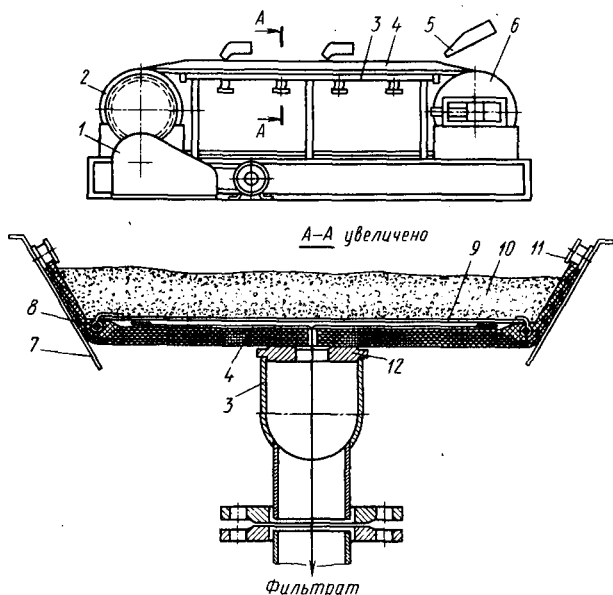


Рис. 3.12. Ленточный вакуум-фильтр:

1 — привод; 2 — приводной барабан; 3 — вакуум-камера; 4 — резиноканевая лента; 5 — лоток; 6 — натяжной барабан; 7 — борта корпуса; 8 — резиновые шнуры для крепления фильтровальной ткани; 9 — фильтровальная ткань; 10 — осадок; 11 — направляющие ролики; 12 — золотниковая решетка

воздухом. Привод тарели фильтра состоит из электродвигателя, двух редукторов, вариатора и открытой зубчатой передачи и позволяет в определенных пределах регулировать частоту вращения тарели (в фильтре Т10-3,6У — от 0,17 до 1 мин⁻¹).

Для подачи промывной жидкости над зоной промывки установлены форсунки или лотки. В качестве фильтровальной перегородки используют пластмассовую или металлическую сетку, а также неплотную ткань. Фильтр снабжен резиновым валиком для выравнивания слоя осадка, остающегося после снятия его ножом или шнеком.

Тарельчатые вакуум-фильтры применяют главным образом для обезвоживания и промывки крупнозернистых концентратов руд черных и цветных металлов, каменного угля и других крупнокристаллических продуктов. Недостаток тарельчатых фильтров — большие размеры. Для уменьшения занимаемой площади их иногда выполняют двухъярусными. Кроме того, в них трудно достичь равномерной промывки осадка, что объясняется разной линейной скоростью движения его в центральной и периферийной частях зоны промывки.

Ленточные вакуум-фильтры. В этих фильтрах, как и в тарельчатых, направления фильтрации и отстаивания суспензии совпа-

дают, поэтому они также хорошо приспособлены для фильтрования крупнозернистых быстроосаждающихся суспензий. В отличие от тарельчатых, в ленточных фильтрах легко достигается равномерная промывка осадка.

Фильтровальная резинотканевая лента 4 (рис. 3.12) надета на приводной 2 и натяжной 6 барабаны. Верхняя ветвь ленты краями опирается на стол фильтра, а средней частью — на вакуумную камеру 3, гладкая плоская верхняя поверхность которой имеет отверстия. Для раздельного отвода основного и промывного фильтратов вакуумная камера разделена на секции и снабжена штуцерами. При движении по столу края ленты отогнуты вверх, образуя желоб; при переходе на барабаны лента выпрямляется. Нижняя ветвь ленты опирается на поддерживающие ролики. Привод 1 фильтра, состоящий из электродвигателя, редуктора и вариатора, обеспечивает плавное регулирование скорости ленты (в фильтре ЛУ4-0,5-8 в пределах 1,5—9,0 м/мин). Для подачи суспензии и промывной жидкости фильтр оборудован лотками 5. Фильтр смонтирован на сварной раме.

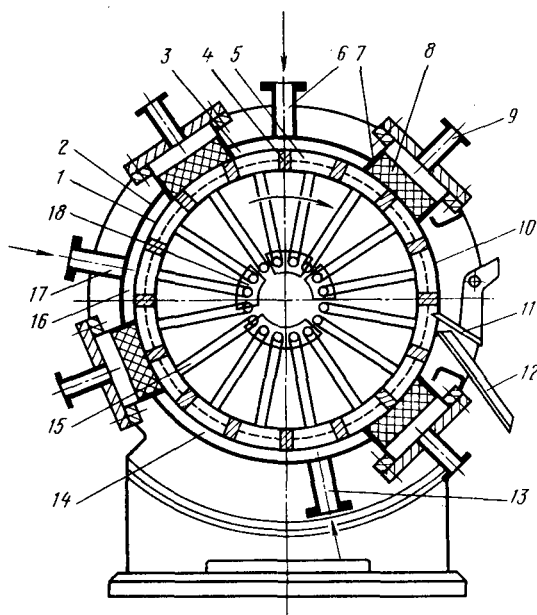
Обрабатываемая суспензия по питающему лотку 5 самотеком поступает на движущуюся фильтровальную ленту 4 и фильтруется под действием вакуума. Осадок остается на ткани, а фильтрат по каналам на рифленной поверхности и сквозным отверстиям ленты поступает в вакуумную камеру, откуда отводится в сборник фильтрата. Двигаясь вместе с лентой, осадок поступает последовательно в зону трехкратной промывки, где орошается промывной жидкостью, и в зону осушки. Промывной фильтрат под действием вакуума отводится из соответствующих секций вакуумной камеры, а осушенный осадок снимается с ленты при огибании ею приводного барабана, пластиной, укрепленной на двух пружинных планках и держателе. Снятый осадок поступает в бункер. Иногда приводной барабан снабжают устройством для отдувки осадка. Зоны фильтрования, промывки и осушки осадка разделены на ленте резиновыми или тканевыми перегородками.

На нижней ветви ленты предусмотрена регенерация фильтровальной ткани обмывкой ее снизу струями воды, подаваемой в два коллектора с рядом мелких отверстий. Смывная жидкость собирается в поддон, откуда отводится в сборник.

Ленточные вакуум-фильтры предназначены преимущественно для разделения полидисперсных быстроосаждающихся суспензий. При этом возможна тщательная промывка осадка. Количество промывной жидкости не должно, однако, превышать пятикратную массу осадка. Суспензия по концентрации и разделяемости должна допускать получение осадка толщиной не менее 4 мм за время не более 4 мин.

Ленточные вакуум-фильтры по сравнению с барабанными имеют примерно вдвое большую производительность единицы фильтрующей поверхности. Их применяют преимущественно в химической промышленности, а также в черной и цветной металлургии.

Рис. 3.13. Барабанный фильтр, работающий под давлением



Барабанный фильтр, работающий под давлением. Применяемые в промышленности фильтры непрерывного действия обычно являются вакуум-фильтрами и работают при малой движущей силе ($\Delta p \ll \ll 0,08$ МПа). Возникла проблема создания непрерывно действующих фильтров с большей движущей силой, работающих при повышенном давлении. Примером может служить барабанный фильтр фир-

мы «Хюттенверк Зонтгофен» (ФРГ). Фильтр (рис. 3.13) имеет ячейковый фильтрующий вращающийся барабан 1, который заключен в кожух 2 и снабжен штуцерами 6, 13, 17. Фильтрующая перегородка (перфорированный лист, покрытый тканью) расположена не на наружной поверхности барабана, а во впадинах ячеек 5. Кольцевое пространство между барабаном и кожухом разделено подвижными перегородками 8 на три или более герметичные камеры 3, 14, 16, предназначенные для подачи в них суспензии, промывной жидкости и сжатого воздуха для осушки осадка. Перегородки 8 помещены в гнезда 7 прямоугольного сечения, прижаты к барабану (к бортам ячеек) сжатым воздухом, подаваемым через штуцер 9, и обеспечивают уплотнение между камерами. Опорные подшипники барабана встроены в торцовые крышки кожуха. Гладкие нерабочие края барабана уплотнены в торцовых крышках кольцевыми уплотнениями типа сальника. К уплотнениям подается смазочная жидкость. Суспензия подается под давлением через штуцер 13 в камеру 14 и фильтруется на ячейках барабана, находящихся в этой камере. Фильтрат отводится через дренажные трубки и распределительную головку в сборник фильтрата. В камере 16 осадок промывается жидкостью, подаваемой под давлением через штуцер 17. Осушка осадка вытеснением влаги сжатым воздухом происходит в камере 3.

Осадок снимается на не закрытом кожухом участке 10 ножом 11, заходящим под действием пружины во впадины ячеек и автоматически выталкиваемым из них при приближении к ножу межъячей-

ковых перегородок 4. Снятый осадок по лотку 12 поступает в бункер. Частоту вращения барабана и скорость подачи суспензии подбирают так, чтобы во время фильтрования в камере 14 впадина ячейки заполнилась осадком. В противном случае при переходе в следующую камеру 16 ячейка переносит туда некоторый объем суспензии, т. е. промывная жидкость загрязняется суспензией, что нежелательно. Межкамерные уплотняющие перегородки 8, подобно поршням, подвижны в своих гнездах в радиальном направлении и уплотнены по периметру. Трущиеся поверхности перегородок выполнены из пластмассы с низким коэффициентом трения по металлу. Ширина перегородок несколько больше шага ячеек, что исключает сообщение соседних камер кожуха между собой.

Привод фильтра выполнен с бесступенчатым регулированием частоты вращения, оборудован редуктором и цилиндрическим зубчатым колесом, закрепленным на цапфе барабана штифтом, срезаемым при превышении предельно допускаемого момента.

Основной и промывочный фильтраты отводятся из ячеек фильтра через дренажные трубки 15 и распределительное устройство 18 кольцевого или торцового типа. Распределительное устройство обеспечивает фильтрацию под давлением, вакуумом или комбинированным способом, а также отдувку осадка в зоне его съема.

Фильтр можно использовать для разделения быстроосаждающихся суспензий. В этом случае суспензия подается в верхнюю камеру 3, и фильтр работает с направлением фильтрации сверху вниз. Направление вращения барабана в этом случае обратное. Соответствующим образом меняются также направления движения и наклона ножа. Фильтр может быть снабжен рубашкой для обогрева.

По сравнению с обычным барабанным вакуум-фильтром рассмотренный фильтр, работающий под давлением, обладает рядом преимуществ. Производительность его больше в 1,5—2,5 раза, конечная влажность осадка в 1,2—1,8 раза, а расход промывной жидкости в 1,2—2,0 раза меньше при том же качестве промывки. Существенное преимущество — полная герметичность аппарата, обеспечивающая улавливание паров легкокипящих и ядовитых растворителей.

Недостатки фильтра — большая поверхность трения в уплотнениях (сальниках), а также ограниченная возможность увеличения поверхности фильтрации.

Автоматизированный выбор фильтра оптимального типоразмера. Для выбора аппарата конкретного назначения необходимо знать технические характеристики выпускаемых промышленностью аппаратов данного класса (например фильтров, центрифуг, циклонов и др.). Эти характеристики приведены обычно в каталогах или других документах (паспортах, инструкциях по эксплуатации, технических описаниях). Обычный выбор состоит в сравнении данных, указанных в каталогах, с условиями технологиче-

ского процесса, для которого предполагается использовать выбираемый аппарат. Для оптимального выбора необходимо рассмотреть и оценить большое количество сведений об аппаратах, сравнивая их с требованиями технологического процесса, что является сложной и длительной процедурой. Для ускорения выбора целесообразно использовать ЭВМ, в память которой введены технические характеристики и конструктивные особенности аппаратов. Эти данные автоматически сравниваются с данными представляемого заказчиком опросного листа, содержащего сведения о технологическом процессе, для которого выбирают аппарат. ЭВМ оценивает несколько приемлемых вариантов и выбирает из них наилучший. Такие поисковые системы создаются в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях, занимающихся совершенствованием аппаратуры или проектированием химических предприятий.

В НИИХИММАШе для выбора фильтровального оборудования используется автоматизированная система, разработанная на базе ЭВМ ЕС-1033. Информационная база системы содержит данные примерно о 400 фильтрах и представлена в виде таблицы, в которой указаны их типоразмеры и модификации, а также признаки, включающие характеристику суспензии (свойства, концентрацию, крупность и плотность твердой фазы, свойства жидкой фазы, характер образующегося осадка и др.), условия работы, категорию исполнения аппарата по возможности обработки в нем взрывоопасных и токсичных веществ, конструкционный материал, степень механизации и автоматизации и др. Количественные признаки (например, рабочая температура, концентрация твердой фазы) разбиваются на подпризнаки с числовыми интервалами; качественные признаки (например, характер осадка) разбиваются на группы качественных подпризнаков (например, зернистый, липкий и др.). В информационной системе и опросных листах все признаки должны быть закодированы одинаково. Способность или неспособность аппарата данного типоразмера удовлетворить требованиям рассматриваемого подпризнака отмечается в таблице соответствующим знаком на пересечении строки и столбца (например, единицей или нулем).

Влияние каждого признака (подпризнака) на выбор аппарата неравнозначно, следовательно, и их совпадения следует оценивать по-разному. Например, характер и влажность образующегося осадка для патронных фильтров с гидросмывом осадка не играет столь большой роли, как для барабанных вакуум-фильтров, поэтому каждому признаку применительно к каждому фильтру присвоена своя степень соответствия по четырехбалльной системе оценки.

Для адекватного выбора аппарата имеет значение число несовпадений признаков различного уровня. Если несовпадение одного признака первого уровня полностью исключает возможность применения данного фильтра, то для такого же вывода требуется три несовпадения признаков второго уровня. Несовпадение признаков

четвертого уровня вызывает замечания рекомендательного характера.

Уровни важности признаков не всегда постоянны; они зависят от дополнительных признаков — сведений об опыте применения данного фильтра в аналогичных условиях и производствах или об экспериментальном подтверждении возможности его использования. В этом случае первый уровень важности заменяется вторым. Такие сведения, как взрывоопасные условия работы или токсичность обрабатываемых веществ, усиливают соответствующие признаки, переводя их со второго уровня важности на первый и т. д. Информационно-поисковая система включает также программу технологического расчета на основании данных, полученных лабораторным фильтрованием образца суспензии с использованием стандартной методики. Эти данные заказчик также включает в опросный лист.

Первым этапом является ввод в ЭВМ сведений опросного листа с числовыми значениями экспериментальных данных. В зависимости от поставленной задачи и полноты исходных данных выбирается один из трех возможных режимов поиска. Это либо поиск специального фильтра для данного продукта, либо поиск фильтра из числа типовых, либо проверка пригодности предварительно выбранного фильтра к условиям опросного листа.

Первый режим позволяет выбрать фильтр, специально разработанный для данного продукта или серийный фильтр, традиционно применяемый для этого продукта. Поиск производится по коду продукта, для которого предназначен аппарат. Для этого информационная база системы содержит перечень продуктов с их характеристиками, для которых накоплен достаточно надежный опыт использования фильтра определенного типа. При обнаружении в перечне кода продукта проводится анализ признаков пары «продукт—фильтр», таких, как характеристики суспензии или рабочие параметры. В случае несовпадения хотя бы одного из этих признаков (независимо от уровня важности) решение задачи направляется по каналу поиска типового фильтра. Совпадение основных признаков после проверки некоторых дополнительных признаков и подбора вспомогательного оборудования приводит к выработке положительного заключения.

В режиме поиска типового фильтра производится просмотр фильтров всех типоразмеров по каждому признаку, причем на каждом этапе просматриваемые фильтры сравниваются с лучшим на данный момент поиска. Критерием является меньшее число несовпадений признаков второго и третьего уровня. Проверка совпадений происходит в порядке значимости, т. е. первыми анализируются признаки первого уровня важности. Проводится также технологический расчет и расчет параметров фильтрования, результаты которых оцениваются как признаки второго уровня значимости. Если комбинации количества и уровней несовпадений признаков не выходят за установленные пределы, то вырабатывается поло-

жительное заключение и подбирается вспомогательное оборудование. В противном случае вырабатывается отрицательное заключение с изложением причин невозможности выбора фильтра для заданных условий.

Предусмотрен также режим проверки пригодности предварительно выбранного заказчиком фильтра для заданных условий работы. В этом случае система функционирует аналогично предыдущему режиму, за исключением того, что не производится просмотр всех фильтров, т. е. сокращается число операций. В случае непригодности фильтра для заданных условий можно осуществить поиск типового фильтра (с просмотром всех фильтров).

Использование системы автоматизированного выбора фильтра экономит значительное время работы квалифицированных специалистов. Аналогичная система для выбора центрифуг разработана и успешно применяется УкрНИИХИММашем. Описанную методологию можно использовать для оптимального выбора аппаратуры пылеочистки и других классов.

§ 3.2. ЦЕНТРИФУГИ

Один из распространенных способов разделения жидких неоднородных систем в процессах химической технологии — центрифугирование. Центрифугированием называют процесс механического разделения неоднородных систем в поле центробежных сил, создаваемых во вращающемся барабане центрифуги.

Методом центрифугирования достигается достаточно четкое и в то же время быстрое разделение суспензий и эмульсий в центробежном поле. В центрифугах разделяют самые разнообразные жидкие неоднородные системы: сырую нефть, суспензии поливинилхлоридной смолы, смазочные и растительные масла, смеси кристаллов солей с маточными растворами, каменноугольный шлам, суспензию крахмала, дрожжевую суспензию и др.

Центрифуги делят на два основных класса: осадительные и фильтрующие.

Осадительные центрифуги не вполне правильно иногда называют отстойными. Их отличительная конструктивная особенность — наличие барабана со сплошной (неперфорированной) стенкой. Разделение суспензии или эмульсии в такой центрифуге происходит осаждением (или всплыванием) взвешенных в жидкости твердых частиц или капель другой жидкости под действием центробежных сил. Осаждение частиц в центрифуге происходит так же, как в отстойнике, но со значительно большей скоростью.

Фильтрующие центрифуги, используемые только для разделения суспензий, имеют барабаны с перфорированной стенкой. Поверхность барабана изнутри обычно покрыта фильтровальной перегородкой (тканью или сеткой). Фильтрующие центрифуги являются по существу фильтрами, в которых движущая сила (разность давлений) создается под действием центробежных сил, действующих на вращающуюся в барабане жидкость.

По величине движущей силы центрифуги превосходят фильтр-прессы; если в последних рабочая разность давлений обычно не превышает 0,3—0,5 МПа, то в центрифугах она составляет 1—2 МПа. Значительно проще в центрифугах организовать тщательную промывку осадка и непрерывную или механизированную его выгрузку. Основное преимущество фильтрующих центрифуг — эффективная осушка осадка. Например, при отделении на центрифугах кристаллов солей от маточных растворов влажность осадка обычно не превышает 1—2 %, что недостижимо в фильтрах. Недостатки всех центрифуг — наличие вращающегося ротора и его опор, повышенный расход энергии на привод и ограниченная поверхность фильтрования или осаждения.

Основные параметры. Фактор разделения (критерий Фруда) характеризует степень интенсификации процесса в центрифуге по сравнению с аналогичным процессом в гравитационном поле. При этом осадительное центрифугирование сопоставляют с гравитационным отстаиванием, а центробежное фильтрование — с фильтрованием под гидростатическим давлением при одинаковых толщинах слоев суспензии.

Целесообразно определить фактор разделения как отношение движущих сил осаждения одиночной частицы в центрифуге и гравитационном отстойнике. В отстойнике частица осаждается под действием разности ее веса и выталкивающей силы, т. е. движущая сила $F_0 = mg - m_1g$, где m — масса частицы; m_1 — масса жидкости, вытесненной частицей; g — ускорение свободного падения.

Аналогично в центробежном поле движущая сила равна разности центробежной силы, действующей на частицу, и архимедовой центробежной силы, обусловленной действием центробежных сил на окружающую частицу жидкость:

$$F_{ц} = m\omega^2 r - m_1\omega^2 r,$$

где ω — угловая скорость; r — радиус вращения частицы (вместе с жидкостью и барабаном центрифуги).

Фактор разделения

$$K_p = F_{ц}/F_0 = \omega^2 r/g \quad (3.37)$$

показывает, во сколько раз ускорение (напряженность) центробежного поля $\omega^2 r$ превышает ускорение свободного падения. Как отношение однородных величин, фактор разделения — величина безразмерная.

Так как радиус r в формуле (3.37) не является постоянной величиной, в разных зонах барабана центрифуги фактор разделения имеет неодинаковые значения; поэтому различают номинальный и эффективный факторы разделения. Как характеристику конкретной конструкции центрифуги используют номинальный фактор разделения (максимально возможное его значение)

$$K_{p.н} = 2n^2 D, \quad (3.38)$$

где n — частота вращения ротора центрифуги, с^{-1} ; D — наибольший внутренний диаметр барабана, м.

Различают центрифуги тихоходные ($K_{p.н} < 1000$), нормальные ($1000 < K_{p.н} < 3500$) и скоростные или сверхцентрифуги ($K_{p.н} > 3500$).

Производительность осадительной центрифуги рассчитывают либо по действительной скорости осаждения частиц суспензии в барабане, либо по скорости гравитационного осаждения тех же частиц. Во втором случае для расчета используют индекс производительности центрифуги Σ — площадь проточного гравитационного отстойника, эквивалентного по производительности рассматриваемой центрифуге.

Производительность отстойника по суспензии Q_0 равна произведению его площади S_0 на скорость гравитационного осаждения v_0 частиц заданного граничного размера (более мелкие частицы уносятся с осветленной жидкостью), т. е. $Q_0 = S_0 v_0$. Аналогично производительность центрифуги $Q_{ц}$ равна произведению площади поверхности жидкости в ее барабане $S_{ц} = 2\pi r_{ж} L$ (где $r_{ж}$ и L — радиус и длина поверхности жидкости в барабане центрифуги) на скорость осаждения таких же частиц в центробежном поле v_r , т. е. $Q_{ц} = S_{ц} v_r = 2\pi r_{ж} L v_r$. Из условия $Q_{ц} = Q_0$ следует: $\Sigma = S_0 = S_{ц} v_r / v_0$.

Если и в центрифуге, и в отстойнике сохраняется ламинарный режим обтекания осаждающихся частиц, то отношение скоростей осаждения равно эффективному фактору разделения: $v_r / v_0 = \omega^2 r_{ж} / g = K_p$; следовательно, $\Sigma = S_{ц} K_p$.

Характеризуя центрифугу конкретной конструкции, принимают $r_{ж} = 0,5D$ и номинальный индекс производительности вычисляют по формуле

$$\Sigma_n = 2\pi n^2 D^2 L. \quad (3.39)$$

При известных индексе производительности Σ и скорости v_0 гравитационного осаждения теоретическая производительность центрифуги, как производительность эквивалентного отстойника,

$$Q_T = \Sigma v_0.$$

Здесь не учтен ряд факторов, снижающих производительность, таких, как отставание во вращении жидкости от барабана, неравномерность ее течения в продольном направлении, неоднородность формы частиц. Производительность уменьшают также вихри в местах подачи и слива жидкости, перемешивающее действие шнека и других устройств для выгрузки осадка, вибрация ротора. В связи с этим действительная производительность Q_d обычно меньше теоретической, что учитывают опытным коэффициентом $\zeta_{ц}$:

$$Q_d = \zeta_{ц} Q_T. \quad (3.40)$$

Коэффициент эффективности обычно существенно меньше единицы; так, для трубчатых сверхцентрифуг он примерно равен 0,375, для шнековых осадительных центрифуг — 0,212.

Для фильтрующих центрифуг индекс производительности также рассчитывают по формуле (3.39). В этом случае он не имеет столь очевидного физического смысла, но позволяет сравнивать центрифуги.

Центрифуги с пульсирующей выгрузкой осадка. Из фильтрующих центрифуг непрерывного действия наиболее часто применяют центрифуги с пульсирующей выгрузкой осадка (типа ФГП). Они предназначены для разделения суспензий объемной концентрацией более 20 %, содержащих крупно- и среднезернистую твердую фазу с частицами размером более 0,1 мм. В химической промышленности пульсирующие центрифуги применяют для разделения суспензий с кристаллической твердой фазой. Они эффективны также при обработке волокнистых материалов, для которых не допускается разрушение волокон или волокна обладают способностью прилипать к рабочим деталям.

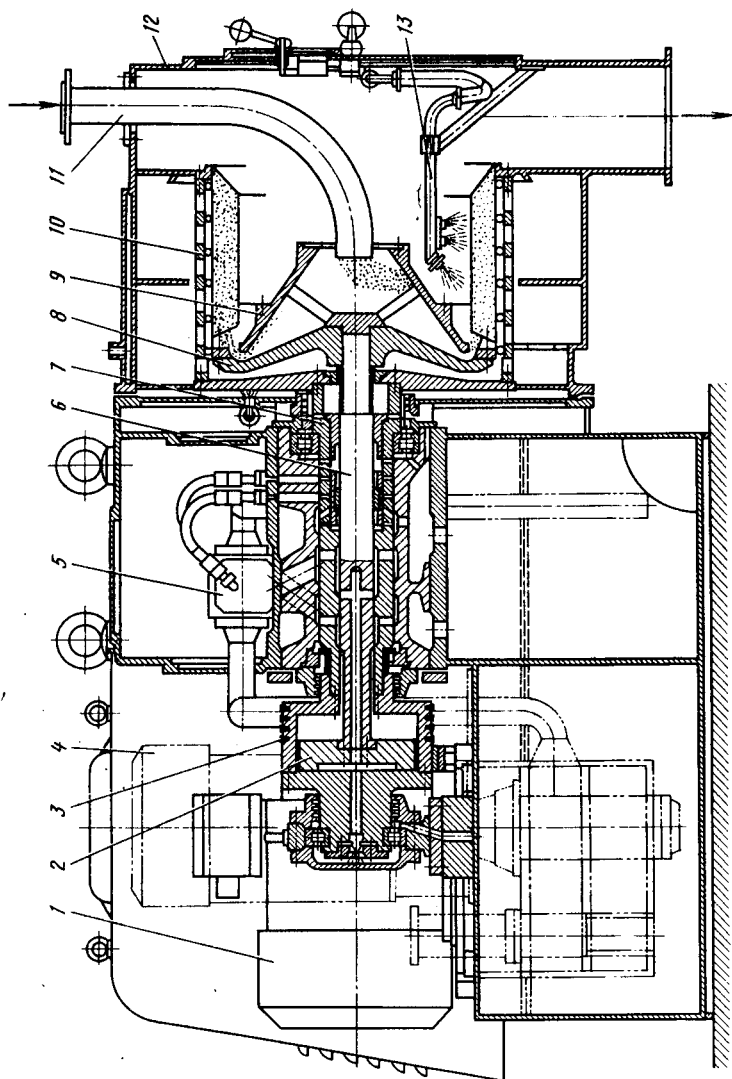
Центрифуги этого типа обеспечивают эффективную промывку осадка и раздельный отвод фильтрата и промывочной жидкости. Главные преимущества пульсирующих центрифуг: непрерывность процесса, высокая производительность при низком удельном расходе энергии и металла, относительно небольшое дробление твердой фазы, хорошая степень обезвоживания осадка и эффективная его промывка. Недостаток пульсирующих центрифуг — повышенный унос твердой фазы с фильтратом.

Все выпускаемые в настоящее время фильтрующие центрифуги с пульсирующей выгрузкой осадка можно разделить на одно-, двух- и многокаскадные. Одно- и двухкаскадные центрифуги — это машины общего назначения. Их выпускают с одно- и двусторонней выгрузкой осадка (сдвоенные). Центрифуги с ротором, имеющим больше двух каскадов, являются специализированными конструкциями.

Однокаскадные центрифуги наиболее просты и дешевы, но менее эффективны, чем двухкаскадные. Диаметр ротора 160—1400 мм.

Центрифуга ФГП (рис. 3.14) имеет барабан 10, который укреплен на конце полого вала 7, приводимого во вращение электродвигателем 1 через клиноременную передачу со шкивом 3. В обечайку ротора запрессовано щелевое сито. Внутри барабана расположен поршень-толкатель 8, который кроме вращения совершает возвратно-поступательное движение для перемещения осадка по щелевому сити барабана под давлением масла на поршень 2, соединенный штоком 6 с поршнем-толкателем. Конический питатель 9 служит для равномерной подачи суспензии в центрифугу из загрузочной трубы 11. В крышке кожуха 12 установлена труба 13 для ввода промывной жидкости. Движением толкателя управляет гидравлическая система, включающая масляный насос с электродвигателем 4 и механизм управления 5. Толщину слоя осадка на поверхности сита регулируют с помощью сменного кольца, закрепленного на коническом питателе.

Рис. 3.14. Однока-
скадная центрифуга с
пульсирующей вы-
грузкой осадка



Характерная особенность работы пульсирующих центрифуг — поступление суспензии при обратном ходе поршня-толкателя на небольшой участок сита, очищаемый толкателем от ранее образовавшегося осадка. Скорость фильтрования при этом ходе поршня максимальна. При прямом ходе толкателя суспензия попадает на уже образовавшийся слой осадка и фильтрация постепенно замедляется. Интенсивный унос твердой фазы с фильтратом происходит именно во время обратного хода (при фильтровании через чистое сито), поэтому возможность обработки той или иной суспензии определяется в первую очередь размерами отверстий щелевых сит. Суспензии, относящиеся к мелкокристаллическим, а также к аморфным высокодисперсным (красители, гидроксиды металлов), нельзя обрабатывать на центрифугах этого типа.

Для обеспечения удовлетворительной работы центрифуг с пульсирующей выгрузкой осадка концентрация твердой фазы в суспензии и скорость подачи ее в центрифугу должны быть постоянны; в противном случае получаемый осадок будет иметь меняющиеся влажность и степень промывки.

Следует учитывать, что суспензия при малой концентрации не успевает отфильтровываться и попадает под регулирующее кольцо, что может привести к вымыванию осадка и попаданию жидкости в бункер готового продукта. Суспензия высокой концентрации отличается меньшей текучестью. В результате возникает вибрация центрифуги из-за неравномерного распределения осадка по окружности барабана. Таким образом, для каждой обрабатываемой суспензии существует два предела концентрации: верхний и нижний. Превышение или занижение допустимого предела концентрации нарушает нормальную работу центрифуги.

Экспериментальное изучение зависимости между длиной L барабана и толщиной h слоя осадка показало, что для каждого материала существует определенное допускаемое отношение L/h . Это отношение соответствует условию отсутствия вспучивания осадка:

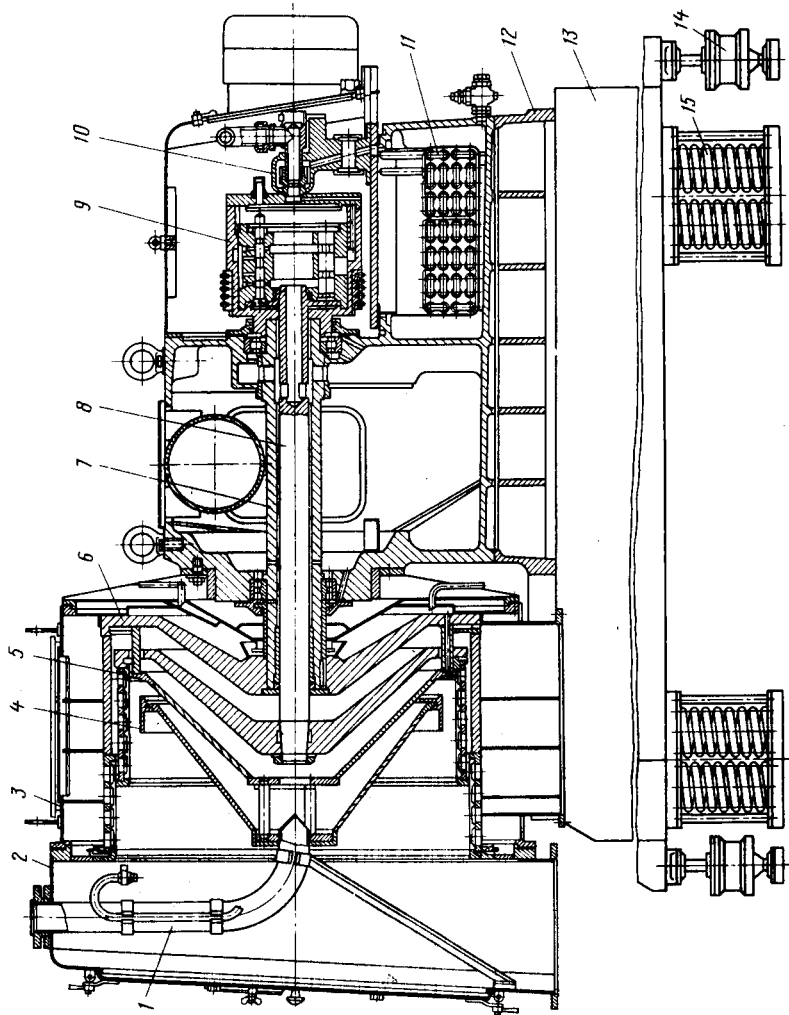
$$L/h \leq \alpha \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) / f, \quad (3.41)$$

где $\alpha = 0,6 \dots 0,7$ — поправочный коэффициент, учитывающий зависимость угла φ от влажности и плотности осадка в процессе центрифугирования; φ — угол внутреннего трения в осадке; f — коэффициент трения осадка по поверхности сита барабана.

Попытки увеличить рабочую длину фильтрующего барабана для достижения хорошей осушки осадка без его вспучивания привели к созданию двухкаскадных центрифуг с пульсирующей выгрузкой. По общему устройству и принципу действия (рис. 3.15) они аналогичны однокаскадным; отличие относится лишь к ротору. Последний состоит из двух фильтрующих барабанов, вставленных один в другой с возможностью продольного относительного перемещения. Барабан второго каскада и поршень-толкатель за-

Рис. 3.15. Двухкасная центрифуга типа ФП:

1 — питающая труба; 2 и 3 — передний и средний кожухи; 4 — уравнивающее кольцо; 5 — сбрасывающее кольцо; 6 — ротор; 7 — вал; 8 — шток-толкатель; 9 — гидравлический цилиндр; 10 — торцовая муфта; 11 — масляный холодильник; 12 — станция; 13 — основание; 14 — демпфер; 15 — вибро-изолятор



креплены на конце полого вала 7 и неподвижны в осевом направлении. Барабан первого каскада насажен на шток 8 и совершает вместе с ним продольное возвратно-поступательное движение. Торец барабана первого каскада, снабженный съемным кольцом, обеспечивает движение осадка по ситам второго каскада. По ситам первого каскада осадок движется, наталкиваясь на неподвижный в осевом направлении поршень-толкатель. Таким образом, при возвратно-поступательном движении штока осадок движется попеременно по ситам первого и второго каскадов.

Изучение работы двухкаскадных центрифуг показало, что, при одинаковом с однокаскадными машинами факторе разделения, на них может быть достигнута производительность на 10—25 % выше. При уменьшении длины отдельного каскада соответственно уменьшается и длина слоя осадка, что позволяет интенсифицировать процесс его отжима уменьшением толщины слоя или увеличением фактора разделения в 1,5—2,0 раза по сравнению с его значением для однокаскадных центрифуг. Двухкаскадные машины характеризуются также меньшим расходом электроэнергии на выгрузку осадка. Эти и некоторые другие преимущества двухкаскадных центрифуг способствовали их быстрому внедрению в химическую и другие отрасли промышленности.

Отечественной промышленностью изготавливаются также четырехкаскадные центрифуги, используемые преимущественно в пищевой промышленности, и шестикаскадные. Принципиально многокаскадные центрифуги аналогичны двухкаскадным.

Центрифуги со шнековой выгрузкой осадка. Современные центрифуги непрерывного действия со шнековой выгрузкой осадка имеют ротор конической или цилиндро-конической формы. Внутри ротора расположен цилиндрический, конический или ступенчатый барабан, несущий спиральную ленту (шнек). Выгрузку осадка с помощью шнека используют в осадительных, фильтрующих, а также в комбинированных (осадительно-фильтрующих) центрифугах.

Осадительные центрифуги со шнековой выгрузкой осадка предназначены для разделения суспензий с нерастворимой твердой фазой; их применяют для обезвоживания кристаллических и зернистых продуктов, классификации материалов по крупности и плотности, а также для осветления суспензий. Влажность осадка приблизительно такая же, как после фильтрации на барабанных вакуум-фильтрах. Широкое распространение осадительных центрифуг объясняется универсальностью этих машин. Их успешно используют для разделения суспензий с размером частиц 1—0,005 мм и объемной концентрацией 1—40 %.

В зависимости от направлений движения в роторе осадка и разделяемой суспензии различают центрифуги противоточные (осадок движется навстречу потоку суспензии) и прямоточные (направления движения осадка и суспензии совпадают). Роторы центрифуг могут быть горизонтальными или вертикальными, иметь

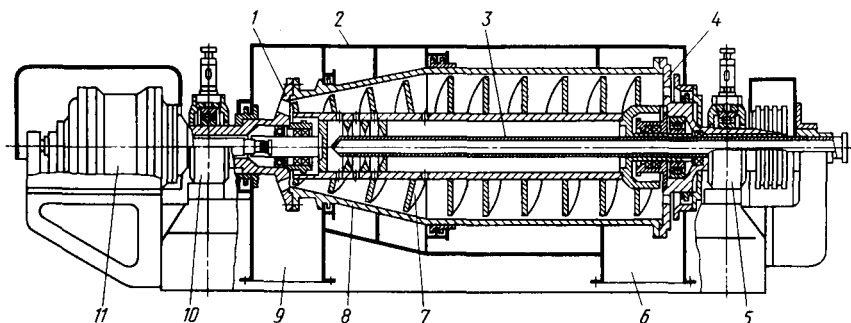


Рис. 3.16. Горизонтальная противоточная осадительная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка

коническую или цилиндро-коническую форму. Горизонтальные центрифуги изготавливают преимущественно с ротором, помещенным между опорами, реже — с консольным ротором; вертикальные центрифуги имеют, как правило, верхнюю подвеску ротора.

Наиболее широко распространены горизонтальные противоточные центрифуги с цилиндро-коническим ротором. Такую конструктивную схему машины считают стандартной для центрифуг этой группы. Центрифуга (рис. 3.16) состоит из цилиндро-конического сплошного барабана 8, помещенного в кожух 2 и опирающегося цапфами крышек 1 и 4 на подшипниковые узлы 5 и 10. Суспензия через неподвижную трубу 3 подводится во внутреннюю полость барабана шнека 7, где вращается с частотой, близкой к частоте вращения ротора, и через отверстия в шнековом барабане поступает в рабочий барабан 8. Далее она движется вдоль стенок барабана к сливным окнам, расположенным в плоской крышке 4. Частицы твердой фазы под действием центробежных сил оседают на стенке ротора и перемещаются шнеком 7 в зону осушки осадка, где он уплотняется, освобождаясь от части жидкости, находящейся в его порах. В конце зоны осушки осадок выбрасывается в сборник 9 через разгрузочные окна в крышке 1.

Суспензия подается на границу между зонами осушки и осаждения, что достигается перемещением трубы 3 в соответствующую секцию барабана шнека, ограниченную кольцевыми перегородками.

Фугат поступает через окна в крышке 4 в камеру 6 кожуха, откуда отводится по назначению. Уровень жидкости внутри барабана зависит от степени открытия окон в крышке 4.

Для перемещения твердого осадка барабан и шнек вращаются с различными, но близкими частотами. Различие частот вращения достигается применением планетарного или специального редуктора 11, являющегося ответственным узлом центрифуги.

В зависимости от назначения осадительные центрифуги можно подразделить на три группы: обезвоживающие, универсальные и осветляющие. Обезвоживающие центрифуги предназначены для разделения высококонцентрированных суспензий с твердыми частицами размером не менее 25 мкм. Для этих машин характерна высокая производительность по осадку и сравнительно низкая влажность последнего. Фактор разделения обычно $K_p < 2000$, отношение длины барабана к его диаметру менее 1,7. Промывка осадка предусмотрена в конструкции практически только обезвоживающих центрифуг.

Универсальные осадительные центрифуги предназначены для разделения суспензий малой и средней концентраций с частицами твердой фазы размером более 10 мкм. При работе этих центрифуг получают сравнительно чистый фугат и осадок с небольшой влажностью. Фактор разделения 2000—3000, отношение длины барабана к диаметру 1,7—2,2.

Осветляющие центрифуги предназначены для очистки низкоконцентрированных суспензий от высокодисперсной твердой фазы. Эти машины характеризуются высоким фактором разделения (более 2500), отношением длины барабана к диаметру более 2,2, высокой производительностью по суспензии и получением чистого фугата.

Кроме горизонтальных противоточных применяют также горизонтальные прямоточные и вертикальные противоточные осадительные центрифуги.

Фильтрующие центрифуги со шнековой выгрузкой осадка предназначены для разделения суспензий с крупнозернистой твердой фазой, в которой преобладают частицы размером более 0,15 мм. Возможна также обработка суспензий с коротковолокнистой твердой фазой. Наиболее эффективна работа центрифуг при объемной концентрации суспензии более 40 %.

Фильтрующие центрифуги со шнековой выгрузкой осадка можно разделить на две группы: быстроходные (производительность по осадку 0,3—20 т/ч, фактор разделения до 3000) и тихоходные крупнотоннажные (производительность по осадку 35—100 т/ч, фактор разделения 150—800). Машины первой группы широко используют в химической, второй — в угледобывающей промышленности.

Из фильтрующих центрифуг со шнековой выгрузкой осадка наиболее распространены центрифуги с вертикальным расположением оси ротора (ФВШ), так как они освоены значительно раньше горизонтальных машин. Конструктивная схема центрифуги, приведенная на рис. 3.17, считается стандартной для машин этого типа; привод — от электродвигателя через клиноременную или коническую зубчатую передачу.

Центрифуга ФВШ состоит из корпуса 2, перфорированного конического барабана 3, вращающегося на полом валу 5, конического шнека 4, который закреплен на сплошном валу 6, получа-

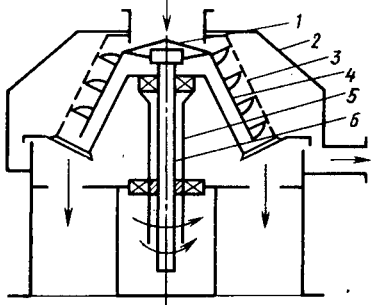


Рис. 3.17. Схема вертикальной шнековой фильтрующей центрифуги

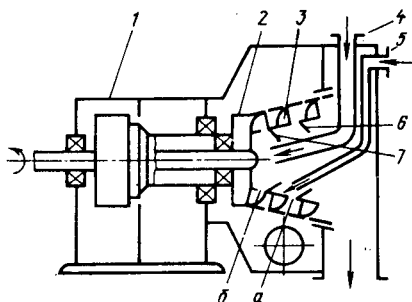


Рис. 3.18. Схема горизонтальной фильтрующей центрифуги со шнековой выгрузкой осадка

ющем вращение от полого вала через специальный редуктор. Суспензия подается по питательной трубе на распределительный диск 1 и отбрасывается к стенке барабана, где твердая фаза отделяется от жидкости.

Расширение производства горизонтальных фильтрующих центрифуг со шнековой выгрузкой осадка (ФГШ) объясняется их высокой эксплуатационной надежностью по сравнению с вертикальными машинами (редуктор вынесен из рабочей зоны и облегчен доступ к основным узлам центрифуги). Горизонтальные центрифуги более перспективны, чем вертикальные, несмотря на то, что они занимают большую площадь и имеют худшие динамические характеристики (центр тяжести ротора находится за опорами).

Центрифуга типа ФГШ (рис. 3.18) состоит из корпуса 1, в подшипниковых опорах которого установлен вал. На консольном конце вала закреплен конический фильтрующий барабан 2. Внутри барабана размещен шнек 3, на поверхности корпуса которого имеются отверстия а и б для прохождения соответственно суспензии и промывной жидкости. Внутри барабана закреплены приемные воронки 6 и 7. Суспензия и промывная жидкость подаются по трубам соответственно 4 и 5. К машинам этого типа относится герметизированная центрифуга ФГШ-403К-2, применяемая в производстве полипропилена.

Центрифуги с инерционной выгрузкой осадка. Основное преимущество центрифуг непрерывного действия с инерционной выгрузкой осадка — отсутствие каких-либо выгружающих устройств. Осадок выгружается из них под действием составляющих инерционных центробежных и вибрационных сил. В связи с этим инерционные центрифуги подразделяют на два класса: центрифуги с выгрузкой осадка под действием центробежных сил инерции; центрифуги с выгрузкой осадка под действием составляющей центробежной силы и сил инерции, возникающих в осадке при вибрации ротора (вибрационные).

Идея использования действия центробежных сил на осадок, находящийся в барабане, для его выгрузки впервые предложена русскими изобретателями Г. Пионтковским, И. Щениовским в 1889 г. Она заключалась в использовании для перемещения и выгрузки осадка продольной составляющей центробежной силы, возникающей в коническом барабане (на его внутренней поверхности). Под действием этой составляющей осадок движется по поверхности барабана от узкого края к широкому подобно скатыванию груза по наклонной плоскости. Анализ сил, действующих на частицу осадка (при условии $\omega^2 r \gg g$), позволил вывести формулу для угла α наклона образующей барабана к оси, необходимого для движения осадка:

$$\operatorname{tg} \alpha \geq f, \quad (3.42)$$

где f — коэффициент трения осадка по поверхности барабана.

Так как стенка барабана выполнена с мелкими отверстиями или покрыта изнутри щелевым ситом, осадок или шлам во время движения обезживается.

Три опытные центрифуги, сконструированные упомянутыми изобретателями, были испытаны на сахарных заводах. Из-за отсутствия налаженного производства сит эти центрифуги не нашли должного распространения в России. Однако с 1956 г. они выпускаются зарубежными фирмами. Фактор разделения этих центрифуг доведен на наибольшем диаметре до 2000. Успешная работа центрифуг в большой степени связана с использованием в них щелевых сит со щелями шириной 0,04; 0,05 и 0,09 мм. В результате заметно уменьшился унос твердой фазы фугатом.

Центрифуга с коническим барабаном и винтообразным направляющим устройством для осадка, выпускаемая в ФРГ, имеет примерно ту же область применения, что и скоростные фильтрующие центрифуги со шнековой выгрузкой осадка.

В кожухе 4 (рис. 3.19) на валу 1 размещен конический перфорированный барабан 3, внутренняя поверхность которого покрыта листовым ситом. Внутри барабана коаксиально с ним установлено направляющее устройство 2. Оно состоит из пяти секций, образующих с помощью расположенных на наружных поверхностях лопастей 5 каналы для движения суспензии. Барабан и направляющее устройство вращаются с одинаковыми частотами, что является главным отличительным признаком от центрифуги со шнековой выгрузкой осадка. Угол наклона образующей барабана к оси вращения 30—35°, т. е. больше угла трения осадка о сито. Предусмотрена возможность промывки осадка. В центрифуге применены листовые или щелевые колосниковые сита, специально разработанные для машины; минимальный размер отверстий листовых сит 20 мкм, колосниковых 50 мкм.

Существенный недостаток центрифуг с центробежной выгрузкой осадка — трудность регулирования времени пребывания суспензии в барабане. Этого недостатка лишена центрифуга с виб-

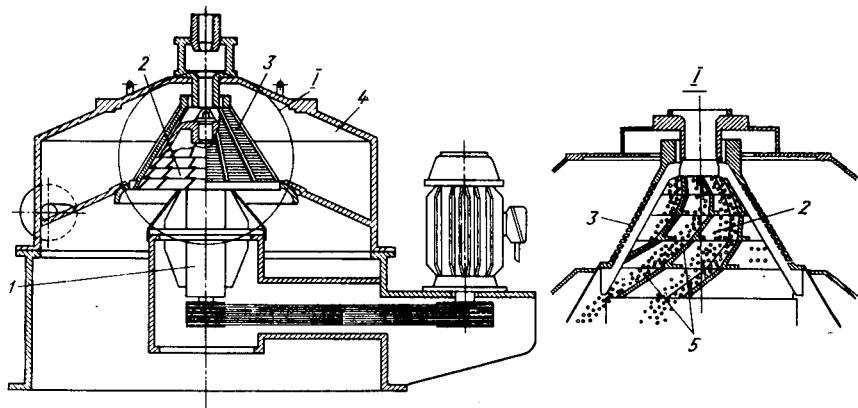


Рис. 3.19. Центрифуга с центробежной выгрузкой осадка и винтообразным направляющим устройством

рационной выгрузкой осадка, принцип работы которой предложил Л. Н. Мандрыко. Эти центрифуги имеют также конические фильтрующие барабаны, но в них угол наклона образующей к оси меньше угла трения ($\operatorname{tg} \alpha < f$). Движению влажного осадка, кроме продольной составляющей центробежной силы, способствуют силы инерции осадка, для создания которых барабану с осадком сообщаются колебания в направлении его оси. Движение осадка прерывистое: он движется по барабану (ситу) в течение тех полупериодов колебаний, когда сам барабан движется в направлении от широкого края к узкому. В моменты противоположного движения осадок относительно барабана не перемещается, т. е. движется вместе с барабаном.

Для движения частицы осадка необходимо, чтобы сумма действующих на нее продольной составляющей центробежной силы и средней силы инерции за соответствующий полупериод была не меньше силы трения. На основании этого условия выведена формула для расчета необходимого угла α между образующей барабана и его осью:

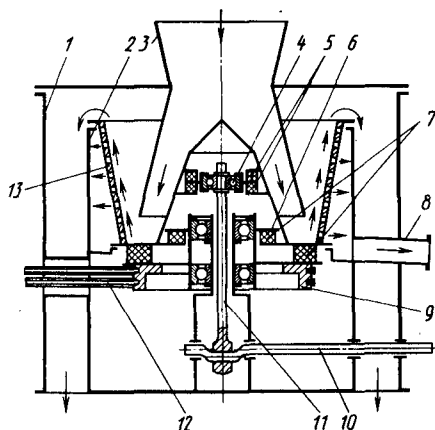
$$\operatorname{tg} \alpha \geq (f\omega^2 r - 0,64a\Omega^2)/(\omega^2 r + 0,64fa\Omega^2), \quad (3.43)$$

где f — коэффициент трения осадка по барабану (ситу); ω — угловая скорость ротора центрифуги, рад/с; r — средний радиус барабана, м; a — амплитуда продольных колебаний барабана, м; Ω — угловая частота продольных колебаний, рад/с.

Изменяя амплитуду или частоту продольных колебаний, можно в некоторых пределах регулировать скорость движения осадка и время его пребывания в барабане. Сравнительно тихходные вибрационные центрифуги применяют в основном для обезвоживания шламов с частицами размером не менее 0,2 мм.

Ротор центрифуги с фильтрующим барабаном 13 (рис. 3.20) получает вращение через клиновые ремни 12 от электродвигателя,

Рис. 3.20. Схема центрифуги с вибрационной выгрузкой осадка



установленного на раме центрифуги. От кривошипного вала 10 барабану центрифуги дополнительно сообщается колебательное движение вдоль его оси. Шатун 11 связан с барабаном резиновыми элементами 5. Между днищем барабана и шкивом 9, а также между днищем и кольцом 6 расположены два ряда упругих элементов 7. Верхний конец шатуна 11 зафиксирован во внутреннем кольце сферического роликового подшипника 4. Наружное кольцо подшипника связано с барабаном центрифуги резиновыми элементами 5. Барабан центрифуги представляет собой усеченный конус, обращенный широким основанием вверх. Суспензия подается через загрузочное устройство 3 в нижнюю часть барабана, где раскручивается и движется вверх. Вибрация способствует не только продвижению осадка, но и лучшему отделению жидкой фазы от твердой. Достигнув верхнего края барабана, осадок выбрасывается в пространство между внутренним 2 и внешним 1 кожухами и выгружается. Фильтрат, пройдя осадок, сита и стенки барабана, попадает во внутренний кожух, откуда выводится из центрифуги через штуцер 8.

§ 3.3. СЕПАРАТОРЫ

Сепараторами называют осадительные сверхцентрифуги (т. е. скоростные центрифуги), предназначенные для разделения стойких эмульсий и осветления весьма тонких низкоконцентрированных суспензий с частицами размерами от 0,1 мкм. Для этих целей используют и трубчатые сверхцентрифуги.

В отличие от трубчатых центрифуг сепараторы имеют сравнительно короткие барабаны, обычно цилиндро-конической формы, и несколько меньший фактор разделения K_p ; для сепараторов $K_p = 6000 \dots 10\,000$, для трубчатых центрифуг $K_p = 12\,000 \dots 17\,000$.

Барабан сепаратора обычно установлен на верхний консольный конец вала и приводится во вращение от горизонтального вала привода, расположенного под барабаном, через повышающую червячную передачу, погруженную для охлаждения и уменьшения потерь в масляную ванну. Эта компоновка сохранилась в основном со времени изобретения молочного сепаратора в конце прошлого столетия шведским инженером Лавалем.

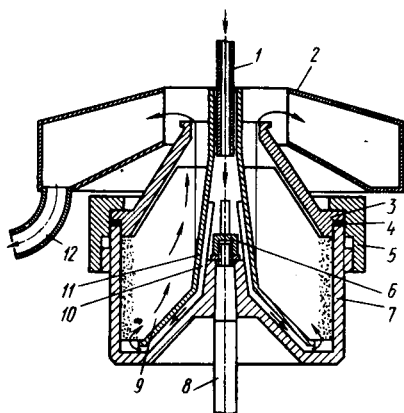


Рис. 3.21. Однокамерный осветляющий сепаратор

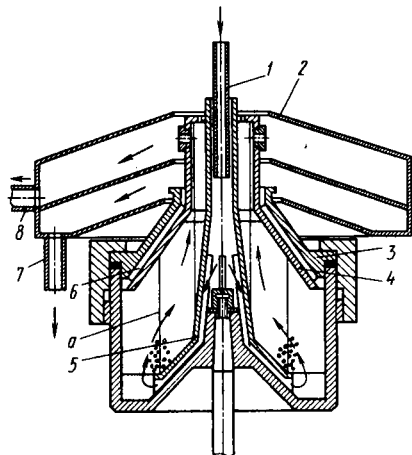


Рис. 3.22. Однокамерный разделяющий сепаратор

Современные конструкции сепараторов имеют обычно гибкие валы, опирающиеся на упругие опоры. Вследствие этого их роторы являются самобалансирующимися, что позволяет увеличить частоту вращения и достичь более качественного разделения жидких смесей.

В зависимости от назначения различают сепараторы разделяющие и осветляющие: первые предназначены для разделения стойких эмульсий и имеют устройства для раздельного отвода легкой и тяжелой жидкостей после сепарации; вторые используют для осветления суспензий, причем осадок накапливается в барабане и либо его удаляют из сепаратора после остановки и разборки ротора (сепараторы с ручной выгрузкой), либо осадок автоматически выгружается на ходу (саморазгружающиеся сепараторы).

Как разделяющие, так и осветляющие сепараторы в зависимости от внутреннего устройства барабана можно подразделить на однокамерные, тарельчатые и многокамерные.

Барабан однокамерного осветляющего сепаратора (рис. 3.21) состоит из цилиндрического основания 7 с вогнутым днищем и внутренней ступицей, конической крышки 3 и загрузочной воронки 11. Для облегчения (ускорения) сборки и разборки барабана, необходимых для периодического удаления из него осадка, его детали скреплены резьбовым затяжным кольцом 5 (накидная гайка большого диаметра), соединяемым с наружной резьбой основания. Герметичность соединения обеспечивает уплотнительное кольцо 4. Ступица барабана установлена на верхний конический конец вала (веретена) 8 сепаратора и закреплена глухой гайкой 6. Для обеспечения вращения поступающей в загрузочную воронку жидкости имеются ребра 10. Одинаковые частоты вращения жид-

кости и барабана обеспечивают установленные в рабочей полости барабана три или четыре радиальные перегородки 9.

Осветляемая жидкость (разбавленная суспензия) поступает по трубе 1 в загрузочную воронку, а затем в нижнюю периферийную часть рабочей полости барабана. Заполнив полость до края отверстия в конической крышке, жидкость переливается через край отверстия (борт) и центробежными силами выбрасывается в сборник (ловушку) 2, откуда отводится самотеком через патрубок 12. Проходя примерно в осевом направлении, жидкость освобождается от взвешенных твердых частиц, оседающих под действием центробежных сил и образующих осадок на внутренней цилиндрической поверхности барабана (частично на крышке). После накопления значительного объема осадка (ухудшения чистоты фугата) подачу жидкости прекращают, сепаратор останавливают, барабан разбирают (не снимая с вала) и удаляют из него осадок (обычно промывкой).

Разделяющий (рис. 3.22) однокамерный сепаратор в основном аналогичен осветляющему; конструктивные отличия связаны с необходимостью раздельного отвода отсепарированных легкой и тяжелой жидкостей. Между крышкой барабана и загрузочной воронкой установлена воронкообразная перегородка, называемая обычно разделительной тарелкой и снабженная на наружной поверхности ребрами 6. Между крышкой 3 и тарелкой 4 образуется кольцевой канал, соединяющий область у стенок барабана с горловиной крышки и служащий для отвода тяжелой жидкости.

Поступающая по трубе 1 в загрузочную воронку 5 эмульсия через канал между воронкой и днищем основания поступает в среднюю часть сепарационного пространства в барабане. В результате сепарации в барабане образуются два слоя жидкости с поверхностью раздела α между ними. У стенки барабана располагается слой тяжелой жидкости, а ближе к оси вращения — слой легкой жидкости. По мере подачи эмульсии отсепарированная тяжелая жидкость из пристенного слоя поступает по кольцевому каналу между крышкой 3 и разделительной тарелкой 4 в горловину крышки и далее в нижнюю полость сборника 2, откуда отводится по штуцеру 7. Одновременно легкая жидкость из поверхностного слоя перетекает в горловину разделительной тарелки, из ее боковых отверстий (снабженных втулками или соплами) поступает в верхнюю полость сборника и отводится через штуцер 8. Радиусы слива легкой и тяжелой жидкостей рассчитывают так же, как для центробежных экстракторов, с учетом, что поверхность α раздела фаз должна располагаться в средней части сепарационного пространства.

Отсепарированные жидкости отводятся из разделяющего сепаратора непрерывно. Однако следует учитывать, что поступающая на разделение эмульсия содержит обычно кроме двух жидких фаз некоторое количество (часто очень малое) взвешенных твердых частиц, т. е. является, строго говоря, трехфазной системой.

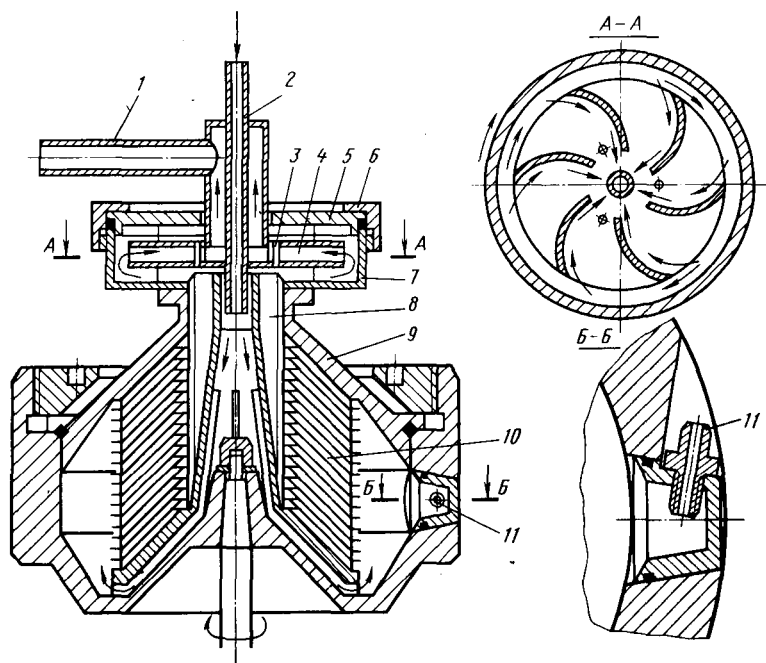


Рис. 3.23. Осветляющий тарельчатый сепаратор с напорным диском и выгрузкой шлама через сопла

Твердая фаза постепенно оседает на стенке барабана, образуя осадок, поэтому разделяющие барабаны конструируют быстро-разборными для облегчения периодической очистки от осадка.

В 1889 г. Бехтольсгейм предложил вставку для молочного сепаратора, позволяющую значительно повысить эффективность разделения или увеличить производительность сепаратора при сохранении качества разделения. Вставка представляет собой пакет тонкостенных тарелок в виде усеченных конусов с углом между образующей и радиусом $40\text{--}60^\circ$. Ось тарелок совпадает с осью барабана. Тарелки наложены одна на другую с зазором между ними $0,4\text{--}2,0$ мм. Зазор и угол наклона выбирают в зависимости от свойств разделяемой суспензии или эмульсии и необходимого качества разделения. Для сохранения зазора на поверхности тарелок выполнены выступы (шпы) или ребра (6 или 8 на каждой тарелке), направленные по образующим (высота ребер равна зазору).

Пакет тарелок делит поток суспензии или эмульсии в барабане сепаратора на ряд тонких слоев. При этом во много раз уменьшается путь осаждения частиц суспензии или капель эмульсии и увеличивается поверхность осаждения. В зазорах между тарелками обеспечивается ламинарный режим жидкости, т. е. исклю-

чается возникновение вихрей, размывающих образовавшийся осадок. Расположение тарелок под определенным углом обеспечивает упорядочение потоков легкого и тяжелого компонентов. Если тарелки обращены большим основанием вниз, то тяжелый компонент центробежной силой прижимается к нижней поверхности тарелки и скользит по ней к периферии, а легкий — скользит по верхней поверхности расположенной ниже тарелки к оси ротора. Это способствует увеличению эффективности сепаратора.

Конструктивно тарельчатые сепараторы (рис. 3.23) аналогичны однокамерным. Пакет тарелок 10 надет на горловину загрузочной воронки и зажат в осевом направлении между раструбом воронки и конической крышкой барабана (в осветляющих сепараторах) или разделительной тарелкой (в разделяющих сепараторах). Наружная поверхность горловины загрузочной воронки, называемой в этом случае тарелкодержателем 8, имеет цилиндрическую форму с продольными пазами переменной глубины, служащими для отвода легкого компонента. Осветляемая жидкость (суспензия) из внутренней полости тарелкодержателя 8 подается к периферийной части пакета тарелок 10 и поступает (разделившись на параллельные потоки) в межтарельчатые зазоры. В зазорах происходит центробежное осаждение твердых частиц (более тяжелых, чем жидкость) на нижней поверхности тарелок. Осевшие частицы скользят по поверхности тарелок к периферии, двигаясь навстречу жидкости. Для этого необходимо, чтобы угол (обычно 35—45°) между образующей тарелки и осью вращения барабана был больше угла трения частиц о тарелку. Достигнув края пакета тарелок, частицы поступают в пространство между пакетом и стенкой барабана, где накапливаются в виде осадка. Осветленная жидкость из межтарельчатых зазоров поступает по пазам тарелкодержателя в горловину крышки барабана.

Отсепарированная жидкость отводится напорным диском следующим образом. По пазам тарелкодержателя 8 из горловины крышки 9 барабана жидкость перетекает в напорную камеру 7, закрепленную на крышке. Внутри камеры 7, закрытой крышкой 5 с затяжным кольцом 6, помещен напорный диск 4. Он состоит из двух плоских дисков с центральными отверстиями и расположенных между дисками лопастей. Отверстие нижнего диска закрыто трубой 2 для подачи суспензии. Верхний диск имеет отверстие большего диаметра и снабжен патрубком. Для сообщения центральной части барабана с атмосферой напорный диск снабжен трубками 3. Поступающая в камеру 7 жидкость образует у ее стенки кольцевой слой, вращающийся вместе с камерой. Из этого слоя жидкость направляется лопастями напорного диска в его центральную часть, поступает в патрубок диска и отводится через боковой штуцер 1.

Осветляющие сепараторы с ручной периодической выгрузкой, требующей разборки барабана, предназначены для суспензий с малой концентрацией твердой фазы. Для более концентрирован-

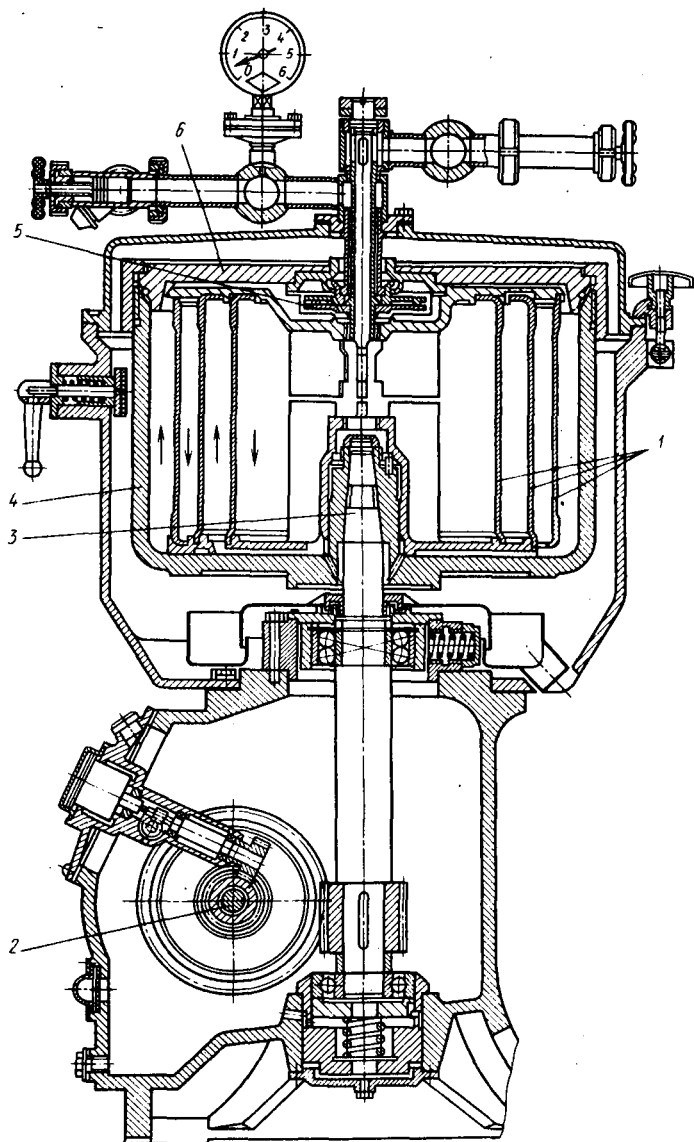


Рис. 3.24. Четырехкамерный сепаратор

ных суспензий разработаны сепараторы с выгрузкой осадка из шламового пространства на ходу. Осадок удаляется с некоторым количеством жидкости (в виде шлама) под действием центробежных сил либо непрерывно через постоянно открытые сопла 11 (см. рис. 3.23), либо через периодически открываемые отверстия или

щели. Тем не менее такие сепараторы также требуют периодической разборки и чистки, например при забивании шламовых сопел, накоплении отложений на тарелках или в других случаях; поэтому конструкция барабана должна обеспечивать возможность быстрой разборки и сборки.

В разделяющих сепараторах эмульсия подводится в среднюю часть пакета тарелок, для чего тарелки снабжают отверстиями (от трех до восьми по окружности) и собирают в пакет таким образом, чтобы они совпадали, образуя вертикальные каналы. Отсепарированная жидкость может отводиться как в однокамерном сепараторе (см. рис. 3.22) или двумя напорными дисками.

Многокамерные сепараторы используют для осветления низкоконцентрированных суспензий. В них возможна классификация твердой фазы по крупности частиц.

Многокамерный сепаратор (рис. 3.24) имеет короткий цилиндрический барабан 4 с плоскими днищем и крышкой 6, установленный на вертикальном валу 3. Вал 3 получает вращение от приводного вала 2 через повышающую червячную передачу. Для уменьшения пути осаждения частиц внутри барабана установлены вставки 1 в виде тонкостенных цилиндров с бортиками, образующие последовательно соединенные отдельные камеры осаждения. Отсепарированная жидкость отводится напорным диском 5. Так как средние радиусы камер не одинаковы, различаются их эффективные факторы разделения, площади проходного сечения и осевые скорости потока. В периферийных камерах они меньше, чем в центральных, поэтому в центральных камерах осаждаются крупные частицы, в периферийных — мелкие. Таким образом, многокамерные сепараторы пригодны для классификации суспензий по размерам частиц.

§ 3.4. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ БАРАБАНОВ ЦЕНТРИФУГ И СЕПАРАТОРОВ

В большинстве случаев барабан центрифуги состоит из цилиндрической (или конической) обечайки 2 (рис. 3.25), плоского днища 5 в виде диска с жесткой ступицей 6 в середине и конического (или плоского) кольцевого борта 1. В стенке вращающегося барабана возникают напряжения от центробежных сил, действующих на материал стенки, и от давления, обусловленного действием центробежных сил на жидкость 4 и осадок 3, находящиеся в барабане. Кроме того, вблизи сопряжений обечайки с бортом и днищем, а также днища со ступицей действуют напряжения от краевых сил и моментов, возникающих в сопряжениях.

В стенке цилиндрической обечайки в общем случае возникают напряжения окружные σ_t , осевые σ_s и радиальные σ_r . Наименьшее из них — отрицательное (сжимающее) радиальное напряжение σ_r на внутренней поверхности стенки, равное по абсолютной величине давлению p_d от центробежных сил. Хотя в неко-

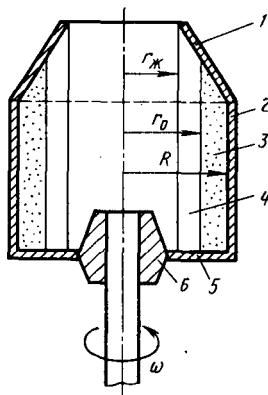


Рис. 3.25. Схема к расчету барабана центрифуги

торых случаях σ_r достигает 5 МПа (по модулю), им обычно пренебрегают, т. е. принимают $\sigma_r = 0$. Наибольшие значения имеют кольцевые напряжения σ_t . Осевое напряжение σ_s , обусловленное действием давления $p_{ц}$ на днище и борт барабана, имеет некоторое среднее значение. Расчеты обычно выполняют по 3-й теории прочности (теории наибольших касательных напряжений). В этом случае эквивалентное напряжение

$$\sigma_0 = \sigma_1 - \sigma_3, \quad (3.44)$$

где σ_1 и σ_3 — наибольшее и наименьшее главные напряжения, МПа.

В рассматриваемом случае $\sigma_1 = \sigma_t$, $\sigma_3 = \sigma_r = 0$, $\sigma_0 = \sigma_t$ и условие прочности принимает вид

$$\sigma_t \leq [\sigma], \quad (3.45)$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение для материала барабана.

Давление на стенку барабана (т. е. давление на радиусе R)

$$p_{ц} = 0,5\omega^2 [\rho_{ж}(r_o^2 - r_{ж}^2) + \rho_o(R^2 - r_o^2)], \quad (3.46)$$

где ω — угловая скорость ротора, рад/с; $\rho_{ж}$ и ρ_o — плотности соответственно жидкости и влажного осадка, кг/м³; $r_{ж}$ и r_o — радиус поверхности соответственно жидкости и осадка, м; R — наибольший внутренний радиус барабана, м.

Если барабан полностью (т. е. до края сливного борта) заполнен какой-либо одной средой (суспензией или осадком) с плотностью ρ_c , то

$$p_{ц} = 0,5\rho_c\omega^2(R^2 - r_{ж}^2). \quad (3.47)$$

Введя в рассмотрение условный коэффициент заполнения барабана $\psi = 1 - (r_{ж}/R)^2$, получим

$$p_{ц} = 0,5\rho_c\omega^2R^2\psi. \quad (3.48)$$

Распределенная центробежная сила от собственной массы обечайки

$$q = \rho_m s \omega^2 R_c, \quad (3.49)$$

где ρ_m — плотность материала обечайки, кг/м³; s — толщина стенки обечайки, м; $R_c = R + 0,5s$ — радиус срединной поверхности обечайки, м (обычно слагаемым $0,5s$ пренебрегают по сравнению со значением R и принимают $R_c = R$).

Окружное напряжение σ_t можно определить по уравнению Лапласа:

$$\sigma_s s / R_1 + \sigma_t s / R_2 = -Z, \quad (3.50)$$

где R_1 и R_2 — первый и второй главные радиусы кривизны срединной поверхности оболочки, м; Z — проекция внешней распределенной нагрузки на ось, нормальную к срединной поверхности и направленную в сторону центров кривизны.

Для цилиндра радиус кривизны образующей $R_1 = \infty$, $R_2 = R_0 \approx R$; в рассматриваемом случае проекция внешней нагрузки

$$Z = -(p_{\text{ц}} + q). \quad (3.51)$$

По уравнению Лапласа

$$\sigma_t s / R = p_{\text{ц}} + q, \quad (3.52)$$

откуда

$$\sigma_t = 0,5 \rho_c \omega^2 R^3 \psi / s + \rho_m \omega^2 R^2. \quad (3.53)$$

Первое слагаемое в правой части этого уравнения представляет собой напряжение от давления $p_{\text{ц}}$ среды, второе — напряжение от распределенной центробежной силы, обусловленной массой стенки. Как видим, вторая составляющая не зависит от толщины стенки.

Используя записанное выше условие прочности, найдем необходимую толщину стенки

$$\begin{aligned} s &= 0,5 \rho_c v^2 R \psi / ([\sigma] - \rho_m v^2) = \\ &= 0,5 R \lambda \psi / ([\sigma] / \sigma_0 - 1), \end{aligned} \quad (3.54)$$

где $v = \omega R$ — окружная скорость обечайки, м/с; $\sigma_0 = \rho_m v^2$ — составляющая окружного напряжения в барабане, обусловленная действием распределенной центробежной силы q , Па; $\lambda = \rho_c / \rho_m$ — отношение плотностей среды и материала барабана.

Отношение $[\sigma] / \sigma_0$ показывает, во сколько раз напряжение в стенке пустого (не заполненного жидкостью) барабана σ_0 меньше допускаемого и является аналогом коэффициента запаса. Таким образом, это отношение можно назвать критерием прочности незаполненного барабана. Умножив числитель и знаменатель отношения $[\sigma] / \sigma_0$ на линейный размер (например, толщину стенки) в третьей степени, получим величину, называемую критерием Ньютона:

$$[\sigma] s^3 / (\rho_m s^3 v^3) = f l / (m v^2) = Ne, \quad (3.55)$$

где $f = [\sigma] s^2$ — допускаемая внутренняя сила, приходящаяся на сечение площадью s^2 ; $m = \rho_m s^3$ — масса элемента стенки объемом s^3 ; $l = s$ — линейный размер.

Для обеспечения прочности незаполненного барабана необходимо, чтобы $Ne > 1$; при этом окружное (а также эквивалентное) напряжение не превышает допускаемое. Необходимая толщина стенки частично заполненного барабана

$$s = 0,5 R \lambda \psi / (Ne - 1). \quad (3.56)$$

В случае $Ne \leq 1$ условие прочности не удовлетворяется ни при какой толщине стенки.

Характеристика некоторых металлов

Металл	σ_T , МПа	ρ_M , кг/м ³	$\frac{\sigma_T}{\rho_M g} \cdot 10^3$, м
Сталь Ст3	220	7850	2,8
Сталь 12Х18Н10Т	285	7800	3,7
Алюминиевый сплав Д1	200	2800	7,1
Алюминиевый сплав АК6	280	2800	10,1
Титан ВТ1—1	380	4500	8,6
Титановый сплав ВТ6	800	4500	18,0

Представляет интерес предельное значение фактора разделения, допускаемое прочностью материала. Для пластичного материала опасно явление текучести, т. е. равенство $\sigma_t = \sigma_T$, где σ_T — предел текучести. Учитывая, что $K_p = \omega^2 R/g$, из уравнения (3.53) найдем

$$K_{пр} = \sigma_T \left[\rho_M g R \left(\frac{0,5\lambda\psi R}{s} + 1 \right) \right]^{-1}. \quad (3.57)$$

Отсюда видно, что при заданных характеристиках материала высокие значения фактора разделения достигаются при малом радиусе R барабана, поэтому наибольший фактор разделения достигается в трубчатых центрифугах с барабанами малого диаметра (обычно не более 200 мм).

Для увеличения фактора разделения необходимо также использовать для изготовления барабанов материалы с высокой удельной прочностью, т. е. с возможно большим отношением $\sigma_T/(\rho_M g)$, значения которого для некоторых металлов приведены в табл. 3.1. Как видно из таблицы, наибольшую удельную прочность имеют алюминиевые и титановые сплавы.

В конической обечайке или в борте центрифуги наибольшим из трех действующих является также окружное напряжение σ_t . Его максимальное значение (у большего основания конуса) можно определить, как и для цилиндрической обечайки, по уравнению Лапласа. В этом месте давление среды имеет то же значение, что и в цилиндрической части барабана. В этом случае проекция на ось z распределенной центробежной силы $q_z = s_K \rho_M \omega^2 R \cos \alpha$, первый главный радиус кривизны $R_1 = \infty$, второй главный радиус $R_2 = R/\cos \alpha$ и уравнение Лапласа принимает вид

$$\sigma_t s_K \cos \alpha / R = 0,5 \rho_c \omega^2 R^2 \psi + s_K \rho_M \omega^2 R \cos \alpha,$$

где s_K — толщина стенки конической обечайки, м.

Окружное напряжение

$$\sigma_t = 0,5\rho_c\omega^2 R^3\psi/(s_k \cos \alpha) + \rho_m\omega^2 R^2$$

или

$$\sigma_t = 0,5\sigma_0 R\lambda\psi/(s_k \cos \alpha) + \sigma_0. \quad (3.58)$$

Из условия прочности расчетная толщина стенки конической обечайки

$$s_k = 0,5R\lambda\psi / \left[\left(\frac{[\sigma]}{\sigma_0} - 1 \right) \cos \alpha \right] = 0,5R\lambda\psi / [(Ne - 1) \cos \alpha]. \quad (3.59)$$

Толщину плоского борта или днища рекомендуется определять из соотношения

$$s_n = 1,5s, \quad (3.60)$$

где s — расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки.

При расчете перфорированных обечаек учитывают ослабление обечайки отверстиями, а также уменьшение ее массы, приводящее к уменьшению центробежной силы. Первый фактор учитывают коэффициентом уменьшения допускаемого напряжения

$$\varphi_0 = 1 - d_0/t_0,$$

где d_0 — диаметр отверстий; t_0 — шаг между отверстиями.

Для учета второго фактора вводят коэффициент перфорации k_n , зависящий от расположения отверстий. При расположении их по вершинам квадратов и в шахматном порядке $k_n = 0,785 (d_0/t_0)^2$, по вершинам равносторонних треугольников $k_n = 0,907 (d_0/t_0)^2$. Расчетная толщина стенки перфорированной обечайки соответственно цилиндрической и конической

$$s = 0,5R\lambda\psi / [\varphi_0 [\sigma]/\sigma_0 - (1 - k_n)]; \quad (3.61)$$

$$s_k = 0,5R\lambda\psi / \left[\left(\frac{\varphi_0 [\sigma]}{\sigma_0} - 1 + k_n \right) \cos \alpha \right]. \quad (3.62)$$

Приведенные выше формулы, основанные на теории тонкостенных оболочек, рекомендуется использовать при критерии Ньютона $Ne > 2,6$. При меньших значениях Ne следует использовать формулы теории толстостенных цилиндров. В последнем случае, однако, барабан получается чрезмерно тяжелым из-за большой толщины стенки. Увеличения критерия Ne и лучшего использования материала можно добиться либо уменьшением частоты вращения (что невыгодно из-за уменьшения K_p), либо применением материалов с высокой удельной прочностью.

Кроме рассмотренных центробежных сил в местах сопряжения обечайки с днищем и бортом барабана действуют распределенные по окружности краевые силы и моменты, вызывающие появление дополнительных местных напряжений. Краевые силы и моменты и соответствующие напряжения можно определить из условия

совместности деформаций обечаек и дисков, из которых состоит барабан. Напряжения от краевых нагрузок быстро затухают по мере удаления от места сопряжения; в средних частях элементов конструкции напряжения практически равны рассчитанным по мембранной теории. Для обеспечения прочности достаточно несколько усилить места сопряжений. Приведенные в литературе примеры расчетов показали, что в местах сопряжений достаточно увеличить толщину стенки на 10—15 %. Методика уточненного расчета с учетом краевых нагрузок довольно сложна [19].

§ 3.5. ДИНАМИКА ЦЕНТРИФУГ И СЕПАРАТОРОВ

Роторы центрифуг, как и других машин с вращающимися валами, совершают колебания или вибрацию, обусловленные наличием неуравновешенных масс. Для устранения вибрации производят статическую и динамическую балансировку роторов. Однако даже после балансировки роторы испытывают значительную вибрацию и действие инерционных сил при определенных частотах вращения, называемых резонансными или критическими. В связи с этим для устранения вибрации и обеспечения спокойной работы машины, кроме балансировки, целесообразно выбирать рабочую частоту вращения, не совпадающую с критической и не близкую к ней.

Различают центрифуги с жесткими валами, рабочая частота вращения которых меньше критической, и центрифуги с гибкими валами, работающие в закритической области. Выбор жесткого или гибкого вала, а также конструкции опор зависит от типа центрифуги, характера обрабатываемого продукта и образующегося осадка.

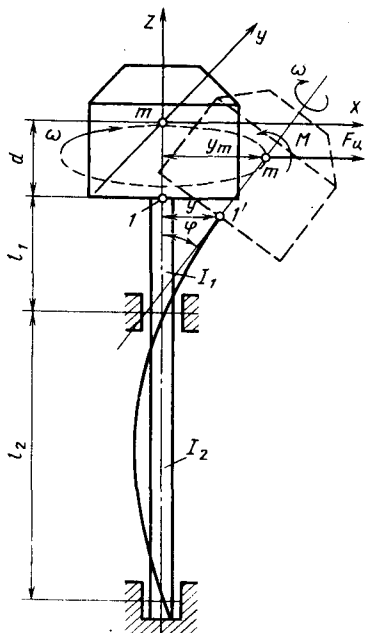
Если осадок представляет собой полужидкую массу, как это часто бывает в осадительных центрифугах, то он распределяется ровным слоем по окружности барабана. В этом случае центр масс барабана, заполненного осадком, находится на оси вращения и можно не опасаться возникновения значительных неуравновешенных центробежных сил и вызываемой ими вибрации. В этом случае машина может работать достаточно спокойно с жестким валом, т. е. при $\omega_p/\omega_{кр} \ll 1$, причем, очевидно, тем лучше, чем меньше это отношение. Так как рабочая угловая скорость ω_p определяется технологическими условиями, целесообразно увеличить по возможности критическую угловую скорость $\omega_{кр}$. Это достигается утолщением вала при одновременном (конструктивно возможном) его укорочении, что желательно также с точки зрения уменьшения размеров машины. При консольном креплении барабана на валу для той же цели целесообразно уменьшить вылет центра вращающихся масс относительно точки крепления. Еще лучше совместить центр масс с подшипником. Это приводит к увеличению жесткости вала, уменьшению напряжений в нем и коэффициента нарастания амплитуд. Конструктивно этого достигают приданием днищу барабана вогнутой формы.

Рис. 3.26. Схема к расчету центрифуги с гибким валом

Иначе конструируют центрифугу, если по каким-либо причинам не удастся добиться равномерного распределения обрабатываемой массы (шлама, осадка) по окружности барабана. Например, при обработке в центрифугах суспензий различных кристаллических продуктов. В этих случаях ротор обладает при работе значительным дисбалансом массы. При этом целесообразно использовать гибкие валы или упругие опоры, позволяющие работать в закритической области для использования возникающего эффекта самоцентрирования ротора. Так как этот эффект возрастает с увеличением отношения $\omega_p / \omega_{кр}$, то $\omega_{кр}$ целесообразно уменьшать. Очевидно, для этого валы должны быть по возможности тоньше и длиннее, что противоречит требованиям прочности и компактности машин. В этом случае увеличивают вылет центра вращающихся масс относительно точки крепления барабана применением плоского днища, а также установкой упругого подшипника.

При конструировании центрифуг необходимо рассчитывать критическую скорость. Метод расчета зависит от схемы компоновки машины. Двухопорные роторы с барабанами, расположенными между опорами, не испытывают существенного поворота сечения вала при изгибе и достаточно точно могут быть рассчитаны без учета гироскопического эффекта. Если барабан закреплен на консольном конце гибкого вала, то угол поворота барабана при изгибе вала и связанный с этим углом гироскопический момент значительны и их следует учитывать при расчетах.

Рассмотрим ротор центрифуги или сепаратора с барабаном, закрепленным на консоли вала с жесткими опорами (рис. 3.26). Пренебрегая массой вала по сравнению с массой барабана, будем считать вал невесомым. Представим ротор идеально уравновешенным; в этом случае центр масс барабана (вместе с жидкостью или осадком) лежит на продолжении оси вала. Будем решать задачу об устойчивости такого ротора. Известно, что при критической частоте вращения ротор становится неустойчивым, т. е. теряет способность возвращаться в первоначальное неизогнутое положение.



Можно считать, что при критической частоте вращения вал находится в состоянии безразличного равновесия и его упругий изгиб вызван действием центробежной силы и гироскопического момента. Ограничимся наиболее типичным случаем прямой синхронной прецессии, когда изогнутая ось вала вращается вокруг линии подшипников с той же частотой и в ту же сторону, что и вал с барабаном вокруг своей изогнутой оси. Отметим, что возможны также случаи обратной синхронной и прямой несинхронной прецессии, имеющие свои особенности.

При вращении на ротор действует центробежная сила $F_{\pi} = m\omega^2 y_m$, приложенная в центре масс барабана, и гироскопический момент $M = (J_o - J_a) \omega^2 \varphi$ (где m — масса барабана; y_m — отклонение центра масс вследствие изгиба вала; J_o и J_a — динамические моменты инерции барабана относительно соответственно его оси и диаметра, проходящего через центр масс; φ — угол поворота барабана). Сила и момент вызывают прогиб и поворот конца вала (в месте крепления барабана), которые можно выразить через коэффициенты влияния. Пусть a_{1c} и b_{1c} — соответственно прогиб и угол поворота вала на его конце (в точке I) от единичной силы, приложенной в точке m ; α_{1c} и β_{1c} — прогиб и угол поворота в той же точке от единичного момента.

Тогда прогиб и поворот вала в точке I :

$$y = a_{1c}F_{\pi} - \alpha_{1c}M; \quad \varphi = b_{1c}F_{\pi} - \beta_{1c}M. \quad (3.63)$$

Подставив сюда F_{π} и M , получим:

$$\begin{aligned} y &= a_{1c}m\omega^2 y_m - \alpha_{1c}(J_o - J_a)\omega^2 \varphi; \\ \varphi &= b_{1c}m\omega^2 y_m - \beta_{1c}(J_o - J_a)\omega^2 \varphi. \end{aligned}$$

Учитывая, что $y_m = y + \varphi d$ (где d — расстояние от точки крепления до центра масс барабана), получим:

$$\begin{aligned} y &= a_{1c}m\omega^2 y + [a_{1c}md - \alpha_{1c}(J_o - J_a)]\omega^2 \varphi; \\ \varphi &= b_{1c}m\omega^2 y + [b_{1c}md - \beta_{1c}(J_o - J_a)]\omega^2 \varphi; \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} (a_{1c}m\omega^2 - 1)y + [a_{1c}md - \alpha_{1c}(J_o - J_a)]\omega^2 \varphi &= 0; \\ b_{1c}m\omega^2 y + \{[b_{1c}md - \beta_{1c}(J_o - J_a)]\omega^2 - 1\}\varphi &= 0. \end{aligned} \quad (3.64)$$

Получена система двух однородных линейных уравнений с двумя неизвестными y и φ . Критическое значение ω должно допускать отличные от нуля решения этой системы. Для этого необходимо, чтобы определитель системы был равен нулю:

$$\begin{vmatrix} a_{1c}m\omega^2 - 1 & [a_{1c}md - \alpha_{1c}(J_o - J_a)]\omega^2 \\ b_{1c}m\omega^2 & [b_{1c}md - \beta_{1c}(J_o - J_a)]\omega^2 - 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (3.65)$$

Раскрыв определитель, получим

$$A\omega^4 - B\omega^2 - 1 = 0, \quad (3.66)$$

где

$$\begin{aligned} A &= m(J_0 - J_9)(a_{1c}\beta_{1c} - \alpha_{1c}b_{1c}); \\ B &= \beta_{1c}(J_0 - J_9) - m(a_{1c} + b_{1c}d). \end{aligned} \quad (3.67)$$

Критическая угловая скорость

$$\omega = \sqrt{\frac{B + \sqrt{B^2 + 4A}}{2A}}. \quad (3.68)$$

Из четырех корней системы (3.64) физический смысл имеет только один, поэтому ротор имеет одну критическую скорость.

Коэффициенты влияния, входящие в выражения для A и B , следующим образом связаны с прогибами и углами поворота конца вала (точки крепления l) от единичных силы и момента, приложенных в той же точке: $a_{1c} = a_{11} + \alpha_{11}d$; $b_{1c} = b_{11} + \beta_{11}d$; $\alpha_{1c} = \alpha_{11}$; $\beta_{1c} = \beta_{11}$. Здесь

$$a_{11} = \frac{l_1^3 (l_2 I_1 + l_1 I_2)}{3EI_1 I_2}; \quad b_{11} = \alpha_{11} = \frac{l_1 (3l_1 I_2 + 2l_2 I_1)}{6EI_1 I_2};$$

$$\beta_{11} = \frac{l_2 I_1 + 3l_1 I_2}{3EI_1 I_2},$$

где l_1 — длина консоли вала; l_2 — расстояние между подшипниками; I_1, I_2 — моменты инерции сечения вала на участках l_1 и l_2 .

Динамические моменты инерции J_0 и J_9 загруженного барабана

$$J_0 = \int_0^m r^2 dm; \quad J_9 = \int_0^m l^2 dm,$$

где r — радиус элементарной массы dm ; l — расстояние от массы dm до оси x ; $r^2 = x^2 + y^2$; $l^2 = z^2 + y^2$. Моменты инерции J_0 и J_9 рассчитывают суммированием динамических моментов инерции обечайки, днища, борта барабана и находящегося в нем осадка.

Если верхняя опора вала — упругая (подшипник закреплен на нескольких пружинах), то критическую скорость определяют по тем же формулам, но коэффициенты влияния существенно отличаются. В этом случае смещение конца вала в значительно большей мере определяется податливостью опоры, чем изгибом самого вала и часто вал можно считать недеформирующимся. Все коэффициенты влияния в этом случае определяют через жесткость k упругой опоры, представляющую собой силу, необходимую для смещения опоры (в поперечном направлении) на единицу длины. Обычно в сепараторах верхний (горловой) подшипник закреплен на шести пружинах, равномерно расположенных по окружности. Жесткость такой подвески примерно одинакова во

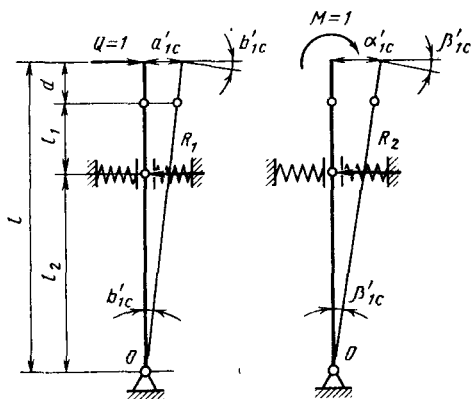


Рис. 3.27. Схемы к расчету коэффициентов влияния для вала с упругой опорой

всех направлениях и в 1,5 раза больше жесткости одной пружины.

Для определения коэффициентов влияния приложим к ротору в центре масс барабана сначала силу $Q = 1$, а затем момент $M = 1$, определим реакции R_1 и R_2 верхней опоры из уравнения равнове-

сия моментов относительно точки O и выразим их через жесткость опоры k (рис. 3.27). Получим: $R_1 = 1 \cdot l/l_2 = a'_{2c}k$; $R_2 = 1/l_2 = \alpha'_{2c}k$, откуда $a'_{2c} = l/(kl_2)$; $\alpha'_{2c} = 1/(kl_2)$. Здесь a'_{2c} и α'_{2c} — перемещение упругой опоры, вызванное соответственно единичной силой и моментом; $l = l_1 + l_2 + d$. С учетом геометрических соотношений найдем коэффициенты влияния: $-a'_{1c} = l^2/(kl_2^2)$; $b'_{1c} = \alpha'_{1c} = l/(kl_2^2)$; $\beta'_{1c} = 1/(kl_2^2)$.

Если податливостью вала пренебречь нельзя, то коэффициенты влияния $a''_{1c} = a_{1c} + a'_{1c}$; $b''_{1c} = b_{1c} + b'_{1c}$; $\alpha''_{1c} = \alpha_{1c}$; $\beta''_{1c} = \beta_{1c} + \beta'_{1c}$.

Вычисленные коэффициенты влияния подставим в выражения (3.67) для A и B и по формуле (3.68) определим критическую скорость.

Для обеспечения хорошего самоцентрирования упругость пружин горлового подшипника подбирают так, чтобы выполнялось соотношение

$$\omega_p/\omega_{кр} = 5 \dots 6.$$

Для уменьшения уровня шума и вибрации здания центрифуги монтируют на виброизоляторах или амортизаторах различного типа. Эффективны резиновые подкладки и прокладки, а также сочетание резины с древесиной, пробково-пластмассовые композиции и другие виброгасящие материалы. После каждого ремонта рекомендуется проводить статическую и динамическую балансировку ротора.

§ 3.6. ГИДРОЦИКЛОНЫ

Гидроциклонами называют аппараты, в которых для разделения жидких неоднородных систем используется поле центробежных сил инерции, возникающее в закрученном потоке жидкости. Фактор разделения в гидроциклонах колеблется от 500 до 2000.

Рис. 3.28. Схема гидроциклона

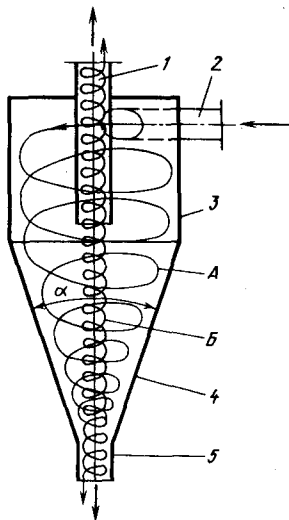
Гидроциклоны широко применяют при сгущении, осветлении и классификации суспензий в химической, нефтедобывающей, горнорудной, пищевой отраслях промышленности, а также в энергетике и в системах очистки промышленных и бытовых сточных вод. Гидроциклоны весьма несложны по конструкции, компактны, высокопроизводительны, дешевы в изготовлении и просты в эксплуатации.

Гидроциклон (рис. 3.28) представляет собой сосуд, состоящий из конической 4 и цилиндрической 3 частей, закрытый сверху крышкой. Угол α между образующими конической части называется углом конуса гидроциклона. Суспензия подается под давлением через питающий патрубок 2, установленный тангенциально к цилиндрической части непосредственно под крышкой. Осветленная жидкость отводится через установленный в центре крышки по оси гидроциклона сливной патрубок 1, а сгущенный продукт — через патрубок 5 в вершине конуса, называемый разгрузочным. Площадь сечения разгрузочного патрубка в гидроциклонах некоторых конструкций можно изменять сменными насадками.

Некоторые гидроциклоны, особенно малых диаметров, выполняют без цилиндрической части, и исходную суспензию вводят непосредственно в конус гидроциклона.

Несмотря на простоту конструкции, гидроциклоны характеризуются сложной гидродинамикой процесса разделения. В гидроциклоне твердые частицы и жидкость движутся по двум основным траекториям: *A* — пристенная, по которой опускаются наиболее тяжелые частицы; *B* — внутренняя, по которой поднимается столб жидкости с легкими частицами. Другими словами, образуются два вращающихся потока — внешний и внутренний. Внешний поток вращается вдоль стенок конической части аппарата и движется в направлении к нижнему выходному патрубку (разгрузочному), вынося из аппарата наиболее крупные и плотные частицы твердой фазы. Внутренний поток имеет цилиндрическую форму (диаметр этого цилиндра примерно равен диаметру сливного патрубка) и направлен вверх, выводя из гидроциклона тонкодисперсные частицы, не успевшие отделиться во время движения из внешнего потока под действием центробежных сил.

Следует отметить, что восходящий поток жидкости с внутренней стороны ограничен воздушным столбом, форма и размеры которого определяют работу гидроциклона. Воздушный столб образуется потому, что вблизи оси гидроциклона окружная скорость



жидкости, а следовательно, и центробежная сила, возникающая под действием этой скорости, настолько велики, что происходит разрыв потока жидкости и вдоль оси образуется воздушное ядро. Давление внутри этого ядра уменьшается, что вызывает засасывание воздуха из атмосферы через разгрузочный патрубок и приводит к образованию воздушного столба. Однако даже если закрыть патрубок, воздушный столб сохраняется в виде очень тонкого «шнура». Форма и размеры воздушного столба зависят от многих факторов: давления на входе в гидроциклон, диаметров сливного и разгрузочного патрубков и др. Наибольший диаметр воздушного столба (который может быть в виде цилиндра или усеченного конуса) составляет примерно 55—65 % диаметра сливного патрубка.

Обычно гидроциклон характеризуют диаметром его цилиндрической части, который связан определенными соотношениями с диаметром питающего, сливного и разгрузочного патрубков. Большое значение для нормальной работы гидроциклона имеет соотношение диаметров верхнего сливного d_c и нижнего разгрузочного патрубков d_p ; рекомендуется $d_c/d_p = 1,66 \dots 3,33$. Изменением этого соотношения в основном регулируют работу гидроциклона. Поскольку насадки быстро изнашиваются, то их изготавливают из износостойких материалов (легированный чугун, керамика, твердые сплавы, резина и др.) или предусматривают возможность их быстрой замены.

Диаметр гидроциклона составляет 50—1000 мм, причем высота цилиндрической части корпуса примерно равна диаметру гидроциклона; угол конуса $\alpha = 10 \dots 20^\circ$. Для увеличения срока службы аппаратов их внутреннюю поверхность футеруют износостойкими материалами.

В настоящее время известны несколько десятков типов гидроциклонов. По назначению гидроциклоны можно разделить на классификаторы, сгустители и разделители, по способу сообщения суспензии вращательного движения — на напорные (конические, цилиндрические, прямоточные), открытые и роторные (турбоциклоны).

Эффективность работы гидроциклона зависит от многих факторов. К основным из них относятся: диаметры корпуса, питающего, сливного и разгрузочного патрубков, угол наклона образующей конической части, давление на входе, концентрация и размер частиц твердой фазы в исходном продукте, разность плотностей твердой и жидкой фаз.

Диаметр гидроциклона определяет количественные и качественные показатели его работы. С увеличением диаметра гидроциклона повышается его производительность, однако качественные показатели работы ухудшаются; поэтому тонкие суспензии разделяют в гидроциклонах малых диаметров.

Для увеличения производительности применяют одно- и двухступенчатые батарейные гидроциклоны. Элементы одноступенча-

того батарейного гидроциклона работают параллельно и самостоятельно. Двухступенчатые гидроциклоны komponуют из блоков, по несколько элементов в каждом; один из элементов предназначен для первичного сгущения, другие — для вторичного осветления жидкости после первого гидроциклона. Конструктивно батарейные гидроциклоны напоминают газовые батарейные циклоны (см. ниже).

§ 3.7. ПЫЛЕОЧИСТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В химической промышленности часто необходимо разделять аэрозоли, т. е. очищать газы от взвешенных в них твердых частиц или мелких капель жидкости. Сушилки, смесители, диспергаторы, многие массообменные и другие виды химического оборудования не могут работать без эффективной системы газоочистки.

Различают три вида аэрозолей — пыли, дымы и туманы. Пыли образуются в процессах дробления, смешивания, транспортирования, сушки зернистых материалов; размеры частиц пыли 3—70 мкм. Дымы получают при сгорании топлива, конденсации паров с образованием жидких и твердых частиц размерами 0,3—5,0 мкм. Дисперсная фаза туманов представляет собой капельки жидкости также размером около 0,3—5,0 мкм.

Газы очищают от взвешенных частиц для уменьшения загрязненности воздуха (охраны окружающей среды), улавливания из газа примесей, затрудняющих последующую его переработку или разрушающих аппаратуру, а также для улавливания из газа ценных продуктов.

Используют следующие способы разделения: осаждение частиц в гравитационном, электростатическом, центробежном поле или под действием сил инерции; фильтрование запыленных газов через пористые перегородки; улавливание частиц жидкостью (мокрая очистка). В последнем случае улавливание частиц может сопровождаться поглощением жидкостью растворимых компонентов газовой фазы, т. е. абсорбцией. Такой процесс называют комплексной очисткой газа.

Циклонами называют аппараты для выделения твердых частиц из запыленного газа под действием центробежных сил, возникающих во вращающемся потоке газа. Наиболее распространены возвратно-поточные циклоны, называемые также противоточными, в которых направление потока газа меняется на противоположное при движении по оси аппарата.

По конструктивному исполнению и принципу работы циклоны во многом аналогичны гидроциклонам. В промышленности используют множество конструктивных разновидностей циклонов.

Для унификации и сравнительной оценки проведены испытания по единой методике циклонов различных типов. Наиболее эффективным и одновременно приемлемым по габаритам и удобным

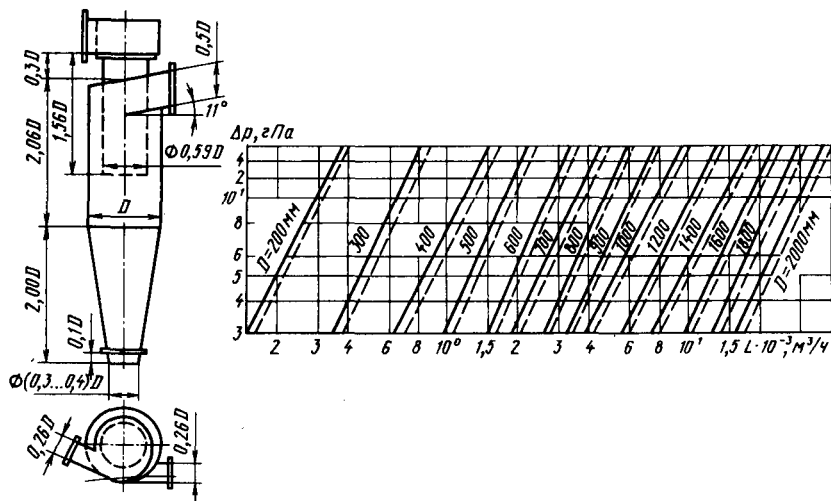


Рис. 3.29. Схема и график к определению гидравлического сопротивления циклона ЦН-11

для компоновки в группы признан циклон ЦН-11, размеры которого (в долях диаметра) и зависимость гидравлического сопротивления Δp от расхода газа L приведены на рис. 3.29.

Групповые и батарейные циклоны. Для обеспечения заданной производительности используют группы параллельно работающих циклонов, снабженных общим пылесборным бункером, подводящим и отводящим коллекторами. Использование нескольких циклонов меньшего диаметра вместо одного большого предпочтительнее, так как при одинаковой линейной скорости газа в циклоне малого диаметра развиваются большие центробежные силы и, следовательно, обеспечивается лучшее пылеулавливание. Кроме того, разместить крупные циклоны часто сложно из-за их большой высоты. Обычно применяют попарную компоновку (рис.

3.30, а) с общим числом циклонов 2—8 или круговую (рис. 3.30, б), располагая 10—14 циклонов вокруг вертикального подводящего газохода. Степень очистки в группе циклонов примерно такая же,

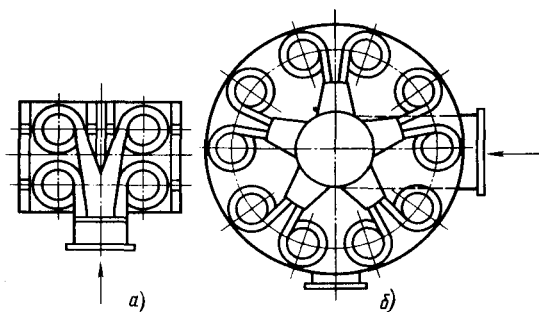


Рис. 3.30. Варианты компоновки циклонов

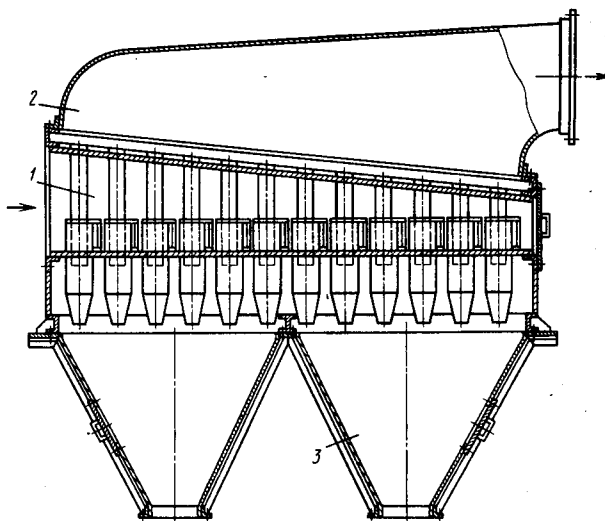


Рис. 3.31. Батарейный циклон БЦУ

как в одном циклоне, входящем в эту же группу. Наиболее полно преимущества малых циклонов реализуются в батарейных циклонах (мультициклонах), содержащих множество (иногда несколько сотен) параллельно работающих циклонных элементов диаметром 100—300 мм. В отечественных конструкциях в одном аппарате до 792 циклонных элементов при расходе газа до 650 000 м³/ч.

Батарейный циклон (рис. 3.31) представляет собой тонкостенный корпус (обычно прямоугольного сечения), снабженный штуцерами и разделенный плоскими перегородками на камеры запыленного газа 1, очищенного газа 2 и бункер-пылесборник 3. Циклонные элементы закреплены в отверстиях перегородок таким образом, что входные отверстия завихрителей (тангенциальных патрубков) соединяются с камерой запыленного газа, центральные выхлопные трубы — с камерой очищенного газа, а пылеотводящие отверстия — с бункером-пылесборником.

Для закручивания потока газа в циклонных элементах используют тангенциальные или осевые завихрители. К тангенциальным относятся короткие сужающие патрубки (рис. 3.32, а) и входные улитки (рис. 3.32, б). При использовании осевых завихрителей элементы не имеют крышек и газ поступает в зазор между отводной трубой и корпусом, где установлен завихритель типа «винт» (рис. 3.32, в) или «розетка» (рис. 3.32, г).

Возвратно-поточные циклонные элементы обладают значительным гидравлическим сопротивлением из-за поворота потока газа на 180°. Поворот приводит также к турбулизации потока, усили-

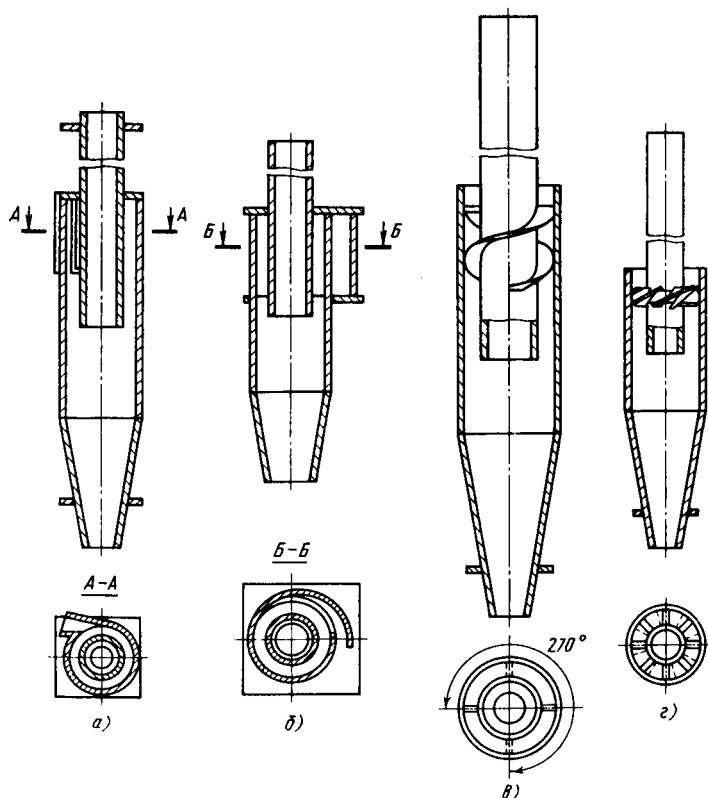


Рис. 3.32. Элементы батарейных циклонов

вающей вынос мелких фракций пыли восходящим потоком в отводную трубу, т. е. к снижению степени очистки газа. Для исключения этих недостатков созданы батарейные циклоны с прямоточными контактными элементами. Такой элемент (рис. 3.33) состоит из цилиндрического корпуса 1, осевого закручивающего устройства 2 с винтовыми лопастями и выхлопной трубы 3 с отсечным кольцом 4. Запыленный газ входит в корпус сверху, закручивается лопастями и поступает в сепарационное пространство. Здесь благодаря вращению и действию центробежных сил твердые частицы концентрируются у стенок корпуса и отводятся с частью потока газа (5—10 %) через щель между корпусом 1 и кольцом 4 в камеру 5 запыленного газа. Очищенный газ по трубе 3 отводится из центральной части сепарационного пространства в камеру очищенного газа.

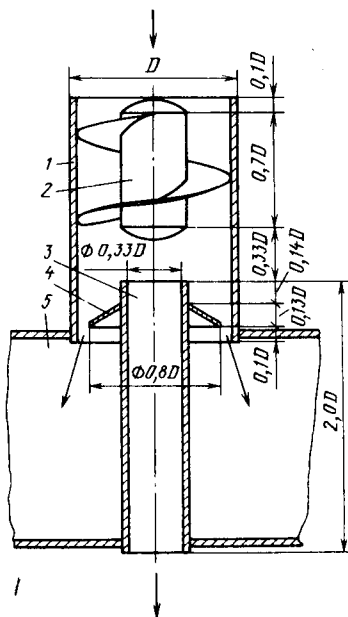
Из изложенного ясно, что прямоточный циклон является пылеконцентратором и не позволяет полностью отделить твердую фазу

Рис. 3.33. Элемент проточного батарейного циклона

от газа. В связи с этим для окончательного отделения твердой фазы установки с проточными батарейными циклонами дополнительно снабжают обычными циклонами, тканевыми фильтрами или другими аппаратами для разделения небольшого количества запыленного газа с высокой концентрацией твердых частиц.

Электрофильтры. В электрофильтрах для отделения твердых частиц из газа используют осаждение их в электростатическом поле; поэтому такие аппараты вернее было бы назвать электростатическими осадителями. Электрофильтрами их называют по аналогии с рукавными и другими тканевыми фильтрами, применяемыми для той же цели. Прототипом современных электрофильтров является аппарат Коттреля, представляющий собой вертикальную трубу, по оси которой натянута проволока, подвешенная на изоляторе. Проволока и труба соединены с источником высокого напряжения (катушкой Румкорфа). Проволока является активным или коронирующим электродом, труба — пассивным. Запыленный газ или дым подается в трубу, внутри которой создается электростатическое поле. Проходя по трубе, взвешенные в газе твердые частицы приобретают электрические заряды и осаждаются на ее стенках (частично на проволоке), откуда их периодически удаляют; из трубы выходит очищенный газ.

Современные электрофильтры имеют множество труб круглого или шестигранного сечения, установленных в корпусе фильтра. Вместо труб используют также плоские металлические пластины, решетки или сетки. Трубы, пластины или сетки заземлены, а проволоочные коронирующие электроды присоединены к отрицательному полюсу высоковольтного источника постоянного тока (30—70 кВ). Проходя по трубам или между пластинами, частицы приобретают отрицательный заряд и осаждаются на положительно заряженных пластинах или стенках труб. Газ выходит из камеры почти полностью освобожденным от взвешенных частиц. Для удаления осевшей пыли фильтр отключают от источника напряжения, а трубчатые или плоские электроды встряхивают. Осевшая на них пыль падает в бункер, находящийся под аппаратом, откуда ее периодически удаляют.



В мокрых электрофильтрах, предназначенных для улавливания вместе с твердыми частицами мелких капелек тумана, уловленная пыль смывается с электродов водой и удаляется в виде суспензии (шлама). В таких аппаратах улавливается также пыль с высоким электрическим сопротивлением, плохо задерживаемая в сухих электрофильтрах. Газ предварительно увлажняют и охлаждают до температуры ниже точки росы.

Электрофильтры используют для наиболее полной очистки газа от мельчайших частиц и капелек (размером от 0,005 мкм) при малой их концентрации. Они работают обычно при скорости газа 0,2—1,5 м/с. Эти аппараты применяют, например, при переработке полиметаллических руд (извлечение ценных металлов из газов), в производстве сажи, для улавливания цементной и угольной пыли. В производстве серной кислоты из колчедана сухие электрофильтры используют для очистки газа от огарковой пыли, мокрые — для улавливания капелек кислоты и примесей из газа, поступающего в контактное отделение, и очистки отходящих газов.

Мокрые электрофильтры снабжают трубчатыми или сотовыми осадительными электродами, по которым газ движется в осевом направлении. Примером может служить односекционный вертикальный электрофильтр ШМК для очистки газа от тумана серной кислоты и частиц соединений селена и мышьяка (рис. 3.34). Стальной цилиндрический корпус 7 электрофильтра футерован изнутри кислотоупорным кирпичом по подслою из полиизобутилена. Крышка аппарата защищена листовым свинцом. Свинцовые осадительные электроды 6 в виде сот (шестигранных труб) подвешены к стальной освинцованной решетке 5, закрепленной в верхней части корпуса. По оси каждого шестигранного канала свободно подвешен коронирующий электрод 4 из проволоки звездчатого сечения, прикрепленный верхним концом к изолированной от корпуса раме и снабженный грузом.

Рама коронирующих электродов подвешена на тросах 3 к изоляторам 2, закрепленным в коробках 1 крышки. Коробки изоляторов снабжены электрическими нагревателями (для исключения конденсации влаги на поверхности изоляторов). Корпус 7 снабжен штуцерами для подвода и отвода газа, а также для подачи пара и отвода уловленных кислоты и шлама. В нижней части установлена двойная газораспределительная решетка 8.

Уловленная кислота собирается в нижней части корпуса и отводится в процессе работы. Уловленные твердые частицы в виде шлама удаляют после отключения и промывки аппарата горячей водой, подаваемой через верхний люк. Шлам, содержащий до 50 % селена, тщательно собирают.

На ряде заводов в электрофильтрах ШМК свинцовые осадительные электроды-соты заменены более легкими трубами диаметром 250 мм из винипласта, опирающимися на решетку из титанового листа, а освинцованные коронирующие электроды звездча-

230

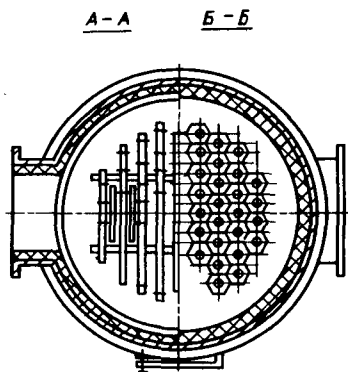
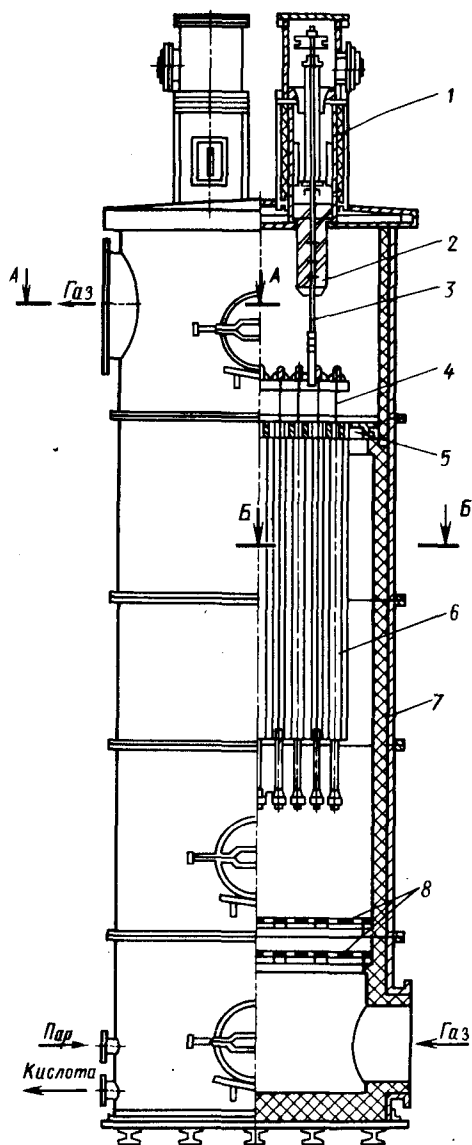


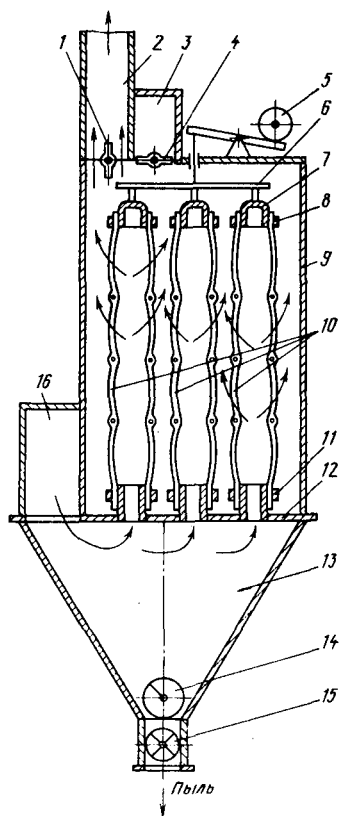
Рис. 3.34. Мокрый трубчатый электрофильтр ШМК

того сечения — электродами из титановой колючей проволоки. Это позволило увеличить степень очистки.

Расчет электрофильтра по скорости осаждения частиц в электрическом поле сложен из-за необходимости учета множества факторов, влияющих на осаждение. Необходимо знать дисперсный состав пыли, диэлектрическую проницаемость ее частиц, свойства газа и пыли и учесть их влияние на режим работы электрофильтра. В связи с этим электрофильтры обычно подбирают, используя

практические данные о допустимой скорости очищаемых газов в электрическом поле электрофильтра (в пределах 0,2—1,5 м/с). Конструкцию электрофильтра выбирают также по данным эксплуатационного опыта; она должна обеспечивать необходимую степень улавливания пыли из газового потока и надежность в работе.

Рис. 3.35. Схема рукавного фильтра



Рукавные и другие фильтры для газов. Газовые неоднородные системы, как и жидкие, можно разделять фильтрованием через пористые перегородки, задерживающие взвешенные частицы и пропускающие сплошную фазу. Для промышленной пылеочистки используют те же фильтрующие материалы, которые применяют для разделения суспензий. Чаще всего используют ткани и мелкие сетки из натуральных и синтетических материалов, войлок, фетр, керамику, порошковые материалы, специальный пористый картон. Применяют также насыпные слои зернистых материалов (песка, гравия и др.).

В химической промышленности наиболее распространены рукавные фильтры. В них развитая поверхность фильтрации выполнена в виде множества сшивных или цельнотканых рукавов цилиндрической формы из фильтровальной ткани, свободных или натянутых на каркас.

Схема фильтра бескаркасной конструкции приведена на рис.

3.35. В нижней части корпуса 9 (обычно прямоугольной формы) расположена горизонтальная перегородка 12 с несколькими рядами патрубков. Рукава 10 нижними концами надеты на патрубки и закреплены на них хомутами 11. Верхние концы рукавов хомутами 8 закреплены на крышках 7, подвешенных на раме 6. Под перегородкой 12 расположен бункер 13 для сбора пыли, сообщающийся (через окна в перегородке 12) с трубопроводом 16 запыленного газа. В нижней части бункера расположен шнек 14, шлюзовый затвор 15 для транспортирования и выгрузки пыли. Верхняя часть корпуса 9 через окна, снабженные заслонками 1 и 4, сообщается с трубопроводами очищенного газа 2 и продувочного воздуха 3.

Цикл работы фильтра состоит из стадий фильтрации и регенерации фильтровальной ткани. Запыленный газ из трубопровода 16 под некоторым давлением через бункер 13 и патрубки перегородки 12 поступает внутрь рукавов 10 и фильтруется сквозь их стенки. Твердые частицы (пыль) остаются на внутренней поверхности и в порах стенок рукавов, а очищенный газ из корпуса филь-

тра поступает в трубопровод 2. Через некоторое время слой пыли в рукавах утолщается, и гидравлическое сопротивление фильтра увеличивается. После того, как сопротивление станет недопустимо большим (или значительно уменьшится скорость фильтрации) подачу очищаемого газа прекращают и приступают к регенерации фильтра. Для этого специальным механизмом 5, расположенным на крышке корпуса, рукава встряхиваются для отделения пыли от стенок. Верхние концы рукавов получают толчкообразное возвратно-поступательное движение через раму 6 и систему подвесок. Встряхивание рукавов обычно сопровождается продувкой их воздухом, подаваемым специальным вентилятором (воздуходувкой) через канал 3 (при этом заслонка 4 открыта, а заслонка 1 закрыта). Воздух проходит через фильтр в обратном направлении (по отношению к направлению очищаемого газа). Воздух проходит через стенки рукавов снаружи внутрь, поступает через патрубки в полость бункера 13, откуда отводится в канал запыленного газа или специальный трубопровод. Отделяемая при регенерации твердая фаза (пыль) падает на дно бункера, транспортируется шнеком 14 и удаляется из фильтра через шлюзовой затвор 15.

Для лучшего отделения пыли часто используют импульсную подачу продувочного воздуха. Для предотвращения чрезмерного раздувания ткани 1 (рис. 3.36, а) рукавов при работе и смятия их при обратной продувке в стенки рукавов вшивают проволоочные кольца 2. В других конструкциях внутрь рукавов помещают гибкие каркасы (рис. 3.36, б); они состоят из ряда распорных колец 3, укрепленных на проходящих по осям рукавов проволоочных тросах 4.

Применяют также фильтры с рукавами, открытыми с двух сторон, с двумя перегородками (одна сверху, другая снизу), снабженными патрубками. Газ может подаваться в рукава сверху, что создает благоприятные условия для вывода уловленной пыли.

В рукавных и многих других фильтрах используют ткани и различные фильтровальные материалы из натуральных и синтетических волокон, работающие при температуре не выше 250 °С и обладающие ограниченной коррозионной стойкостью. В связи с этим в ряде случаев для тонкой очистки горячих и агрессивных газов от пыли применяют керамические и порошковые фильтры, обладающие высокой термо- и кислотостойкостью; последние особенно перспективны, так как устойчиво работают при температуре, близкой к 400 °С.

Аппараты мокрой пылеочистки. Один из способов очистки газов от растворимых вредных примесей и взвешенных твердых частиц — промывка газа жидкостью, чаще всего водой. Аппараты для этого процесса называют обычно скрубберами или мокрыми фильтрами. В них либо газ барботирует сквозь слой жидкости, либо жидкость движется в потоке газа в виде струй или мелких капель. Очистка от пыли происходит прилипанием твердых частиц

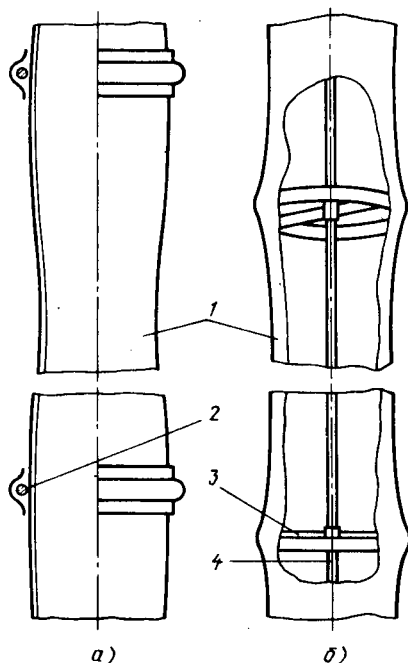


Рис. 3.36. Армированные фильтрующие элементы:
а — с вшитыми кольцами; б — с гибким каркасом

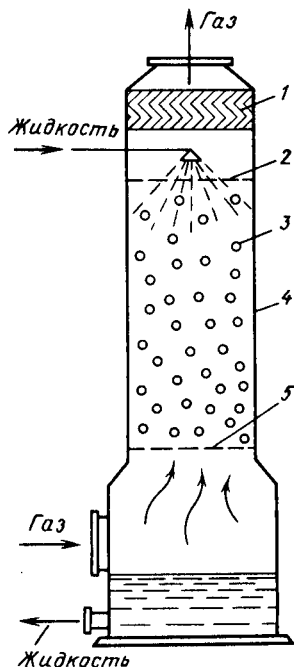


Рис. 3.37. Пылеуловитель с псевдоожиженной шаровой насадкой

к поверхности жидкости с последующим переходом их в жидкую фазу. В некоторых случаях частицы прилипают к тонкой пленке жидкости, смачивающей поверхность насадки или металлической сетки, или к поверхности пузырьков пены (в пенных аппаратах).

Мокрые пылеуловители отличаются сравнительно небольшой стоимостью и обычно более эффективны, чем сухие. Некоторые их конструкции по способности улавливать мелкие частицы (размером $>0,1$ мкм) конкурируют с электрофильтрами. Однако улавливаемый твердый продукт в них выделяется в виде суспензии или шлама, что связано с необходимостью обработки сточных вод и, следовательно, с удорожанием очистки; поэтому мокрый способ целесообразно использовать для разделения низкоцентрированных мелкозернистых пылей. При обработке высококонцентрированной пыли (например, в системах пневмотранспорта) мокрые фильтры можно использовать в сочетании с сухими пылеуловителями в качестве второй ступени (перед выбросом газа в атмосферу).

Конструкции аппаратов мокрой пылеочистки отличаются большим разнообразием. По принципу действия их можно разделить на: полые форсуночные скрубберы; насадочные скрубберы; бар-

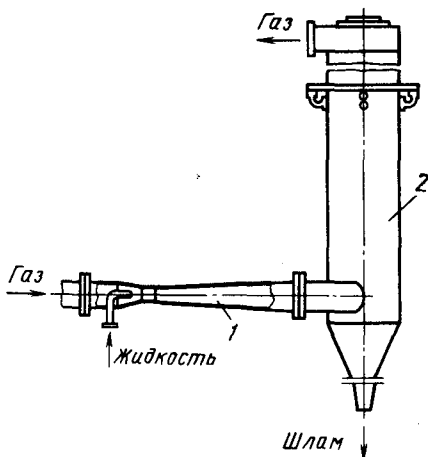
Рис. 3.38. Схема скруббера Вентури

ботажные и пенные аппараты; аппараты ударно-инерционного действия; орошаемые циклоны; механические скрубберы; скоростные промыватели.

Схема пылеуловителя с псевдооживленной насадкой приведена на рис. 3.37. Внутри цилиндрического корпуса 4 между нижней опорной 5 и верхней ограничительной 2 решетками находится слой насадки 3 из полых или сплошных шаров. Решетка 5 с крупными отверстиями или прямоугольными щелями является одновременно и газораспределительной. В верхней части аппарата установлен каплеуловитель 1. Высота неподвижного слоя насадки составляет 200—300 мм при расстоянии между решетками 1200—1500 мм. Шары насадки изготовляют из полиэтилена, полистирола, резины, стекла и других материалов; диаметр шаров не более 0,1 диаметра аппарата. Диаметр промышленных аппаратов этого типа достигает 6,5 м.

Аппарат работает в условиях полного псевдооживления насадки, орошаемой сверху жидкостью из распылителя при скорости газа 4—6 м/с. Обеспечивается хороший контакт газа и жидкости благодаря турбулизации газового потока псевдооживленной насадкой, циркулирующей в рабочем объеме, при многократном обновлении межфазной поверхности. Эффективность пылеулавливания, а также гидравлическое сопротивление аппарата возрастают по мере увеличения динамической высоты трехфазного слоя в аппарате. Гидравлическое сопротивление в рабочем режиме 0,8—2,0 кПа.

Большинство мокрых пылеуловителей не улавливают твердые частицы размером менее 1 мкм. Эту задачу можно решить лишь при большой скорости газа относительно капель жидкости, захватывающих частицы пыли. При малых и средних скоростях мелкие частицы, взвешенные в газе, обтекают капли, не достигая их поверхности; при этом частицы не прилипают к межфазной поверхности. Высокая относительная скорость достигается в скруббере Вентури, состоящем из орошаемой трубы-распылителя с сужением и расширением (трубы Вентури) и сепаратора для отделения капель жидкости от газового потока (рис. 3.38). Труба 1 состоит из сужающейся части (конфузора), короткого цилиндрического участка (горловины) и расширяющегося участка (диффу-



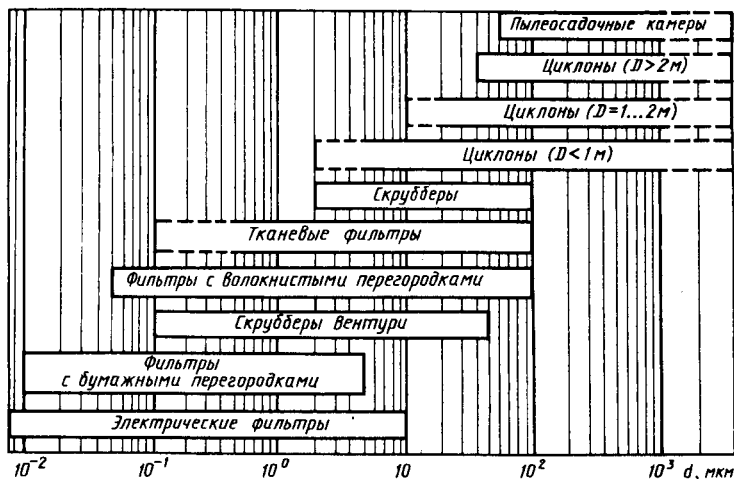


Рис. 3.39. Диаграмма к определению области применения аппаратов для улавливания аэрозольных частиц (d — диаметр частиц)

зора). Жидкость подается в конфузор или в горловину через распределитель или механическую форсунку. Рекомендуются следующие геометрические характеристики трубы: углы конуса конфузора и диффузора соответственно 25 — 28 и 6 — 7° , длина горловины $0,15$ — $0,5$ ее диаметра; диаметр горловины $0,4$ — $0,5$ диаметра трубопровода. Для снижения потерь давления внутреннюю поверхность трубы-распылителя подвергают механической обработке.

При выходе газожидкостного потока из горловины происходит дополнительное дробление жидкости при расширении потока в диффузоре. Здесь же частицы пыли захватываются каплями жидкости. Следующая стадия процесса — отделение капель от потока газа — происходит в циклоне-каплеуловителе 2.

Выбор пылеочистительного оборудования. Основные факторы, определяющие целесообразный выбор типа аппарата для пылеочистки, — размер частиц пыли, их концентрация в очищаемом газе и необходимая степень улавливания. В первом приближении тип аппарата можно выбрать по данным рис. 3.39 в зависимости от диаметра аэрозольных частиц. Для высококонцентрированных пылей, а также в случае, когда твердая фаза является ценным продуктом, следует предпочесть сухую очистку.

Требования к полноте улавливания определяются либо необходимыми санитарно-гигиеническими условиями чистоты атмосферного воздуха, либо условиями работы технологического оборудования. Очистка газов предотвращает, например, чрезмерное изнашивание компрессоров и вентиляторов из-за эрозии их рабочих органов, а также засорение контактной массы в реакто-

рах пылью. Повышенная степень улавливания иногда обусловлена высокой ценностью пыли. При выборе конструкции и материала пылеочистного оборудования учитывают также наличие влаги и агрессивных компонентов в газах, их количество и температуру.

Заданную степень улавливания обеспечивают правильным выбором типа, конструкции, размеров аппарата и его эксплуатацией в расчетном режиме. Попытки перегрузить аппарат, упростить и удешевить его конструкцию или эксплуатацию по сравнению с проектными решениями обычно приводят к уменьшению полноты пылеулавливания.

Улучшение пылеулавливания требует обычно увеличения либо размеров аппаратуры, либо ее энергоемкости. Так, рукавные фильтры, осадительные камеры, электрофильтры работают более эффективно при меньших скоростях газа, т. е. при больших размерах аппаратов. Циклоны, скоростные промыватели, скрубберы ударного действия в режиме эффективного пылеулавливания имеют большое гидравлическое сопротивление или требуют увеличенного расхода жидкости, что приводит к повышенным затратам энергии. Чем мельче частицы аэрозоля и выше требования к степени их улавливания, тем больше затраты на сооружение установок и их эксплуатацию. В связи с распространением в химической промышленности установок большой единичной мощности, обычно более экономически эффективных по сравнению с установками малой производительности, объемы перерабатываемых газов настолько возросли, что размеры аппаратов малой энергоемкости, работающих при низких скоростях, становятся чрезмерно большими.

Поэтому при выборе пылеочистных аппаратов предпочитают использовать более компактные аппараты, несмотря на их большую энергоемкость.

При выборе типа пылеуловителя следует учитывать его возможности и особенности. Пылевые камеры, циклоны и другие инерционные пылеуловители наиболее просты и дешевы, но улавливают только крупные частицы. Их применяют на аспирационных установках при дробилках, при транспортировании сыпучих материалов, в двухступенчатых установках для предварительной очистки перед вентиляторами для защиты лопаток роторов от эрозии, устанавливая перед электрофильтрами или рукавными фильтрами (например, в системах пневмотранспорта), а также в случаях, когда требуется уловленную пыль разделить на фракции по крупности частиц.

Большинство мокрых пылеуловителей, улавливающих частицы размером 2—5 мкм, целесообразно использовать главным образом, когда газ требуется дополнительно охладить, увлажнить или очистить от растворимых компонентов (аммиака, сернистого газа). Применение скоростных промывателей (скрубберов Вентури) позволяет улавливать более мелкие частицы, но эти аппараты очень

энергоемки. При использовании мокрых пылеуловителей приходится уделять внимание последующей переработке суспензий (пульп, шламов), а также противокоррозионной защите аппаратуры.

Рукавные (тканевые) фильтры и электрофильтры позволяют достичь высокой степени очистки, в том числе от мелких частиц, но часто требуют предварительной подготовки газа — в основном охлаждения до определенной температуры. Для электрофильтров выбирают оптимальные условия работы (температуру, влажность, скорость газа, конструкцию и метод встряхивания электродов) в зависимости от электропроводности пыли, ее слипаемости, дисперсности и химического состава газа. Электрофильтры, по сравнению с другими аппаратами тонкой очистки, обладают минимальным гидравлическим сопротивлением и большими возможностями автоматизации процесса. По размерам электрофильтры близки к рукавным, требуют больших капитальных затрат, но эксплуатация их дешевле. Сухие электрофильтры работают при температуре до 400—500 °С. Они наиболее экономичны при больших объемах газа (начиная с $0,5 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{ч}$). При малой производительности использование электрофильтров приводит к неоправданному возрастанию удельных затрат. Кроме того, электрофильтры нельзя использовать при обработке взрывоопасных газовых сред. В этих случаях целесообразно устанавливать рукавные фильтры или мокрые пылеуловители.

§ 3.8. ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕХНИКА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

Основная тенденция в совершенствовании техники разделения неоднородных систем — наиболее полное и рациональное использование свойств центробежного поля для обеспечения максимальной производительности аппарата при заданном качестве разделения. В этом аспекте в последние годы разработаны более совершенные типы центрифуг, сепараторов, аппаратов для пылеочистки. В области фильтровальной техники наряду с развитием центробежной фильтрации проводят работы по внедрению механизированных и автоматизированных способов выгрузки осадка.

Разработана конструкция вертикального дискового фильтра типа ДдАр (рис. 3.40), в котором для механизированной выгрузки осадка с неподвижных фильтровальных дисков 3 предназначены вращающиеся серповидные ножи 5. Срезанный ножом осадок транспортируется к центральному разгрузочному отверстию диска и сбрасывается в выгрузной люк 1; при этом осадок не касается стенки и днища, что исключает возможность прилипания осадка, обладающего адгезионными и тиксотропными свойствами. Выгрузной люк закрывается быстродействующим поворотным затвором.

Фильтр состоит из корпуса 2, в котором размещен пакет фильтровальных дисков 3 с дистанционными кольцами. Диски уста-

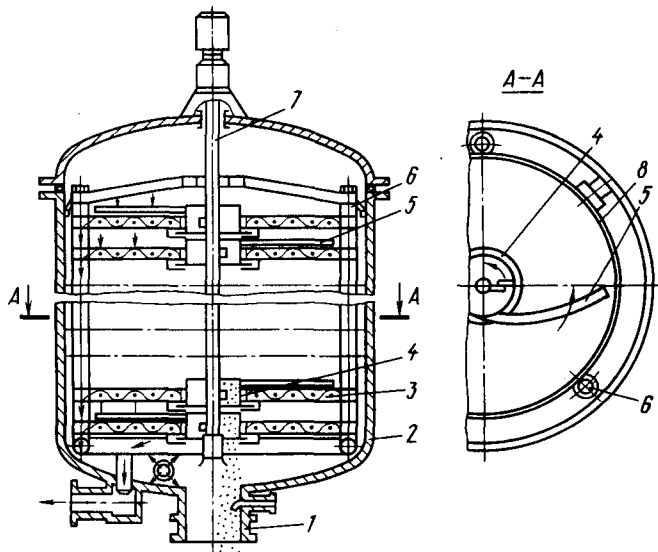


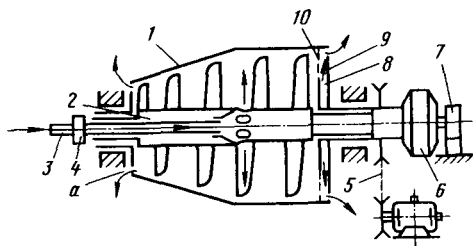
Рис. 3.40. Вертикальный дисковый фильтр

новлены на три вертикальные дренажные трубы 6 и имеют внешний неподвижный 8 и внутренний вращающийся 4 борта, способствующие качественной промывке осадка. Серповидный разгрузочный нож 5 прикреплен к подвижному борту, в котором выполнен вырез на уровне рабочей поверхности диска. В центре разгрузочного отверстия расположен приводной вал 7, выступы которого входят в зацепление с выступами внутреннего борта, обеспечивая медленное вращение разгрузочного ножа. На задней кромке ножа расположены щетки, предназначенные для удаления остатков осадка и регенерации фильтрующей перегородки (в последнем случае по линии отвода фильтрата подается чистая жидкость). Благодаря разделению полости диска на три секции с раздельными выводами фильтрата обеспечиваются благоприятные гидродинамические условия для проведения процессов разделения суспензии и промывки осадка.

Фильтр испытан с положительными результатами в производстве поликарбоната на стадии фильтрования суспензий растворителя (ацетона и метилхлорида) и в производстве пластмасс при очистке растворов полисульфона от асканита. Разработан размерный ряд фильтров ДдАр с поверхностью фильтрования 5; 10 и 20 м².

В шнековых осадительных центрифугах при относительном вращении шнека в роторе образуются вихри в потоке суспензии, что не обеспечивает иногда достаточной эффективности разделе-

Рис. 3.41. Схема шнековой осадительно-фильтрующей центрифуги с пульсирующей выгрузкой осадка



выгрузкой осадка (рис. 3.41) лишена этих недостатков. Центрифуга работает в циклическом режиме с чередованием стадий осадительного центрифугирования, отжима влаги из осажденной твердой фазы и выгрузки осадка.

В периоды осаждения и отжима муфта 7, служащая для регулирования передаточного числа механизма привода шнека 2, отключена и шнек вращается с той же угловой скоростью, что и барабан 1 центрифуги. Это исключает отрицательное влияние шнека на осаждение частиц твердой фазы суспензии и отжим жидкости из образовавшегося осадка. В период выгрузки осадка муфта 7 включена, и шнек, соединенный с редуктором 6, вращается с несколько меньшей частотой, чем барабан.

В стадии осаждения исходная суспензия через питающую трубу 3 и клапан 4 начинает заполнять ротор центрифуги с образованием на его стенках осадка и выводом части жидкости через фильтрующие поверхности внутреннего диска 10. Фильтрат попадает в кольцевую камеру 8 и удаляется из ротора через дренажные отверстия на периферии внешнего диска 9.

Осаждение продолжается до накопления на стенках барабана требуемого количества твердой фазы, после чего срабатывает клапан 4 и подача исходной суспензии прекращается. В стадии отжима в результате удаления жидкости через дренажные отверстия кольцевая камера 8 осушается. Возникающая при этом по обе стороны от внутреннего диска 10 разность давлений обеспечивает проход через фильтрующую поверхность жидкости, оставшейся в барабане и жидкости, отжимаемой из осадка. После окончания отжима скорость шнека уменьшается и осадок через окна *a* выгружается из барабана, освобожденного от жидкости, что позволяет получить продукт с низкой влажностью. Далее цикл повторяется. Привод центрифуги осуществляется через клиноремennую передачу 5.

Эту центрифугу можно применять в химической промышленности для разделения легкодиспергируемых суспензий, а также при необходимости выделения из суспензии твердой фазы при относительно низком содержании ее в жидкости.

В центробежном сепараторе, называемом вихревым, сепарируемая жидкость совершает винтовое движение вокруг оси вращающегося барабана. В барабане 1 вихревого сепаратора (рис. 3.42) на тарелкодержателе 7 установлен пакет тарелок 2. Зазоры на

внутреннем 6 и наружном 3 краях пакета перекрыты. Каждая тарелка имеет один или несколько рядов отверстий *a* под дистанционными планками 4 и 5. На планках выполнены боковые вырезы *б* и *в* с противоположных сторон, причем над отверстиями *a* направление вырезов *в* в планках 5 противоположно направлению вырезов *в* в планках 4. Тарелки собирают в пакет таким образом, чтобы вырезы *б* в планках 5 размещались под отверстиями *a* расположенных выше тарелок с вырезами *в* в планках 4. При такой конструкции пакета тарелок в нем образуется винтовой канал для движения сепарируемой жидкости.

Процесс разделения происходит следующим образом. Сепарируемая жидкость подается в полость тарелкодержателя, откуда поступает через отверстия *a* в зазор между нижними тарелками; здесь жидкость перемещается вокруг оси вращающегося барабана до планок 5 и 4. Затем она устремляется в вырезы *б*, через отверстия *a* расположенных выше тарелок попадает в образуемые ими зазоры и продолжает свое круговое движение до следующих планок 5 и 4. Направление движения сепарируемой жидкости (показано на рисунке стрелками) перпендикулярно направлению центробежных сил, что благоприятствует разделению.

Сепаратор этой конструкции целесообразно использовать для разделения тонких суспензий и эмульсий в случаях, когда при относительно невысокой производительности необходима высокая степень разделения.

Вихревой безнасадочный аппарат для пылеочистки (рис. 3.43)

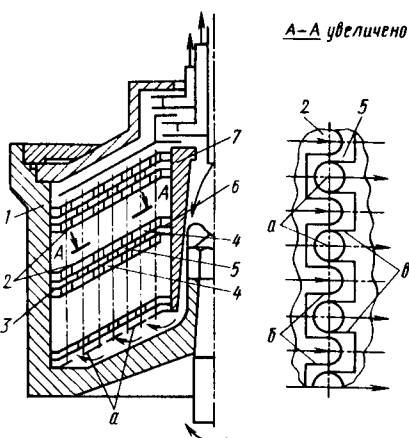


Рис. 3.42. Вихревой сепаратор

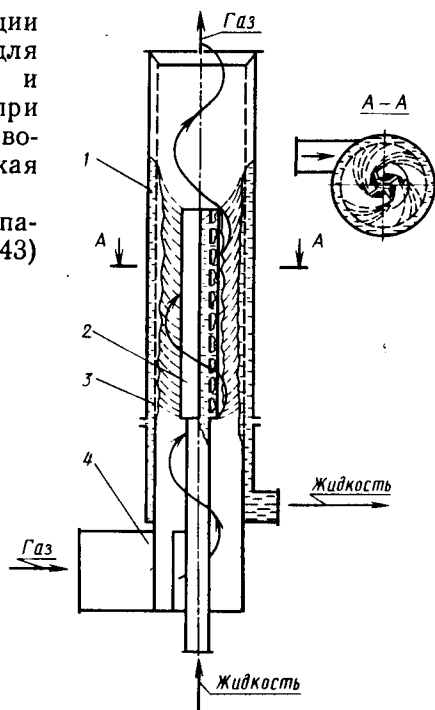


Рис. 3.43. Вихревой пылеуловитель с вертикально-дефлекторным оросителем

по конструкции и принципу работы аналогичен показанному на рис. 2.92 вихревому аппарату для абсорбции легко- и средне-растворимых газов. Однако для большего перекрытия газового потока жидкостной пленкой дефлектор оросителя 2 выполнен в виде пластин, приваренных к трубе вдоль ее оси.

Как и в вихревом абсорбере, газ через тангенциальный входной патрубок 4 поступает в цилиндрический корпус 1, образуя восходящий вращающийся поток. Жидкость, выходя из отверстий оросителя 2 в виде струй, растекается по дефлектору (пластине) и образует вертикальные пленочные завесы по всей высоте контактной зоны. Жидкость отделяется от вращающегося потока газа перфорированным сепаратором 3.

Промышленные испытания этого аппарата показали, что он может работать при скорости газа до 20—25 м/с практически без уноса. Гидравлическое сопротивление не превышает 2 кПа. Эффективность очистки запыленного газа от частиц размером более 1 мкм в зависимости от диаметра аппарата составляет 95—99 %.

Химическими реакторами или реакционными аппаратами называют устройства для проведения химических реакций с целью получения определенных веществ.

Промышленные химические реакторы отличаются большим конструктивным разнообразием. На конструкцию химического реактора и связанного с ним оборудования для физических процессов решающим образом влияет характер проводимой в нем реакции. Например, если реакция протекает с достаточной скоростью лишь при высоких температуре и давлении, следует выполнить реактор в виде цилиндра с толстыми стенками и включить в технологическую схему машины и аппараты для сжатия и нагревания газовой реакционной смеси. Если реакция протекает на катализаторе, необходимо применение аппаратов для тщательной очистки реакционной смеси от веществ, отравляющих катализатор. Если реакция обратима и, следовательно, протекает не полностью, требуется аппаратура для непрерывного выделения продукта из циркулирующей в системе реакционной смеси и возвращения непрореагировавших веществ в реактор (например, синтез аммиака).

Однако это не означает, что конструкция реактора целиком определяется характером реакции и свойствами реагирующих веществ. Одну и ту же реакцию можно проводить в реакторах различных конструкций. Во многих случаях применение нового более совершенного реактора позволяет провести реакцию быстрее, с большим выходом целевого продукта и меньшим выходом побочных продуктов, например созданием лучшего температурного или гидравлического режима в аппарате, более высокого давления. Это, в свою очередь, отражается на работе и конструктивных особенностях обслуживающего реактор тепло- и массообменного оборудования.

В зависимости от формы реактора, наличия или отсутствия перемешивающих устройств, вязкости и плотности реакционной смеси в реакторе могут создаваться различные гидравлические условия, от которых существенно зависит течение реакции.

Используют два типа проточных, т. е. непрерывного действия, реакторов с существенно различными гидравлическими условиями: кубовый (реактор смешения) и трубчатый (реактор вытес-

нения). Кубовый реактор представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд высотой, как правило, 1—2 диаметра, снабженный вращающейся мешалкой, установленной на вертикальном валу, и штуцерами для подвода реагентов и отвода продуктов реакции. Такой аппарат используют для проведения реакций в жидкой среде. При интенсивной работе мешалки условия в нем близки к идеальному (или полному) смешению и характеризуются постоянством концентраций реагирующих веществ и температуры по всему объему реактора.

Трубчатые проточные реакторы, в отличие от кубовых, не имеют перемешивающих устройств, в них перемешивание среды сведено к минимуму. Приближенной теоретической моделью такого аппарата является реактор идеального вытеснения, в котором среда движется с постоянной скоростью подобно поршню. Отсутствие перемешивания и поступательное (поршневое) течение среды определяют одинаковое время пребывания различных частиц или элементарных объемов реакционной смеси в таком аппарате. Концентрации веществ, участвующих в реакции, плавно изменяются по длине аппарата, и это изменение обусловлено только реакцией. В таком аппарате не происходит разбавления поступающих в него исходных веществ продуктами реакции. В связи с этим при одинаковых начальных и конечных концентрациях средние концентрации реагирующих веществ и скорость реакции больше, а время реакции и необходимый объем реактора меньше, чем в условиях идеального смешения.

Кубовые реакторы близки по своим характеристикам к модели идеального смешения. Реальные трубчатые реакторы, наоборот, обладают существенными отклонениями от теоретической модели. Известно, например, что поршневое течение жидкости в трубе практически невозможно: как при ламинарном, так и при турбулентном течении скорость жидкости в различных точках сечения потока неодинакова. Частицы жидкости в центре трубы движутся значительно быстрее, чем частицы, находящиеся вблизи стенки. Это нарушает условие равенства времени пребывания различных частиц в аппарате и влияет на поле концентраций в нем. Кроме того, модель идеального вытеснения не учитывает молекулярную и конвективную диффузию веществ в направлении потока (продольное перемешивание), уменьшающие средние концентрации реагирующих веществ и среднюю скорость реакции. Вследствие этого время реакции и необходимый объем реактора увеличиваются. Несмотря на эти отклонения, модель идеального вытеснения весьма полезна для расчета и анализа работы реакторов.

§ 4.1. АППАРАТЫ ДЛЯ ЖИДКОСТНЫХ РЕАКЦИЙ

Реакторы, в которых реакционная среда является жидкостью, довольно часто используют в химической промышленности. В качестве примеров можно привести процессы органиче-

ского синтеза, получения каучука, персульфата калия, полимеризацию бутадиена. Реакции в жидкой среде могут протекать как в однофазной системе, так и в двухфазной, т. е. в эмульсии.

В эмульсионных процессах исходные вещества растворены в двух несмешивающихся жидкостях. Для течения реакции необходим контакт фаз. Для этого одна из жидкостей обычно должна быть в виде капель взвешена в другой (дисперсионной среде). В большинстве случаев этого достигают применением вращающихся мешалок. Иногда эмульсии стабилизируют поверхностно-активными веществами, что позволяет уменьшить интенсивность перемешивания (следовательно, снизить необходимую мощность), но это затрудняет последующее отстаивание эмульсии.

При гомогенных процессах перемешивание необходимо для обеспечения равномерного протекания реакции в объеме; этого достигают выравниванием температур и концентраций по объему аппарата. Кроме того, перемешивание создает достаточно высокие скорости жидкости у теплопередающих поверхностей, что способствует улучшению условий теплообмена.

При проведении эмульсионных жидкостных реакций возможны кинетическая и диффузионная области их течения. Это определенным образом влияет на выбор конструкции реактора. В диффузионной области (быстрые реакции) необходимо обеспечить возможно большую поверхность контакта фаз. Для медленных реакций, протекающих в кинетической области, большое значение приобретает объем реактора, т. е. время протекания реакции. Разнообразие конструкций жидкостных реакторов обусловлено использованием различных перемешивающих и теплообменных устройств в зависимости от вязкости жидкости и теплового эффекта.

На рис. 4.1. показаны различные перемешивающие устройства. Перемешивание можно осуществить с использованием мешалок различных конструктивных форм, пневматических, центробежных и шнековых устройств, сопл, различного типа тарелок и насадок, реализацией турбулентного течения реагентов. Применение того или иного способа перемешивания зависит от необходимого гидродинамического режима течения реагентов в аппарате.

Режим идеального смешения можно реализовать применением мешалок (рис. 4.1, а—з).

В реакторах идеального вытеснения перемешивание допускается лишь в поперечном сечении аппарата, что при обработке высоковязких жидкостей может быть достигнуто применением шнека (рис. 4.1, л). Среды с небольшой вязкостью перемешивают турбулизацией потока реакционной смеси в трубчатом реакторе. Для предварительного смешения реагентов перед подачей в реактор применяют струйный смеситель (рис. 4.1, м).

Для поддержания оптимального температурного режима в реакторах используют различные теплообменные устройства, обеспечивающие нагрев или охлаждение реакционной массы. Выбор

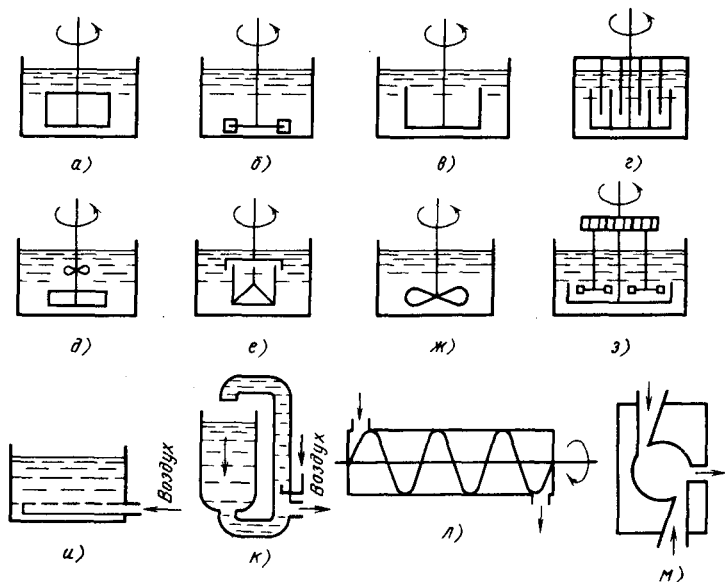


Рис. 4.1. Перемешивающие устройства для жидкости:

а—з — мешалки (а — лопастная, б — турбинная, в — якорная, г — рамная, д — комбинированная лопастно-винтовая, е — барабанная, ж — винтовая, з — планетарная); и — пневматическое; к — воздушный подъемник (газлифт); л — шнек; м — струйный смеситель

конструкции теплообменного устройства зависит прежде всего от теплового эффекта реакции, а также от температурных условий ведения процесса, гидродинамического режима движения реагентов, физических, теплофизических и химических свойств теплоносителя.

По конструктивному оформлению поверхностные теплообменные устройства можно разделить на встроенные и выносные. Встроенные в аппарат устройства в свою очередь подразделяют на наружные и внутренние. Примером устройств первой группы является греющая рубашка (рис. 4.2, а), а представителем второй группы — погруженный внутрь аппарата змеевик (рис. 4.2, б).

В качестве примеров на рис. 4.2 показаны наиболее распространенные способы организации теплообмена и теплообменные устройства, применяемые в реакторах.

Следует остановиться на встроенных теплообменных устройствах, так как выносные теплообменные аппараты рассмотрены в гл. 1.

Выбор и конструктивное оформление встроенного теплообменного устройства зависят от характера технологического процесса и количества передаваемой в единицу времени теплоты, а также от физических свойств, температуры и давления теплоносителя,

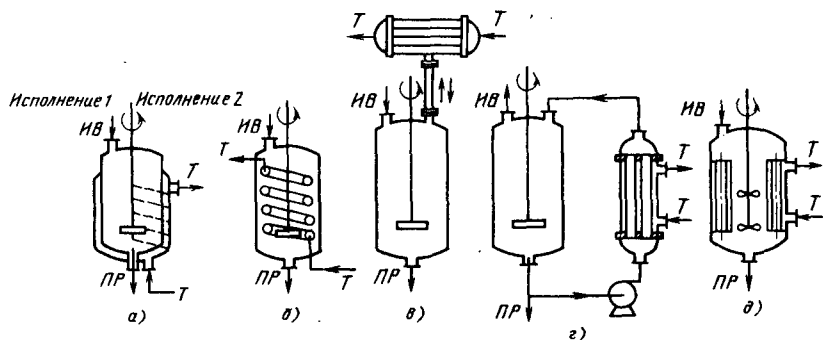


Рис. 4.2. Схемы теплообменных устройств реакторов:

а — рубашка; б — встроенный внутренний змеевик; в — выносной конденсатор; г — выносной теплообменник; д — встроенный внутренний теплообменник; ИВ — исходные вещества; ПР — продукты реакции; Т — теплоноситель

агрегатного состояния, агрессивных и физических свойств нагреваемой среды. С точки зрения удобства контроля состояния реактора и теплообменного устройства, а также простоты конструкции и обеспечения более мягкого и равномерного нагрева реакционной массы следует отдать предпочтение наружным теплообменным устройствам. Гладкая рубашка (рис. 4.2, а, исполнение 1) эффективна, когда скорость движения теплоносителя мало влияет на теплопередачу, например, при обогреве паром. При использовании жидких теплоносителей для увеличения скорости их движения к рубашке приваривают спираль (рис. 4.2, а, исполнение 2). Это увеличивает эффективность теплообмена иногда в 6—7 раз. Если давление теплоносителя превышает 0,6—0,7 МПа или необходимы высокие скорости движения теплоносителей, приме-

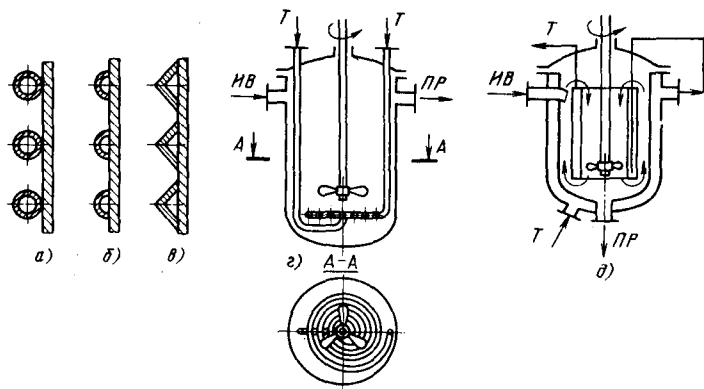


Рис. 4.3. Наружные и внутренние теплообменные элементы реакторов (ИВ, ПР и Т — соответственно исходные вещества, продукты реакции и теплоноситель)

няют приваренные снаружи к стенке реактора змеевики, выполненные из целой трубы (рис. 4.3, а), полутрубы (рис. 4.3, б) или профильного проката (рис. 4.3, в). К недостаткам приварных змеевиков следует отнести большую длину сварных швов, трудность обеспечения герметичности, повышенное гидравлическое сопротивление. Последнее обстоятельство особенно важно при естественной циркуляции теплоносителя.

На наружных стенках реактора не всегда удастся разместить теплообменный элемент с необходимой поверхностью нагрева или охлаждения. Следовательно, наружными теплообменными устройствами можно снабжать реактор небольшого объема или реакторы с умеренными тепловыми нагрузками.

Если поверхность наружных теплообменных устройств недостаточна и не обеспечивает теплообмена, дополнительно устанавливают внутренние теплообменные элементы. Их выполняют в виде цилиндрической (рис. 4.2, б) или плоской (рис. 4.3, г) трубчатой спирали.

В первом случае спираль устанавливают около стенки, во втором — у дна реактора. В качестве теплообменных элементов вместо змеевиков часто используют полые диффузоры в виде цилиндрического или конического стакана с двумя гладкими, легко очищаемыми стенками (рис. 4.3, д) или пучки прямых труб (рис. 4.2, д). Иногда применяют выносные конденсаторы или теплообменники (см. рис. 4.2, в, г).

Внутренние устройства имеют большую поверхность теплообмена, выдерживают достаточно высокие давления, просты в изготовлении и монтаже. К недостаткам их можно отнести усложнение конструкции реактора, трудность очистки аппарата, наружной поверхности змеевика и удаления воздуха из спирали, сложность их применения при значительной вязкости реакционных масс и выпадении осадков в процессе реакции.

Эмульсионную полимеризацию проводят как непрерывный процесс. Для этого используют агрегаты, состоящие из ряда последовательно соединенных полимеризаторов. Каждый из них работает в близких к идеальному смешению условиях. В целом в каскаде полимеризаторов создаются условия, близкие к модели идеального вытеснения.

Реактор для полимеризации дивинила со стиролом при температуре 50 °С (рис. 4.4) представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат (автоклав) объемом 12—20 м³. Аппарат состоит из корпуса 1 с рубашкой 2 для охлаждения, крышки 3, опоры 6, на которой укреплены электродвигатель 7 с редуктором 8 для привода вала 10 и рамной мешалки 11. Вал проходит через сальник 5 крышки. Продукт поступает в аппарат по трубе 4, доходящей почти до дна реактора, и выходит сверху через штуцер 9 (полимеризатор во время работы загружен полностью). В качестве хладагента применяют воду. На внутренних стенках аппарата в процессе его эксплуатации постепенно оседает поли-

мер, что ухудшает теплопередачу; поэтому периодически, примерно 2 раза в год, реактор чистят.

Реактор типа многосекционной колонны для полимеризации или поликонденсации (рис. 4.5) применяют в процессах получения полистирола и фенолоформальдегидных смол. Реактор состоит из нескольких последовательно соединенных между собой секций 5, каждая из которых имеет рубашку 11 со штуцерами 13 и 10 для подвода и отвода теплоносителя. На крышке 4 верхней секции укреплены электродвигатель 1 и редуктор 2, передающий вращение валу 7, проходящему через всю колонну и установленному в двух подшипниках — верхнем 3 и нижнем 12. Для исключения утечки реагирующих веществ через отверстия для вала в днищах секций предназначены предохранительные трубы 8, верхний уровень которых выше уровня жидкой смеси в секции. В каждой секции на валу 7 укреплены мешалки 6. Для перелива реакционной смеси

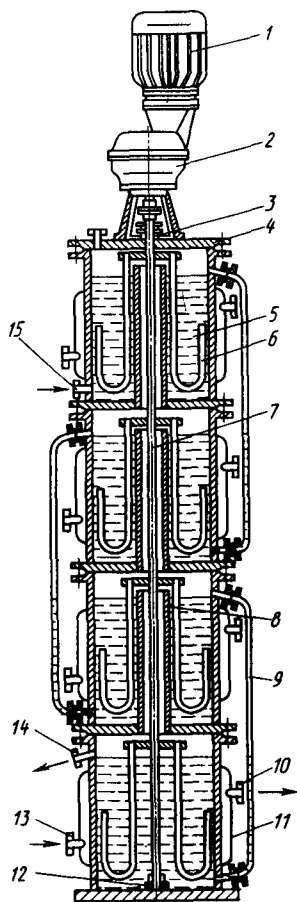
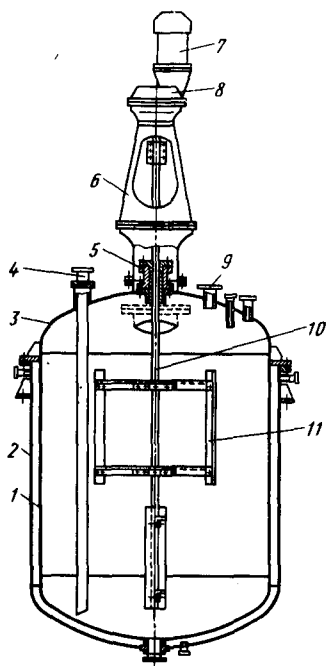


Рис. 4.4. Реактор для полимеризации дивинила со стиролом

Рис. 4.5. Многосекционный реактор для полимеризации или поликонденсации

служат переливные трубы 9. Исходные вещества поступают в нижнюю часть верхней секции через штуцер 15, перемешиваются, переливаются через трубу 9 в следующую секцию и т. д. Из нижней секции продукт выгружается через штуцер 14. Таким образом, реактор является непрерывно действующим. Реактор целесообразно использовать для осуществления процессов химического превращения с малыми скоростями, т. е. протекающих в кинетическом режиме. Наличие отдельных теплообменных устройств в виде рубашек 11 позволяет поддерживать необходимый температурный режим в каждой секции.

Для проведения реакций с большим тепловым эффектом используют аппараты с внутренними теплообменными элементами большой поверхности. Примером может служить реактор с пучком двойных теплообменных труб для алкилирования углеводовородов, в частности для получения изооктана из изобутана и бутилена. В реакторе циркулирует эмульсия смеси углеводовородов с серной кислотой. Реактор (рис. 4.6) имеет вертикальный цилиндрический корпус 6, рассчитанный на давление 1 МПа, внутри которого для отвода теплоты реакции расположен пучок 8 двойных теплообменных труб (трубок Фильда), окруженный кожухом 7, играющим роль направляющего диффузора. В нижней суженной части кожуха помещено колесо 11 осевого насоса (винтовая мешалка), обеспечивающее циркуляцию жидкости, перемешивание и обтекание теплообменной поверхности. Вал колеса выведен наружу через двойное торцовое уплотнение, привод расположен внизу. Вращение жидкости предотвращается продольными ребрами. Для подвода хладагента в верхней части расположены две распределительные камеры с трубными решетками 2 и 4. Верхние концы наружных теплообменных труб, заглушенных снизу, развальцованы в трубной решетке 4, верхние концы внутренних труб закреплены в решетке 2. Нижняя решетка 9 служит для крепления шпильками нижних концов теплообменных труб, чтобы обеспечить жесткость трубного пучка. Концы внутренних труб снабжены продольными ребрами.

Хладагент (жидкие аммиак или пропан) подается через штуцер 1 в верхнюю распределительную камеру, проходит по внутренним трубам вниз до заглушенных концов наружных труб и поднимается по зазору между трубами, испаряясь за счет теплоты реакции. Газ (пар) отводится из приемной камеры, расположенной между трубными решетками 2 и 4, по штуцеру 3. Исходные вещества вводятся в нижнюю часть корпуса через штуцера 10 и 12, продукт отводится сверху через штуцер 5.

Аналогично сконструированы горизонтальные реакторы с пучком U-образных теплообменных труб.

Реакционный агрегат с выносным теплообменником состоит из реактора 1 (рис. 4.7), выносного перемешивающего устройства 3 (обычно центробежного насоса) и выносного теплообменника 2. Этот агрегат сравнительно прост в изготовлении и эксплуатации

и особенно удобен в случаях, когда необходимы интенсивный теплообмен (например, при разложении гидроперекиси изопропилбензола) или расслоение эмульсии на два слоя. При этом реактор 1 одновременно служит отстойником. Именно по такой схеме извлекают изобутилен из газов нефтепереработки, разделяют углеводороды медно-аммиачными растворами (один из вариантов технологического оформления процесса).

Недостатки непрерывных реакторов с мешалками, основные из которых — громоздкость и большой расход электроэнергии на перемешивание — требовали создания непрерывно действующих реакторов, работающих по принципу идеального вытеснения. Этот принцип может быть осуществлен, если выполнить аппарат в виде трубы достаточной длины. Теплообмен в такой трубе можно осуществить достаточно просто, если ее снабдить рубашкой.

Сложность применения таких аппаратов определяется небольшими скоростями реакций в жидкой фазе, что требует создания реакционной зоны очень большой длины для достижения необходимой конверсии. Достаточно сказать, что непрерывно действующий проточный реактор для гидролиза дихлорэтана имеет длину труб порядка 1 км. Большая длина реактора необходима для

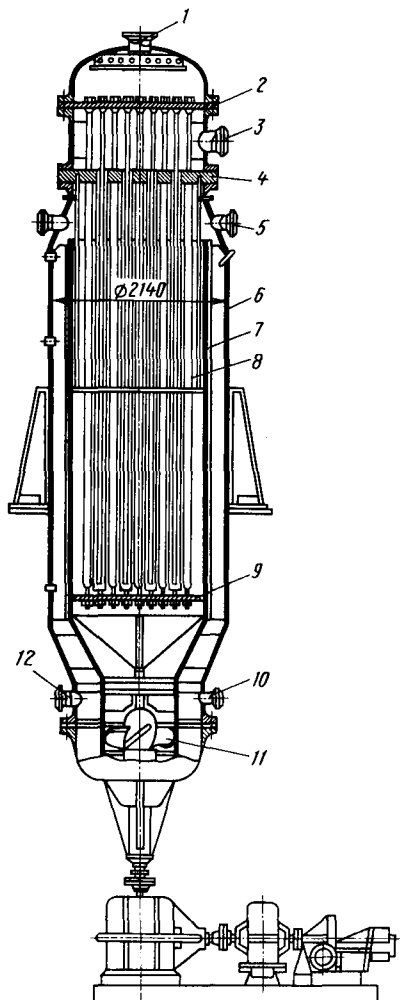


Рис. 4.6. Реактор с пучком двойных теплообменных труб

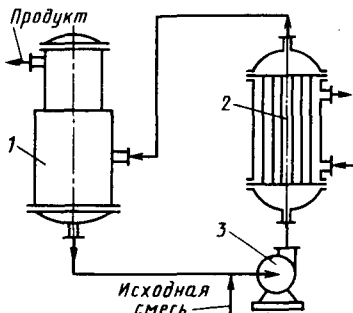


Рис. 4.7. Схема агрегата с выносным теплообменником

обеспечения достаточной скорости течения жидкости в аппарате, чтобы поток был турбулентным. Только при этом условии достигаются требуемое перемешивание реакционной смеси по сечению трубы и достаточная теплопередача. Для увеличения скорости уменьшают площадь сечения трубы при сохранении ее объема или используют рециркуляцию. Однако в последнем случае агрегат по своим характеристикам приближается к реактору идеального смешения, и его объем следует увеличить, например, использованием труб большего диаметра. Вследствие этого длина реактора сравнительно невелика. Рециркуляцию обеспечивают специальными циркуляционными насосами. Кратность циркуляции выбирают так, чтобы обеспечить турбулентный режим течения жидкости.

§ 4.2. СОСУДЫ С РУБАШКОЙ. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ

Как известно, на практике используют сосуды с рубашками различных конструкций (рис. 4.8—4.11).

Для соединения сосуда с рубашкой можно использовать сопряжения (см. рис. 4.8): конические с отбортовкой (или без отбортовки) и кольцевые.

Принимают угол конуса α равным 30 или 45°. Значения α более 45° не рекомендуются из соображений технологии изготовления и прочности.

Внешними нагрузками, обуславливающими напряженное состояние конструкции, для сосудов с рубашками являются давление p_2 в рубашке и разность температурных удлинений ϵ_t корпуса и рубашки. Как показывают результаты экспериментальных ис-

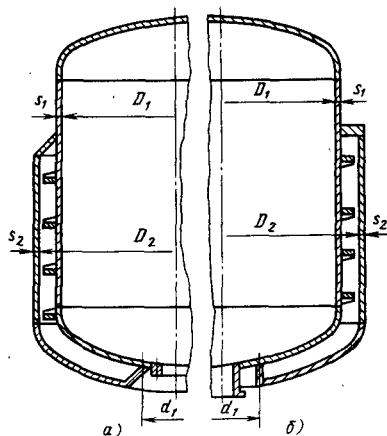


Рис. 4.8. Варианты сопряжения сосуда с U-образной рубашкой:

а — коническое; б — кольцевое

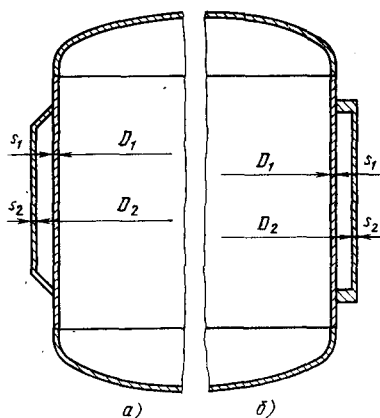


Рис. 4.9. Варианты сопряжения сосуда с цилиндрической рубашкой:

а — коническое; б — кольцевое

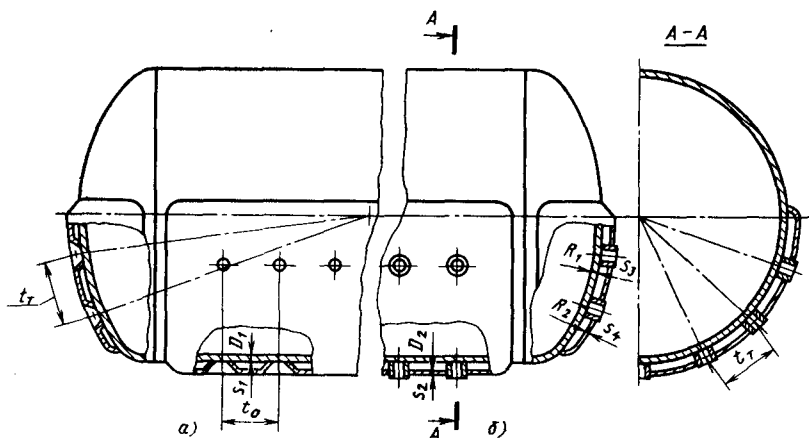


Рис. 4.10. Сосуды с рубашками, сопряженными с корпусом сосуда отбортовкой (а) и анкерными трубами (б)

следований (рис. 4.12), эти нагрузки вызывают возникновение краевых напряжений в месте сопряжения корпуса и рубашки; поэтому при расчете на прочность сосудов с рубашками недостаточно определить прочность отдельных элементов конструкции. Необходимо, кроме того, учесть и взаимодействие этих элементов в узлах сопряжения. Более того, указанные нагрузки требуют от узлов сопряжения свойств, которые в определенном смысле

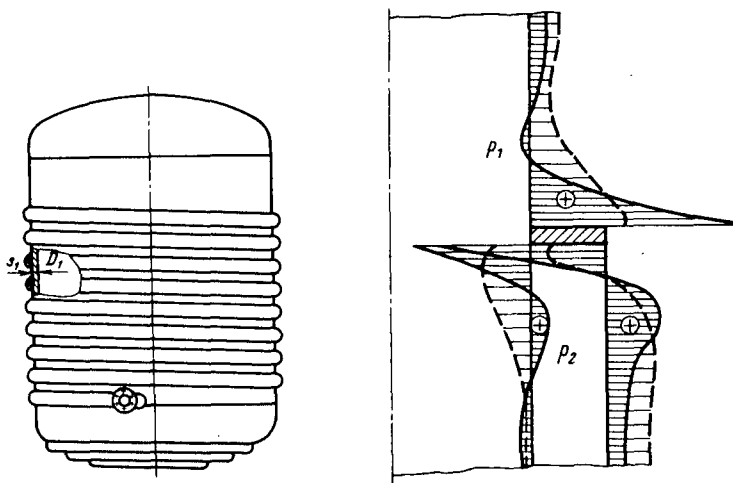


Рис. 4.11. Сосуд с приваренным змеевиком

Рис. 4.12. Эпюры напряжений, возникающих вблизи сопряжения при $p_2 > p_1$ (сплошные линии — осевые напряжения, штриховые — кольцевые напряжения; p_1 и p_2 — давления в корпусе и в рубашке)

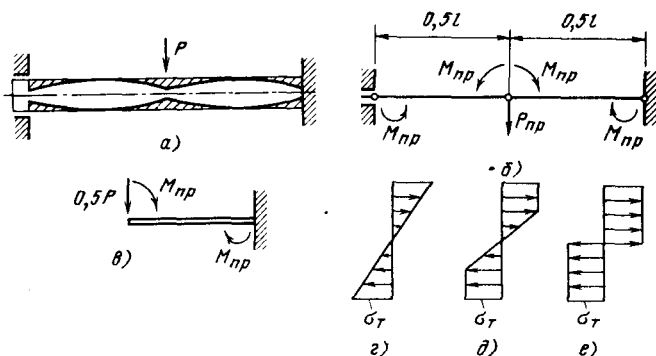


Рис. 4.13. Схема нагружения балки

являются противоположными друг другу. Так, напряжения от давления p_2 требуют прочного и жесткого соединения, а напряжения от разности температурных деформаций сосуда и рубашки требуют, напротив, гибкого соединения, способного по возможности уменьшить эти напряжения. Кроме того, из-за переменности нагрузок сосуда с рубашками необходимо проверять также и на сопротивление усталости.

Расчет аппаратов с рубашками проводят в соответствии с ГОСТ 25867—83. Сопротивление усталости проверяют методами теории упругости, учитывая температурные деформации элементов конструкции, а несущую способность — методом предельного равновесия в условиях статического нагружения без учета температурных деформаций.

При расчете аппаратов на прочность часто пользуются методом расчета по предельным напряжениям. Наиболее опасно в этом случае такое состояние материала конструкции, когда эквивалентные напряжения в опасных сечениях достигают предела текучести. Это не единственный метод, используемый в расчетах химической аппаратуры на прочность. Достаточно широко используют и другой метод — расчет по несущей способности, идею которого проиллюстрируем следующими примерами.

Возьмем балку прямоугольного сечения (рис. 4.13, а), изготовленную из пластичного материала и нагруженную перерезывающей силой P . При некотором значении P в сечении с максимальным изгибающим моментом в точках, расположенных у верхней и нижней поверхностей балки, появляются зоны пластических деформаций, где напряжения изгиба достигают предела текучести (рис. 4.13, з). С увеличением нагрузки эти зоны распространяются вглубь (рис. 4.13, д) до момента их соединения (рис. 4.13, е). Тогда все сечение охвачено зоной пластических деформаций, а изгибающий момент в этом сечении достигает предельного значения

$$M_{\text{пр}} = 0,25bh^2\sigma_T,$$

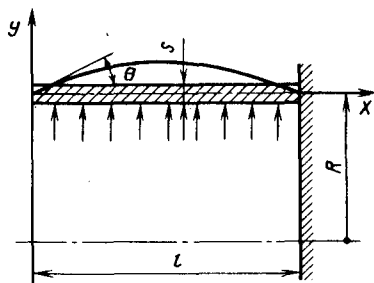
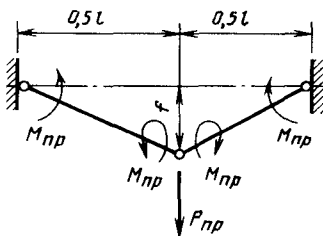


Рис. 4.14. Схема нагружения балки с пластическими шарнирами

Рис. 4.15. Схема деформации цилиндрической оболочки

где b и h — ширина и высота сечения балки, м; σ_T — предел текучести материала балки, МПа.

При пластической деформации изгибающий момент в сечениях балки не может стать больше предельного, и сечение, в котором возник такой момент, можно уподобить шарниру с постоянным моментом трения. Такой шарнир называют пластическим.

Предельное состояние балки характеризуется наличием трех пластических шарниров (рис. 4.13, б).

Из условия равновесия половины балки (рис. 4.13, в)

$$P_{пр} = 4M_{пр}/l = \sigma_T b h^2 / l, \quad (4.1)$$

где l — длина балки.

Очевидно, работать при предельных нагрузках нельзя. Допускаемая рабочая нагрузка

$$[P] = P_{пр}/n,$$

где $n > 1$ — коэффициент запаса.

Рассмотренную задачу можно решить и кинематическим методом.

В этом случае необходимо принять какую-либо схему разрушения балки с появлением некоторого числа пластических шарниров. Каждой выбранной схеме разрушения соответствует определенная нагрузка. Истинная схема разрушения, очевидно, соответствует наименьшей предельной нагрузке. Предельную нагрузку по каждой схеме разрушения определяют из условия равенства изменения внутренней энергии системы и работы внешних сил при достижении предельного равновесия.

Проиллюстрируем сказанное примером (рис. 4.14): работа, совершаемая внешней силой в условиях, когда балка находится в состоянии предельного равновесия, при статическом нагружении

$$T = 0,5P_{пр}f, \quad (4.2)$$

где f — максимальный прогиб, мм.

Внутренняя энергия системы в этом случае

$$U = M_{\text{пр}}\theta, \quad (4.3)$$

где $\theta = 2f/l$.

Тогда из условия $T = U$

$$P_{\text{пр}} = 4M_{\text{пр}}/l. \quad (4.4)$$

Таким образом, получено значение $P_{\text{пр}}$, равное найденному по уравнению (4.1).

Проиллюстрируем применение кинематического метода при определении предельной нагрузки для тонкостенной цилиндрической обечайки, подверженной действию внутреннего давления. Предположим, что под действием внутреннего давления обечайка получила в стадии предельного равновесия некоторую деформацию, обеспечивающую в окружном направлении напряжения по всей длине обечайки, равные пределу текучести, а в месте сопряжения обечайки с днищем образовался пластический шарнир. Обозначим приращение радиуса R оболочки через y (рис. 4.15), а угол поворота меридиана в месте сопряжения оболочки с днищем через θ . Тогда изменение внутренней энергии системы

$$U = 0,5\sigma_{\text{тс}} \int_0^l 2\pi y dx - 2M_{\text{пр}}\theta\pi R, \quad (4.5)$$

где $y = y(x)$ — уравнение линии деформации меридиана оболочки.

Работа внешних сил

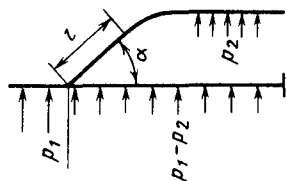
$$T = 0,5p2\pi R \int_0^l y(x) dx = 0,5p \Delta V, \quad (4.6)$$

где $\Delta V = 2\pi R \int_0^l y(x) dx$ — изменение объема обечайки при деформации.

Теперь для определения предельной нагрузки для такой оболочки необходимо принять форму ее образующей после деформации в условиях предельного равновесия, т. е. задаться уравнением $y = y(x)$.

Рассмотрим две линии деформации, удовлетворяющие граничным условиям $y = 0$ и $y' = 0$ при $x = 0$ и $x = l$: $y = C \sin(\pi x/l)$ и $y = C(l^3x - 2l^2x^2 + x^4)$. Подставив y и dy/dx из этих уравнений в уравнения (4.5) и (4.6) и приравняв их правые части с учетом, что $y' = 0$, найдем соответствующие выражения для предельного давления: $p_{\text{пр}} = \frac{\sigma_{\text{тс}}}{R} \left(1 + \frac{4,9}{\sqrt{3}} \frac{Rs}{l^2} \right)$ и $p_{\text{пр}} = \frac{\sigma_{\text{тс}}}{R} \left(1 + \frac{5}{\sqrt{3}} \frac{Rs}{l^2} \right)$. Учитывая хорошую сходимость результатов, можно не рассматривать другие формы деформированного состояния.

Рис. 4.16. Схема нагружения конического сопряжения



Поскольку при $y = C \sin(\pi x/l)$ предельное давление меньше, эту форму следует принять за искомую.

Для тонкостенных оболочек при $l/R \geq 2,3$ значение второго слагаемого в круглых скобках менее 5 %, и пренебрегая им, получим основную формулу для расчета допускаемого давления в цилиндрических обечайках, нагруженных внутренним давлением, которая приведена в ГОСТ 14249—80 и не отличается от формулы, полученной по безмоментной теории:

$$[p] = \frac{2 [\sigma] \varphi (s - c)}{D + (s - c)}, \quad (4.7)$$

где $[p] = p_{\text{пр}}/1,5$; $[\sigma] = \sigma_T/1,5$.

Сосуды с U-образными рубашками. Наиболее характерно для такой конструкции то, что действующее на днище рубашки давление p_2 вызывает в ней осевую силу Q_2 , которая должна быть воспринята коническими или кольцевыми сопряжениями. При этом система статически неопределима, так как рубашка соединена с сосудом не только в месте конического перехода, но и у днища. Однако с допуском в сторону запаса действием давления на днище сосуда можно пренебречь (рис. 4.16); тогда

$$Q_2 = 0,25\pi (D_2^2 - d_1^2) p_2,$$

где D_2 — внутренний диаметр рубашки, м; d_1 — диаметр сопряжения рубашки с днищем, м.

На кольцевое или коническое сопряжение (см. рис. 4.8) в результате совместного действия осевой неуравновешенной силы Q_2 и внутреннего давления p_2 действует изгибающий момент

$$M = Q_2 l_0 - p_2 \int_{0,5D_1}^{0,5D_2} 2\pi r (r - 0,5D_1) dr \approx 0,25\pi p_2 l_0 (D_1 D_2 - d_1^2),$$

где $l_0 = 0,5 [(D_2 + s_2) - (D_1 + 2s_1)]$ — расстояние от середины стенки рубашки до наружной стороны стенки сосуда, м; D_1 — внутренний диаметр сосуда, м; r — текущий радиус, м.

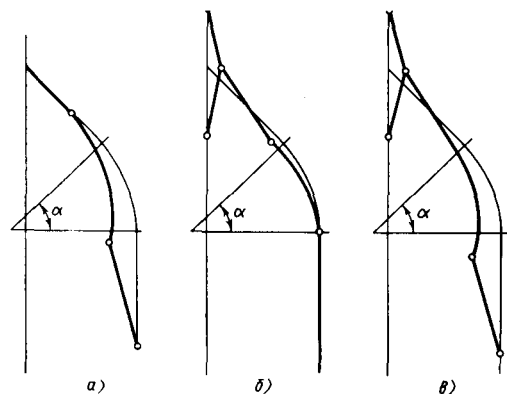
Отсюда эффективная (приведенная) осевая сила

$$Q_1 = M/l_0 = 0,25\pi p_2 D_2^2 A,$$

где $A = (D_1 D_2 - d_1^2)/D_2^2$ — коэффициент приведения.

Если опоры расположены на рубашке, то на кольцевое сопряжение действует собственный вес аппарата G_1 и $Q_1 = 0,25\pi p_2 D_2^2 A + G_1$. Если опоры расположены на сосуде, то на соединение действует вес рубашки G_2 , и $Q_1 = 0,25\pi p_2 D_2^2 A + G_2$.

Рис. 4.17. Схемы деформаций сопряжения в стадии предельного равновесия



Несущую способность конических сопряжений рассчитывают кинематическим методом. При этом рассматривают следующие случаи деформированного состояния:

стенка сосуда не имеет пластического шарнира (поперечное

сечение сосуда не деформируется); пластические шарниры возникают в коническом сопряжении и рубашке (рис. 4.17, а);

стенка рубашки не имеет пластического шарнира (поперечное сечение рубашки не деформируется); шарниры возникают в стенке сосуда и в коническом сопряжении (рис. 4.17, б);

коническое сопряжение не имеет пластического шарнира; шарниры возникают в сосуда и рубашке (рис. 4.17, в).

Уравнения для определения допускаемого давления $[p_2]$ в каждом из рассматриваемых случаев деформации меридионального сечения аппарата можно представить в виде

$$[p_2] = \frac{2 [\sigma_2] \varphi_2 (s_2 - c)}{D_2 + (s_2 - c)} \frac{B}{A}, \quad (4.8)$$

где $[\sigma_2]$ — допускаемое напряжение для материала рубашки, МПа; φ_2 — коэффициент прочности продольных сварных швов рубашки; s_2 — толщина стенки рубашки, мм; $B = 2\sqrt{s_2/D_2} \min \{X_1; X_2; X_3\}$ (X_i — вспомогательная величина, характеризующая условия деформации в стадии предельного равновесия; X_1 , X_2 и X_3 соответствуют потере несущей способности по рис. 4.17, в, а и б).

Потеря несущей способности по варианту рис. 4.17, а может происходить с образованием пластического шарнира либо в конусе, либо в зоне сопряжения с сосудом. В обоих случаях

$$X_2 = f_2 \sqrt{1 + \varphi_{R2}}, \quad (4.9)$$

где f_2 — расчетный коэффициент прочности сопряжения; φ_{R2} — расчетный коэффициент прочности сварного шва рубашки.

Коэффициент $f_2 = f_2(\alpha, \rho, \varepsilon)$, где α — угол при вершине конического сопряжения; $\rho = (r_0 + 0,5s_2)/\sqrt{D_2(s_2 - c)}$ (r_0 — внутренний радиус отбортовки конического сопряжения); $\varepsilon = l_0/\sqrt{D_2(s_2 - c)}$.

Поскольку, как указано, для схемы, соответствующей рис. 4.8, а, пластический шарнир может образоваться либо в ко-

нусе, либо в зоне сопряжения, ГОСТ 25867—83 предлагает два вида аппроксимирующей зависимости $f_2 = f_2(\rho, \varepsilon)$ при $\alpha = 30^\circ$ и при $\alpha = 45^\circ$.

При потере несущей способности по схеме на рис. 4.17, а стадия предельного равновесия характеризуется величиной

$$X_1 = \frac{\cos \alpha}{\varepsilon} \left(\frac{\varphi_{R1} + \varphi_{R2}}{4 \cos \alpha} + \lambda f_1 \right), \quad (4.10)$$

где $\varphi_{R1} = \varphi_{T1}$ — расчетный коэффициент прочности сварного шва сосуда (φ_{T1} — коэффициент прочности кольцевого шва сосуда); $\lambda = 2\varepsilon + 0,25\rho$ при $\alpha = 30^\circ$ и $\lambda = \sqrt{2}\varepsilon + 0,45\rho$ при $\alpha = 45^\circ$; $f_1 = f_1(\lambda)$ — расчетный коэффициент прочности сопряжения (график зависимости приведен в ГОСТ 25867—83).

Потеря несущей способности конического сопряжения по схеме на рис. 4.17, б характеризуется величиной

$$X_3 = \kappa f_3 + \left(\frac{\varphi_{R1} + \varphi_{R2}}{4\mu \cos \alpha} + \mu \right) f_4, \quad (4.11)$$

где κ — коэффициент отношения пределов прочности материалов сосуда и рубашки; μ — относительная эффективная несущая длина конуса:

$$\mu = \min \left\{ \frac{\varepsilon}{\sin \alpha}; \sqrt{\frac{\varphi_{R1} + \varphi_{R2}}{4 \cos \alpha}} \right\}; \quad (4.12)$$

$$\kappa = 1,25 \frac{[\sigma_1] (s_1 - c) \sqrt{D_1 (s_1 - c)}}{[\sigma_2] (s_2 - c) \sqrt{D_2 (s_2 - c)}} \times$$

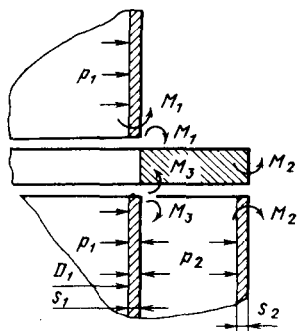
$$\times \left[\sqrt{1 - \frac{\rho_1 D_1}{2[\sigma_1] (s_1 - c)}} + \sqrt{1 - \frac{(\rho_1 - \rho_2) D_1}{2[\sigma_1] (s_1 - c)}} \right],$$

где $[\sigma_1]$ и $[\sigma_2]$ — допускаемые напряжения для материалов соответственно сосуда и рубашки.

При потере несущей способности по схеме на рис. 4.17 необходимо учитывать, где образуется пластический шарнир — в конусе или в отбортовке сопряжения. Если шарнир образуется в конусе, то $f_3 = \operatorname{ctg} \alpha$ и $f_4 = \operatorname{ctg} \alpha / \sqrt{\cos \alpha}$; если пластический шарнир появляется в отбортовке, то зависимости $f_3 = f_3(\rho, \varepsilon, \alpha)$ и $f_4 = f_4(\rho, \varepsilon, \alpha)$ гораздо сложнее. Графическая интерпретация этих зависимостей приведена в ГОСТ 25867—83.

Несущую способность кольцевого сопряжения рассчитывают на основании следующих соображений. При соединении сосуда и рубашки кольцами образование пластических шарниров (см. рис. 4.12) возможно как на контуре сосуда или рубашки, так и на обоих контурах одновременно, что позволяет определять допускаемое давление $[p_2]$ по относительным реактивным моментам M_1, M_2, M_3 , возникающим на контурах (рис. 4.18).

Рис. 4.18. Схема нагружения кольцевого сопряжения



Из условия прочности зоны при-
мыкания рубашки к кольцу допуска-
емое избыточное давление в рубашке

$$[p_2] = (H^2 + M_2 + M_3) [\sigma_0] \varphi_{R0} / M_0,$$

где $H = (h_0 - c) / \sqrt{D_1 (s_1 - c)}$ — отно-
сительная толщина кольца (h_0 — ис-
полнительная толщина кольца); $[\sigma_0]$ —
допускаемое напряжение для материа-

ла кольца; φ_{R0} — коэффициент прочности радиального свар-
ного шва кольца; M_0 — относительный момент нагружения.

$$M_1 = \frac{[\sigma_1] (s_1 - c)}{2 [\sigma_0] \varphi_{R0} b_0} \left[2 - \frac{1}{2} \left(\frac{p_1 D_1}{2 [\sigma_1] (s_1 - c)} \right)^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{(p_1 - p_2) D_1}{2 [\sigma_1] (s_1 - c)} \right)^2 \right]; \quad (4.13)$$

$$M_2 = \frac{[\sigma_2] (s_2 - c) \varphi_{R2} D_2 (s_2 - c)}{2 [\sigma_0] \varphi_{R0} b_0 D_1 (s_1 - c)}; \quad (4.14)$$

$$M_3 = \min \left\{ \frac{D_1 \varphi_{R1}}{2 b_0 \varphi_{R0}} H^2; (1 - 2H) M_1 \right\}; \quad (4.15)$$

$$M_0 = \frac{l_0}{b_0} \frac{D_2^2}{2 D_1 (s_1 - c)} \frac{D_1 D_2 - d_1^2}{D_2^2} = \frac{l_0}{b_0} \frac{D_1 D_2 - d_1^2}{2 D_1 (s_1 - c)}, \quad (4.16)$$

где b_0 — ширина кольца.

Для проверки сопротивления усталости аппаратов с U-образ-
ными рубашками сравнивают возникающий при эксплуатации
размах напряжений $\Delta \sigma$ с допускаемой амплитудой напряже-
ния $[\sigma_a]$ при рабочем числе циклов нагружения. При этом усло-
вие прочности имеет вид

$$\Delta \sigma \leq 2 [\sigma_a]. \quad (4.17)$$

Размах напряжений, возникающих в процессе эксплуатации,

$$\Delta \sigma = (\Delta Q_1 / [Q_1]) [\sigma_2] K_\sigma, \quad (4.18)$$

где ΔQ_1 — изменение осевой силы в рабочем цикле; $[Q_1] =$
 $= 0,25 [p_2] \pi D_2^2 A$ — допускаемая осевая сила в рубашке; $[\sigma_2]$ —
допускаемое напряжение для материала стенки рубашки; K_σ —
коэффициент концентрации напряжений (значения приведены
в ГОСТ 25867—83).

Изменение осевой силы ΔQ_1 вызывается изменением давления
в цикле от 0 до p_2 (т. е. $\Delta p_2 \approx p_2$) и разностью температурных

Рис. 4.19. Схема нагружения сопряжения температурными усилиями

деформаций ε_t корпуса и рубашки:

$$\Delta Q_1 = 0,25\pi p_2 D_2^2 A + \Delta Q_t. \quad (4.19)$$

В свою очередь, разность температурных деформаций корпуса и рубашки $\varepsilon_t = \alpha_1 \Delta t_1 - \alpha_2 \Delta t_2$, где α_1 и α_2 — температурные коэффициенты линейного расширения материала соответственно сосуда и рубашки, °С; Δt_1 и Δt_2 — разность температур в начале и в конце рабочего цикла соответственно сосуда и рубашки.

При расчете температурных усилий ΔQ_t допускают, что осевые деформации цилиндрических обечаек сосуда и рубашки, а также конических и кольцевых сопряжений отсутствуют и что эти деформации возникают лишь в днищах, т. е. справедлива схема (рис. 4.19), в которой днища являются упругими основаниями. Обозначив упругости днища сосуда и днища рубашки соответственно через C_1 и C_2 , можно записать $l\varepsilon_t = \Delta Q_t (C_1 + C_2)$, откуда

$$\Delta Q_t = l\varepsilon_t / (C_1 + C_2); \quad (4.20)$$

$$C_1 = \frac{1}{E_1 d_1} \frac{4}{\pi} \frac{1}{5} \sqrt{\left(\frac{D_1}{2s_3}\right)^3}; \quad C_2 = \frac{1}{E_2 d_1} \frac{4}{\pi} \frac{1}{5} \sqrt{\left(\frac{D_2}{2s_4}\right)^3}; \quad (4.21)$$

здесь E_1 и E_2 — модули упругости материала соответственно сосуда и рубашки, МПа; s_3 и s_4 — толщины эллиптического днища соответственно сосуда и рубашки, мм.

Подставив соотношения (4.19)—(4.21) в уравнение (4.18), приняв, что $E_1/E_2 = 1$ и $A = 1$, получим зависимость для размаха напряжений (ГОСТ 25867—83)

$$\Delta \sigma = \frac{[\sigma_z] K_\sigma}{[p_2]} \left[p_2 + E_2 \varepsilon_t \frac{l d_E}{D_2^2} \frac{5}{\left(\frac{R_1}{s_1}\right)^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{R_2}{s_2}\right)^{\frac{2}{3}}} \right], \quad (4.22)$$

где $d_E = \max \{d_1; 0,7\sqrt{R_1 s_3}; 0,7\sqrt{R_2 s_4}\}$.

Сосуды с цилиндрическими рубашками. В аппаратах с цилиндрическими рубашками осевая неуравновешенная сила Q_2 , обусловленная статическим нагружением, отсутствует, что значительно упрощает расчеты.

Толщину цилиндрической рубашки либо назначают конструктивно с последующей проверкой по ГОСТ 14249—80, либо выбирают по толщине конического сопряжения. В последнем случае допускаемое избыточное давление

$$[p_2] = (2 [\sigma_z] s_2 / D_2) \cos \alpha + \sin^2 \alpha [\sigma_z] s_2^2 (1 + 0,5 \sqrt{2}) / l_0^2. \quad (4.23)$$

Первое слагаемое в правой части этой формулы соответствует безмоментному решению, второе — обусловлено краевыми эффектами в местах сопряжения.

Если необходимо, чтобы допускаемое давление было одинаковым для конического сопряжения и цилиндрической обечайки, т. е. $[p_2] = 2 [\sigma_2] s_2/D_2$, то должно выполняться условие

$$l_0 \leq \sqrt{D_2(s_2 - c)} \sqrt{\frac{2,91 \sin^2 \alpha}{2(1 - \cos \alpha)}} \approx 1,8 \sqrt{D_2(s_2 - c)}. \quad (4.24)$$

Кольцевое сопряжение рассчитывают как плоскую шарнирно закрепленную кольцевую пластину под действием распределенной нагрузки. В этом случае допускаемое давление

$$[p_2] = 2 [\sigma_K] (h_0/l_0)^2, \quad (4.25)$$

где $[\sigma_K]$ — допускаемое напряжение для материала кольца; h_0 — исполнительная толщина кольца.

Для сосудов с цилиндрическими рубашками возможности самокомпенсации температурных деформаций весьма ограничены, поэтому даже небольшая разность температурных деформаций способна привести к возникновению значительных напряжений в местах сопряжения сосуда и рубашки. Очевидно, что напряжения в этих узлах обусловлены осевой силой Q_2 , вызванной разностью давлений в корпусе и рубашке, а также их температурными деформациями.

Для определения силы Q_2 статически неопределимой системы запишем выражения для осевых удлинений соответственно сосуда и рубашки:

$$w_1 = l\alpha_1 \Delta t_1 - \frac{Q_2 l}{E_1 \pi D_3 s_1}; \quad w_2 = l\alpha_2 \Delta t_2 + \frac{Q_2 l}{E_2 \pi D_4 s_2},$$

где l — длина обечайки рубашки по образующей; $D_3 = D_1 + s_1$; $D_4 = D_2 + s_2$.

Осевое удлинение конического сопряжения или кольца сопряжения $w_0 = C_0 Q_2$, где C_0 — упругость кольцевого или конического сопряжения.

Очевидно, что $w_1 - w_2 = 2w_0$, откуда

$$Q_2 = \pi E_2 s_2 D_4 \varepsilon_t / \left[1 + \frac{D_4 s_2}{D_3 s_1} + 2\pi C_0 E_2 \frac{D_4 s_2}{l} \right]. \quad (4.26)$$

Размах напряжений цикла

$$\Delta \sigma = [\sigma] \frac{Q_2}{[Q]} K_\sigma = [\sigma] \frac{4Q_2 K_\sigma}{[p_2] D_2^2 A \pi} \leq 2 [\sigma_a]. \quad (4.27)$$

Сосуды с рубашками, сопряженными с корпусом сосуда анкерными трубами или отбортовкой. Сопряжение корпуса сосуда и рубашками анкерными трубами применяют, когда давление в рубашке настолько велико, что либо устойчивость сосуда, либо несущая способность рубашки недостаточны.

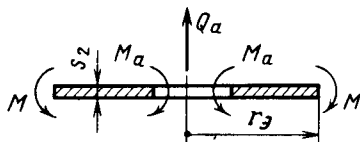
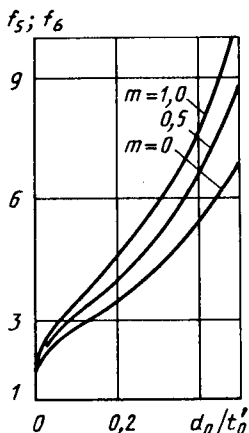


Рис. 4.20. Схема нагружения плоской кольцевой пластины

Рис. 4.21. Зависимость коэффициентов прочности f_5 и f_6 от d_0/t'_0



Очевидно, что анкерной трубой воспринимается сила

$$Q_a = p_2 t_0 t_r [1 - \pi d_0^2 / (4 t_0 t_r)],$$

где t_0 и t_r — шаг анкерных труб соответственно вдоль оси и по окружности аппарата; d_0 — наружный диаметр анкерной трубы.

Очевидно также, что анкерные трубы и сварные швы, скрепляющие трубу с сосудом и рубашкой, должны обеспечивать компенсацию этой силы. Прочностной расчет рубашки при этом сводится к проверке условия, что при таком способе скрепления каждый сегмент обечайки размером $t_0 \times t_r$ выдерживает давление p_2 .

В этом случае цилиндрическую обечайку рассчитывают с допущением в сторону запаса прочности как плоскую кольцевую пластину площадью $\pi r_3^2 = t_0 t_r$ (рис. 4.20), по внутренней кромке которой действуют сила Q_a и момент M_a , а по внешней — момент $M = 0,25 [\sigma] s^2$. При этих условиях допускаемое давление для стенки соответственно сосуда и рубашки:

$$[p_1] = [\sigma_1] \frac{(s_1 - c)^2}{t_0 t_r} f_5 \left[1 - \left(\frac{p_1 D_1}{2 [\sigma_1] (s_1 - c)} \right)^2 \right], \quad (4.28)$$

$$[p_2] = [\sigma_2] \frac{(s_2 - c)^2}{t_0 t_r} f_6, \quad (4.29)$$

где $[\sigma_1]$ и $[\sigma_2]$ — допускаемые напряжения для материала соответственно сосуда и рубашки; f_5 и f_6 — коэффициенты прочности.

Коэффициенты f_5 и f_6 определяют из графика (рис. 4.21) в зависимости от отношения d_0/t'_0 и относительного реактивного момента m . Здесь $t'_0 = \sqrt{t_0 t_r}$; $m = 1$ — для сопряжений отбортовкой; $m = \min \left\{ 1; \left(\frac{d}{s_2} \right)^2; \left(\frac{s_0}{s_2} \right)^2 \right\}$ — для сопряжений анкерными трубами.

При проверке сопротивления усталости сосудов с рубашками, скрепленными анкерными трубами, исходят из того, что под действием разности температурных удлинений ϵ_t между сосудом и рубашкой возникает дополнительно (по отношению к анкерной

силе Q_a) сила Q_t . Для статически неопределимой системы Q_t рассчитывают из условия совместности деформаций.

Увеличение радиуса сосуда в результате изменения температуры на величину Δt_1 и действия силы Q_t

$$w_{1t} = \frac{D_3}{2} \left(\alpha_1 \Delta t_1 + \frac{Q_t}{2\pi t_0 t_{Ts_2} E_2} \right) \approx \frac{D_3}{2} \left(\alpha_1 \Delta t_1 + \frac{\sigma_{k1}}{\pi E_1} \right);$$

аналогично для стенки рубашки

$$w_{2t} = \frac{D_4}{2} \left(\alpha_2 \Delta t_2 - \frac{Q_t}{2\pi t_0 t_{Ts_2} E_2} \right) \approx \frac{D_4}{2} \left(\alpha_2 \Delta t_2 - \frac{\sigma_{k2}}{\pi E_2} \right);$$

здесь σ_{k1} и σ_{k2} — окружные напряжения в корпусе и рубашке под действием давления $Q_t/(t_0 t_T)$.

Радиальное перемещение сосуда, рассчитываемое как прогиб плоской пластины под действием силы Q_T ,

$$w_{1F} = \frac{Q_T}{E_1 s_1} \sqrt{\frac{D_3}{s_1}} 0,4 \left(\frac{65}{\delta_T} + \frac{D_3}{s_1} \frac{\delta_T}{360} \right);$$

аналогично для рубашки

$$w_{2F} = \frac{Q_t}{E_2 s_2} \sqrt{\frac{D_4}{s_2}} 0,4 \left(\frac{65}{\delta_T} \frac{D_4}{s_2} \frac{\delta_T}{360} \right),$$

где δ_T — угол шага анкерных труб (или отбортовок) по окружности цилиндрических обечаек сосуда и рубашки.

Для радиальных деформаций сосуда и рубашки, пренебрегая деформациями анкерных труб, запишем $w_{2t} - w_{2F} = w_{1F} + w_{1t}$. Отсюда с учетом приведенных выражений

$$Q_t = \varepsilon_t E t_0 t_T \left/ \left(\frac{D_3}{4s_1} K_3 + \frac{D_4}{4s_2} K_4 \right) \right.,$$

где

$$K_3 = 1 + 3,2 \frac{t_0 t_T}{D_3 \sqrt{D_3 s_1}} \left(\frac{65}{\delta_T} + \frac{D_3}{s_1} \frac{\delta_T}{360} \right);$$

$$K_4 = 1 + 3,2 \frac{t_0 t_T}{D_4 \sqrt{D_4 s_2}} \left(\frac{65}{\delta_T} + \frac{D_4}{s_2} \frac{\delta_T}{360} \right).$$

По найденному значению Q_T и допускаемой нагрузке $[Q_t] = [p_2] t_0 t_T \left(1 - \frac{d_0^2}{t_0 t_T} \right)$ выполняют проверку сопротивления устойчивости:

$$\Delta \sigma = \frac{Q_t}{[Q_t]} [\sigma_2] K_\sigma \leq 2 [\sigma_a].$$

§ 4.3. ПЕЧИ ПИРОЛИЗА И КРЕКИНГА

Крекингом называют процесс высокотемпературного разложения углеводородного сырья с получением продуктов меньшей молекулярной массы. Из мазута или газойля крекингом

получают автомобильные и авиационные бензины. Сложные и крупные молекулы тяжелых углеводородов с температурой кипения не ниже 300 °С расщепляются на более простые молекулы веществ с температурой кипения не выше 110 °С. Процессы термического крекинга, проводимые ранее в огневых печах с трубчатыми змеевиками при температуре 400—500 °С и давлении до 6 МПа теперь почти всюду заменены процессами каталитического крекинга и риформинга, проводимыми в специальных реакторах с движущимся гранулированным твердым катализатором. Каталитические процессы позволяют получать более ценные продукты (бензины с высоким октановым числом, ароматические углеводороды) по сравнению с полученными термическим крекингом. Трубчатые печи в установках каталитического крекинга или риформинга также необходимы, но они служат для нагрева и испарения сырья и не являются реакционными аппаратами.

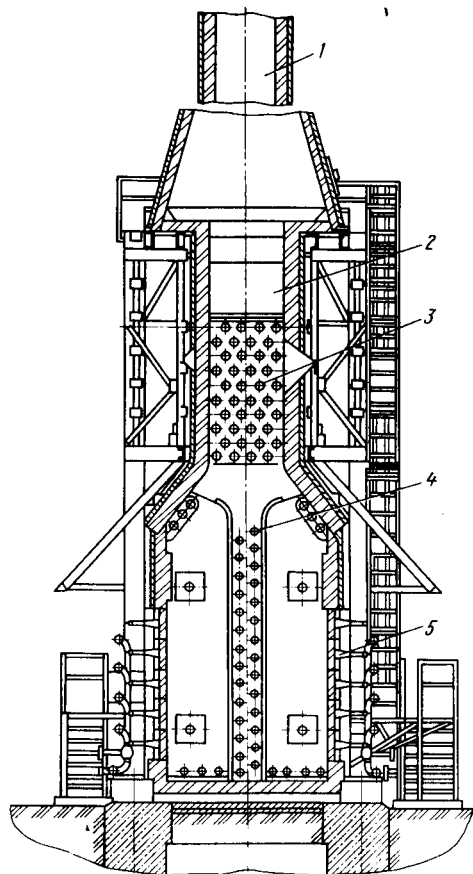
Пиролизом называют процесс, аналогичный термическому крекингу, но проводимый при более высокой температуре (670—1200 °С) и невысоком давлении (0,2—0,5 МПа). Пиролизом углеводородных газов (пропана или бутана) или бензиновых фракций получают ряд необходимых для нефтехимического синтеза и производства пластмасс веществ, таких, как этилен, пропилен, бутadiен, ацетилен. Этилен, в свою очередь, служит сырьем для производства этилового спирта, стирола, полиэтилена и оксида этилена.

Процесс пиролиза проводят в трубчатых печах, точнее в их змеевиках. Змеевики состоят из ряда прямых труб, последовательно соединенных двойниками и обогреваемых снаружи пламенем горелок или форсунок, в которых сгорает газообразное или жидкое топливо. По своим характеристикам такой змеевиковый реактор близок к реактору полного (идеального) вытеснения с программированным тепловым режимом.

При пиролизе пропан-бутановой фракции пирогаз выходит из печи с температурой 1000—1100 °С при избыточном давлении 0,1—0,2 МПа. Из-за высокой скорости реакции подачу газа регулируют так, чтобы время пребывания его в зоне реакции было в пределах 0,7—1,5 с; для этого газ подают в змеевик со скоростью 10—17 м/с. Вследствие увеличения объема газа при реакции и нагревании его скорость увеличивается и составляет на выходе 150—200 м/с. Высокая скорость уменьшает толщину пристенного пограничного слоя, в котором происходят нежелательные побочные реакции, приводящие к отложению кокса на внутренней поверхности труб змеевика.

Трубчатые печи отличаются разнообразием конструкций, зависящих в основном от вида используемого топлива. Основные элементы печи — стальной сварной каркас, кирпичная кладка, образующая стены, под и свод печи, змеевик, расположенный внутри печи, горелки или форсунки для сжигания топлива, дымоход и дымовая труба. Печь устанавливают на железобетонный фундамент.

Рис. 4.22. Трубчатая печь с горизонтальными трубами и излучающими стенками



Внутреннее пространство печи разделено обычно на две камеры — радиантную (топочную) и конвекционную, — в каждой из которых размещены секции змеевика. Ряд труб змеевика, размещенных в топочной камере и воспринимающих лучистую теплоту горелок, называют экраном. В радиантной камере сырью передается основная доля теплоты (около 70 %). К трубам конвекционной секции змеевика теплота подводится от дымовых газов в основном конвекцией (70 %) и частично лучеиспусканием от дымовых газов (20 %) и нагретых стенок камеры (10 %). Дымовые газы движутся через трубчатую печь обычно под действием естественной тяги, регулируемой шибером в дымоходе.

В установках пиролиза используют в основном печи коробчатой формы с горизонтальным расположением труб змеевика и беспламенными (точнее короткопламенными) газовыми горелками панельного типа. Нижняя часть боковых стен печи (рис. 4.22) выполнена из беспламенных панельных газовых горелок 5, расположенных пятью горизонтальными рядами в каждой стене и образующих два излучающих блока. В середине топочной камеры установлен трубный экран 4 двустороннего облучения, делящий камеру на две половины. В связи с этим печь считают двухкамерной (две камеры радиации). Экран может быть одно- или двухрядным. Имеются также подовый и потолочный экраны. В расположенном над топочной камерой дымоходе 2 размещены трубы конвекционной части змеевика 3. Пройдя конвекционную камеру, газы поступают в дымовую трубу 1.

В установках пиролиза сырье (пропан-бутановая фракция) после испарения и предварительного нагревания в теплообмен-

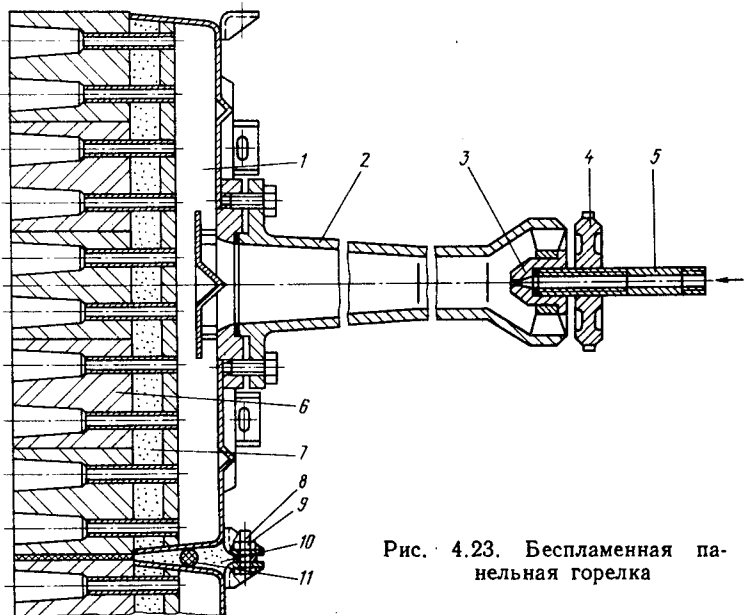


Рис. 4.23. Беспламенная панельная горелка

нике поступает двумя потоками сначала в конвекционную часть змеевика печи, а затем в радиантную (т. е. в трубы экранов). Выходящий из печи пирогаз поступает в закалочный аппарат, где быстрым охлаждением (впрыскиванием воды) прекращают реакцию.

В печи можно регулировать теплоотдачу к различным участкам радиантного змеевика подачей топливного газа к горелкам. Для этого каждый ряд горелок питается независимо от обособленного коллектора.

Удобные и высокоэффективные нагреватели для печей — беспламенные панельные горелки (рис. 4.23), обеспечивающие полное сгорание газа при малом коэффициенте избытка воздуха благодаря высокой температуре в зоне горения. Горелка имеет распределительную камеру (короб) 1, в переднюю часть которой вварены трубки для выхода газовой смеси. На свободные концы трубок надеты керамические призмы 6, каждая с четырьмя цилиндро-коническими отверстиями (туннелями). Призмы образуют керамическую панель размерами 500×500 или 605×605 мм, служащую при горении газа аккумулятором и излучателем теплоты. Между призмами и стенкой короба расположен слой теплоизоляции 7 из диатомовой крошки. К задней стенке короба 1 прикреплен инжекторный смеситель 2 газа (метано-водородной фракции) с воздухом, снабженный соплом 3 и заслонкой 4. Газ поступает в сопло 3 из патрубка 5. Выходя из сопла с высокой скоростью, газ инжектирует из атмосферы необходимое количество воздуха. Газовоздуш-

ная смесь, образующаяся в смесителе 2, обтекаемая отбойник, поступает в короб 1, откуда распределяется по трубкам (ниппелям) горелки. Сгорание смеси происходит и в основном завершается в туннелях керамических элементов, куда смесь поступает из трубок. Для того, чтобы пламя из туннелей не проскакивало внутрь короба, скорость газовой смеси в распределительных трубках не должна быть меньше скорости распространения пламени. В туннелях, благодаря их конической форме, обеспечивается равенство этих скоростей, что является необходимым условием нормальной работы горелок.

Горелки соединены между собой болтами 8 с гайками 9, образуя излучающие стены печей. Зазоры между горелками заполняются диатомовой крошкой 10 и уплотняются асбестовым шнуром 11.

Теплопроизводительность горелок регулируют изменением подачи газа в коллектор, к которому подключен данный ряд горелок. Необходимое для горения количество воздуха устанавливают заслонкой 4 индивидуально для каждой горелки. Для газа заданного состава такая регулировка необходима лишь при пуске печи, так как конструкция инжекционного смесителя обеспечивает практически постоянное соотношение количества газа и воздуха в пределах изменения теплопроизводительности горелки примерно в 2 раза.

Змеевик трубчатой печи составляют из прямых бесшовных труб длиной 6—18 м, с наружным диаметром 60—219 мм. Наиболее часто используют трубы диаметром 102; 127 и 152 мм. Трубы соединяют в непрерывную цепочку специальными печными двойниками с крышками или без них. Открываемые двойники применяют при температуре до 560 °С, когда необходима механическая чистка внутреннего пространства труб от отложений кокса. В печах пиролиза, работающих при более высокой температуре, трубы соединяют обычно приварными двойниками. Из-за малого расстояния между трубами $[(1,8—2,2) d]$ двойники нельзя изготовлять из трубы гибкой; их получают протяжкой труб или сваркой штампованных половин. В этом случае трубы очищают от кокса выжиганием. Для этого в трубы подают смесь, состоящую из одной части воздуха и десяти частей водяного пара.

Материал труб змеевика выбирают в зависимости от температурного режима и коррозионных свойств сырья, причем в различных зонах печи используют трубы из разных материалов. Так, в печах пиролиза начальные участки змеевика, расположенные в конвекционной зоне, работают при температуре 30—400 °С, а конечные, находящиеся в радиантной камере, — при температуре 500—900 °С. По этой причине конвекционные трубы первых рядов изготовляют из углеродистых стальных труб (20Г), последних рядов — из хромомолибденовой стали (15Х5М), а радиантные трубы — из жаропрочной стали 12Х18Н10Т.

Для крепления труб змеевиков в печах используют подвески и кронштейны различных конструкций. Для той же цели по торцам печи устанавливают две трубные решетки в виде вертикальных прямоугольных листов с отверстиями для труб. Трубные решетки теплоизолируют со стороны, обращенной в сторону топочной камеры. Подвески располагают на расстоянии 0,8—3 м одна от другой, в зависимости от температуры труб.

Подвески, кронштейны и трубные решетки радиантной камеры, работающие при температуре до 1000 °С, отливают из жаропрочной стали 20Х23Н13. В конвекционной камере, где температура ниже, используют подвески из чугуна СЧ21 или из стали 40Х9С2. Подвески крепят к каркасу печи болтами.

§ 4.4. АППАРАТЫ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ РЕАКЦИЙ ✓

К аппаратам для реакций, проводимых в гетерогенных системах, относятся в основном газожидкостные реакторы и аппараты для реакций между газом и твердым веществом.

Для протекания газожидкостной реакции необходим контакт газа и жидкости. В большинстве случаев реакция протекает в жидкой фазе, в которую должен вводиться реагирующий компонент газовой смеси; поэтому газожидкостные реакции всегда сопровождаются межфазным массообменом. В некоторых случаях одни стадии процесса протекают в жидкой фазе, другие — в газовой, например в производстве азотной кислоты. В абсорбционно-окислительной колонне происходит следующая цепочка процессов: абсорбция диоксида азота жидкостью, реакция диоксида азота с водой с образованием азотной и азотистой кислот, разложение азотистой кислоты с образованием монооксида азота, десорбция монооксида азота в газовую фазу, окисление монооксида азота в диоксид. Здесь окисление монооксида азота происходит в газовой фазе, остальные реакции — в жидкой; необходимые стадии процесса также абсорбция и десорбция. Все эти процессы проводят одновременно в одном аппарате.

В связи с необходимостью межфазного массопереноса газожидкостные реакторы конструктивно сходны с абсорберами. Как и при абсорбции, применяют, например, насадочные колонны и аппараты с барботажными тарелками. Однако следует учитывать, что реакции сопровождаются значительно большим тепловым эффектом, чем физическая абсорбция, поэтому реакторы, в отличие от абсорберов, всегда снабжают теплообменными элементами. Кроме того, при малой скорости реакции объем жидкости, находящейся в аппарате, должен быть значительно больше, чем для абсорбции, при которой важна лишь площадь межфазной поверхности. Объем аппарата должен обеспечивать достаточное время проведения реакции, необходимое для достижения заданной степени превращения.

Методы интенсификации медленных и быстрых реакций различны. При проведении быстрых реакций, течение которых ли-

митирует массообменная стадия, производительность аппарата можно увеличить обеспечением хороших условий массопередачи: увеличением межфазной поверхности, интенсивности перемешивания или относительной скорости фаз. При проведении медленных реакций, лимитируемых реакционной способностью веществ, достаточно создания умеренных условий массопередачи. Процесс можно ускорить воздействием на кинетические факторы, например увеличением концентраций реагирующих веществ, повышением температуры или применением более активного катализатора. Концентрации веществ в газовой фазе можно увеличить, например, повышением давления в аппарате.

Реакции с участием газа и твердого вещества также сопровождаются массопереносом, но он происходит в пределах одной газовой фазы и заключается в подводе реагирующих веществ из ядра потока газа к поверхности твердого вещества, на которой протекает реакция, и отводе продуктов реакции в обратном направлении. Твердое вещество может быть либо одним из реагентов, либо катализатором. В обоих случаях на скорость процесса существенно влияет площадь поверхности частиц (гранул) твердого вещества. Для ее увеличения твердое вещество либо дробят на мелкие частицы, либо используют в виде мелкопористых гранул.

Например, очень интенсивно проходит обжиг колчедана в псевдооживленном слое благодаря малым размерам частиц, интенсивному перемешиванию газовой фазы и развитой поверхности твердого реагента, обеспечивающих высокую скорость внутрифазного массопереноса. В колоннах синтеза аммиака в качестве катализатора используют гранулы губчатого железа, имеющие высокую удельную поверхность.

Особенности процесса определяют конструкцию реактора и его размеры. В одних случаях определяющими являются физические стадии процесса (тепло- и массообмен), в других — кинетика химической стадии.

§ 4.5. ГАЗОЖИДКОСТНЫЕ РЕАКТОРЫ ✓

Общая характеристика газожидкостных реакторов. Возможны два варианта газожидкостных реакций: либо газ реагирует непосредственно с жидкостью, либо реагирующие вещества находятся в газовой фазе, а жидкость является катализатором. Во втором случае реакция протекает либо в объеме жидкого катализатора, либо на его поверхности. В качестве примеров газожидкостных реакций можно привести производство уксусного альдегида гидратацией ацетилена, алкилирование бензола пропиленом, окисление изопропилбензола кислородом воздуха. Главные требования к газожидкостным реакторам — создание условий для их межфазного контакта и оптимального теплового режима процесса, так как газожидкостные реакции всегда сопровождаются межфазным массообменом, а скорость их зависит от температуры.

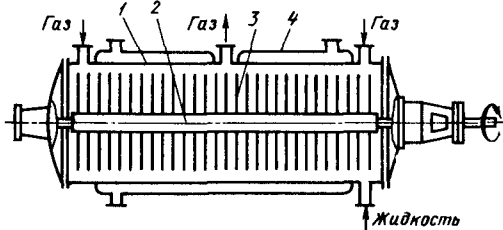
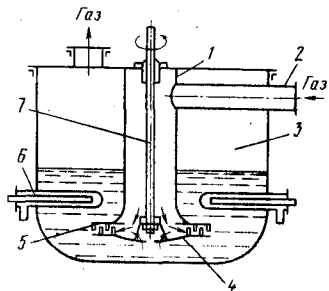


Рис. 4.24. Реактор-турбоабсорбер

Рис. 4.25. Реактор с вращающимися дисками

При химических реакциях обычно не нужно создавать условий для особенно интенсивного массообмена. Исключение составляют очень быстрые реакции (например, процессы неорганической технологии).

Реакторы с мешалками обычного типа для проведения процессов с участием газа и жидкости применяют довольно редко. Это объясняется тем, что при использовании мешалок обычного типа в таких аппаратах не достигается достаточный контакт газа с жидкостью, затрудняются условия для теплообмена, а также организация непрерывного процесса. Следует отметить, что наличие движущихся частей в аппаратах, работающих с газом или агрессивными жидкостями, весьма нежелательно.

Реакторы с механической мешалкой используют главным образом для процессов получения аэрозолей или для абсорбции отходящих промышленных газов с очень небольшой концентрацией абсорбируемого вещества (например, монооксида азота).

В качестве примера можно привести весьма оригинальную конструкцию реактора-турбоабсорбера (рис. 4.24).

Газ поступает через входной патрубок 2 в трубу 1, снабженную в нижней части неподвижным диском 5 с концентрическими кольцами. На валу 7 установлен вращающийся диск 4, образующий с диском 5 лабиринтный канал. Под действием центробежных сил возникает радиальный поток газожидкостной смеси, направленный к периферии аппарата. Затем этот поток расслаивается в отстойной части 3 аппарата. Прореагировавший газ удаляется из верхней части аппарата, а жидкость постоянно циркулирует внутри него. Теплообмен обеспечивают встроенные теплообменные элементы 6 (трубки Фильда).

Реакторы с механическим распылением жидкости. Развитую поверхность контакта между газом и жидкостью можно получить распылением жидкости различными распылителями, форсунками или вращающимися дисками. На рис. 4.25 приведена схема реактора с механическим распылением жидкости, применяемого в производстве этилового спирта сернокислотным методом. Реактор представляет собой горизонтальный цилиндрический корпус 1,

по оси которого установлен ротор, состоящий из вала 2 с дисками 3. Аппарат примерно на одну треть заполнен жидкостью, которая при быстром вращении дисков дробится на мельчайшие капли; последние образуют густой туман, заполняющий весь объем реактора. Через этот туман проходит газ. Создаваемая в реакторе развитая межфазная поверхность и энергичное перемешивание способствуют интенсивному массообмену между газом и жидкостью.

В аппарате создаются хорошие условия для быстрых реакций, протекающих в диффузионной области. Благоприятны также и условия теплоотдачи от реагирующих веществ к стенкам реактора, через которые отводится (или подводится) теплота с помощью рубашки 4. Чаше такие реакторы выполняют периодически действующими. К недостаткам этого аппарата можно отнести наличие сальников (набивка которых быстро разрушается, особенно при работе с коррозионными веществами), движущихся частей, требующих ухода и ремонта, значительный расход энергии.

Для медленных реакций, протекающих обычно в кинетической области, аппараты этого типа использовать нецелесообразно.

Реакционные аппараты колонного типа с насадкой или тарелками. В качестве газожидкостных реакторов часто применяют насадочные или тарельчатые колонны, используемые для процессов абсорбции. Если жидкость является катализатором, эти аппараты отличаются от абсорберов тем, что жидкость циркулирует в системе по замкнутому контуру. Насадочные колонны просты по устройству и обеспечивают большую поверхность контакта реагирующих газа и жидкости даже в небольшом объеме. Жидкость стекает по поверхности насадки в виде тонкой пленки, а газ движется противотоком. Их гидравлическое сопротивление невелико и, следовательно, расход энергии на перемещение газов незначителен. Колонны изготовляют обычно из стали с дополнительным покрытием из материала, стойкого к коррозионному действию рабочей среды. Применяют также колонны из чугуна, керамики (в производстве серной кислоты), футерованные графитом или кислотоупорным кирпичом.

Насадочные колонные аппараты, как и механические, мало пригодны для проведения процессов, протекающих в кинетической области. Это связано с тем, что одновременно используется не весь объем жидкого реагента или катализатора, а лишь сравнительно небольшая его часть. Большая часть находится в системе циркуляции и в сборнике. В этом отношении предпочтительнее тарельчатые колонны, так как в них нет циркуляции основной массы жидкости. Необходимый объем жидкости в реакторе можно обеспечить регулированием уровня жидкости на тарелках реактора, например, переливными устройствами. При этом достигается хороший контакт газа с жидкостью.

Тарельчатая колонна-реактор для проведения медленных реакций существенно отличается от колонны-абсорбера тем, что

Рис. 4.26. Колонна для окисления изопропилбензола

толщина слоя жидкости на тарелке значительно больше. Примером может служить колонна для окисления изопропилбензола (рис. 4.26). Колонна имеет тарелки 1 с капсульными колпачками 2, снабженные переливными устройствами 3, которые обеспечивают толщину слоя жидкости на тарелке около 1 м. Для отвода теплоты реакции в жидкость погружены теплообменные элементы 4 из U-образных труб. Жидкость поступает в колонну сверху, движется по переливным устройствам 3 с тарелки на тарелку и удаляется из нижней части колонны. Газ поступает в нижнюю часть колонны, следовательно проходит противотоком к жидкости через тарелки и удаляется из верхней части аппарата.

Реакционные аппараты барботажного типа — простые и распространенные аппараты для газожидкостных реакций. В них газ проходит пузырьками через слой жидкости. В большинстве случаев такой реактор представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд или колонну, заполненные жидкостью и имеющие в нижней части барботер. Последний часто выполняют в виде согнутой в кольцо трубы, снабженной мелкими отверстиями. Газ подается внутрь трубы и, выходя из отверстий в виде пузырьков, поднимается в слое жидкости. В пространстве над поверхностью жидкости (в отстойной камере) газ перед выходом из аппарата освобождается от брызг и капель. Для более полного их отделения отстойную камеру часто выполняют расширенной или дополнительно устанавливают выносную отстойную камеру. Для поддержания заданной температуры в большинстве случаев аппарат снабжают рубашкой, реже используют встроенные или выносные теплообменники.

Такие аппараты особенно пригодны для проведения медленных реакций, протекающих в кинетической области, т. е. для большей части реакций между органическими веществами. В них обеспечивается хороший контакт фаз и достаточное перемешивание, необходимое для равномерного течения реакции в объеме. Недостатки — большое гидравлическое сопротивление и необходимость нагрева больших масс жидкости при пуске аппарата.

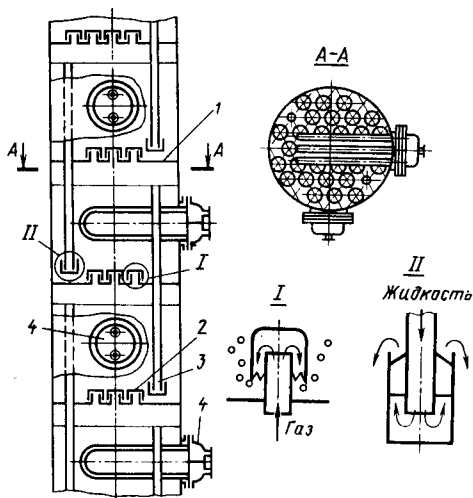
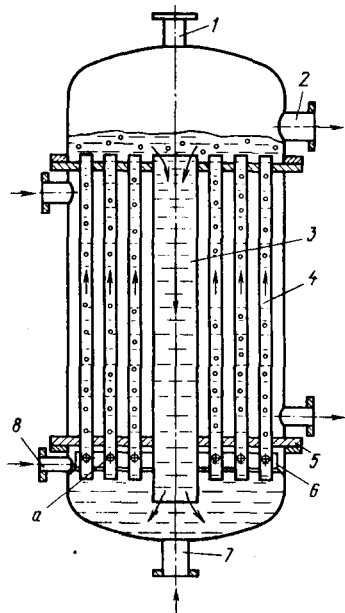


Рис. 4.27. Барботажный кожухотрубчатый реактор



На рис. 4.27 показан барботажный кожухотрубчатый реактор для проведения реакций с большим тепловым эффектом. По конструкции он представляет собой кожухотрубчатый теплообменник с центральной циркуляционной трубой 3. Удлиненные нижние концы трубок 4, находящиеся под трубной решеткой 5, имеют боковые отверстия а, расположенные во всех трубах на одном уровне. Трубное пространство аппарата заполнено жидкостью до уровня сливного штуцера 2 в верхней крышке. Жидкость непрерывно подается в нижнюю крышку через штуцер 7. Газ поступает в реактор по штуцеру 8 и по кольцевому каналу, образованному стенкой нижней

крышки и кольцевой перегородкой 6, распределяется по периметру аппарата. Слой газа под нижней трубной решеткой нарастает до тех пор, пока не достигнет уровня отверстий в трубках. Сквозь них газ поступает в трубки 4, образуя пузырьки, поднимающиеся вверх и увлекающие за собой жидкость (по принципу газлифта).

Газ отводится из верхней крышки реактора через штуцер 1, а жидкость возвращается вниз по циркуляционной трубе. Постепенно часть жидкости сливается из реактора через штуцер 2. В межтрубное пространство реактора в зависимости от теплового эффекта реакции подается теплоноситель или хладагент. Реактор отличается значительной равномерностью распределения газа в жидкости, большим отношением теплопередающей поверхности к объему реагирующих веществ и достаточно высокими коэффициентами теплоотдачи. Для использования преимуществ секционирования и противотока ряд таких аппаратов можно объединить в одну колонну.

Пенные аппараты. В отличие от реакторов барботажного типа в пенных аппаратах пузырьки газа поступают в жидкость с большой скоростью. В результате реакционная масса интенсивно перемешивается и образуется динамическая пена. Такая пенная система характеризуется малым диффузионным сопротивлением. В связи с этим пенные аппараты эффективны лишь для проведения быстрых реакций. Для медленных реакций, протекающих в жидкой фазе, они непригодны из-за крайне малого объема жидкости в аппарате.

Для непрерывного обновления поверхности контакта между реагентами пену получают обычно без использования поверхностно-активных веществ. В этом случае пена нестабильна, и при уменьшении скорости газа ниже определенного значения пена мгновенно разрушается. Это позволяет без затруднений реализовать перетекание жидкости с тарелки на тарелку. Максимальная скорость газа ограничена условиями уноса жидкости на расположенную выше тарелку. Диапазон рабочих скоростей газа в пенных аппаратах 0,8—4 м/с.

На рис. 4.28 дана схема трехполочного пенного аппарата. Аппарат состоит из металлического корпуса 1 прямоугольного или круглого сечения, внутри которого на равных расстояниях расположены перфорированные тарелки-решетки 4, снабженные сливными порогами 2. С тарелки на тарелку жидкость переливается через переливные устройства 3, которые должны иметь достаточную площадь сечения, чтобы быстро выделяющийся из разрушающейся пены газ не создавал газовых пробок и не препятствовал переливу. Газ поступает в аппарат снизу и проходит последовательно через все решетки, по которым сверху вниз перемещается жидкость, подаваемая на верхнюю решетку. Слой жидкости на тарелках зависит от высоты порогов 2.

Для проведения реакций, протекающих в диффузионной области, используют также реакторы типа газлифта, предназначенного для подъема жидкостей. Реакторы этого типа применяют, например для хлорирования этилена.

На рис. 4.29 показан промышленный реактор (для жидкофазного оки-

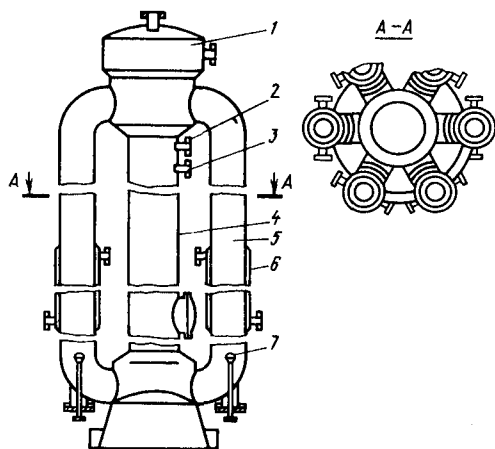
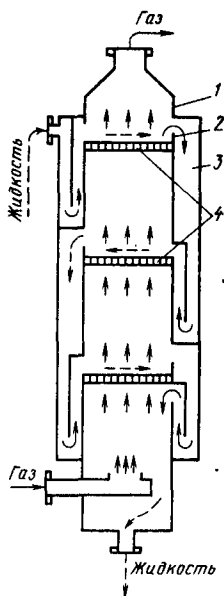


Рис. 4.28. Схема пенного реактора

Рис. 4.29. Реактор с циркуляционным контуром

сления алкилбензолов) типа газлифта с циркуляционным контуром. Подъемные трубы 5 расположены вокруг центральной циркуляционной трубы 4 по окружности.

В каждую подъемную трубу через барботер 7 подается газ. Всплывая в жидкости, заполняющей трубу, пузырьки газа увлекают жидкость вверх. Это обеспечивает циркуляцию жидкости (как в рассмотренном барботажном кожухотрубчатом реакторе). Для отвода (или подвода) теплоты на подъемных трубах предусмотрены теплообменные элементы в виде рубашек 6. Аппарат работает непрерывно. Штуцер 2 для выхода продукта располагается выше штуцера 3 для ввода сырья. Разделение газа и жидкости происходит в сепараторе 1.

§ 4.6. АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РЕАКЦИЙ МЕЖДУ ГАЗОМ И ТВЕРДЫМ ВЕЩЕСТВОМ

Аппараты этой группы предназначены для проведения таких практически важных процессов, как обжиг клинкера в производстве цемента, обжиг известняка, гипса и соды, газификация кокса и других видов твердого топлива, обжиг пирита (серного колчедана) в производстве серной кислоты. В последнее время два последних процесса потеряли свою значимость вследствие замены исходного сырья (например пирит в производстве серной кислоты заменен элементарной серой).

Процессы этого рода, проводимые обычно при высокой температуре, требуют подвода или отвода значительных количеств теплоты. В связи с этим реакторы называют печами. Газ (определенный компонент газовой смеси) может быть реагентом, топливом, теплоносителем или выделяться из твердого вещества в процессе реакции.

Основные типы аппаратов: вертикальные цилиндрические реакторы (шахтные печи и газогенераторы); полочные обжиговые печи; барабанные вращающиеся печи; реакторы (печи) со псевдоожиженным (кипящим) слоем. Реже используют периодически действующие реакторы с наружным обогревом (ретортные печи) и с горизонтальным механическим перемещением слоя зернистого твердого вещества (цепными колосниковыми решетками).

Шахтные печи. К реакторам этого типа относится широко известная доменная печь, являющаяся основой всей черной металлургии, а также печи обжига магнезита, доломита и других материалов. Шахтная печь для обжига известняка (рис. 4.30) имеет вертикальный цилиндрический корпус 2 со стенками из огнеупорного материала. Сырье (куски известняка, иногда с твердым топливом) загружают в печь сверху, а выгружают из нижней части, куда поступает необходимый для горения воздух. Теплота для обжига выделяется в нижней части печи при сжигании жидкого или газообразного топлива (в горелках 3 и 4) или кокса, смешанного с известняком.

Рис. 4.30. Вертикальная печь для обжига известняка

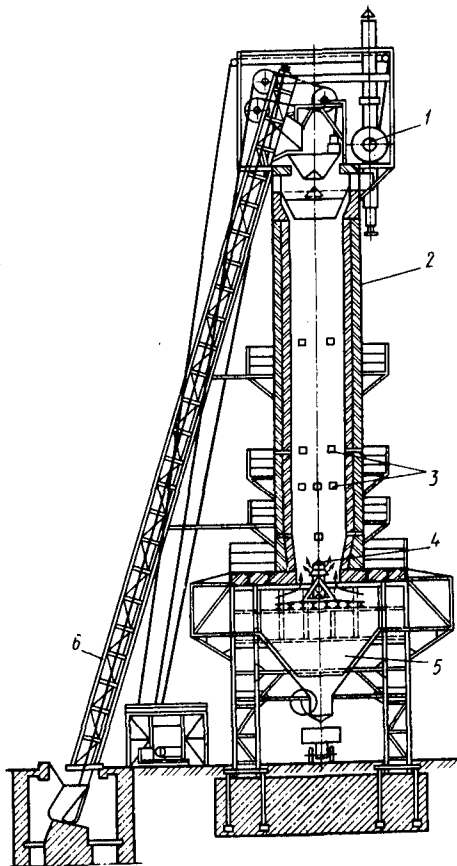
Известняк подается элеватором 6 на верхнюю платформу, где находится загрузочный бункер с затвором, плотно закрывающим печь сверху. Тягу обеспечивают дымосос или газодувка 1, которая подает воздух, необходимый для горения. Известь собирается в бункер 5.

Наружная рубашка печи изготовлена из листовой стали, облицованной кирпичом и защищенной огнеупорной кладкой. Печь имеет следующие рабочие зоны (сверху вниз): зону сушки и нагревания материала, расположенную непосредственно под загрузочным бункером (материал нагревается до температуры $400\text{--}500^\circ\text{C}$); зону горения и обжига (температура $600\text{--}1200^\circ\text{C}$), в которой происходит выделение диоксида углерода из известняка; зону охлаждения монооксида кальция и нагревания воздуха, где температура снижается до 500°C .

Температура стальной рубашки печи не превышает 100°C , поэтому потери теплоты через стенки составляют всего 20 % (потери теплоты с дымовыми газами 25 %, с несгоревшим коксом 15 %).

Газогенераторы с вертикально перемещающимся слоем конструктивно мало отличаются от шахтных печей; существенное отличие — меньшее отношение высоты к диаметру. Основное назначение — газификация углеродсодержащих твердых топлив для получения горючего газа, состоящего преимущественно из монооксида углерода, водорода и продуктов сухой перегонки. Аппараты аналогичного устройства можно использовать и для других экзотермических реакций, проводимых при атмосферном давлении. Как и в шахтных печах, топливо загружают сверху, золу или шлак удаляют снизу.

В процессе используют воздух или кислород и водяной пар, иногда с добавкой диоксида углерода. Газификации подвергают



твердое топливо практически всех видов: каменный и бурый угли, горючие сланцы, древесину, торф, иногда даже отходы сельского хозяйства (например, рисовую шелуху). Полученный горючий газ используют в качестве топлива в металлургии (для выплавки стали в мартеновских печах), в производстве стекла, в двигателях внутреннего сгорания (газогенераторные автомобили, тепловозы, электростанции и другие силовые установки), а также в качестве сырья в химической промышленности (синтез аммиака, метанола, фосгена, производство водорода).

В химической промышленности в основном газифицируют кокс, чтобы газ не содержал примесей в виде продуктов сухой перегонки. До 1950—1955 г. этот процесс использовали в производствах синтетического аммиака и метанола, переведенных впоследствии на углеводородное сырье (природный газ), что позволило резко улучшить технико-экономические показатели. Газификация кокса в этих производствах почти повсеместно была прекращена. В настоящее время в связи с истощением ресурсов и ростом цен на нефть и природный газ необходимо возвращение к твердому сырью с использованием современной аппаратуры и технологии. В частности, возрастает роль газогенераторов.

Газогенератор (рис. 4.31) имеет вертикальный цилиндрический стальной кожух 2, футерованный изнутри двумя слоями кирпича (внутренний слой — огнеупорный). Топливо загружают сверху через отверстие с герметичным затвором 1. Для механического удаления золы (шлака) газогенератор снабжен в нижней части вращающейся колосниковой решеткой 3.

Аналогично сконструирован газогенератор Лурги, предназначенный для газификации кускового топлива под давлением 1,5—3 МПа. Корпус аппарата имеет двойные стенки, образующие водяную рубашку, и рассчитан на соответствующее давление. Давление воды в рубашке несколько больше, чем внутри газогенератора. Для защиты стенки от коррозии и воздействия высокой температуры шахта газогенератора выложена изнутри огнеупорным кирпичом. Топливо подается сверху через шлюзовое устройство в загрузочную воронку, где подогревается паровой рубашкой. Парокислородная смесь подается снизу, причем часть пара поступает из рубашки. Для удаления золы предназначена вращающаяся колосниковая решетка, из-под которой зола периодически выбрасывается через специальный штуцер и шлюз. Газ отводится из верхней части газогенератора. Производительность аппарата при давлении 2 МПа около 0,9 т/(м³·ч).

Полочные печи ранее широко использовали в производстве серной кислоты для обжига пирита (реже — сернистого цинка). Их можно применять для других аналогичных экзотермических реакций. Печь (рис. 4.32) имеет вертикальный цилиндрический корпус с рядом горизонтальных полок 2, футерованных кирпичом. Полки имеют окна, через которые материал, поступающий на верхнюю полку из бункера 1, пересыпается на полку, располо-

женную ниже. Материал перемещается по полкам гребками 3 с наклонными лопастями, медленно вращающимися вместе с вертикальным полым валом 4. Вал получает вращение через зубчатую передачу 5. Противотоком к материалу (пириту) поступает воздух (иногда нагретый), дозируемый таким образом, чтобы содержание кислорода в смеси с сернистым газом было достаточно для реакций в последующих фазах производства серной кислоты.

В связи с развитием производства полочные печи были заменены сначала более совершенными печами с псевдоожиженным (кипящим) слоем, а затем — печами для сжигания элементарной серы (в расплавленном состоянии).

Барабанные вращающиеся печи. Основной частью такой печи является длинный вращающийся барабан, изготавливаемый обычно из листовой стали. Барабан расположен с некоторым наклоном к горизонту, снабжен двумя бандажми и приводным зубчатым колесом. Бандажми барабан опирается на роликовые опорно-упорные станции; зубчатое колесо находится в зацеплении с шестерней привода. Частота вращения барабана $0,5\text{--}2,0\text{ мин}^{-1}$. Твердый материал, загружаемый через питатель в верхний конец барабана, перемещается к его нижнему концу, где выгружается. Газ движется часто противотоком по отношению к твердому материалу; иногда используют прямоток. По конструкции и движению материала такие печи близки к барабанным сушилкам. Как и в сушилках на торцах барабана расположены уплотнительные

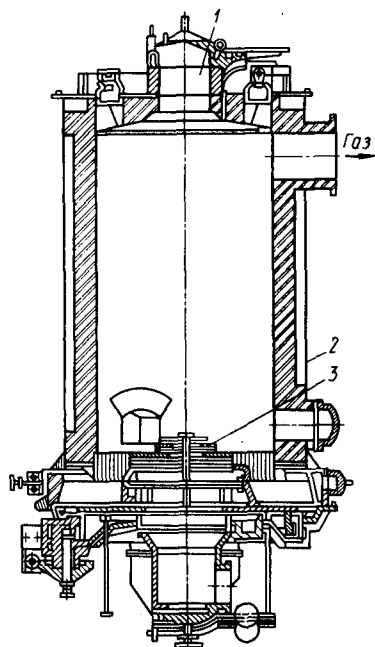


Рис. 4.31. Газогенератор для получения водяного газа

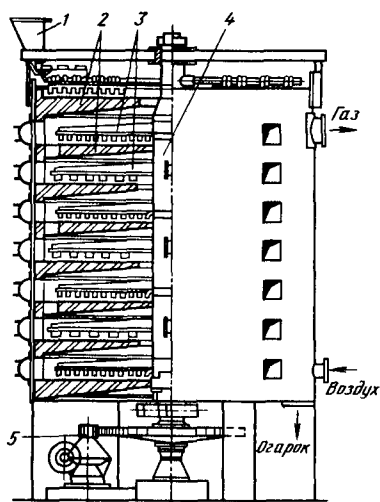


Рис. 4.32. Полочная печь для обжига колчедана

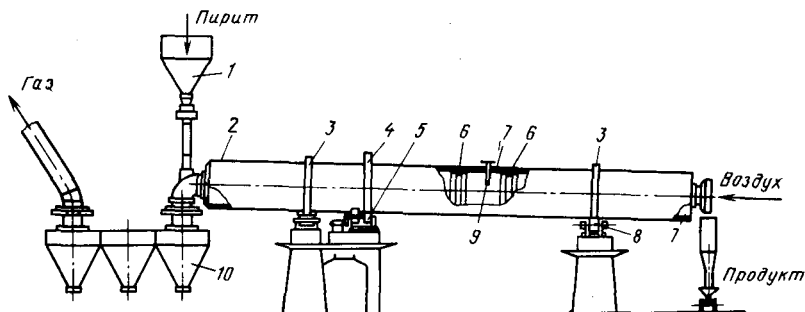


Рис. 4.33. Барабанная печь для обжига пирита

устройства, предотвращающие утечку газа из печи в производственное помещение; выходящий (прореагировавший) газ направляется в устройства для улавливания пыли (циклоны). Так как печи обычно используют для проведения высокотемпературных реакций, в отличие от сушилок, барабан футеруют изнутри огнеупорным кирпичом. При проведении экзотермических реакций (обжиг колчедана) теплота выделяется непосредственно в барабане. Печи для эндотермических реакций (обжиг клинкера) снабжают выносной топкой, работающей на газовом или жидком топливе, откуда в барабан подаются нагретые топочные газы, играющие роль теплоносителя или реагента (прямой обогрев).

Если реакция проходит при невысокой температуре (производство соды), а контакт продукта с топочными газами нежелателен, барабан обогревают снаружи, для чего его помещают внутри кирпичной кладки (косвенный обогрев). При этом барабан изготавливают из жаропрочной стали с более толстыми стенками и не снабжают футеровкой. Скорость газа в барабане не более 6 м/с (для уменьшения уноса пыли). Коэффициент заполнения барабана твердым материалом близок к 0,1.

На рис. 4.33 показана барабанная печь для обжига пирита с необходимым оборудованием. Барабан 2 печи опирается бандажми 3 на ролики 8 опорных станций и приводится во вращение через зубчатые колеса 4 и 5. Барабан выполнен с кирпичной футеровкой 7 и несколькими керамическими кольцами 6. Пирит поступает в печь из бункера 1. Печь не имеет топки, так как реакция экзотермична. Для поддержания постоянного состава удаляемых газов, содержащих диоксид серы, и постоянной температуры в зоне реакции воздух, необходимый для горения, вводят порциями в нескольких местах по длине барабана через специальные сопла 9. Для исключения местного перегрева барабан в зоне реакции охлаждают снаружи воздухом. Полученный газ (диоксид серы) очищается от огарковой пыли в циклонах 10.

Примером печи с косвенным обогревом является печь (рис. 4.34), в котором бикарбонат натрия при нагревании превращается в карбонат. Барабан 1 помещен внутри кирпичной

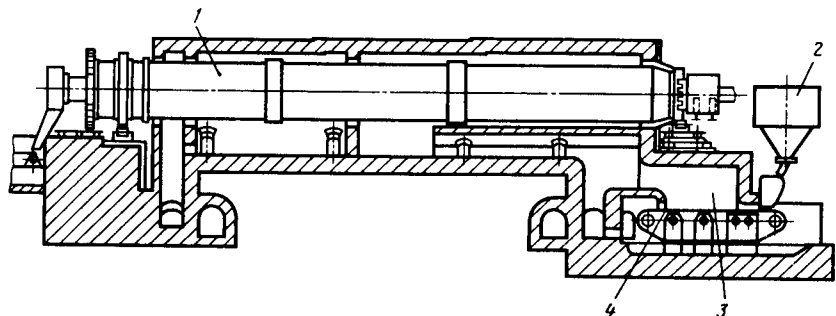


Рис. 4.34. Барабанная печь для кальцинирования соды

кладки и обогревается снаружи топочными газами, получаемыми в топке 3 сжиганием твердого топлива. Последнее поступает из бункера 2 на подвижную цепную колосниковую решетку 4. Для защиты от высокой температуры пламени печь почти на половину длины экранирована. Подобные печи применяют также в производстве минеральных пигментов (литопона, диоксида титана и др.).

Барабанные печи — тяжелая и дорогостоящая аппаратура. Диаметр барабана обычно 1,8—3,5 м, длина до 100 м, отношение длины к диаметру 20—30. В производстве цемента применяют печи длиной до 230 м, диаметром до 7 м. Большие размеры и вес печи требуют строгого расчета ее элементов (барабана, бандажей, опорно-упорных станций, привода) на механическую прочность. Толщину стенки барабана рассчитывают с учетом прочности, повышенной температуры и массы футеровки; иногда толщина достигает нескольких сантиметров.

Недостатки барабанных печей — длительность установления рабочего режима, малый коэффициент заполнения, а также сложность и высокая стоимость ремонта. Тем не менее они широко распространены в промышленности, так как обеспечивают достаточно хороший контакт между газом и твердым веществом; кроме того, необходимая для реакции теплота в них может быть передана непосредственно от газа к материалу, что экономически выгодно. Несмотря на громоздкость печей, герметизация, монтаж и обслуживание сравнительно просты. Производительность и режим работы (частота вращения, угол наклона к горизонтали) зависят от свойств перерабатываемого материала, времени его пребывания в печи, температуры и количества теплоты, необходимых для проведения реакции, а также расхода и температуры горючих газов.

Реакторы с псевдооживленным слоем. Если под слой мелкозернистого твердого материала, находящегося на решетке, подавать воздух или другой газ, то при малой скорости газ фильтруется через неподвижный слой материала. При увеличении скорости газа объем слоя увеличивается, его частицы приходят во взвешенное состояние и совершают интенсивное хаотическое движение. Такой

слой обладает текучестью, хорошо перемешивается и по виду напоминает кипящую жидкость; поэтому он назван псевдоожигенным или кипящим.

Псевдоожигенный слой позволяет проводить реакции между газами и твердыми веществами в интенсивном режиме с хорошим выходом целевого продукта. Мелкозернистость слоя обеспечивает развитую поверхность контакта между газом и твердым веществом, что весьма существенно, так как реакция протекает в основном на поверхности твердых частиц. Интенсивное перемешивание слоя обеспечивает постоянство концентраций и температуры по объему и позволяет проводить реакцию при оптимальных условиях.

Реакторы с псевдоожигенным слоем по своим характеристикам близки к аппаратам идеального смешения и обладают их недостатками. Основной из них — снижение скорости реакции вследствие разбавления реагирующих веществ продуктами реакции — устраняют секционированием аппарата перегородками с использованием противотока между секциями. Концентрация твердого реагента в кипящем слое меньше, чем в неподвижном (плотном). При проектировании и эксплуатации приходится учитывать истирание стенок аппарата твердыми частицами, измельчение их при трении одна о другую и унос твердых частиц в виде пыли с отходящим газом, что требует установки пылеочистного оборудования. По устройству такие реакторы очень близки к сушилкам с кипящим слоем.

Первая крупная промышленная установка с использованием псевдоожигенного слоя (рис. 4.35) создана Ф. Винклером для газификации измельченного угля. Измельченное топливо из бункера 1 шнековым конвейером 4 подается в нижнюю часть газогенератора 2, где происходит газификация топлива в псевдоожигенном состоянии. Зола удаляется снизу шнеком 3, а газ отводится через верхний штуцер.

Первый газогенератор высотой 13 м, площадью поперечного сечения 12 м^2 создан в 1926 г. Газогенератор имеет значительный объем, необходимый для подачи вторичного кислорода в область над слоем. В результате повышается температура и разлагается выделившийся метан. Аппарат работает при давлении, близком к атмосферному; несмотря на это по производительности $[1,7 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})]$ он почти вдвое превосходит газогенератор Лурги. Недостатки газогенератора Винклера — потребление большого количества кислорода и значительные (более 20 %) потери углерода вследствие уноса. В связи с переходом промышленности на углеводородное сырье необходимость в газогенераторах отпала. В будущем, возможно, их вновь будут использовать. По современным данным, газогенераторы Винклера и Лурги имеют близкие технико-экономические показатели.

Другой пример экзотермической реакции, проводимой в псевдоожигенном слое, — обжиг колчедана (пирита) в производстве серной кислоты. Печь КС (с кипящим слоем) для этого процесса

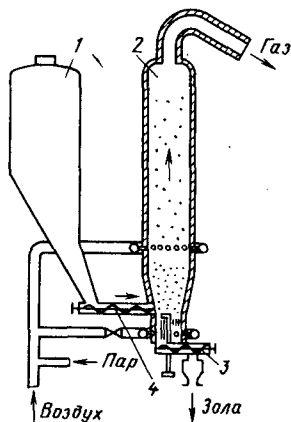


Рис. 4.35. Схема газогенератора Винклера

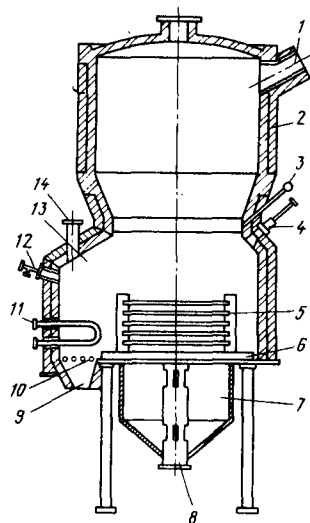


Рис. 4.36. Печь КС для обжига пирита

показана на рис. 4.36. Стальной корпус 2 печи футерован изнутри шамотным кирпичом или жароупорным бетоном. Печь имеет загрузочную камеру 13 (форкамеру), снабженную провальной решеткой. Применение форкамеры предохраняет подовую решетку 6 основной части печи от забивания крупными кусками колчедана, кусками спекшегося огарка и позволяет расположить вертикально спускную трубу от тарельчатого питателя во избежание забивания ее колчеданом, поступающим в форкамеру через штуцер 14.

Под печи состоит из беспровальной решетки 6 (90 % площади), частично заходящей в форкамеру, и провальной колосниковой решетки 10, расположенной в форкамере под местом загрузки колчедана. Под провальной решеткой расположен бункер 9 для огарка. Воздух подается в камеру 7 под беспровальной решеткой через штуцер 8; штуцер 1 верхней части печи предназначен для отвода газа. Предусмотрен ввод вторичного воздуха над кипящим слоем из коллектора 3.

Во избежание спекания частиц температура в зоне реакции не должна превышать 1000 °С. Для отвода теплоты и поддержания температуры в зоне кипящего слоя расположены охлаждающие элементы 5 и 11 — змеевики для подогрева воды или секции труб парового котла. Для зажигания колчедана при пуске печи установлены газовые горелки или мазутные форсунки 4 и 12.

Беспровальная решетка с дутьевым устройством (рис. 4.37) представляет собой стальной лист 4 с отверстиями, снабженными

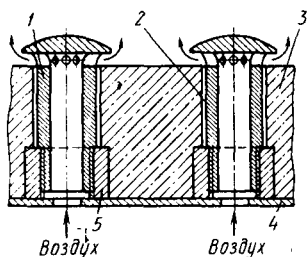


Рис. 4.37. Устройство для подачи воздуха в печи КС

патрубками 5 с внутренней резьбой. В патрубки нижними концами ввернуты дутьевые сопла (грибки) 1 с горизонтальными отверстиями для выхода воздуха в верхней части. Решетка почти до уровня выходных отверстий грибков залита слоем 3 жароупорного бетона. Для создания зазора между бетоном и грибками перед заливкой их обертывают несколькими слоями 2 крафтбумаги, которая затем сгорает.

Благодаря высокой скорости процесса горения и интенсивному перемешиванию в псевдоожиженном слое практически находится не колчедан, а огарок. Содержание серы в огарке в различных точках кипящего слоя примерно одинаково (идеальное смешение). Количество пыли, уносимой из печи, достигает 90 % всего огарка; поэтому после котла-утилизатора газ проходит один или два циклона для отделения основной массы пыли, а затем очищается в электрофильтрах.

Примером секционированного противоточного реактора является печь для обжига известняка в псевдоожиженном слое фирмы «Нью Ингланд Лайм Компани» (США) (рис. 4.38). Реактор 3 имеет стальной цилиндрический корпус, футерованный изнутри огнеупорным материалом и разделенный горизонтальными пере-

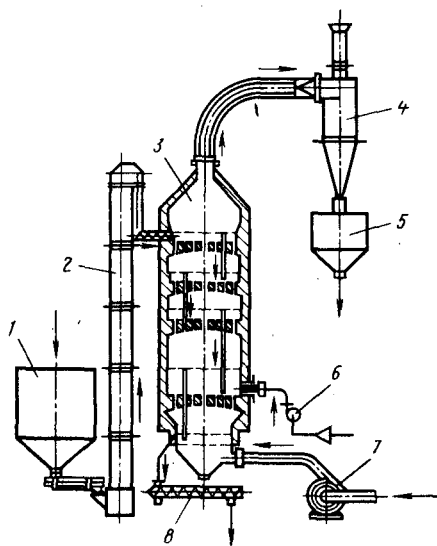


Рис. 4.38. Реактор со взвешенным слоем для обжига известняка

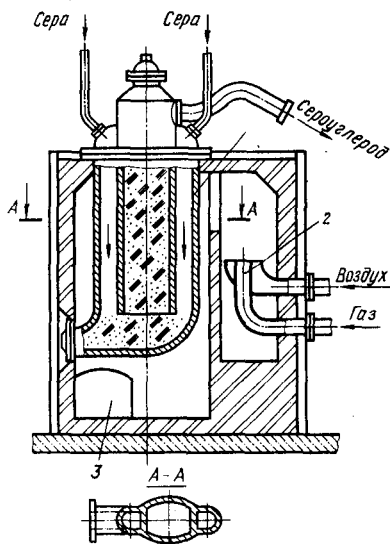


Рис. 4.39. Реактор для производства сероуглерода

городками на несколько секций. В перегородках выполнены отверстия для прохода газов и сливные щели, через которые движется известняк. Топливо подается насосом 6 во вторую секцию и сжигается, создавая температуру 870—950 °С, достаточную для обжига. Продукт (оксид кальция) охлаждается воздухом до температуры 350 °С и удаляется шнековым конвейером 8. Известняк в раздробленном виде (куски размером 0,25—3,5 мм) из бункера 1 поднимается элеватором 2 и вводится в реактор сверху. Воздух подается вентилятором 7. Мелкие частицы известняка, уносимые газом, отделяются в циклоне 4 с пылесборником 5. Секционирование позволяет лучше использовать топливо и получить известь высокого качества.

Реакторы с ретортами, обогреваемыми снаружи, с периодической загрузкой твердых реагентов используют в малотоннажных производствах. В реакторе для получения сероуглерода (рис. 4.39) пары серы при температуре 900—1000 °С реагируют с древесным углем. Реторта 1 реактора имеет эллиптическое сечение, защищена от коррозионного действия паров серы огнеупорной кладкой и нагревается снаружи топочными газами от газовой горелки 2 до температуры 850 °С. Отработанные газы поступают в дымоход 3. Расплавленную серу вводят через трубопровод в реторту, где сера испаряется при контакте с нагретыми стенками. Поднимаясь через слой угля, пары серы реагируют с ним. Сероуглерод, образующийся при реакции, отводится из верхней части реактора.

§ 4.7. АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГАЗОВЫХ РЕАКЦИЙ НА ТВЕРДОМ КАТАЛИЗАТОРЕ

Газовые реакции на твердом катализаторе распространены в химической промышленности. В частности, производство азотных удобрений было бы невозможным без каталитических реакций конверсии метана и монооксида углерода, синтеза аммиака и окисления его до монооксида азота. Серную кислоту, необходимую для производства фосфорных удобрений, в настоящее время получают почти исключительно контактным способом, основанным на каталитическом окислении сернистого ангидрида в серный. Примеры таких процессов в нефтехимических и органических производствах — каталитический крекинг и риформинг нефтепродуктов, а также синтез метанола и других спиртов и углеводов. Реакторы для таких процессов обычно называют контактными аппаратами или колоннами синтеза.

В большинстве случаев используют несколько неподвижных слоев катализатора в виде гранул или таблеток, расположенных на решетках (полках). Применяют также реакторы с движущимся зернистым катализатором, образующим псевдоожиженный (кипящий) слой, или пересыпающимся сверху вниз в зоне реакции. Окисление аммиака и некоторые другие процессы проводят на катализаторе в виде нескольких слоев проволоочной сетки, изготовленной из платины с активирующими добавками (родий, иридий).

За исключением некоторых реакций, проводимых при малых концентрациях реагирующих веществ (очистка метана от серы), большей частью реакции протекают со значительным тепловым эффектом. Для поддержания необходимого температурного режима в реакторе необходим отвод теплоты. Этого достигают подачей холодного газа или распыленной воды в поток реагента между слоями катализатора или применением теплообменных устройств. Часто встроенные поверхностные теплообменники располагают в корпусе реактора между слоями катализатора. При большом тепловом эффекте (в крупных реакторах) более удобны выносные теплообменники. В этом случае реактор разделен на секции ложными днищами и снабжен штуцерами для соединения с теплообменниками.

Наилучший (наиболее равномерный) температурный режим достигается, когда теплообменные элементы помещены непосредственно в слой катализатора. Используют прямые, U-образные или более удобные для конструктивной компоновки двойные трубки (трубки Фильда), внутри которых протекает теплоноситель (холодный газ). В других, более редких, случаях катализатор помещают внутрь труб, омываемых теплоносителем снаружи.

Конструкции корпуса и других элементов реактора существенно зависят от давления, при котором протекает реакция. Реакторы низкого давления (контактные аппараты, конвертеры) имеют обычно сравнительно тонкостенный сварной цилиндрический корпус, непосредственно к которому крепят решетчатые полки с катализатором. Штуцера для подвода и отвода реагентов обычно приварены к боковой стенке корпуса. В качестве корпусов реакторов высокого давления (10—100 МПа) применяют цельнокованные, ковано-сварные или многослойные сварные цилиндрические толстостенные сосуды (из стали 22Х3М), закрытые массивными плоскими крышками (рис. 4.40). Реагенты подводят и отводят через крышки; боковые штуцера применяют редко. Для герметизации соединения корпуса и крышки в последнее время используют преимущественно двухконусный самоуплотняющийся затвор. Такие реакторы применяют в основном для синтеза аммиака и метанола (колонны синтеза). Реакция происходит в катализаторной коробке (насадке колонны), закрепленной с зазором относительно корпуса. В зазоре циркулирует холодный синтез-газ, охлаждающий корпус и стенку катализаторной коробки и этим защищающий их от перегрева и соответствующей потери прочности материала стенки, а также от температурных напряжений. Создание крупных колонн синтеза и агрегатов большой единичной мощности обусловлено развитием сварочной техники, в частности электрошлаковой сварки, позволяющей сваривать толстые детали.

Реакторы низкого давления. Примером высокотемпературного реактора, работающего при давлении, близком к атмосферному (абсолютное давление 0,17 МПа), может служить конвертер метана

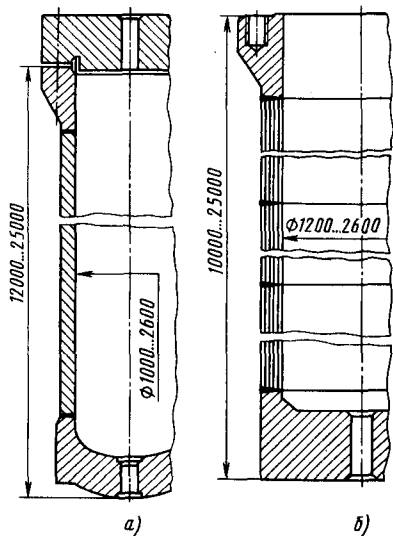


Рис. 4.40. Ковано-сварной (а) и многослойный (б) корпуса колонны синтеза аммиака

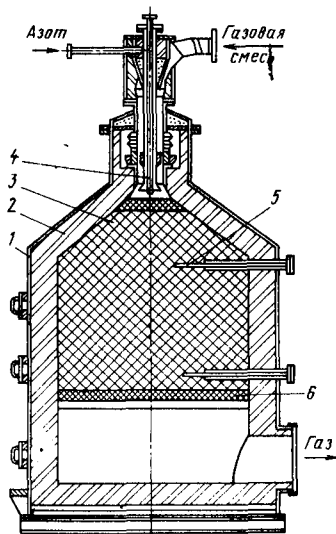
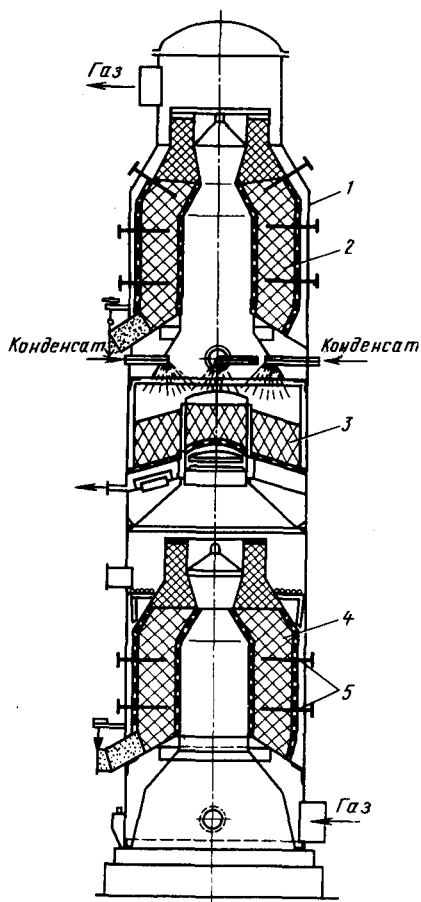


Рис. 4.41. Конвертер метана

(рис. 4.41). В нем при температуре 850—1100 °С протекает реакция метана с кислородом и водяным паром для получения водорода и монооксида углерода. Цилиндро-конический тонкостенный сварной корпус 1 реактора двухслойный: наружный слой — из углеродистой стали Ст3, внутренний — из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т. Изнутри корпус покрыт футеровкой 2 (послойно — шамотный кирпич, легковесный шамот, диатомовый кирпич и диатомовая крошка); толщина футеровки 500 мм. Слой катализатора 3 с подслоем 6 из дробленого шамотного кирпича опирается на сводообразную кирпичную кладку со щелями для прохода газа, играющую роль опорной решетки. Для контроля температуры в зоне реакции в карманы 4 и 5 помещены термодатчики. Парогазовая смесь подводится сверху, конвертированный газ отводится снизу.

При более низкой температуре и абсолютном давлении 0,13 МПа проводят конверсию монооксида углерода водяным паром в реакторе с радиальным потоком газа (рис. 4.42). Процесс происходит в две ступени в коробках 2 и 4 с катализатором, выполненных в виде коаксиальных перфорированных цилиндров из жаропрочной стали, обтянутых сеткой и расположенных с зазором относительно корпуса 1. В зону реакции газ поступает из внутреннего решетчатого цилиндра в кольцевое пространство, заполненное катализатором, движется в радиальном направлении в зоне реакции и отводится по зазору между наружной стенкой коробки и корпусом реактора. Между ступенями конверсии теплота отводится за счет испарения очищенной воды (конденсата), ко-

Рис. 4.42. Радиальный конвертер монооксида углерода



торая подается семью форсунками в испаритель 3 из слоя колец Рашига, помещенных на решетку. Корпус конвертера снабжен карманами-трубками 5 для термопар и наружной теплоизоляции толщиной 160—250 мм. Реакторы с радиальным потоком газа имеют меньшее гидравлическое сопротивление, чем реакторы с осевым потоком газа.

Пример реактора с встроенными теплообменниками между зонами реакции (слоями катализатора) — пятиполочный контактный аппарат для окисления сернистого ангидрида в серный (рис. 4.43). Аппарат имеет стальной цилиндрический корпус 2, в центре которого расположена опорная стойка 3, собранная из чугунных труб с фланцами. Внутренний диаметр аппарата 8,5 м, общая высота 19,6 м. Пять слоев катализатора (контактной массы) 7 помещены на решетках 1, опирающихся на корпус и опорную трубу. Для охла-

ждения газа после первого слоя вводится холодный сернистый газ; между последующими слоями катализатора вмонтированы трубчатые теплообменные элементы 4, 5 и 6 из прямых горизонтальных труб, которые при необходимости можно очищать и ремонтировать без выгрузки катализатора. Производительность реактора 540 т серной кислоты в сутки. Более крупные аппараты (1000 т/сут) снабжают выносными теплообменниками; при этом конструкция аппаратов проще.

Реакторы с катализатором в виде нескольких слоев платиновой сетки применяют для окисления аммиака в монооксид азота. Такой реактор (контактный аппарат), работающий под давлением 0,8 МПа при температуре 850—900 °С, показан на рис. 4.44. Корпус аппарата состоит из двух полых усеченных конусов 1 и 3, снабженных фланцами и соединенных большими основаниями. В расширенной части корпуса закреплен пакет 2 из 16 платиновых

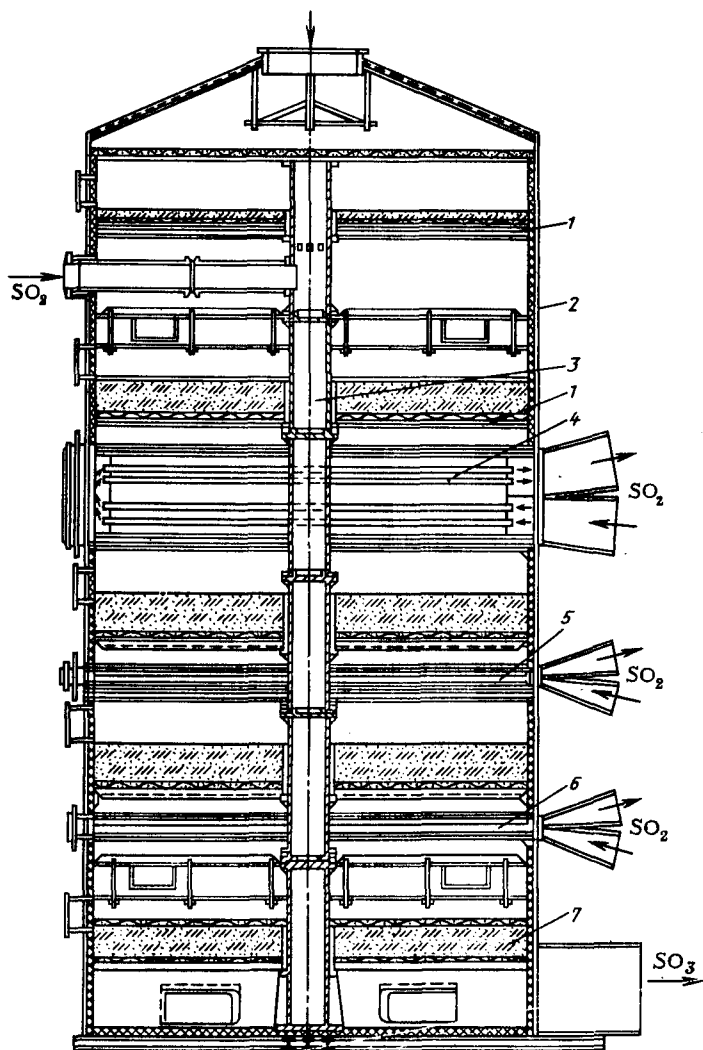


Рис. 4.43. Контактный аппарат для получения серного ангидрида

сеток, опирающихся на решетку из нихромовой проволоки. Малые основания конусов снабжены штуцерами для подвода и отвода реагирующих газов. Нижняя часть корпуса и отводная труба 4 имеют рубашку 5, в которой циркулирует охлаждающая вода для защиты материала стенок от перегрева и потери прочности. Более сложны по устройству контактные аппараты, совмещенные с фильтром и котлом-утилизатором.

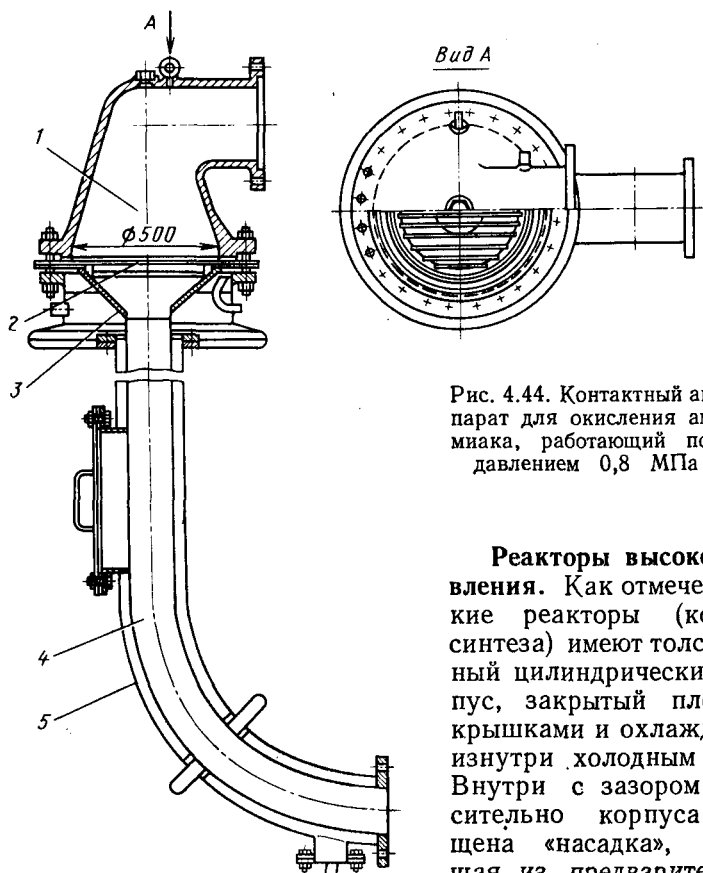


Рис. 4.44. Контактный аппарат для окисления аммиака, работающий под давлением 0,8 МПа

Реакторы высокого давления. Как отмечено, такие реакторы (колонны синтеза) имеют толстостенный цилиндрический корпус, закрытый плоскими крышками и охлаждаемый внутри холодным газом. Внутри с зазором относительно корпуса помещена «насадка», состоящая из предварительного теплообменника и катали-

заторной коробки. Наилучший тепловой режим обеспечивается при установке теплообменных элементов непосредственно в слое катализатора. Колонна синтеза с двойными трубками Фильда показана на рис. 4.45. Газ поступает в аппарат сверху, проходит кольцевой зазор между корпусом колонны 3 и кожухом насадки 4, затем межтрубное пространство теплообменника 5, где нагревается прореагировавшим газом. Нагретый газ через центральную трубу 8 поступает в верхнюю полость катализаторной коробки, проходит внутренние 1 и затем наружные 7 трубки, слой катализатора 2 и трубки теплообменника 5 и выходит из колонны снизу. Для пуска колонны в центральной трубе 8 установлен электроподогреватель. Температуру регулируют подачей холодного (байпасного) газа снизу по трубе 6 в верхнюю часть теплообменника, где он смешивается с нагретым основным газом.

Преимущества реактора — температурный режим, близкий к оптимальному, высокая устойчивость работы, надежность кон-

струкции, удобство монтажа насадки. Недостатки — высокое гидравлическое сопротивление и необходимость извлечения насадки из корпуса для замены отработавшего катализатора.

Современная тенденция состоит в создании наиболее экономичных агрегатов высокой единичной мощности с крупногабаритными колоннами синтеза. При этом извлечение насадки из корпуса для замены катализатора практически невозможно. Кроме того, при большом диаметре крышки затруднена герметизация корпуса. В связи с этим корпуса крупных колонн изготавливают ковано-сварными с суженными горловинами для уменьшения диа-

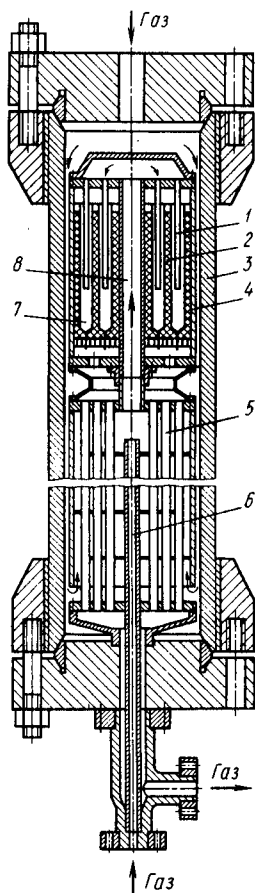


Рис. 4.45. Колонна синтеза аммиака с двойными противоточными трубками

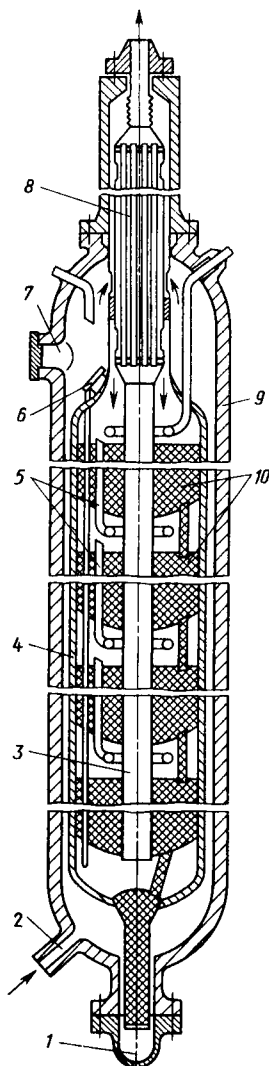


Рис. 4.46. Колонна синтеза аммиака производительностью 1360 т/сут

метра уплотнения, а насадку конструируют с расчетом на загрузку и выгрузку катализатора без ее извлечения из корпуса. Этим условиям удовлетворяют давно применяемые аппараты — полочные колонны. Здесь используют несколько адиабатических слоев катализатора, между которыми для регулирования температуры подают холодный байпасный газ. В четырехполочной колонне агрегата синтеза аммиака производительностью 1360 т/сут (рис. 4.46) основной поток газа поступает в колонну снизу через штуцер 2, проходит по кольцевой щели между корпусом 9 колонны и кожухом 4 насадки и поступает в межтрубное пространство теплообменника 8. Здесь синтез-газ нагревается до температуры 400—430 °С теплотой прореагировавшего газа, выходящего из катализаторной коробки, и затем последовательно проходит четыре полки 10 катализатора, между которыми по трубам 5 подается холодный байпасный газ. Пройдя четвертый слой, продукты реакции при температуре 500—520 °С поднимаются по центральной трубе 3, проходят по трубкам теплообменника 8, охлаждаясь при этом до 320—350 °С, и выходят из колонны сверху. Теплообменник расположен в верхней суженной части корпуса. Катализатор загружают в колонну через люки 7 и 6, отработанный катализатор выгружают через люк 1. Внутренний диаметр колонны 2400 мм, высота 32 м, толщина стенки корпуса 250 мм, рабочее давление 31,5 МПа.

Основные недостатки полочных колонн — несовершенный температурный режим в адиабатических слоях катализатора и разбавление прореагировавшего газа холодным байпасным газом с низким содержанием аммиака (3—4 %), что снижает эффективность аппарата. В связи с этим степень превращения азотоводородной смеси в аммиак в таких колоннах невысока. Кроме того, аксиальные полочные насадки обладают сравнительно высоким гидравлическим сопротивлением; поэтому используют крупнозернистый катализатор, что, в свою очередь, снижает производительность колонн синтеза. В последние годы получили распространение колонны с радиальным потоком газа через слои катализатора, что позволяет уменьшить гидравлическое сопротивление и использовать более эффективный мелкозернистый катализатор.

Реакторы с псевдооживленным катализатором. Каталитические реакции в газовой или паровой фазе часто целесообразно проводить в псевдооживленном слое твердого зернистого катализатора. В этом случае обеспечивают хорошее перемешивание реакционной смеси и постоянство температуры, определяющие хороший выход целевого продукта. Это особенно важно, когда реакцию проводят в узком интервале температур (получение фталевого ангидрида). Процессы, в которых катализатор быстро теряет активность и требует регенерации, практически неосуществимы в реакторах с неподвижным слоем. Псевдооживленный слой в сочетании с пневмотранспортом позволяет проводить такие процессы в агрегате, состоящем из реактора и регенератора, с непрерывно циркулиру-

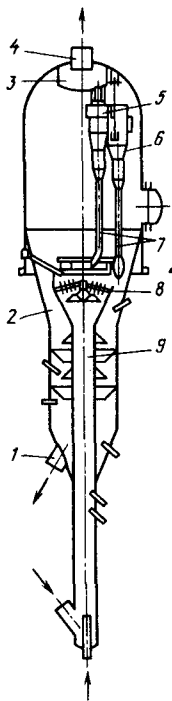
Рис. 4.47. Реактор крекинга с пылевидным катализатором

щим катализатором. Такие агрегаты широко используют в нефтеперерабатывающей промышленности для процессов каталитического крекинга и риформинга углеводородов. Оба процесса сопровождаются отложением кокса на поверхности зерен катализатора и поглощением теплоты. Из реактора катализатор пневмотранспортом перемещается в регенератор, где кокс сгорает с выделением теплоты. Горячий восстановленный катализатор возвращается в реактор, перенося теплоту из генератора.

Реактор каталитического крекинга (рис. 4.47) с псевдоожиженным слоем пылевидного катализатора имеет форму ступенчатого цилиндра с коническими переходами. В средней части корпуса 2 размещена распределительная решетка 8, через которую из трубы 9 в рабочую зону аппарата поступает смесь паров сырья с катализатором. В зоне над решеткой, занятой кипящим слоем, реакция протекает при температуре 500 °С. Продукты реакции с частицами катализатора поступают в верхнюю часть, где расположены циклонные элементы 5 и 6, образующие двухступенчатый батарейный циклон. Здесь пары углеводородов отделяются от катализатора, собираются в верхней цилиндрической камере 3 и отводятся из реактора через штуцер 4. Отсепарированный пылевидный катализатор из бункеров циклонов по спускным трубам (стоякам) 7 возвращается в кипящий слой. Отработанный катализатор (частицы, «обросшие» слоем кокса) перемещается вниз между распределительной решеткой 8 и стенкой корпуса 2. Затем он поступает в нижнюю суженную цилиндрическую часть реактора, где из него выделяются углеводороды. После этого катализатор через нижний штуцер 1 реактора по трубе подается в распределительное устройство регенератора.

Корпус аппарата изготовлен из углеродистой стали (толщиной 18 мм), внутреннее устройство — из легированной стали. Внутренняя изоляция корпуса состоит из трех слоев: торкретбетона, шлаковаты и легковесного огнеупорного кирпича. Изоляция облицована изнутри листовой легированной сталью (толщиной 6 мм).

В аппаратах с кипящим слоем проводят и другие каталитические реакции — окисление этилена на серебряном катализаторе, получение алкилхлоридов на медном катализаторе, получение винилацетата. Вследствие истощения запасов углеводородного сырья перспективен синтез бензина из водорода и монооксида углерода



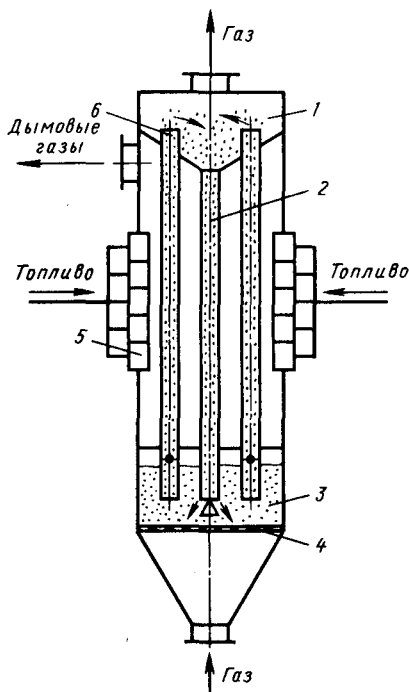


Рис. 4.48. Контактный трубчатый реактор с пневмотранспортной циркуляцией сыпучего материала

(синтез Фишера—Тропша), также успешно осуществляемый в аппарате с псевдоожиженным слоем. Существуют также подобные реакторы для окисления SO_2 в SO_3 .

§ 4.8. ПЕРСПЕКТИВНАЯ РЕАКЦИОННАЯ ТЕХНИКА

Трубчатые контактные аппараты широко применяют на заводах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Новый контактный трубчатый реактор с пневмотранспортной циркуляцией сыпучего материала можно рассматривать как перспективный.

Реактор (рис. 4.48) снабжен сепарационным 1 и дозирующим

3 бункерами. Одна или несколько пневмотранспортных труб 6 соединяют верхний бункер с нижним. На нижнем конце каждой трубы выполнены по четыре газоподающих отверстия. Для перетока сыпучего материала из верхнего бункера в псевдоожиженный слой (в бункере 3) аппарат снабжен трубой 2 с регулятором расхода. Газ подается в нижний бункер аппарата через газораспределительную решетку 4 и создает в нем псевдоожиженный слой сыпучего материала. Большая часть газа, пройдя слой, образует газовую подушку под крышкой нижнего бункера и устремляется в газоподающие отверстия пневмотранспортных труб. При поршневом режиме сыпучий материал достигает газоподающих отверстий и, подхваченный газом, направляется в сепарационный бункер. Газ удаляется из аппарата, а твердый материал возвращается сплошным потоком в нижний бункер по трубе 2. Расход сыпучего материала в циркуляционном контуре регулируют изменением диаметра газоподающих отверстий. Для обеспечения необходимой температуры в пневмотранспортных трубах в межтрубном пространстве установлены панельные газовые горелки 5. Аппарат применен для пиролиза этана. Выход этилена был в 1,8—2,0 раза выше, чем в трубчатом реакторе.

Теоретические и экспериментальные исследования плазмы определили возможности промышленного использования новой области технологии — плазмохимической технологии.

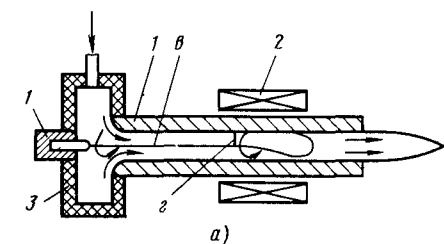
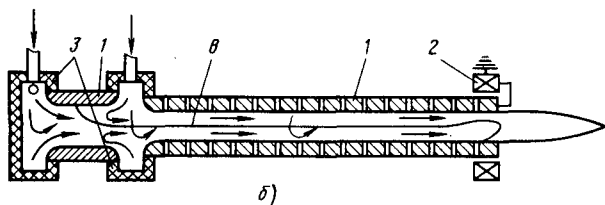


Рис. 4.49. Схемы электродуговых плазмотронов с самоустанавливающейся (а) и регулируемой (б) длиной дуги:

1 — электроды; 2 — катушки электромагнитов; 3 — разрядные камеры; δ — дуга; ε — канал шунтирующего пробоя



При температуре выше 9700°C атомы находятся в состоянии плазмы. Но в состоянии плазмы могут быть и вещества, температура атомов и молекул которых ниже 830°C , если их поместить, например, в сильные электрические или магнитные поля. Таким образом, для получения плазменного состояния необходимы специальные установки.

В научно-технической литературе используют термины: «высокотемпературная и низкотемпературная», «равновесная и неравновесная», «горячая и холодная» плазмы. К низкотемпературной (холодной) относят плазму с температурой ионных частиц 10^3 — 10^4°C , а к высокотемпературной — плазму с температурой частиц выше 10^5°C . Термин «горячая» плазма аналогичен термину «высокотемпературная» плазма.

Каковы же достижимые в настоящее время параметры плазмы? Генераторы плазмы позволяют получать плазму практически любых газов при давлении от нескольких паскалей до десятков мегапаскалей. Температуру газа можно менять от близких к абсолютному нулю до десятков тысяч градусов при числе заряженных частиц 10^7 — 10^{17} в 1 см^3 . Скорости плазменных струй можно изменять в широких пределах — от близких к нулю до нескольких километров в секунду.

Несмотря на необычные, экстремальные условия плазму уже в настоящее время широко применяют в научных исследованиях и технике. Благодаря возможности получения высоких скоростей газового потока возникает возможность реализации высокоскоростных высокотемпературных химических реакций.

В плазменном состоянии вещества получают в специальных устройствах — генераторах плазмы. Наиболее широко применяют электродуговые плазмотроны постоянного и переменного тока промышленной частоты. Такой генератор плазмы (рис. 4.49, а)

содержит электроды 1, разрядную камеру 3 и узел подачи газа. Газ проходит через дугу в, горящую между катодом и анодом, и истекает в виде плазменной струи через отверстие в анодосопле. Стабилизацию дугового столба в пространстве обеспечивают конструкцией стенок камеры 3 и сопла или подачей газа тангенциально к этим стенкам (вихревой подачей газа). Длина дуги зависит от скорости газа и шунтирования в сопле анода в плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги. В плазмотронах другого типа длину дуги фиксируют либо применением секционированного электрода и подключением к источнику питания только его определенной секции (рис. 4.49, б), либо использованием резко расширяющегося сопла. За ним образуется застойная вихревая зона, где и происходит шунтирование дуги.

В качестве плазмообразующего газа используют аргон, азот, кислород, воздух, водяной пар, аммиак, природный газ, моно- и диоксид углерода, галогены. Плазма дуговых плазмотронов практически всегда в той или иной мере загрязнена материалами эрозии электродов. Если это недопустимо, используют безэлектродные высокочастотные индукционные (ВЧ-И), емкостные (ВЧ-Е) и сверхвысокочастотные (СВЧ) плазмтроны.

По принципиальной схеме плазмохимический процесс не отличается от любого традиционного химико-технологического процесса. Однако часто некоторые стадии процесса плазмохимии совпадают в пространстве и во времени, так как либо вся реакционная смесь, либо один из ее компонентов находится в плазменном состоянии. Отсюда следует, что полная технологическая схема плазмохимического процесса содержит стадии генерации плазмы, плазмохимических превращений, закалки. Эти процессы проводят в плазмохимических агрегатах, включающих плазмтроны и реакторы.

Обычно в плазмохимический реактор потоки сырья и плазмы вводят раздельно. В связи с этим прежде всего необходимо смешать плазму с сырьем так, чтобы их молекулы непосредственно контактировали, т. е. осуществить контакт на молекулярном уровне, и затем реализовать сам процесс реакции. Таким образом, плазмохимический реактор для газофазных процессов состоит из двух элементов — смесителя и реактора.

В настоящее время для проведения газофазных плазмохимических процессов наиболее широко применяют реакторы струйного типа. В зависимости от способа перемешивания плазменного потока со струями сырья их подразделяют на прямоточные и со встречными струями. Используют также комбинированные реакторы, в которых часть сырья подается по схеме прямотока, остальная часть — по схеме встречных струй. Сырье в реакторы этого типа вводят спутно-вихревыми или встречно-вихревыми потоками.

В реакторах со спутно-вихревой и встречно-вихревой подачей (рис. 4.50) сырье подается тангенциально по отношению к плаз-

менной струе. Внутренняя часть реактора может быть конической формы, что улучшает процесс смешения. В таком реакторе легче удаляется конденсированная фаза и уменьшается ее осаждение на охлаждаемой внутренней поверхности его стенок. Реакторы со встречными струями чаще используют, когда сырье подается в плазменную струю в капельно-жидком состоянии или в виде твердых частиц в газовом потоке.

Гетерофазные плазмохимические процессы часто проводят в реакторах с псевдооживленной плазмой слоем, в которых резко увеличивается время контакта частиц с плазмой (рис. 4.51). Реактор состоит из конического корпуса 1, в верхней части которого находится устройство 3 для подачи твердой фазы. В нижней части реактора установлен электродуговой плазмотрон 4. Плазменная струя через сопло 6 вводится в нижнюю часть реактора. Газообразные продукты процесса подогревают подаваемый порошок и, пройдя через сепаратор 2, выводятся из реактора. Остальные продукты реакции стекают по стенкам реактора и сопла в бункер 5.

В очень важной высокотемпературной части реактора, в зоне ввода в него плазменной струи, температурное поле очень неоднородно — это недостаток реактора. На выходе из плазмохимического реактора прореагировавшая смесь содержит те или иные

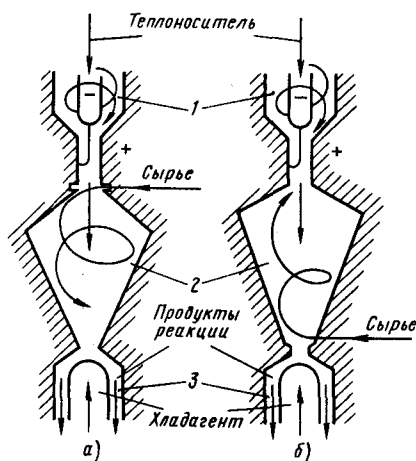


Рис. 4.50. Схемы плазмохимических реакторов спутно-вихревого (а) и встречно-вихревого (б) типа:

1 — плазмотрон; 2 — реакционная камера; 3 — закалочная камера

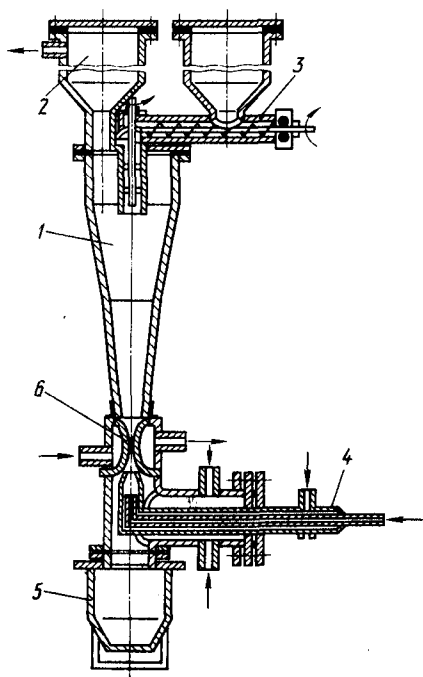


Рис. 4.51. Плазмохимический реактор для обработки дисперсных материалов в псевдооживленном слое

целевые продукты химического процесса. Для прекращения реакции применяют операцию закалки.

Наиболее распространенный способ закалки — охлаждение в теплообменниках. Этот способ применяют для охлаждения газов с температурой до 3700 °С. Широко используют также метод закалки продуктов плазмохимического процесса струями жидкости (воды или реагента) или газа. Например, закалка продуктов плазмохимического пиролиза углеводородов углеводородами повышает выход целевых продуктов, позволяет более гибко регулировать их состав и уменьшает удельные затраты электроэнергии.

Сфера применения плазмохимических процессов постоянно расширяется, и в настоящее время эти процессы применяют в химической, металлургической, электронной, электрохимической промышленности. Многие плазмохимические процессы используют в промышленности, другие проходят опытные и опытно-промышленные испытания.

Разработаны принципы технологии плазмохимических процессов пиролиза углеводородов, их окисления, селективного синтеза ценных продуктов. В области неорганической химии изучены плазмохимические процессы окисления, восстановления различных соединений, руд и минералов, их разложения, получения тугоплавких соединений (нитридов, карбидов, интерметаллидов), а также такие экзотические реакции, как образование соединений благородных газов.

В промышленности, главным образом в микроэлектронике, широко применяют пленки, полученные в плазме. Плазмохимические пленки могут быть кристаллическими или аморфными. Их толщина колеблется от долей до сотен микрон. При осаждении в плазме тонких полимерных пленок на пористых основах образуются мембраны, применяемые в мембранной технологии для разделения растворов солей, органических соединений и газовых смесей. Такие пленки получают двумя методами — полимеризацией углеводородов или деструкцией полимеров. Плазмохимической поверхностной обработке можно подвергать различные материалы — от металлов и их сплавов до полимеров. В результате обработки полимеров в неравновесной плазме изменяются смачиваемость, молекулярная масса и химический состав поверхностного слоя (толщиной до 10 мкм).

Таким образом, неравновесные плазмохимические процессы и их технологическое и аппаратное оформление представляют собой принципиально новый шаг в развитии химической технологии, и в первую очередь в области получения материалов с уникальными свойствами. Использование квазиравновесной плазмы и плазменных струй позволяет с высокими технико-экономическими показателями реализовать многие важнейшие химические процессы.

§ 5.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ И ИХ КАТЕГОРИЙНОСТЬ

На предприятиях химической промышленности технологические трубопроводы являются неотъемлемой частью технологического оборудования.

Технологические трубопроводы делятся на внутрицеховые и межцеховые. К внутрицеховым относятся трубопроводы, соединяющие отдельные аппараты, установки, машины, расположенные на территории цеха; к межцеховым — трубопроводы, соединяющие оборудование, которое находится в разных цехах.

В зависимости от расположения трубопроводы могут быть наземными и подземными. Более распространены наземные трубопроводы, поскольку легче их технический надзор.

Технологический трубопровод представляет собой конструкцию, состоящую из ряда элементов: труб, трубопроводных деталей (фитингов) и арматуры, соединенных разъемными и неразъемными соединениями. Вследствие большого разнообразия элементов трубопроводов и значительных объемов их выпуска промышленностью важное значение имеют вопросы унификации и стандартизации этих элементов. В связи с этим трубы, трубопроводные детали и трубопроводную арматуру изготовляют, поставляют и монтируют в соответствии с государственными и отраслевыми нормативно-техническими документами. Проектирование трубопроводов сводится, в сущности, к подбору соответствующих трубопроводных элементов по действующим стандартам и нормам. При этом важное значение имеют две характеристики трубопровода — условный проход и условное давление.

Номинальный диаметр отверстия в трубе или арматуре, служащего для прохода среды, называется условным проходом и обозначается D_y . Если два любых элемента трубопровода имеют одинаковые значения D_y , то они имеют одинаковые площади проходного сечения и одинаковые присоединительные размеры. Ряд условных диаметров определен ГОСТ 355—67. Для широкого применения в технологических трубопроводах рекомендуют трубы и арматуру с условными проходами (в мм): 3; 5; 10; 15; 20; 25; 32; 40; 50; 65; 80; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 500; 600; 800; 1000; 1200; 1400; 1600; 2000; 2400; 3000; 3400; 4000.

Под условным давлением p_y понимают максимальное избыточное давление среды с температурой 20 °С, при котором обеспечивается длительная и безопасная эксплуатация элементов трубопроводов. При рабочей температуре среды до 200 °С условное давление совпадает с рабочим давлением. При более высокой рабочей температуре значение условного давления должно быть больше рабочего. ГОСТ 356—68 устанавливает следующий ряд условных давлений (МПа): 0,1; 0,25; 0,4; 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4; 6,4; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 64; 80; 100.

Для объединения трубопроводов в группы по условиям работы выполнена их классификация с учетом трех основных параметров: рабочего давления, рабочей температуры, свойств и параметров перекачиваемой среды.

В зависимости от свойств транспортируемой среды все технологические трубопроводы делят на пять групп (А, Б, В, Г, Д), а в зависимости от ее параметров (давления и температуры) — на пять категорий (I, II, III, IV, V).

Группы А—Д включают трубопроводы: для токсичных жидких и газообразных продуктов; Б — для горючих и активных газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей; В — для водяного перегретого пара; Г — для водяного насыщенного пара, горячей воды и парового конденсата; Д — для негорючих газов, жидкостей и паров. В пределах каждой группы трубопроводы разделены на категории. Так, в группе Б для перекачивания легковоспламеняющихся жидкостей при температуре 350—700 °С требуется трубопровод категории I, а при температуре от —150 до +120 °С трубопровод категории IV. Для трубопроводов каждой категории установлены определенные нормы проектирования, монтажа, эксплуатации и ремонта.

§ 5.2. ТРУБЫ, СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ ДЕТАЛИ, КОМПЕНСАТОРЫ И ОПОРЫ ТРУБОПРОВОДОВ

В технологических трубопроводах широко применяют стальные сварные и бесшовные трубы: горячекатаные, холоднокатаные и холоднотянутые. Сварные трубы можно изготавливать с продольным или спиральным сварным швом; они менее надежны в работе, чем бесшовные. Последние применяют главным образом для транспортирования ядовитых, взрывоопасных и коррозионно-активных веществ, сварные — во всех остальных случаях.

Стальные трубы изготавливают из сталей различных марок, трубы массового назначения — из стали 10 и 20, а трубы специального назначения — из легированных, высоколегированных, кислотостойких и жаропрочных сталей.

Трубы изготавливают также из чугуна, меди, латуни, свинца, керамики, стекла, фарфора, пластмассы. В настоящее время трубы из цветных металлов и свинца почти полностью заменены

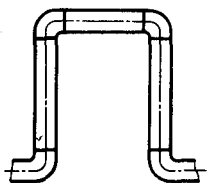


Рис. 5.1. П-образный компенсатор

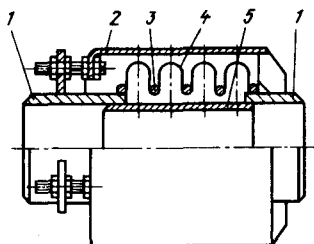


Рис. 5.2. Волнистый компенсатор

пластмассами. Из последних наиболее распространены трубы из винипласта, фаолита, полиэтилена. Эти трубы стойки к агрессивным средам, однако их можно применять только при невысокой температуре транспортируемой среды. Так, температурный предел винипластовых труб 40°C , полипропиленовых труб 100°C , а труб из фаолита 110°C .

Все более широко применяют в химической промышленности титановые трубы. Весьма перспективны стальные трубы с защитным покрытием внутренней поверхности полиэтиленом, винипластом, эмалью, стеклом и резиной. Наиболее хорошо освоены отечественной промышленностью трубы, внутренняя поверхность которых покрыта резиной (гуммированные трубы).

К соединительным деталям трубопроводов относятся: колена различных конструкций, служащие для изменения направления трубопроводов; переходы — для изменения площади проходного сечения трубопровода; тройники, крестовины и развилки для ответвления труб в разные стороны. Обычно элементы стальных трубопроводов (трубы, колена, переходники) соединяют сваркой. Если применение сварных соединений в трубопроводах нецелесообразно, например при необходимости частой разборки соединения, используют фланцевые соединения с приварными, накатными или резьбовыми фланцами. Наиболее часто применяют приварные фланцы. Резьбовые фланцы в химической промышленности устанавливают в основном на трубопроводах высокого давления.

Вследствие разности температур транспортируемых продуктов и окружающей среды трубопроводы подвержены температурным деформациям. Обычно трубопроводы имеют значительную длину, поэтому их общая температурная деформация может оказаться достаточно большой и вызвать разрыв или выпучивание трубопровода. В связи с этим необходимо обеспечить способность трубопровода компенсировать эти деформации.

Для компенсации температурных деформаций на технологических трубопроводах применяют П-образные, линзовые, волнистые и сальниковые компенсаторы.

П-образные компенсаторы (рис. 5.1) широко применяют для наземных технологических трубопроводов независимо от их диаметра. Такие компенсаторы обладают большой компенсирующей

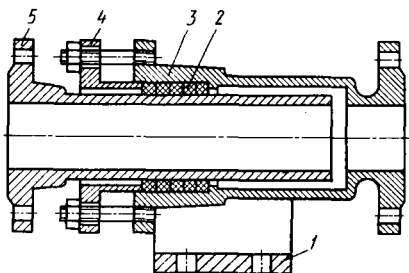


Рис. 5.3. Сальниковый компенсатор

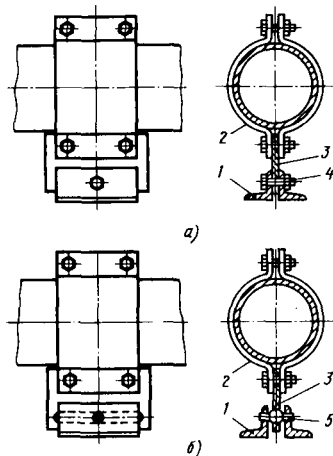


Рис. 5.4. Опоры для труб

способностью, их можно применять при любых давлениях, однако они громоздки и требуют установки специальных опор. Обычно их располагают горизонтально и снабжают дренажными устройствами.

Линзовые компенсаторы используют для газопроводов при рабочих давлениях до 1,6 МПа. По конструкции они аналогичны компенсаторам кожухотрубчатых теплообменников.

Волнистые компенсаторы (рис. 5.2) используют для трубопроводов с неагрессивными и среднеагрессивными средами при давлении до 6,4 МПа. Такой компенсатор состоит из гофрированного гибкого элемента 4, концы которого приварены к патрубкам 1. Ограничительные кольца 3 предотвращают выпучивание элемента и ограничивают изгиб его стенки. Снаружи гибкий элемент защищен кожухом 2, внутри имеет стакан 5 для уменьшения гидравлического сопротивления компенсатора.

На трубопроводах из чугуна и неметаллических материалов устанавливают сальниковые компенсаторы (рис. 5.3), которые состоят из корпуса 3, закрепленного на опоре 1, набивки 2 и грундбоксы 4. Компенсация температурных деформаций происходит за счет взаимного перемещения корпуса 3 и внутренней трубы 5. Сальниковые компенсаторы имеют высокую компенсирующую способность, однако из-за трудности обеспечения герметизации при транспортировании горючих, токсичных и сжиженных газов их не используют.

Трубопроводы укладывают на опоры, расстояние между которыми определяется диаметром и материалом труб. Для стальных труб с диаметром до 250 мм это расстояние составляет обычно 3—6 м. Для крепления трубопроводов применяют подвески, хомуты и скобы. Трубопроводы из хрупких материалов (стекла, графитовых композиций и др.) укладывают в сплошных лотках на сплошных основаниях.

Опоры могут быть неподвижными (рис. 5.4, а) и подвижными (рис. 5.4, б). Последние обеспечивают компенсацию температурных деформаций трубопровода. В неподвижных опорах уголки 1, хомут 2 и башмак 3 жестко связаны между собой, в подвижных опорах вместо нижнего болта 4 поставлен ролик 5, который может свободно перемещаться в отверстиях опорной пластины. Такие опоры необходимо периодически смазывать.

§ 5.3. ТРУБОПРОВОДНАЯ АРМАТУРА

Арматурой называют устройства, устанавливаемые на трубопроводах, аппаратах, емкостях и обеспечивающие управление потоком рабочих сред. По функциональному назначению трубопроводную арматуру подразделяют на следующие основные классы: запорная — для перекрытия потока среды (составляет около 80 % всей арматуры);

регулирующая — для изменения параметров среды (температуры, давления и т. д.);

предохранительная — для предотвращения аварийного повышения давления в системе;

защитная (отсечная) — для защиты оборудования от аварийных изменений параметров среды отключением обслуживающей линии;

фазоразделительная — для удаления конденсата из паров и газопроводов.

Арматура любого класса включает три основных элемента: корпус, привод и рабочий орган (запорный, регулирующий и др.), состоящий из седла и перемещающегося или поворачивающегося относительно него затвора (золотника).

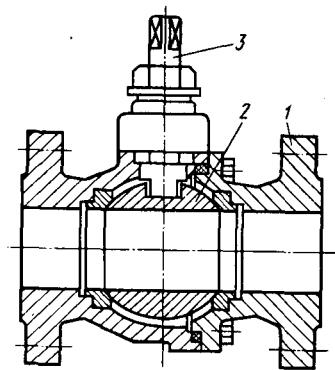
По способу присоединения корпуса к трубопроводу арматуру делят на фланцевую, муфтовую, под приварку и др. В химической промышленности наиболее распространена фланцевая арматура. Муфтовую арматуру используют на трубопроводах диаметром до 80 мм, предназначенных для транспортирования негорючих и нейтральных сред. Приварную арматуру устанавливают на трубопроводах при повышенных требованиях к плотности соединения.

По конструкции корпуса арматуру подразделяют на проходную, в которой среда не меняет направления своего движения на выходе по сравнению со входом, и угловую, в которой это направление меняется на угол до 90°.

В зависимости от способа герметизации рабочего органа в корпусе различают сальниковую, сальфонную и мембранную арматуру. В сальниковой арматуре герметичность сопряжения рабочего органа и корпуса обеспечивается сальниковым устройством, в сальфонной и мембранной — соответственно сальфоном и мембраной.

В зависимости от конструкции привода рабочего органа трубопроводную арматуру разделяют на автоматически действующую,

Рис. 5.5. Кран шаровой



в которой привод осуществляется самим потоком среды, и управляемую, с ручным или механическим (электрическим, пневматическим и др.) приводом.

Запорная арматура. Серийно выпускают запорную арматуру следующих типов: краны, вентили, задвижки и заслонки.

Кранами называется арматура с затвором в форме тела вращения,

который может поворачиваться вокруг оси, перпендикулярной направлению движения потока. По типу затвора краны могут быть шаровыми (рис. 5.5) и пробковыми (рис. 5.6). Шаровой кран состоит из корпуса 1, шаровой пробки 2 и шпинделя 3. Пробковые краны, в свою очередь, могут быть сальниковыми или натяжными в зависимости от способа их герметизации. В сальниковых кранах (рис. 5.6, а) необходимое для герметизации давление на конических поверхностях пробки 2 и корпуса 1 создается при затяжке сальника 3 (из промасленного льна, асбестового шнура и др.).

В натяжных кранах пробку 1 уплотняют в корпусе 2 гайкой 3 (рис. 5.6, б). Натяжные краны не могут обеспечить необходимой герметизации при давлении, превышающем сотые доли мегапаскаля, поэтому в условиях химических производств их используют редко.

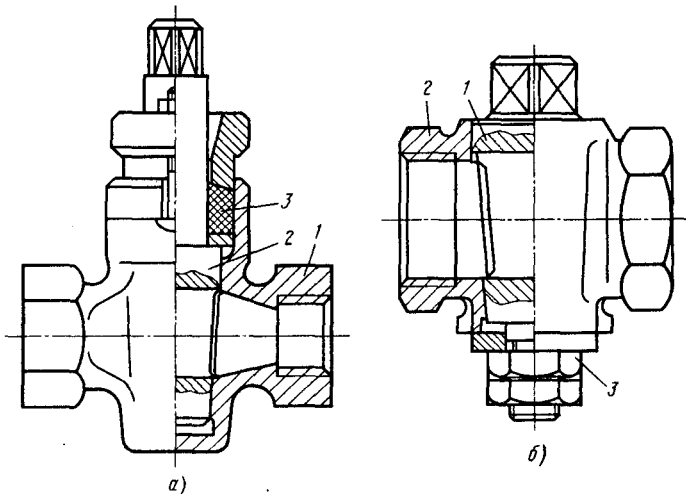


Рис. 5.6. Пробковые краны

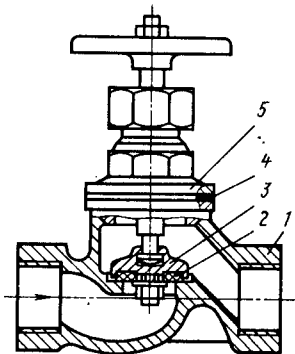
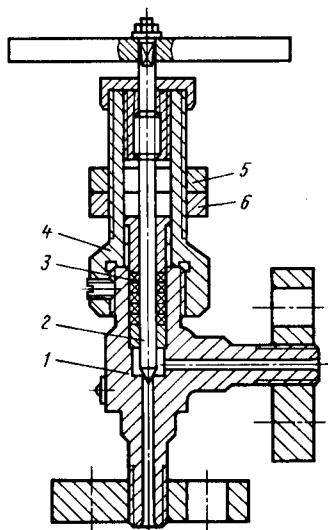


Рис. 5.7. Проходной вентиль

Рис. 5.8. Запорный угловой вентиль:

1 — корпус; 2 — игла; 3 — набивка сальника; 4 — стойка; 5 — контргайка; 6 — нажимная гайка



Краны имеют малые размеры и низкое гидравлическое сопротивление; на трубопроводе их можно устанавливать в любом положении, однако краны требуют ухода и периодического смазывания, в противном случае пробка может «прикипеть» к корпусу.

Описанные краны называют проходными (в них два присоединительных патрубка). Краны с тремя патрубками называют трехходовыми. В этом случае корпус крана имеет три присоединительных патрубка, а пробка — Т-образное отверстие. В зависимости от положения пробки поток рабочей среды направляется в тот или иной патрубок или одновременно в оба патрубка.

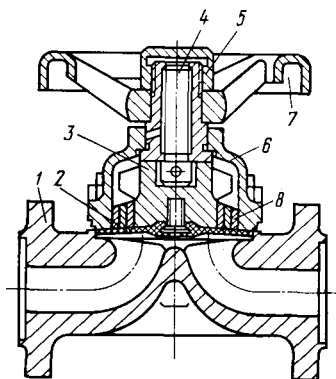
Кран быстро закрывается и вследствие этого в трубопроводе может возникнуть гидравлический удар. К недостаткам кранов следует отнести и то, что они мало пригодны на линиях для пара и нагретой жидкости из-за возможности коробления корпуса и прилипания к нему пробки. Краны изготовляют из чугуна, стали и латуни.

Вентили представляют собой запорную арматуру с затвором в виде плоской или конической тарелки (золотника), которая перемещается возвратно-поступательно вместе со шпинделем относительно седла. Золотник вентиля соединен со шпинделем шарнирно. Вентили выполняют с ручным управлением или с электроприводом.

Примером может служить проходной вентиль (рис. 5.7) с уплотнительным кольцом 2 из фторопласта, кожи или резины на золотнике 3. Корпус 1 и крышку 5 вентиля уплотняют паронитовой прокладкой 4, а в качестве набивки сальника используют пропитанный асбест.

Рис. 5.9. Мембранный вентиль:

1 — корпус; 2 — мембрана; 3 — золотник; 4 — шпindel; 5 — ходовая гайка; 6 — крышка; 7 — маховик; 8 — опорное кольцо



Запорные вентили обычно имеют сальниковые уплотнения шпинделя.

Запорный угловой вентиль высокого давления (рис. 5.8) применяют как запорный элемент системы измерений и пробоотборных систем в установках синтеза высокого давления. Для закрытия и открытия прохода в вентиле предназначены

конусный золотник из стали 20X13, перемещающийся относительно седла из стали 12X18H9T. Уплотнение шпинделя сальниковое. В качестве набивки использован прорезиненный асбест.

В отличие от кранов, которые можно устанавливать на трубопроводе в любом положении, вентили следует располагать так, чтобы среда в них попадала из-под золотника. При такой установке в положении «закрыто» сальник шпинделя не испытывает давления. Ремонт сальника в этом случае можно проводить, не опорожняя трубопровод. Кроме того, при такой установке вентили облегчается его открытие.

Мембранные вентили (рис. 5.9) предназначены для агрессивных сред. В них запорным органом служит мембрана 2, изготовленная из пластмассы, резины или фторопласта и соединенная со шпинделем 4. Внутренняя поверхность корпуса обычно имеет защитное покрытие, например из кислотостойкой эмали. В последнее время такие вентили широко применяют в трубопроводах химических производств.

Область применения вентиляей весьма обширна. Их устанавливают и на паро- и водопроводах, на линиях транспортирования, не загрязненных осадками жидкости; твердые частицы, попадая под седло вентиля, могут нарушить его герметичность.

Задвижка представляет собой запорную арматуру, в которой затвор в виде диска или клина перемещается вдоль уплотнительных поверхностей перпендикулярно оси потока. При малых давлениях обычно используют параллельные (рис. 5.10) задвижки, при больших — клиновые (рис. 5.11).

По характеру движения шпинделя различают задвижки с подвижным шпинделем, который при открывании задвижки перемещается поступательно, и с неподвижным шпинделем, который при работе совершает только вращательное движение. В последнем случае при вращении шпиндель вворачивается в тело клина.

В параллельных задвижках (см. рис. 5.10) запорным органом является шибер, состоящий из двух симметричных горелок 3, между которыми помещается клин 2; последний при опускании

тарелок распирает их, прижимая к уплотняющим поверхностям корпуса 1.

В клиновых задвижках с неподвижным шпинделем (см. рис. 5.11) при опускании или подъеме клина 2 он перемещается вдоль уплотнительных колец седла 1, закрывая или открывая задвижку. Шпиндель 6, при вращении которого обеспечивается поступательное движение клина, имеет нарезку, входящую в скрепленную с клином ходовую гайку 4. Уплотнение шпинделя сальниковое.

Для закрытия или открытия задвижек необходимо большое число оборотов шпинделя, поэтому задвижки большого диаметра снабжают, как правило, электроприводом. Параллельные задвижки, предназначенные для водопроводов, можно выполнять с пневмо- или гидроприводом.

Заслонками называется арматура, в которой затвор выполнен в виде диска, поворачивающегося на перпендикулярной потоку оси. Их используют обычно при большом диаметре трубопровода, малом давлении среды и не жестких требованиях к герметичности запорного органа. Заслонками управляют вручную или с помощью гидро-, пневмо- или электропривода.

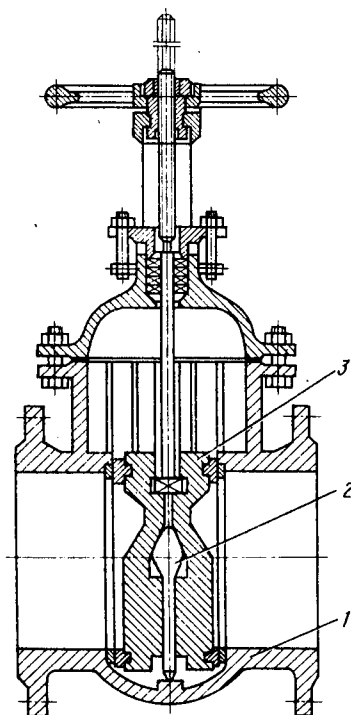


Рис. 5.10. Задвижка параллельная с выдвижным шпинделем

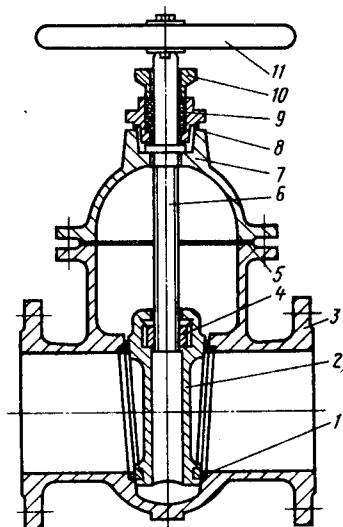


Рис. 5.11. Клиновая задвижка с неподвижным шпинделем:

1 — седло; 2 — клин; 3 — корпус; 4 — ходовая гайка; 5 — прокладка; 6 — шпиндель; 7 — крышка; 8 — прокладка; 9 — сальник; 10 — нажимная втулка; 11 — маховик

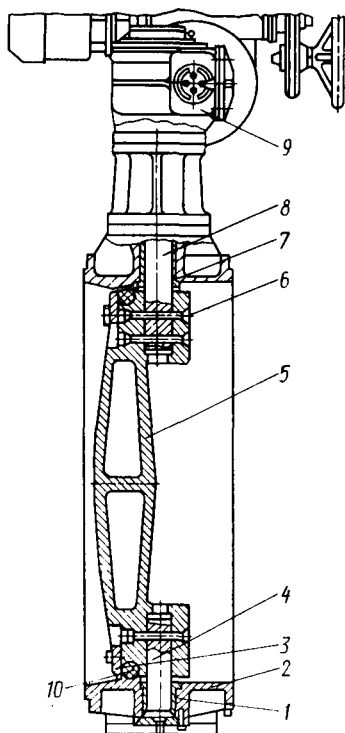


Рис. 5.12. Дисковая заслонка:

1, 7 — подшипники; 2 — корпус; 3 — кольцо прижимное; 4 — ось; 5 — диск; 6 — штифт; 8 — вал; 9 — электропривод; 10 — кольцо резиновое

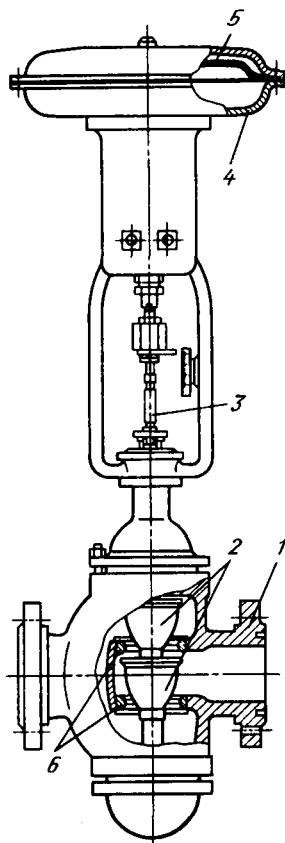


Рис. 5.13. Регулирующий клапан с мембранным исполнительным механизмом:

1 — корпус; 2 — затворы; 3 — шток; 4 — исполнительный механизм; 5 — мембрана; 6 — седла

На рис. 5.12 показана стальная дисковая заслонка для водопроводов (при температуре до 80°C), устанавливаемая как на горизонтальных, так и на вертикальных участках. В ней уплотнение рабочего органа (диска 5), поворачивающегося вокруг оси 4, обеспечивается резиновым кольцом 10, установленным в канавке диска и закрепленным прижимным кольцом 3. Подвижное соединение вала 8 с корпусом 2 уплотнено сальниковым устройством.

Регулирующая арматура — это, прежде всего, регулирующие клапаны и вентили, смесительные клапаны, редукционные клапаны и регуляторы уровня. В системах автоматического регулирования регулирующие клапаны управляют расходом среды в соответствии с поступающей командой. На рис. 5.13 показан регулирующий клапан с мембранным исполнительным механизмом.

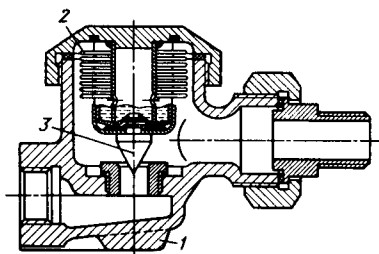
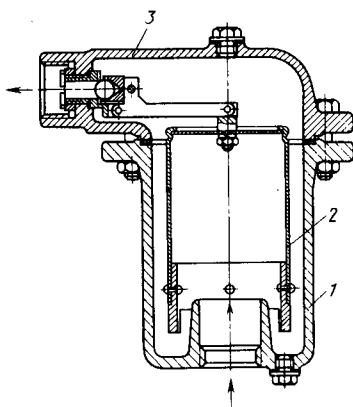


Рис. 5.14. Термостатический конденсатоотводчик

Рис. 5.15. Поплавковый конденсатоотводчик:

1 — корпус; 2 — поплавок; 3 — крышка



Управление клапаном дистанционное: командный сигнал поступает непосредственно на мембрану 5 исполнительного механизма 4, создавая усилие, которое перемещает шток 3 с затворами 2.

Смесительные клапаны используют в случаях, когда необходимо в определенных пропорциях смешивать различные среды, например холодную и горячую воду, выдерживая постоянным какой-либо параметр смеси или изменяя его по заданному закону.

Очевидно, что смесительная арматура является частным случаем регулирующей арматуры. Отличие смесительной арматуры от регулирующей состоит в том, что командный сигнал, задающий положение затвора в смесительном канале, определяет одновременно расходы сред. Как и регулирующие, смесительные клапаны имеют электрический или пневматический механизм.

Подробно устройство и работа регулирующей арматуры рассмотрены в курсе «Автоматика и автоматизация производственных процессов».

Фазоразделительная арматура состоит в основном из конденсатоотводчиков, используемых для вывода из трубопроводной системы конденсата. Конденсатоотводчики действуют автономно, выпуская конденсат периодически по мере его накопления в трубопроводе. Действие их основано на разности температур или плотностей конденсата и пара.

В настоящее время используют в основном термостатические и поплавковые конденсатоотводчики.

В корпусе 1 термостатического конденсатоотводчика (рис. 5.14) размещен сильфонный термостат 2, заполненный жидкостью и связанный с золотником 3 запорного органа. С понижением температуры в конденсатоотводчике при заполнении его конденсатом уменьшается давление в сильфоне, вследствие чего золотник поднимается и начинается выгрузка конденсата из системы. По окончании выгрузки конденсата, когда в конденсатоотводчик начинает

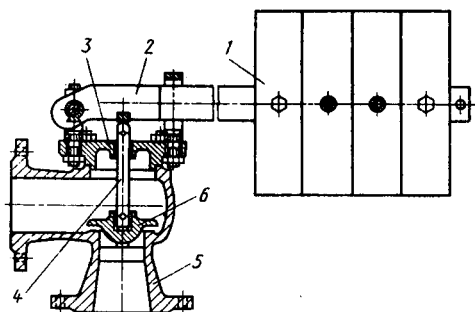


Рис. 5.16. Рычажно-грузовой клапан:

1 — груз; 2 — рычаг; 3 — крышка; 4 — шток;
5 — корпус; 6 — золотник

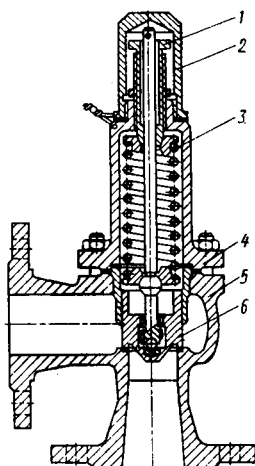


Рис. 5.17. Пружинный клапан:

1 — резьбовая втулка; 2 — колпак; 3 — пружина;
4 — крышка; 5 — корпус; 6 — золотник

поступать пар, температура в нем повышается и жидкость в сильфоне испаряется, в результате давление возрастает и золотник опускается, закрывая выход конденсату.

Для выпуска охлажденного конденсата используют также поплавковые конденсатоотводчики (рис. 5.15), в которых управляющим элементом является поплавок.

Предохранительная и защитная арматура. Предохранительная арматура исключает возможность возникновения недопустимо высокого давления в трубопроводных системах и на установках. Чаще всего используют предохранительные клапаны и разрывные мембраны.

Предохранительные клапаны бывают рычажно-грузовыми (рис. 5.16) и пружинными (рис. 5.17). Нижним штуцером их устанавливают на трубопроводе или аппарате; через боковой их штуцер отводится избыток среды. Давление на золотник клапана регулируют изменением числа грузов или силы сжатия пружины. Грузовые клапаны устанавливают лишь в одном положении, при котором золотник строго вертикален. Пружинные клапаны монтируют в любом положении. Грузовой клапан в отличие от пружинного не имеет сальника на штоке, поэтому его нельзя устанавливать внутри помещений, а также на трубопроводах для транспортирования огнеопасных сред.

Разрывные мембраны, устанавливаемые на трубопроводах, срабатывают при повышении рабочего давления на 20—25 %. Мембраны обеспечивают высокую герметичность, а также надежность срабатывания; их недостаток — одноразовое использование.

Назначение защитной (отсечной) арматуры состоит в предотвращении аварийной ситуации в системах отключением защищаемого участка. К защитной арматуре относятся прежде всего обратные клапаны (подъемные и поворотные). Назначение обратных

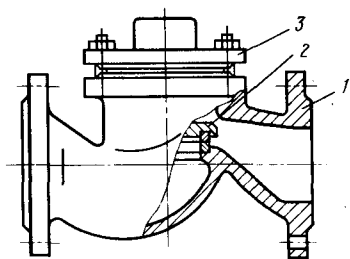


Рис. 5.18. Обратный подъемный клапан:
1 — корпус; 2 — золотник; 3 — крышка

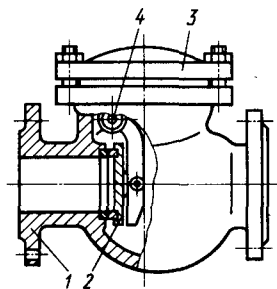


Рис. 5.19. Обратный поворотный клапан:
1 — корпус; 2 — диск; 3 — крышка; 4 — ось

клапанов — защита трубопроводных систем от обратного потока, что может в ряде случаев создать аварийную ситуацию. В показанном на рис. 5.18 обратном подъемном клапане для водопроводов золотник 2 находится в положении «открыто», поскольку сила от давления поступающей среды преодолевает вес золотника. С прекращением подачи среды при возникновении обратного потока золотник опускается на седло и клапан закрывается.

В обратных поворотных клапанах (рис. 5.19) проходное сечение закрывается диском 2, поворачивающимся вокруг горизонтальной оси 4. Такие клапаны менее чувствительны к загрязненности среды, но по герметичности уступают подъемным клапанам. Для уменьшения скорости закрывания и исключения возможности гидравлического удара поворотные клапаны большого диаметра снабжают демпферами, противовесами и др.

§ 5.4. ВЫБОР ТРУБОПРОВОДНОЙ АРМАТУРЫ

Основной тип запорной арматуры, рекомендуемой для трубопроводов диаметром от 50 мм и более, — задвижка; она имеет минимальное гидравлическое сопротивление, надежное уплотнение затвора и допускает изменение направления движения среды.

Вентили рекомендуется устанавливать на трубопроводах диаметром до 50 мм; при диаметре трубопровода более 50 мм вентили используют главным образом в случаях, когда по условиям технологического процесса требуется ручное дросселирование. Основное преимущество вентилей — отсутствие трения уплотнительных поверхностей, что значительно уменьшает опасность их повреждения посторонними частицами и позволяет использовать при более высоких давлениях. В связи с этим вентили устанавливают на трубопроводах высокого давления.

Краны используют, когда требуются запорные устройства, обладающие незначительным гидравлическим сопротивлением или способные управлять несколькими расходящимися потоками, в последнем случае используют трех-четырёхходовые краны.

Дисковые заслонки устанавливают на трубопроводах для жидких газообразных неагрессивных сред с температурой до 80 °С, при условном проходе до 2000 мм и давлении до 1,6 МПа.

Использование регулирующей аппаратуры регламентируется требованиями нормативных документов, а область применения обратных и предохранительных клапанов — правилами Госгортехнадзора.

При выборе материала для трубопроводной арматуры прежде всего следует учитывать свойства транспортируемой среды, ее коррозионную активность, воспламеняемость, токсичность.

В трубопроводах для горючих, токсичных, пожаро- и взрывоопасных сред, сжиженных газов применяют только стальную арматуру.

Арматуру из ковкого чугуна допускается использовать на газопроводах для горючих газов в диапазоне рабочих температур от —30 до +150 °С, при давлении до 1,6 МПа, а арматуру из серого чугуна — в диапазоне рабочих температур от —10 до +100 °С при давлении до 0,6 МПа.

В соответствии с нормативными требованиями, независимо от среды рабочего давления и температуры, не рекомендуется устанавливать чугунную арматуру на трубопроводах: для токсичных веществ группы А, а также для сжиженных углеводородных газов и легковоспламеняющихся жидкостей с температурой кипения ниже 45 °С; для газов при возможности вибрации трубопровода; для газов, содержащих пары воды, и других замерзающих жидкостей при температуре стенки трубы ниже 0 °С; для газов при возможности растяжения трубопровода; при их размещении на открытом воздухе при температуре воздуха ниже —30 °С.

На трубопроводах, работающих при температуре ниже —40 °С, следует устанавливать арматуру из легированных сталей и специальных сплавов.

На трубопроводах, предназначенных для транспортирования высокоагрессивных сред, используют арматуру в коррозионно-стойком исполнении.

На трубопроводах для сред с токсичными свойствами, горючих и активных газов, легковоспламеняющихся жидкостей следует устанавливать арматуру, удовлетворяющую требованиям повышенной герметичности к запорным и сальниковым устройствам.

В случаях, когда это допустимо, арматуре с сальниковым уплотнением штока в корпусе, как наиболее дешевой, отдают предпочтение перед арматурой с сальниковым уплотнением. Для трубопроводов с токсичной, огне- и взрывоопасной средой выбирают сальфонную арматуру.

Ручное управление арматурой используют лишь при ее редком срабатывании. При частом использовании арматуры, а также в условиях автоматизированного управления производственным процессом применяют арматуру с электро-, пневмо- и гидроприводами. Арматуру с электроприводом не используют при темпе-

ратуре окружающего воздуха ниже -40°C , на открытых площадках и в колодцах с повышенной влажностью.

На трубопроводах малого (до 80 мм) диаметра арматуру крепят на резьбе, так как резьбовые соединения требуют минимального числа присоединительных элементов, просты по конструкции и исполнению. Для ответственных случаев, когда требуется частый демонтаж системы, например с целью очистки, на трубопроводах малого диаметра используют фланцевые соединения. Наиболее надежный способ присоединения арматуры — сварка, поэтому в трубопроводах для горючих, токсичных, пожаро- и взрывоопасных сред сварку используют везде, где это допустимо.

Во фланцевых соединениях трубопроводов для сильно действующих ядовитых веществ и дымящих кислот независимо от давления и температуры конструкцию уплотнительных устройств выполняют по типу «шип — паз».

§ 5.5. ОСОБЕННОСТИ МОНТАЖА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Объем работ по монтажу технологических трубопроводов в общем объеме монтажных работ при сооружении промышленных объектов весьма значителен и достигает в химической промышленности 35—40 %, в нефтеперерабатывающей 55—60 %.

Монтажным работам на месте прокладки трубопроводов предшествуют подготовительные работы в цехах трубных заготовок, где выполняют разметку, резку и гибку труб, механическую обработку их торцов и вырезание в трубах отверстий, сборку и сварку элементов трубопроводов в сборочные единицы, испытания сборочных единиц трубопроводов, их маркировку и др.

Сваривают трубы на специальных сборочных стендах с использованием приспособлений (кондукторов и центраторов), обеспечивающих правильное сопряжение деталей и узлов трубопроводов. Для центрирования труб небольшого диаметра при сварке используют приспособление (рис. 5.20, а), позволяющее центрировать трубы различных диаметров. Для этой цели размер хомута 5 регулируют винтом 6. Центрирование труб выполняют с помощью опорных 2 и прижимных 3 призм.

При монтаже сборочных единиц трубопроводов часто необходимо соединять фланец с трубой; при этом нужно обеспечить перпендикулярность уплотнительной поверхности фланца к оси трубы. Одно из приспособлений, используемое для этой цели, показано на рис. 5.20, б. Перпендикулярность фланца к оси трубы проверяют одновременно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, измеряя щупом зазор между контрольной крестовиной 2 и фланцем 1.

Режут трубы на дисковых, ножовочных или токарных станках. Применяют также установку для газопламенной резки и маятниковую пилу с абразивными армированными кругами.

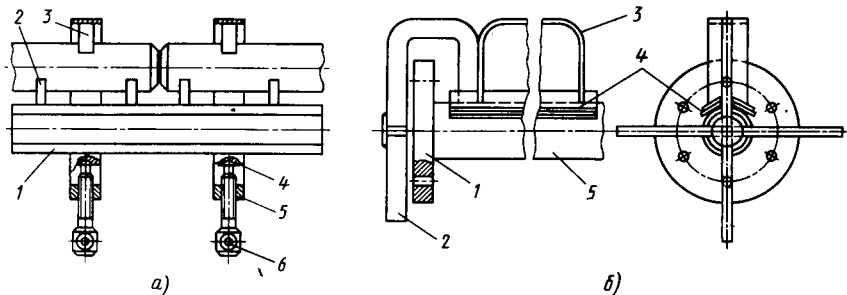


Рис. 5.20. Приспособления, применяемые при сборке деталей трубопроводов:
а — для центровки труб (1 — основание; 2 — опорная призма; 3 — прижимная призма; 4 — упор; 5 — хомут; 6 — винт); б — для центровки трубы и фланца (1 — фланец; 2 — контрольная крестовина; 3 — рукоятка; 4 — уголок; 5 — труба)

После выполнения резки концы труб и края отверстий обрабатывают на специальных станках или переносными пневмо- и электрошлифовальными машинами. Трубы диаметром до 200 мм гнут на трубогибочных станках в холодном состоянии, а трубы диаметром более 200 мм — в горячем состоянии. Для уменьшения деформации стенок в процессе гибки трубы заполняют сухим песком.

Перед сборкой трубы и детали трубопроводов очищают от загрязнений и обдувают сжатым воздухом. Детали, покрытые смазочными маслами, расконсервируют одним из способов: нагревают в камерах или в ваннах с минеральным маслом при температуре 100—120 °С, а затем протирают уайт-спиритом или бензином; промывают горячей водой или моющими растворами.

Прокладке трубопроводов предшествует разбивка их трасс; при этом с помощью стальной или капроновой струны и нивелира через каждые 50—200 м размечают прямолинейные горизонтальные участки с указанием вертикальных отметок оси трубопровода. Затем отмечают места расположения подвижных и неподвижных опор, подвесок, арматуры, ответвлений к аппаратам, температурных компенсаторов. После этого приступают к установке опорных конструкций, которые выверяют по уровню и отвесу.

При монтаже трубопроводов применяют трубоукладчики, краны, тали и другие грузоподъемные механизмы. При монтаже внутрицековых трубопроводов сварные стыки, которые должны быть доступны для осмотра, удаляют не менее чем на 50 мм от опор или подвесок; продольный шов сварных труб располагают так, чтобы его было удобно осматривать; фланцевые соединения располагают непосредственно у опор. Трубопроводы не должны пересекать оконные и дверные проемы. Над этими проемами нельзя устанавливать арматуру, фланцевые и резьбовые соеди-

нения. Трубы, проходящие через стены, необходимо устанавливать в патроны, выступающие за пределы стены на 50—100 мм в каждую сторону. Патроны надевают на трубу до начала монтажа и заделывают в стены.

Трубопроводы монтируют обычно сборочными единицами, представляющими собой участок трубопровода с арматурой, компенсаторами, теплоизоляцией.

В последние годы все шире применяют метод монтажа оборудования блоками (крупноблочная технология монтажа), когда несколько единиц оборудования вместе с обвязочными трубопроводами, арматурой, приборами контроля и управления поступают на монтажную площадку в готовом виде с заводов-изготовителей.

После окончания монтажных работ проводят гидравлические или пневматические испытания трубопроводов на плотность и прочность. Пневматические испытания проводят, если невозможно провести гидравлическое испытание, например, при температуре окружающего воздуха ниже 0 °С или при отсутствии воды на площадке. При испытательном давлении трубопровод выдерживают в течение 5 мин, затем давление снижают до рабочего и осматривают трубопровод, обстукивают сварные швы молотком. Обнаруженные дефекты отмечают на трубопроводе мелом или краской и устраняют после снижения давления до атмосферного. Результаты испытания на прочность и плотность считают удовлетворительными, если во время испытаний давление не уменьшается, а в сварных швах, фланцевых и прочих соединениях не обнаружены течи.

ОСНОВЫ МОНТАЖНЫХ И РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

§ 6.1. ОРГАНИЗАЦИЯ МОНТАЖНЫХ РАБОТ

Высокие темпы развития химической, нефтяной, микробиологической и других отраслей промышленности требуют ускорения ввода в действие производственных мощностей за счет сокращения сроков строительства промышленных объектов.

Выполнение планов капитального строительства в установленные сроки зависит от своевременного поступления оборудования, уровня его комплектности и степени заводской готовности поставляемого оборудования. Существенному ускорению строительства объектов способствует практика укрупненной поставки на строительные площадки оборудования в виде комплектных технологических линий, установок и агрегатов. Вместе с тем надежная работа машин и аппаратов зависит от качества их сборки и монтажа на строительных объектах.

Проектно-техническая документация. Для выполнения монтажных работ разрабатывают техническую документацию. Документация заводов — изготовителей оборудования, которую заказчик передает монтажной организации, включает: спецификации, комплектовочные ведомости, сборочные чертежи, схемы деления нетранспортабельного в сборе оборудования на транспортабельные части, маркировочные схемы и схемы строповки, технические условия, заводские инструкции по монтажу и технические паспорта, акты отдела технического контроля заводов-изготовителей на контрольную сборку и испытание оборудования.

В документацию на монтаж оборудования, составляемую монтажной организацией для контроля качества производимых работ и соответствия этого качества техническим условиям, входят: акты на скрытые работы (основания фундаментов, траншей, скрытые части сооружений и др.); монтажные и сварочные формуляры; акты испытания оборудования на прочность и плотность; акты испытания оборудования вхолостую и под нагрузкой; акт готовности объекта к производству монтажных работ; акт готовности фундаментов и опорных конструкций; акты на некомплектность поставки и на дефекты оборудования; акты о передаче оборудования в монтаж; комплект рабочих чертежей с внесенными в них изменениями.

Проект организации строительства (ПОС), разрабатываемый генеральной субподрядной проектной организацией, включает генеральный план строительно-монтажных работ (стройгенплан) с расположением постоянных и временных зданий и сооружений, подъездных путей, площадок для хранения и укрупненной сборки оборудования; ведомости объемов строительных, монтажных и специальных работ (с распределением по годам строительства); графики потребности в оборудовании, материалах, конструкциях; графики движения рабочих кадров, машин, механизмов; основные схемы монтажа оборудования и конструкций; пояснительную записку с обоснованием выбранных методов производства работ и определением потребности в машинах, механизмах, рабочих кадрах и жилье, материально-энергетических ресурсах (вода, электроэнергия, пар, газ, сжатый воздух, кислород).

Проект производства работ (ППР), разрабатываемый специализированным проектным институтом (Гипрохиммонтаж, Гипронефтеспецмонтаж и др.) или проектным подразделением монтажного треста, являющийся основным документом для выполнения монтажных работ, как правило, включает: копию задания на разработку ППР с перечнем исходной документации; ведомости документов, необходимого монтажного оборудования, материалов и оснастки, объемов монтажных работ (в стоимостном выражении и натуральных показателях); пояснительную записку с краткой характеристикой объекта и основных проектных решений, указаниями о порядке испытания смонтированного оборудования, контроле качества монтажных работ и технике безопасности; генеральный план монтажных работ с расположением зданий и сооружений монтируемого объекта, подъездных путей, площадок для хранения и укрупненной сборки, мест размещения временных сооружений монтажной организации, постоянных и временных трубопроводов сжатого воздуха, сварочных газов, электроэнергии, пара и воды на монтаж, укрупненную сборку и транспортирование оборудования, производство сварочных работ; рабочие чертежи монтажной оснастки и приспособлений; графики (линейные и сетевые) производства работ, подачи в монтаж оборудования, конструкций и материалов.

Поставка, приемка, хранение и сдача оборудования в монтаж. Оборудование, подлежащее монтажу, поставляют на склад или непосредственно в монтажную зону комплектно в соответствии с графиком поставки. Основным фактор, определяющий условия поставки оборудования, — его максимальная заводская готовность. В связи с этим габаритное оборудование следует поставлять в полностью собранном виде и испытанным (на прочность и плотность), а негабаритное — максимально укрупненными блоками. При этом каждый блок должен быть полностью собран и подвергнут гидравлическому или пневматическому испытанию. Перед отгрузкой таких блоков завод-изготовитель выполняет контроль-

ную сборку стыкуемых частей и наносит монтажную маркировку несмываемой краской и контрольные риски.

В комплект поставки входят эксплуатационные документы: техническое описание; инструкции по эксплуатации, техническому обслуживанию, монтажу, пуску, регулированию и обкатке оборудования на месте монтажа; формуляр или паспорт; ведомость запасных частей, инструментов, принадлежностей и материалов (ЗИП); ведомость эксплуатационных документов.

Поступающее оборудование подвергают наружному осмотру с частичным вскрытием упаковки. При этом проверяют техническую документацию, комплектность и исправность оборудования, сохранность защитных покрытий, наличие заводских пломб, пробок и заглушек в отверстиях, качество отдельных узлов и деталей оборудования, доступных осмотру без разборки. При обнаружении недостатков в оборудовании или некомплектной поставки заказчик составляет акт для предъявления рекламации.

По способу хранения оборудование делят на четыре группы.

К первой группе относится оборудование, нечувствительное к атмосферным осадкам и температурным колебаниям. Его можно хранить на открытых площадках. К этой группе относятся металлоконструкции, элементы трубопроводов и другие необработанные детали. Вторая группа включает оборудование, требующее защиты от прямого попадания атмосферных осадков, но нечувствительное к температурным колебаниям. Его хранят на полуоткрытых складах (под общим или индивидуальными навесами). Это базовые детали, узлы с подшипниками скольжения, машины и механизмы, не имеющие встроенного электрооборудования. К третьей группе принадлежит оборудование, требующее защиты от атмосферных осадков и влажности, малочувствительное к температурным колебаниям (канаты, пневмо- и гидроцилиндры, детали с обработанными поверхностями трения и другие мелкие детали). Такое оборудование хранят на закрытых неутепленных складах. К четвертой группе относится оборудование, чувствительное к осадкам и температурным колебаниям (подшипники качения и скольжения, тормозные системы, машины и механизмы со встроенным электрооборудованием, приборы). Его следует хранить на закрытых утепленных складах.

Оборудование передают в монтаж по заявкам монтажной организации в установленные сроки и в соответствии с графиком выполнения строительно-монтажных работ. Вместе с оборудованием заказчик передает монтажному управлению техническую документацию, входящую в комплект поставки оборудования.

При передаче оборудования в монтаж его подвергают внешнему осмотру без разборки на узлы и детали. При этом проверяют: соответствие оборудования проекту и выполнение заводом-изготовителем контрольной сборки, обкатки и испытаний; комплектность оборудования по заводским спецификациям; отсутствие повреждений и дефектов оборудования и сохранность защитных

покрытий, пломб; наличие и полноту технической документации заводов-изготовителей, необходимой для ведения монтажных работ. При обнаружении крупных дефектов или некомплектности оборудования оформляют соответствующий акт в присутствии представителей завода-изготовителя.

Приемку оборудования в монтаж оформляют актом, после подписания которого ответственность за сохранность оборудования до сдачи его в эксплуатацию возлагается на монтажную организацию.

Приемка зданий, сооружений и фундаментов под монтаж оборудования. Готовность зданий, сооружений и фундаментов к производству монтажных работ является важным фактором, обеспечивающим нормальные условия монтажных работ, и оформляется актом, который подписывают представители заказчика, строительной и монтажной организаций.

Монтаж оборудования на объектах, в зданиях и сооружениях выполняют только после завершения всех подготовительных и строительных работ. Здание или сооружение считается подготовленным к монтажу, если выполнены основные строительные работы: смонтирован каркас здания и возведены стены; сооружены междуетажные перекрытия, кровля и фундаменты, подкрановые пути, постоянные лестницы и ограждения; остеклены оконные проемы и навешены двери в помещениях (при проведении работ в зимних условиях). В помещениях, где монтируют сложные механизмы (компрессорные установки, центрифуги и др.), для исключения попадания пыли в агрегаты необходимо забетонировать полы, оштукатурить и окрасить стены и потолки, остеклить окна независимо от времени года, навесить двери и врезать в них замки. Если монтаж оборудования допускается только при температуре выше нуля, то объекты необходимо отапливать.

Приемка готовых фундаментов состоит в проверке соответствия проектным значениям их фактических размеров, высотных отметок и расположения закладных деталей и колодцев под анкерные болты.

Допускаемые отклонения (мм) фактических размеров от проектных: для привязочных размеров продольных и поперечных осей фундаментов и колодцев анкерных болтов ± 20 ; для основных размеров в плане ± 30 ; для высотных отметок поверхности фундамента -30 ; для размеров уступов в плане -20 ; для размеров колодцев под анкерные болты в плане $+20$; для осей анкерных болтов в плане ± 5 ; для глубины колодцев под анкерные болты $+50$; для отметки верхних торцов анкерных болтов $+20$.

На принятый фундамент составляют акт и исполнительную схему, в которой указывают: проектные и фактические размеры фундамента, главных осей и высотных отметок; расположение геодезических знаков (металлических плашек и реперов) в фундаменте; данные о качестве фундамента. При сдаче фундаментов под машины, в которых при работе возникают динамические

нагрузки, к акту готовности должен быть приложен акт, фиксирующий соответствие качества выполненной виброизоляции проекту.

Транспортирование тяжеловесного оборудования, доизготовление оборудования на месте монтажа. Основные виды транспорта, используемого при перевозке крупногабаритного и тяжеловесного оборудования: железнодорожный, автодорожный (или безрельсовый) и водный. Вид транспорта выбирают в соответствии с наличием путей от начального до конечного пункта транспортирования, а также с учетом его экономичности.

Железнодорожные перевозки, особенно на значительные расстояния, наиболее экономичны по сравнению с водными и автодорожными, так как уменьшается число погрузок и вспомогательных работ. Для транспортирования аппаратов используют открытые железнодорожные платформы, транспортеры сцепного типа, в частности предназначенные для транспортирования длинных аппаратов диаметром до 4 м. Железнодорожные транспортеры применяют, когда масса груза больше грузоподъемности четырех- или шестиосных платформ, а также когда груз не вписывается в очертания габарита погрузки.

Для автодорожных перевозок тяжеловесного оборудования используют грузовые автомобили, тракторы, автомобильные седельные тягачи обычной и повышенной проходимости, автомобильные прицепы и полуприцепы общего назначения, а также полуприцепы и прицепы-тяжеловесы грузоподъемностью 20—300 т.

Перевозить аппараты автомобильными транспортными средствами общего назначения сложно, поскольку трудно обеспечить синхронность управления двумя прицепами в автопоезде, необходимую устойчивость и безопасность движения. В связи с этим используют специальные автотранспортные устройства и подкатные тележки грузоподъемностью 150; 250 и 600 т. Они состоят из двух прицепов (тележек) и оборудованы средствами для погрузки и разгрузки аппаратов.

Водным транспортом перевозят оборудование, превышающее по габаритам и массе возможности железнодорожного транспорта, при удобном водном сообщении между изготовителем и заказчиком. Разрешается перевоз на плаву аппаратов диаметром до 10 м и длиной до 100 м, на баржах — диаметром до 8 м и длиной до 50 м. При этом масса аппаратов не ограничена. Основные трудности транспортирования по водным путям заключаются в выполнении погрузочно-разгрузочных операций.

Для перевозки оборудования водным транспортом используют суда и баржи общего назначения, а также специальные самоходные суда и баржи-площадки грузоподъемностью 300—1760 т.

Значительное число тяжеловесных аппаратов доизготавливают на монтажной площадке. Это оборудование, поставляемое в виде укрупненных блоков, сборочных единиц, обечаек и др., которое

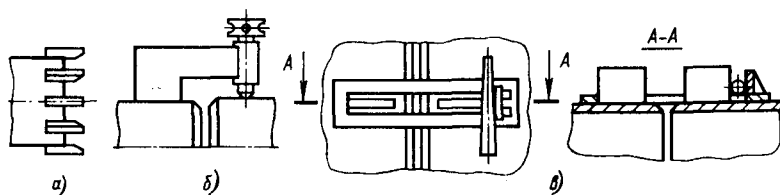


Рис. 6.1. Приспособления для сборки обечаек

не было полностью изготовлено, собрано и испытано на заводе-изготовителе, а также оборудование, требующее подгонки на месте монтажа. Все сборочные, сварочные и другие работы по доизготовлению, а также испытания собранного оборудования производят на месте монтажа, на специальных площадках укрупненной сборки. В зависимости от объема работ и видов собираемого оборудования эти площадки оборудуют козловыми, башенными и стреловыми самоходными кранами и оснащают специальными и универсальными сборочными стендами, а также оборудованием для автоматической или полуавтоматической сварки.

Для стыковки листовых конструкций и обечаек перед сваркой применяют различные сборочные приспособления: струбцины, прижимы, скобы, стяжки, распорки. Для точного центрирования собираемых обечаек по периметру одной из стыкуемых цилиндрических частей приваривают направляющие планки (рис. 6.1, а). Число планок зависит от диаметра аппарата, но должно быть не менее 8 при диаметре стыкуемых элементов до 2 м и не менее 12 при диаметре более 2 м.

Приварная винтовая струбцина (рис. 6.1, б) позволяет совмещать свариваемые кромки. Смещение кромок в кольцевых швах при толщине листов до 20 мм не должно превышать 10 % номинальной толщины более тонкого листа плюс 1 мм, а при толщине листов более 20 мм — 15 % номинальной толщины более тонкого листа, но не более 5 мм. Стяжное приспособление (рис. 6.1, в) предназначено для регулирования зазоров между свариваемыми обечайками.

§ 6.2. МОНТАЖНЫЕ РАБОТЫ

Монтаж оборудования включает следующие основные операции: подготовка и установка механизмов и приспособлений для подъема и установки аппарата на фундамент; распаковка оборудования, проверка комплектности и приемка в монтаж; подготовка оборудования к монтажу (очистка от консервационных смазочных материалов, сборка оборудования, гидравлические испытания, нанесение тепловой изоляции и др.); проверка фундаментов и установка фундаментных болтов; перемещение оборудования в пределах места установки; подъем и установка оборудо-

вания в проектное положение; выверка и закрепление оборудования на фундаменте; монтаж внутренних устройств оборудования; демонтаж грузоподъемных механизмов и приспособлений; испытания на прочность и плотность, вхолостую и под нагрузкой; подготовка к сдаче оборудования в эксплуатацию с оформлением необходимой технической документации. Работы по монтажу оборудования и конструкций производят способами и средствами, предусмотренными в технических картах ППР.

Расконсервация оборудования, освидетельствование и устранение дефектов. В процессе подготовки к монтажу оборудование очищают от консервационных смазочных материалов и защитных покрытий, которые наносят на заводах-изготовителях для исключения коррозии при транспортировании и хранения.

Расконсервацию выполняют следующими способами: протиранием растворителями (соляровое масло, керосин или бензин); обдувкой паром или сухим горячим воздухом с применением передвижных или стационарных установок; погружением оборудования в ванну с индустриальным маслом, нагретым до температуры 90—100 °С с последующей промывкой бензином; механическим (скребками, металлическими щетками, ветошью и др.), не нанося царапин и рисок.

Лакокрасочные покрытия удаляют бензином, уайт-спиритом, ацетоном или другими растворителями. Покрытия, трудно удаляемые растворителями, можно снимать медными или алюминиевыми скребками.

Монтируемое оборудование подвергают освидетельствованию (наружному и внутреннему осмотру), целью которого является обнаружение дефектов и повреждений, возникших при транспортировании. Наружный осмотр выполняют после разборки, расконсервации и чистки деталей и узлов аппарата. Осмотру подвергают корпус, фланцы, крышки, крепежные изделия и другие детали. Внутренний осмотр аппаратов, находящихся под контролем Госгортехнадзора, проводят совместно с представителем Госгортехнадзора. По результатам внутреннего осмотра составляют акт.

При осмотре, который выполняют либо невооруженным глазом, либо при необходимости с применением лупы и приборов магнитного или ультразвукового контроля, выявляют внешние дефекты: трещины, глубокие риски, следы грубой механической обработки. При контроле ультразвуковым методом обнаруживают внутренние объемные дефекты, а магнитным методом — поверхностные дефекты.

Различным дефектам придают правильную овальную форму, по возможности близкую к сферической. При этом минимальная ширина выведения дефекта должна быть в 3 раза больше его глубины. Для исключения резких переходов края скругляют радиусом 5—10 мм. Надежность ликвидации поверхностных дефектов контролируют магнитным или ультразвуковым дефектоскопом.

Корпус аппарата допускается к монтажу после устранения всех дефектов и проведения тензометрического контроля, подтверждающего, что напряжения в местах устранения дефектов не превышают допускаемых значений.

Сборка и установка оборудования. Современная монтажная технология обуславливает поставку и монтаж полностью собранного оборудования, не требующего сборки или разборки в процессе монтажа.

Если оборудование изготовлено и полностью собрано на заводе-изготовителе, но из-за транспортной негабаритности не может быть поставлено в собранном виде, то его разбирают на укрупненные транспортные (поставочные) блоки, не требующие разборки и подгоночных работ при монтаже.

Перед установкой в проектное положение оборудование собирают из поставочных блоков, выполняют обвязку на уровне земли трубопроводами, обслуживающими площадками и другими технологическими конструкциями.

Машины и оборудование после сборки и монтажа тщательно проверяют по нормам точности с использованием различных монтажных инструментов (осевых струн, поверочных линеек, рамных, брусковых, строительных и гидростатических уровней, микрометрических нутромеров — штихмассов, отвесов) оптического и лазерным методами, которые позволяют определять относительное положение контролируемых точек в горизонтальной плоскости и по вертикали.

В процессе сборки и монтажа, а также при установке машин и оборудования на фундамент проверяют отклонения от: прямолинейности, параллельности и перпендикулярности осей и плоскостей; соосности деталей, узлов и машин; вертикальности и горизонтальности. Кроме этого, оборудование выверяют в плане (привязка к осям здания или строительных конструкций) и по высоте. Указанные отклонения не должны превышать допускаемых значений, указанных в чертежах или технических условиях на монтаж оборудования.

Отклонения от прямолинейности проверяют: поверочной линейкой и щупом (для проверки прямолинейности поверхностей типа опор применяют длинную линейку, на которую устанавливают уровень); натянутой струной диаметром 0,3—0,5 мм и штихмассом (для поверхностей длиной до 10 м); гидростатическим уровнем (для поверхностей длиной свыше 20 м).

Отклонение от параллельности в большинстве случаев контролируют непосредственным измерением расстояний между точками, расположенными на контролируемых поверхностях, различными инструментами (штангенциркулем, штихмассом, глубиномером, штангенрейсмусом и др.) и комбинированными способами с применением универсальных измерительных приборов (индикаторов, уровней и др.).

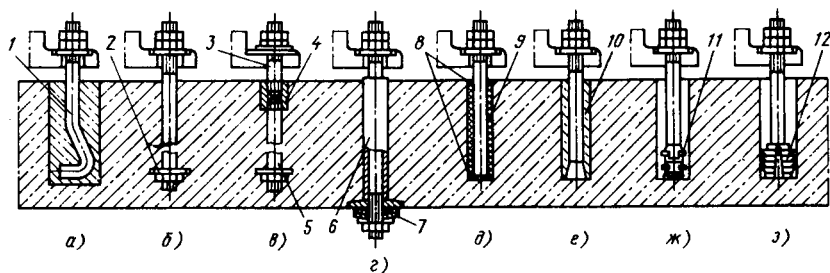


Рис. 6.2. Фундаментные болты:

1 — болт; 2 — анкерная плита; 3 — верхняя шпилька; 4 — муфта; 5 — нижняя шпилька; 6 — изолирующая труба; 7 — тарельчатая пружина; 8 — центрирующее кольцо; 9 — эпоксидный клей; 10 — цементный раствор; 11 — распорная цанга; 12 — распорная втулка

Отклонение от перпендикулярности плоскостей проверяют чаще всего угольниками. Применяют также индикаторы на штативе, штангенрейсмусы, штихмассы.

Отклонение от соосности валов машин контролируют с помощью струны и штихмассов, методом светового луча или по полумуфтам. В последнем случае отклонение от соосности проверяют в два приема: выполняют предварительную проверку (линейкой и щупом) и окончательную проверку специальными скобами, щупом или индикатором, производимую после затяжки фундаментных болтов.

Отклонение оборудования от горизонтальности проверяют уровнем (или гидростатическим уровнем) или нивелиром по базовым поверхностям или контрольным площадкам на собранном оборудовании. Отклонение оборудования от вертикальности контролируют уровнем, отвесом или теодолитом. В последнее время при выверке оборудования все шире применяют способы технических измерений с применением оптических квантовых генераторов-лазеров. Отечественная промышленность выпускает следующие лазерные приборы: визир ЛВ-5М, нивелир ЛН-56, зенит-центр ЛЭЦ-1 и светодальномер ЛСД-1М.

В большинстве случаев оборудование крепят к фундаменту фундаментными болтами (рис. 6.2). По конструктивным признакам их делят на болты: с отгибом (рис. 6.2, а), с анкерной плитой (рис. 6.2, б), составные с анкерной плитой (рис. 6.2, в), с изолирующей металлической трубой (рис. 6.2, г), прямые на эпоксидном клее (рис. 6.2, д), конические на цементном растворе (рис. 6.2, е), конические с распорной цангой (рис. 6.2, ж), конические с распорной втулкой (рис. 6.2, з).

Фундаментные болты устанавливают непосредственно в массив фундамента, в колодцы, в массив фундамента с изолирующей трубой, в просверленные скважины или отверстия. В последних двух случаях болты могут быть съемными.

Рис. 6.3. Монтажная мачта:

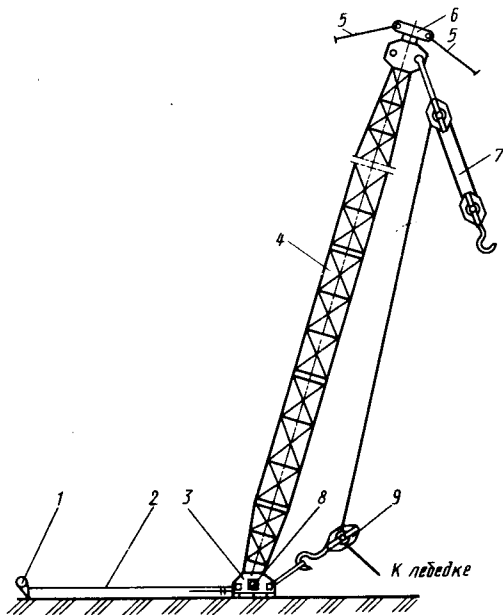
1 — якорь; 2 — страхующий трос;
3 — опора; 4 — решетчатая рама;
5 — ванты; 6 — оголовок; 7 — полиспаст;
8 — сферический шарнир;
9 — отводной блок

Основное грузоподъемное оборудование, механизмы и приспособления. Выбор основных монтажных механизмов определяется методом монтажа оборудования и зависит от массы и габаритов оборудования, числа аппаратов, высотной отметки установки оборудования, конструкции оборудования, степени заводской готовности, сроков монтажа и других факторов.

Стреловые самоходные краны наиболее распространены при монтажных работах; их применяют для подъема и перемещения грузов и установки оборудования в проектное положение. В зависимости от вида ходового устройства различают краны: на шасси грузовых автомобилей, на специальном шасси автомобильного типа, пневмоколесные, гусеничные. При монтажных работах применяют также краны-трубоукладчики, краны на базе экскаваторов, тракторные краны. При монтаже крупных промышленных объектов, а также при монтаже большого количества оборудования и металлоконструкций применяют башенные, мачтовые, козловые, мостовые краны и другие специальные грузоподъемные крановые устройства. Монтажные работы в труднодоступных местах, в условиях действующего производства и в ряде других случаев (дымовые трубы, башенные конструкции и др.) выполняют с использованием вертолетов. Авиационной промышленностью освоен выпуск вертолетов Ми-8, Ми-6, Ми-10К грузоподъемностью 2,5—11 т и вертолета В-12 грузоподъемностью до 40 т с двумя несущими винтами.

Мачтовые подъемники (мачты, порталы, шевры) — простейшие грузоподъемные механизмы, применяемые для подъема и установки крупногабаритных аппаратов на значительную высоту при недостаточных грузовысотных характеристиках стреловых кранов или при небольших размерах монтажной площадки.

Монтажная мачта (рис. 6.3) представляет собой металлическую конструкцию, вершина (оголовок) которой для удержания мачты в рабочем положении и изменения угла ее наклона укреплена тремя или чаще четырьмя гибкими вантами.



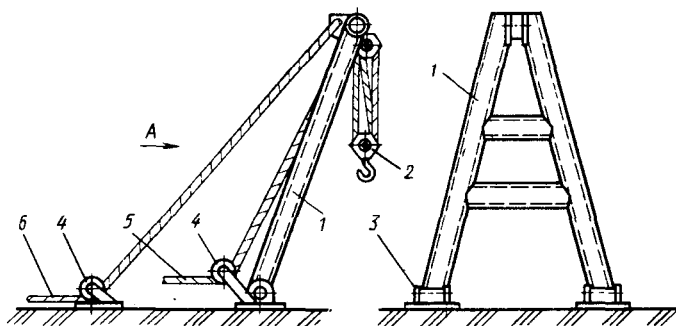


Рис. 6.4. Монтажный шевр:

1 — рама; 2 — полиспаст; 3 — шарнирная опора; 4 — отводной блок; 5 — сбегающая ветвь полиспаста; 6 — канат

Мачты высотой до 30—35 м изготовляют из труб (трубчатые мачты), большей высоты — из прокатного профиля (решетчатые мачты). Грузоподъемность трубчатых мачт до 70 т, решетчатых до 400—500 т. Решетчатые мачты сложнее в изготовлении, однако при одинаковых высоте и грузоподъемности они легче трубчатых.

Если условия монтажной площадки не позволяют разместить боковые ваны мачты, а также в случаях, обусловленных методами производства работ, применяют шевры. Монтажный шевр (рис. 6.4; на виде А оснастка условно не показана) представляет собой А-образную раму, нижние концы которой закреплены шарнирно в опорах, а верхние — жестко соединены и удерживаются канатом или полиспастом. Шевр оснащен двумя полиспастами: один полиспаст 2 (грузовой) предназначен для подъема груза, другой — (на рисунке не показан) — для изменения угла наклона шевра с помощью каната 6. При высоте шевра более 10 м для удобства транспортирования его выполняют разборным, причем соединение секций фланцевое. Грузоподъемность шевров 50—250 т.

Для монтажа крупногабаритных тяжелых аппаратов, а также для сборки уникальных сооружений с большим числом подъемов целесообразно использовать порталные подъемники, или порталы (рис. 6.5). Портал представляет собой однопролетную П-образную конструкцию и состоит из двух опорных стоек 1, которые в верхней части соединены ригелем 3. Ригель и стойки портала представляют собой сварную пространственную конструкцию, собираемую из отдельных секций. В местах соединения со стойками ригель усилен листами, к которым на специальных осях подвешены полиспасты 2. Сбегающие ветви полиспастов через отводные блоки 4, прикрепленные к вершинам и опорам стоек, присоединены к барабанам лебедок. В рабочем положении портал удерживается шестью ваннами 5. Портал может работать

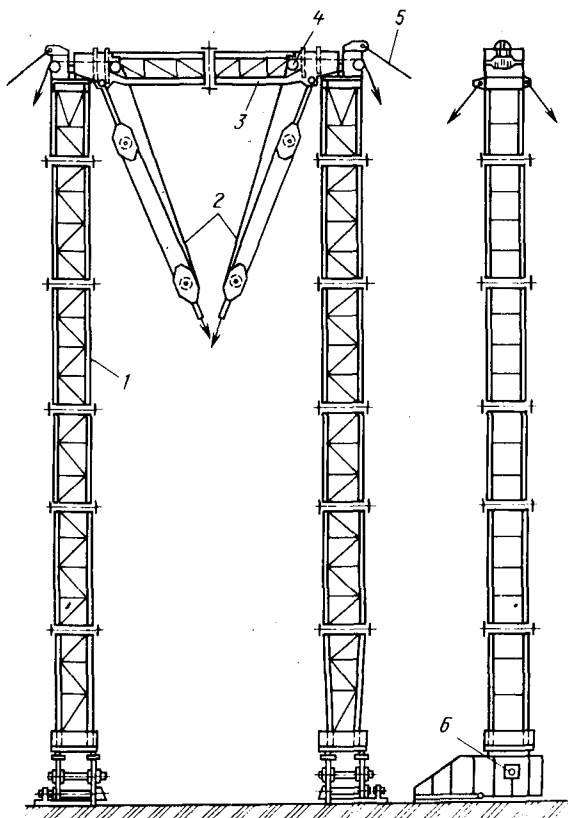


Рис. 6.5. Портал

и в наклонном положении, для чего на ванты ставят полиспасты. Стойки портала соединены с опорными башмаками 6 горизонтальными осями, обеспечивающими поворот портала при его монтаже, а также при изменении вылета портала в процессе работы. Порталы позволяют перемещать груз вертикально и горизонтально в плоскости подъема; их грузоподъемность 100—500 т, высота поднимаемых аппаратов до 100 м.

При монтаже аппаратов применяют лебедки с электроприводом. Они снабжены сварными рамами, на которых установлен барабан, редуктор, электродвигатель, тормозное и пусковое устройства. Грузоподъемность электролебедок 0,5—12,5 т, канатоемкость 70—800 м.

Для подъема грузов массой до 5 т на небольшую высоту (до 12—18 м), перемещения грузов в горизонтальном направлении и натяжения вант при монтажных работах часто применяют тали — грузоподъемные механизмы, включающие цепной или

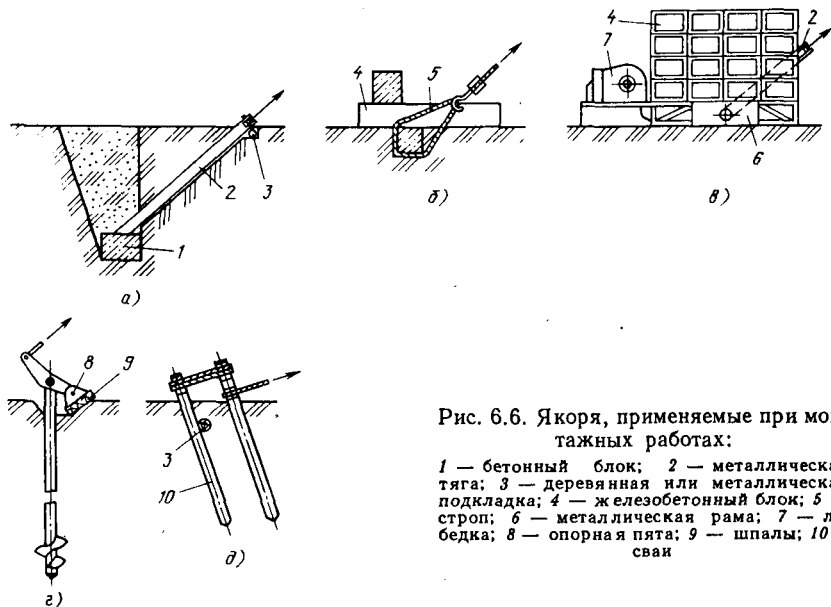


Рис. 6.6. Якоря, применяемые при монтажных работах:

1 — бетонный блок; 2 — металлическая тяга; 3 — деревянная или металлическая подкладка; 4 — железобетонный блок; 5 — строп; 6 — металлическая рама; 7 — лебедка; 8 — опорная пята; 9 — шпалы; 10 — сваи

тросовый полиспаст с ручным приводом от бесконечной цепи или с электрическим приводом (электроталь). Наиболее широко применяют тали при монтаже узлов насосов, компрессоров и другого оборудования, а также узлов трубопроводов, расположенных в помещениях.

Для механизации монтажных и такелажных работ, а также для подъема на небольшую высоту и выверки положения оборудования применяют гидравлические, винтовые, реечные и клиновые домкраты.

Для крепления вант и удержания в рабочем положении мачт, порталов, шевров, лебедок применяют анкерные устройства — монтажные якоря различных типов. Они должны выдерживать сосредоточенную нагрузку, действующую под углом 45° в горизонтальной плоскости и под углом $0-90^\circ$ в вертикальной плоскости. В монтажной практике используют следующие типы якорей: заглубленные, работающие за счет сил трения и веса грунта, в который погружен якорь (рис. 6.6, а); полузаглубленные (рис. 6.6, б); наземные, работающие за счет сил трения, обусловленных весом якоря (рис. 6.6, в). Заглубленные якоря в свою очередь делят на винтовые (рис. 6.6, г) и свайные (рис. 6.6, д). В качестве якорей иногда используют имеющиеся на монтажной площадке строительные и технологические конструкции.

Для изготовления вант, стропов и оснастки грузоподъемных механизмов применяют стальные канаты (ГОСТ 3241—80). Канаты подбирают по разрывному усилию — нагрузке, при которой

происходит разрыв. Наибольшее допускаемое усилие в канате определяют из выражения $S = P/k$, где P — разрывное усилие каната, гарантированное паспортом (или стандартом для каната данного типа); k — коэффициент запаса прочности, принимаемый в зависимости от условий работы каната ($k = 4 \dots 6$).

§ 6.3. МОНТАЖ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В зависимости от типа грузоподъемного механизма различают методы монтажа: самоходными стреловыми кранами; монтажными мачтами; порталными подъемниками, шеврами; гидравлическими подъемниками; вертолетами. Кроме того, возможен монтаж башенными, козловыми, мостовыми кранами и полиспастами, прикрепленными к имеющимся конструкциям.

В зависимости от характера пространственного перемещения поднимаемого оборудования существуют следующие основные методы монтажа: метод скольжения с отрывом или без отрыва аппарата от земли; метод поворота вокруг шарнира; безъякорные методы.

Безъякорные методы являются разновидностью метода поворота вокруг шарнира. К ним относятся: метод монтажа с использованием самомонтирующегося шевра или портала; метод выжимания скользящей по рельсам рамной опорой (или порталом); метод выталкивания гидравлическим подъемником.

Монтаж вертикальных цилиндрических аппаратов. В случаях, когда масса и размеры цилиндрических аппаратов (тарельчатые и насадочные колонны, скрубберы, реакторы и регенераторы, вертикальные емкости и др.) сравнительно невелики, для монтажа применяют самоходные стреловые краны. Преимущества кранов: мобильность и маневренность, высокая производительность и простота технологии подъема аппарата в проектное положение, отсутствие трудоемких подготовительных работ. Однако использование кранов ограничено их сравнительно невысокими грузоподъемностью и высотой подъема, невозможностью оттяжки груза во время подъема и небольшим вылетом стрелы при максимальной грузоподъемности (т. е. небольшим подстреловым пространством на минимальных вылетах стрелы).

Для монтажа тяжелых и высоких аппаратов, при невозможности использования кранов из-за их недостаточных грузовысотных характеристик или размеров монтажной площадки применяют мачтовые подъемники (мачты, порталы, шевры). Преимущества мачт: меньшая стоимость по сравнению с кранами; возможность установки аппаратов на высокие фундаменты, сравнительная простота процесса подъема и применимость практически в любых условиях. Кроме того, механизмы и монтажное оборудование, необходимые для оснастки мачт, широко распространены и имеются в любой монтажной организации. Однако существенны

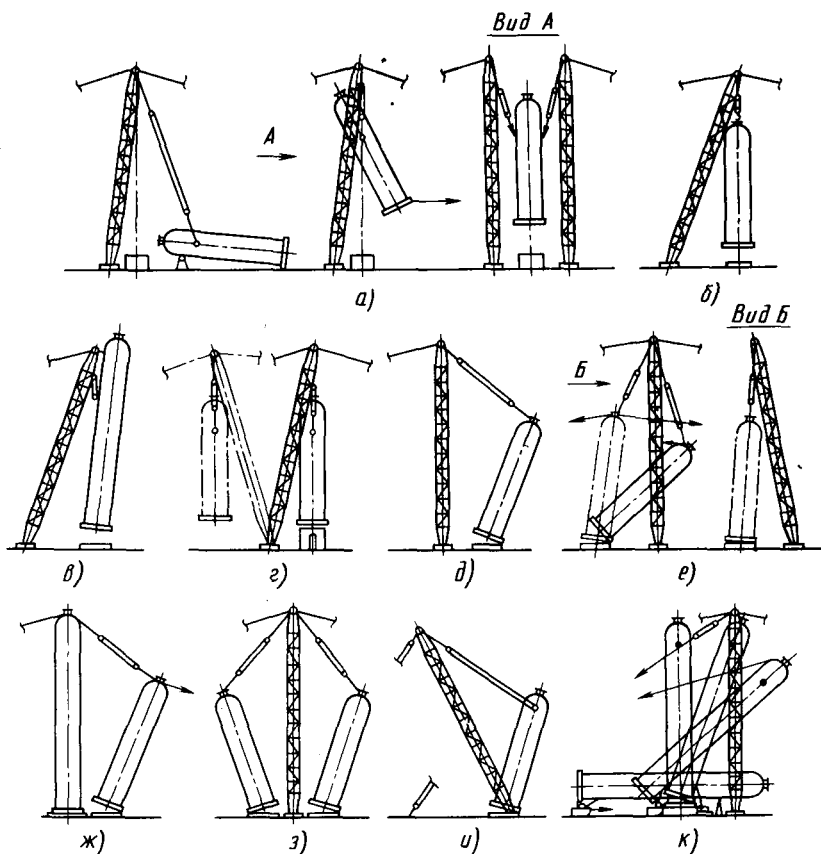


Рис. 6.7. Схемы монтажа вертикальных аппаратов мачтами

недостатки мачт: большое количество такелажной оснастки; трудоемкость операций подготовки мачт к работе; значительная продолжительность работ.

При монтаже методом скольжения с отрывом от земли двумя наклонными мачтами (рис. 6.7, а) аппарат укладывают перед фундаментом таким образом, чтобы при установке он занял правильное положение. По обе стороны от фундамента с наклоном в сторону подготовленного к подъему аппарата устанавливают две мачты, оснащенные полиспастами. Строповку осуществляют за монтажные штуцера (либо траверсой за верх аппарата), которые расположены выше центра масс аппарата и с таким расчетом, чтобы отклонение аппарата от вертикали в поднятом положении не превышало $10-15^\circ$.

Убедившись в надежности такелажной оснастки и проверив работу всех механизмов, начинают подъем. С помощью лебедок

выбирают канаты грузовых полиспастов, и аппарат начинает передвигаться. При этом его опорная часть скользит по заранее подготовленному основанию — на санях (тележках) или металлических листах. После отрыва от земли аппарат устанавливают вертикально, затем поднимают несколько выше фундамента и плавно опускают на анкерные болты. Далее контролируют отклонение аппарата от вертикальности и затягивают анкерные болты.

Кроме рассмотренной наиболее распространенной схемы подъема цилиндрических аппаратов методом скольжения двумя наклонными мачтами используются схемы: одной наклонной или вертикальной мачтой со строповкой за верх аппарата (рис. 6.7, б) или за корпус (рис. 6.7, в); двумя вертикальными мачтами с оттяжкой груза или без оттяжки; качающимися (одной или двумя) мачтами (рис. 6.7, г); наклонной мачтой с вантами, прикрепленными к строительным конструкциям, причем ваны можно крепить выше, ниже или на уровне вершины мачты.

Иногда аппарат по ряду причин не удается перед подъемом расположить близко к месту установки. При этом требуется значительное усилие оттяжки аппарата, что приводит к большим перегрузкам мачт и вант. В таких случаях целесообразно применять схему подъема одной или двумя качающимися мачтами (рис. 6.7, г). Сущность ее заключается в том, что в начале подъема мачты наклонены в сторону лежащего аппарата. После отрыва аппарата от земли при помощи полиспастов, установленных на вантах, мачты вместе с висячим аппаратом устанавливают сначала вертикально, а затем наклоняют в сторону фундамента. При подъеме нескольких установленных рядом аппаратов эта схема монтажа дает значительный экономический эффект, так как отпадает необходимость перемещения мачты, что сокращает трудовые затраты и продолжительность монтажа.

При монтаже колонных аппаратов методом поворота вокруг шарнира аппарат укладывают опорной частью на фундамент и закрепляют в шарнире (рис. 6.7, д—и). Подъем выполняют одной или двумя мачтами; в последнем случае следует применять балансирные траверсы или непрерывно контролировать нагрузки на мачты по показаниям приборов. Подвижный блок грузового полиспаста мачты стропят либо за вершину, либо за корпус аппарата. Приподняв верхний конец аппарата на 100—200 мм (это положение соответствует максимальным нагрузкам), проверяют надежность такелажной оснастки и грузоподъемных механизмов. Дальнейший подъем выполняют с периодическими остановками через каждые 15—20°. Перед моментом подхода аппарата к нейтральному положению (положению неустойчивого равновесия) натягивают тормозной канат, который постепенно ослабляют при дальнейшем движении аппарата.

Возможны различные варианты подъема методом поворота вокруг шарнира. По первому варианту (рис. 6.7, д) используют одну или две вертикальные мачты, расположенные за фундаментом

или рядом с ним (за поворотным шарниром), и подъем осуществляют за один прием. В этом случае аппарат строят за вершину, так как при этом нагрузки на подъемные механизмы и такелажную оснастку минимальны. По второму варианту (рис. 6.7, е) нагрузки на мачты, ванты и полиспасты меньше, чем при подъеме по первому варианту, так как центр масс аппарата расположен ближе к основанию мачты. Однако при этом аппарат поднимают в положение неустойчивого равновесия в два приема: сначала грузовыми полиспастами (на угол $50-70^\circ$), а затем дополнительными тяговыми средствами (полиспастами, тракторами и др.). Иногда аппарат доводят до нейтрального положения наклоном мачты вместе с аппаратом полиспастами, установленными на вантах. Мачта должна быть наклонена таким образом (рис. 6.7, е, вид Б), чтобы ее вершина находилась в плоскости подъема аппарата.

По третьему варианту (рис. 6.7, ж) в качестве мачты используют ранее установленный аппарат, предварительно снабженный грузовым полиспастом и вантами. Этот метод весьма эффективен, так как уменьшает расходы, связанные с установкой и демонтажом мачт.

При монтаже двух аппаратов, стоящих рядом и близких по габаритам и массе, целесообразно применять метод одновременного подъема этих двух аппаратов одной или двумя мачтами (рис. 6.7, з). Благодаря симметричной нагрузке мачта работает только на сжатие без изгибающих моментов; в результате можно использовать такелажную оснастку меньшей грузоподъемности. Так, при грузоподъемности мачты 50 т и высоте 35 м можно поднимать одновременно два аппарата общей массой 160 т и высотой до 50 м.

При монтаже по схеме, показанной на рис. 6.7, и, «падающую» мачту укрепляют на опорной части аппарата и устанавливают вертикально или с небольшим наклоном в сторону верха аппарата. Вершину мачты канатом соединяют с верхом аппарата (длина этого каната остается при подъеме постоянной) и с тяговым механизмом. При натяжении каната мачта наклоняется и тянет за собой аппарат; когда мачта переместится в горизонтальное положение («упадет»), поднимаемый аппарат установится вертикально. При подходе к нейтральному положению (положение неустойчивого равновесия) движение аппарата замедляют. При большой массе аппарата целесообразно поднимать его А-образным «падающим» шевром.

При подъеме колонны методом скольжения без отрыва от земли (рис. 6.7, к) сначала опорную часть колонны подтаскивают к фундаменту, а затем поднимают поворотом в шарнирном устройстве. Поскольку при скольжении нагрузки на такелажные средства значительно меньше силы тяжести аппарата, то, как и при работе по методу поворота вокруг шарнира, удастся использовать такелажные средства грузоподъемностью меньше массы монтируемого

аппарата. Следует отметить, что при монтаже методом поворота вокруг шарнира в начальный момент возникают значительные горизонтальные нагрузки, передающиеся через шарнир на фундамент, что в ряде случаев недопустимо. При использовании метода скольжения без отрыва от земли такие нагрузки не возникают, так как в шарнире аппарат устанавливают в наклонном положении. При подъеме аппарата его нижнюю часть на тележке или санях перемещают к фундаменту и далее, используя в качестве опоры прикрепленную к аппарату ось, передвигают по фундаменту до соединения с пятой поворотного шарнира, предварительно закрепленного около фундамента. После соединения оси в шарнире аппарат поворачивают до проектного положения.

Преимущества метода скольжения по сравнению с методом поворота вокруг шарнира — простота и минимальные затраты на подготовительные работы и оснастку; возможность установки аппаратов на высокие фундаменты. Однако при работе по методу скольжения грузоподъемность монтажных механизмов должна быть равна массе аппарата или превосходить ее. Другой недостаток — нагрузка на такелажную оснастку максимальна только в конце подъема. В связи с этим для обеспечения безопасных условий труда монтажников к такелажной оснастке предъявляют повышенные требования.

Метод поворота вокруг шарнира наиболее эффективен при подъеме отдельно стоящих тяжелых аппаратов, устанавливаемых на низкие фундаменты. Преимущества этого метода: масса монтируемого аппарата может почти в 2 раза превышать грузоподъемность монтажных механизмов, что позволяет расширить область применения грузоподъемного оборудования; требуется меньше такелажной оснастки; нагрузка на грузоподъемное оборудование, такелажную оснастку и поднимаемый аппарат максимальна в начальный момент подъема. Последнее обстоятельство позволяет обезопасить труд монтажников, так как грузоподъемное оборудование и оснастку можно испытать уже в начале монтажа аппарата. Недостатки метода: относительно высокие затраты на подготовительные и вспомогательные работы, связанные с изготовлением и установкой дорогостоящего шарнира, с применением специальных разъемных анкерных болтов; невозможность установки аппаратов на высокие (более 1—2 м) фундаменты.

Разновидностями метода поворота вокруг шарнира являются безъякорные методы. Их применяют при монтаже единичных тяжелых аппаратов в стесненных условиях монтажной площадки на фундаменты высотой до 2 м при соотношении диаметра и высоты поднимаемого аппарата не менее 1 : 10.

В последние годы при монтаже вертикальных аппаратов успешно используют гидравлические грузоподъемные механизмы. По кинематической схеме способ подъема аппаратов гидроподъемником относится к безъякорным и называется способом выталкивания (рис. 6.8). Перед подъемом укладывают краном аппарат 2

нижней частью на шарнирную опору 5, а верхней — на временную опору 3 (козлы, шпалы). Стойки гидроподъемника 1 устанавливают по обе стороны от аппарата и натягивают канатами. Опоры стоек соединяют стяжками 4 или полиспастами с поворотным шарниром поднимаемого аппарата.

При перемещении подъемных устройств (каретки, траверсы) вдоль стоек поднимаемый аппарат поворачивается вокруг шарнира; одновременно вокруг шарнирных опор поворачиваются стойки гидроподъемника. При подходе к положению неустойчивого равновесия движение аппарата замедляется канатом 6. Если длина стоек недостаточна, то аппарат переводят в вертикальное положение методом выжимания, перемещая опоры стоек гидроподъемника полиспастами, связывающими опоры стоек с поворотным шарниром аппарата. При этом стойки движутся по металлическим листам, смазанным солидолом.

При монтаже аппаратов используют и метод выжимания, сущность которого заключается в следующем (рис. 6.9). Нижнюю часть аппарата 1 укладывают краном на шарнирную опору 9, а верхнюю часть — на временную опору. Это необходимо для уменьшения нагрузок на оснастку в начальный момент подъема. К аппарату несколько выше центра масс приваривают специальную поворотную цапфу 2, к которой шарнирно крепят рамную опору 4. Рамная опора обеспечивает хорошую боковую устойчивость аппарата, поэтому боковые ванты обычно не применяют. На нижних концах рамной опоры шарнирно устанавливают специальные тележки (каретки) 5, которые в процессе подъема скользят по рельсовому пути 6. Рамная опора приводится в движение двумя полиспастами 8, соединяющими поворотный шарнир 9 с каретками 5. Сбегающие ветви полиспастов крепят к бабракам лебедок 7.

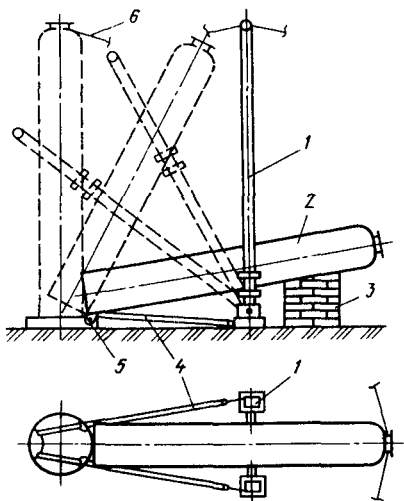


Рис. 6.8. Схема монтажа аппарата гидроподъемником

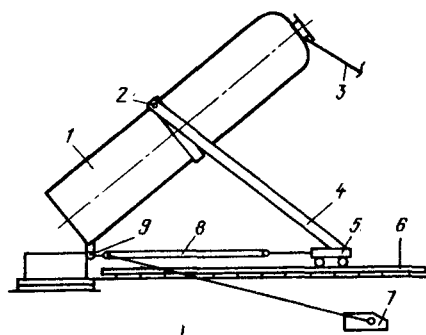


Рис. 6.9. Схема монтажа аппарата методом выжимания

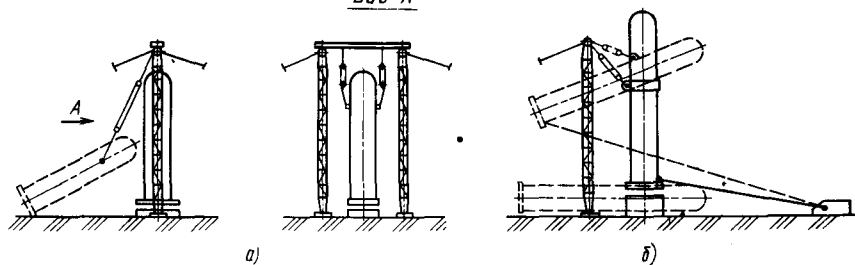


Рис. 6.10. Схемы монтажа аппарата порталом:

а — методом скольжения с отрывом от земли; *б* — с использованием консоли

В качестве опор используют мачты, шевры или специальные конструкции. При включении лебедок 7 нижние концы опоры 4 начинают скользить по рельсам 6, поворачивая аппарат вокруг шарнира 9. Для окончательной установки аппарата на фундаменте применяют тормозной канат 3. В процессе подъема особое внимание обращают на параллельность перемещения оснований рамной опоры, так как при перекосе возникают дополнительные нагрузки на поворотный шарнир.

Описанные методы монтажа вертикальных аппаратов мачтами применимы и при монтаже аппаратов стреловыми кранами. Аппараты можно поднимать методами скольжения с отрывом от земли и методом поворота вокруг шарнира, одним или двумя кранами, со строповкой за верх аппарата и за корпус.

Подъем и установка колонной аппаратуры с использованием портала. Портал по сравнению с мачтами обладает большей грузоподъемностью. Преимуществами метода монтажа порталами являются возможность перемещения монтируемого оборудования в плоскости портала и некоторое уменьшение такелажной оснастки. Монтаж порталами удобен при установке большого числа аппаратов в один ряд.

При монтаже порталами можно использовать методы скольжения (рис. 6.10, *а*), поворота вокруг шарнира, безъякорный метод. Один из основных недостатков портала — ограничение высоты монтируемого оборудования высотой портала. Этого недостатка можно избежать, применив схему подъема, показанную на рис. 6.10, *б*, при этом высота портала составляет 0,55—0,65 высоты аппарата. Стropовку осуществляют не по оси аппарата, как обычно, а за строповочную консоль, расположенную сбоку аппарата, немного выше его центра масс, и закрепляемую на корпусе аппарата с помощью бандажей. Консоль обеспечивает выведение аппарата при его повороте в вертикальной плоскости из пространства, занимаемого порталом.

Сначала аппарат поднимают до высоты, несколько превышающей положение центра масс в рабочем состоянии аппарата.

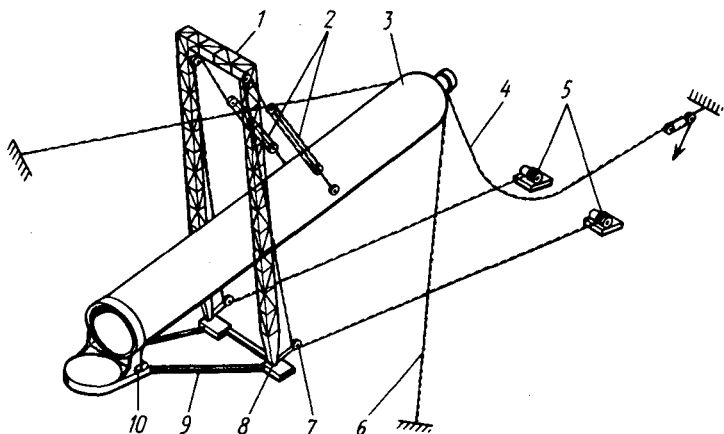


Рис. 6.11. Схема монтажа безъякорным методом с помощью портала

Затем аппарат оттягивают за нижнюю часть; при этом он поворачивается в вертикальной плоскости вокруг места строповки и выводится из плоскости портала. Длину консоли подбирают так, чтобы корпус аппарата при развороте не соприкасался с ригелем портала. Аппарат устанавливают на фундамент последовательными операциями опускания и оттягивания. Такой способ монтажа требует точной установки опор портала относительно фундамента, в противном случае затруднена установка аппарата на анкерные болты.

Сущность безъякорного монтажа с использованием портала состоит в следующем (рис. 6.11). Портал 1 поднимают из горизонтального в исходное вертикальное положение полиспастами 2, используя поднимаемый аппарат 3 в качестве «якоря», который в начальный момент находится в горизонтальном положении. Затем дальнейшим натяжением тросов полиспастов поднимают аппарат; при этом портал наклоняется в сторону своего первоначального положения. В процессе подъема аппарат и портал поворачиваются соответственно вокруг поворотного шарнира 10 и шарнирной опоры 8, соединенных между собой стяжкой 9. Для подъема аппарата используют две лебедки 5, к барабанам которых через отводные блоки 7 крепятся сбегающие ветви полиспастов 2. Плавное опускание аппарата на фундамент обеспечивается тормозным канатом 4.

При подходе аппарата и портала к положению неустойчивого равновесия натягивают тормозной канат 4 аппарата; затем натяжение каната постепенно уменьшают. Одновременно с натяжением тормозного каната натягивают боковые ванты 6 аппарата. После установки аппарата в вертикальное положение его закрепляют на фундаментных болтах гайками. Затем освобождают боковые ванты и опускают портал, включив лебедки 5 грузовых полиспастов на спуск.

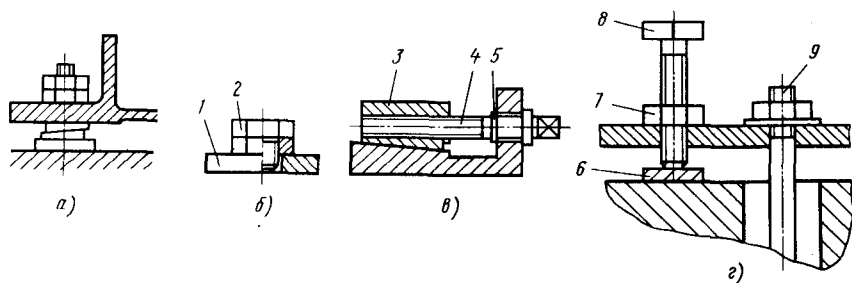


Рис. 6.12. Приспособления для выверки вертикальности аппаратов:

а — клиновые подкладки; б — винтовой домкрат; в — клиновой домкрат; г — отжимной болт; 1 — корпус приспособления; 2 — регулирующий винт; 3 — клин; 4 — винт; 5 — стопорная шайба; 6 — упорная пластина; 7 — контргайка; 8 — отжимной болт; 9 — фундаментальный болт

Монтаж тарельчатых и насадочных колонн. Рассмотрим вопросы выверки массообменных колонных аппаратов на фундаменте и монтажа внутренних устройств.

После установки на фундаменте тарельчатый или насадочный аппарат выверяют по высоте и вертикальности, после чего закрепляют фундаментными болтами. От точности установки аппаратов по вертикали во многом зависит эффективность работы тарелок и насадки массообменных колонн (четкость разделения продуктов переработки на компоненты при ректификации или степень поглощения компонентов при абсорбции).

Для выравнивания аппаратов по вертикали используют специальную оснастку (в том числе клиновые и винтовые домкраты), подкладки и клинья, заранее установленные под опорное кольцо аппарата (рис. 6.12). Если в проекте колонны для ее выверки предусмотрены установочные (отжимные) винты, то подкладки при выверке не применяют. Установочные винты ввинчивают в опоры аппаратов. Торцы винтов упирают в пластины, уложенные горизонтально на поверхность фундамента.

Допускаемые отклонения образующих аппаратов от вертикальности: для колонн без внутренних устройств и для насадочных колонн 0,03 % высоты аппарата, но не более 35 мм; для тарельчатых ректификационных колонн 0,1 % высоты аппарата, но не более 15 мм при $H \leq 50$ м и $H/D \geq 5$ (H и D — высота и диаметр аппарата), 0,03 % высоты аппарата, но не более 25 мм при $H = 50 \dots 80$ м и $H/D \geq 8$, 0,03 % высоты аппарата, но не более 30 мм при $H = 80 \dots 100$ м и $H/D \geq 10$. Допускаемые отклонения аппарата от вертикальности при $H/D < 5$ могут быть указаны в рабочих чертежах.

Требования к монтажу тарелок, а также методы проверки правильности их сборки и установки указывают в технической документации, поставляемой вместе с аппаратом. При монтаже тарелок особое внимание обращают на контроль их горизонталь-

ности в рабочем положении и одинакового гидравлического сопротивления контактных устройств (например клапанов) на тарелке, поскольку от этих факторов существенно зависит эффективность ее работы.

Допуск горизонтальности для тарелки: провальной 2 мм при диаметре колонны $D < 2$ м и 3 мм при $D = 2 \dots 3$ м; клапанной 3 мм при $D < 3$ м, 4 мм при $D = 3 \dots 4$ м и 5 мм при $D > 4$ м; с S-образными элементами 4 мм при $D = 3 \dots 6$ м; ситчатой с переливами 4 мм при $D < 4$ м. Верхние торцы паровых патрубков тарелок в сборе должны находиться в одной горизонтальной плоскости с отклонением не более ± 3 мм; перекося колпачков относительно плоскости тарелки не должен превышать ± 1 мм. Горизонтальность тарелок проверяют с помощью уровня или линейки, измеряя в нескольких точках высоту слоя жидкости на тарелке.

Технология сборки тарелок зависит от их конструкции и включает: подготовку элементов и деталей тарелок к монтажу (проверка по рабочим чертежам или нормам размеров, формы, состояния поверхности, прямолинейности элементов и деталей, свойств материалов); установку и сварку опорных и неразъемных деталей (опорные уголки, переливы, приемные карманы и др.); установку съемных деталей (желоба, колпачки, клапаны, полотно тарелки или разборные секции тарелки и др.).

Для обеспечения герметичности соединений между съемными и опорными элементами укладывают мягкие (преимущественно асбестовые) прокладки. Элементы и детали тарелок подают в колонну через люки.

Тарелки в колонне монтируют снизу вверх, причем, как правило, каждую тарелку испытывают на герметичность и на барботаж. Тарелку считают герметичной, если уровень воды, налитой на тарелку, в течение 20 мин снижается не более чем на 25 мм. Испытания проводят при закрытых сливных и дренажных отверстиях.

Для проверки тарелки на барботаж часть колонны, находящуюся ниже испытываемой тарелки, плотно перекрывают. Тарелку заливают водой и под нее подают воздух под небольшим давлением (от компрессора, воздуходувки или магистрали сжатого воздуха). О нормальной работе тарелки свидетельствует равномерность пробулькивания пузырьков воздуха по всей площади тарелки. При неравномерности барботажа регулируют положение тарелки и высоту отдельных колпачков.

В насадочных колоннах свободно лежащие решетчатые тарелки (колосниковые решетки) с керамической насадкой монтируют после установки аппаратов в вертикальное положение. Для упорядоченного расположения насадки ее укладывают вручную. При беспорядочном расположении насадки ее загружают следующим образом. Аппарат наполняют водой до верхнего люка и сверху высыпая насадку из бака в воду. По мере наполнения колонны насадкой воду сливают через нижний штуцер колонны.

Монтаж сушилок и теплообменных аппаратов. Как отмечено, в химической промышленности для обжига, прокаливания и разложения продуктов, а также для сушки различных материалов используют барабанные вращающиеся печи и сушилки.

Основные требования, предъявляемые к монтажу барабанных печей и сушилок: прямолинейность продольной оси печи, легкость вращения, соблюдение проектных зазоров для компенсации температурных расширений бандажей и корпуса, отсутствие радиального и торцового бисния корпуса и зубчатого венца при вращении, надежное уплотнение узлов соединения барабана с неподвижными частями (особенно в случаях, когда при работе аппаратов выделяются вредные газы).

Барабанные печи и сушилки поступают на монтажную площадку отдельными узлами и деталями. Последовательность их монтажа следующая: установка и выверка плит под опорные и упорные ролики; установка и выверка роликов; установка обечаек с надетыми бандажами; установка упорных роликов; установка зубчатого венца; установка редуктора и ведущей шестерни; установка оборудования горячего и холодного концов. Опорные ролики выверяют нивелиром относительно струны, натянутой по оси фундаментов, а также по высотным отметкам.

Барабанные печи и сушилки монтируют с использованием самоходных стреловых кранов, мачт, козловых кранов. Большое значение для нормальной работы барабанных печей и сушилок имеет правильная установка бандажей и опорных роликов. Установленные барабанные печи и сушилки прокручивают вхолостую (без материала), а затем испытывают под нагрузкой.

Теплообменные аппараты поставляют, как правило, в полностью собранном виде после испытаний на прочность и плотность. Монтаж проводят либо на открытых площадках, либо на междуэтажных перекрытиях технологических цехов. В качестве грузоподъемных механизмов преимущественно используют самоходные стреловые краны, в некоторых случаях — трубоукладчики, мачты и порталы, а также простейшие грузоподъемные механизмы (полиспасты, тали), прикрепленные к металлоконструкциям.

В зависимости от условий монтажа (высота и расположение фундаментов, размеры монтажной площадки), размеров и массы аппаратов возможны различные схемы подъема одним краном на открытой площадке (рис. 6.13). По схеме на рис. 6.13, а аппарат перед подъемом располагают таким образом, чтобы положение центра масс аппарата соответствовало проектному. Стрела крана имеет минимальный вылет, и грузоподъемность крана максимальна. После подъема аппарат поворачивают на растяжках в проектное положение вокруг вертикальной оси и устанавливают на опоры. Если перед подъемом удастся расположить аппарат рядом с фундаментом параллельно проектному положению, то монтаж осуществляют по схеме, показанной на рис. 6.13, б. После подъема аппарата над фундаментом кран перемещают до

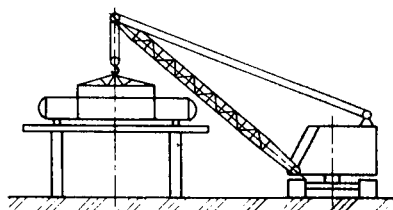
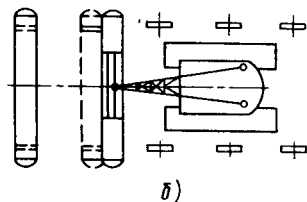
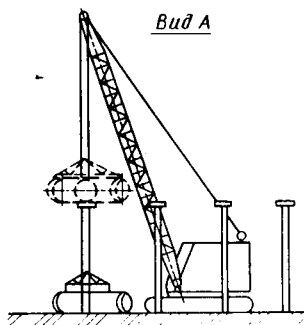
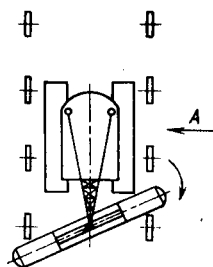
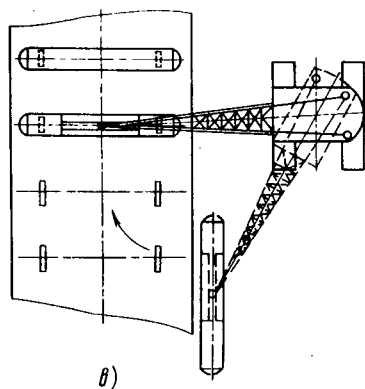


Рис. 6.13. Схемы монтажа теплообменных аппаратов на открытой площадке

установки аппарата в проектное положение. Если передвижение крана между фундаментами невозможно, то применяют схему подъема, изображенную на рис. 6.13, в.

При недостаточной грузоподъемности одного крана устанавливают спаренные краны. Для контроля равномерного распределения нагрузки на краны часто применяют балансирные траверсы. В технологических цехах теплообменные аппараты монтируют в соответствии с совмещенным графиком строительно-монтажных работ в период возведения здания, фундаментов до сооружения располагаемых выше перекрытий. Такая технология значительно ускоряет производство строительно-монтажных работ.

При несоблюдении указанной последовательности работ приходится монтировать аппараты под перекрытиями (рис. 6.14). Возможна схема монтажа с применением вертикальной мачты и полиспастов, прикрепленных к строительным конструкциям (рис. 6.14, а). Менее трудоемок монтаж с использованием кача-



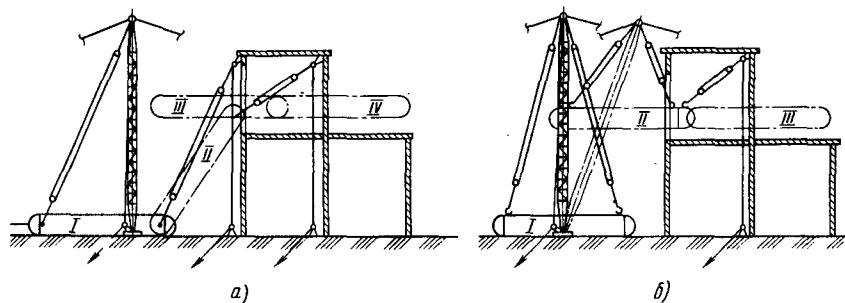


Рис. 6.14. Схемы монтажа теплообменных аппаратов под перекрытием (I — IV — последовательные положения аппарата при подъеме)

ющейся мачты (рис.6.14, б), оснащенной двумя полиспастами — передним и задним. Подъем выполняют обоими полиспастами до необходимой отметки, затем наклоном мачты аппарат передним торцом заводят на площадку, после чего передний полиспаст и строп освобождают. Дальнейшее перемещение аппарата осуществляют полиспастом, прикрепленным к строительным конструкциям.

При выверке теплообменных аппаратов отклонения от проектных осей и отметок, а также от горизонтальности и вертикальности составляют: главных осей аппарата в плане ± 10 мм; фактической высотной отметки аппарата ± 10 мм; оси вертикального аппарата от вертикали 3 мм на 1 м, но не более 35 мм; горизонтального аппарата от горизонтали 0,5 мм на 1 м.

Для компенсации температурных деформаций корпуса горизонтальных теплообменников одну из опор (как правило, у подвижной трубной решетки аппарата) выполняют подвижной.

Испытания смонтированного оборудования. Термоизоляция аппаратов. Смонтированное оборудование подвергают испытаниям: гидравлическим или пневматическим на прочность и плотность (для сосудов и аппаратов); вхолостую и под нагрузкой (для машин, механизмов и аппаратов с приводом).

Аппараты, поставляемые на место монтажа в полностью собранном виде, испытывают на прочность и плотность на заводе-изготовителе. Повторным испытаниям на месте монтажа такие аппараты подвергают в случаях: истечения гарантийного срока хранения; повреждения оборудования при транспортировании к месту установки; монтажа аппарата с применением сварки, пайки или вальцовки элементов, работающих под давлением. При поставке оборудования блоками или отдельными деталями его испытывают после сборки и сварки в монтажных условиях.

Оборудование с защитным покрытием или изоляцией испытывают до наложения покрытия или изоляции. Значения пробных давлений при гидравлическом испытании аппаратов указаны в табл. 6.1.

Значения пробного давления $p_{пр}$ при гидравлическом испытании аппаратов

Сосуды	Расчетное давление p_p , МПа	Пробное давление $p_{пр}$, МПа
Все, кроме литых	$<0,07$ $0,07—0,5$	$0,2$ $1,5p_p [\sigma]_{20}/[\sigma]_t$, но не менее $0,2$
	$>0,5$	$1,25p_p [\sigma]_{20}/[\sigma]_t$, но не менее $p_p + 0,3$
	Вакуум	$1,5p_p [\sigma]_{20}/[\sigma]_t$, но не менее $0,2$
Литые	Независимо от давления	$1,5p_p [\sigma]_{20}/[\sigma]_t$, но не менее $0,3$

¹ для вакуума — наружное давление.

Примечания: 1. $[\sigma]_{20}$ и $[\sigma]_t$ — допускаемые напряжения для материала сосуда при температуре 20 °С и рабочей температуре.

2. Пробное давление при гидравлическом испытании сосудов и аппаратов, работающих при температуре ниже 0 °С, принимают равным таковому при температуре 20 °С.

Температуру воды при гидравлическом испытании поддерживают не ниже 5 °С и не выше 40 °С. Перепад температур окружающей среды и воды, применяемой для гидравлического испытания, не должен превышать 5 °С.

При испытании вертикальных аппаратов в горизонтальном положении к пробному давлению, принятому по таблице 6.1, прибавляют гидростатическое давление.

Продолжительность испытаний пробным давлением составляет: 10 мин при толщине стенки аппарата до 50 мм; 20 мин при толщине стенки 50—100 мм; 30 мин при толщине стенки более 100 мм; 60 мин для литых и многослойных сосудов независимо от толщины стенки. По истечении указанного времени давление постепенно уменьшают до рабочего и тщательно осматривают все соединения и сварные швы (обстукивают молотком). Во время осмотра поддерживают рабочее давление. Замеченные дефекты исправляют после полного сброса давления и вывода воды из аппарата. Оборудование считают выдержавшим гидравлическое испытание, если давление в течение всего периода испытаний не уменьшается, а при осмотре не обнаружены признаки разрыва, течи в сварных соединениях, а также видимые остаточные деформации.

Аппараты, работающие при атмосферном давлении, испытывают наливом воды до верхней кромки и выдержкой в таком состоянии в течение 4 ч, а затем осматривают, обстукивая сварные швы молотком. Допускается испытывать сварные швы, смачивая их поверхности изнутри аппарата керосином в течение всего

Продолжительность испытания
сварных швов керосином

Толщина сварных листов металла, мм	Время выдержки (мин) при положении шва	
	нижнем	верхнем
До 4	20	30
Св. 4 до 10	25	35
Св. 10	30	40

периода испытания. При отсутствии дефектов на наружной поверхности сварных швов, покрытых предварительно меловым раствором, не должно быть пятен. Продолжительность испытания сварных швов аппаратов этим способом указана в табл. 6.2.

При пневматических испытаниях воздухом или инертным газом (пробное давление — см. табл. 6.1), которые проводят при невозможности выполнения гидравлических испытаний, измеряют уменьшение давления в течение 24 ч и рассчитывают

$$\Delta p = \frac{100}{\tau} \left(1 - \frac{p_{\text{к}} t_{\text{к}}}{p_{\text{н}} t_{\text{н}}} \right),$$

где Δp — отношение уменьшения давления за 1 ч к давлению при испытаниях, %; τ — время испытаний, ч; $p_{\text{н}}$, $p_{\text{к}}$ — суммы манометрического и барометрического давлений соответственно в начале и конце испытаний, МПа; $t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$ — температура в начале и конце испытаний, °С.

Оборудование считают выдержавшим испытание на прочность и плотность, если Δp не превышает: 0,1 и 0,2 % — при токсичных рабочих газах соответственно для закрытых помещений и открытых участков; 0,2 и 0,4 % — при пожаро- и взрывоопасных газах соответственно для закрытых помещений и открытых участков.

После испытаний аппарата на прочность и плотность его термоизолируют и футеруют. Нанесение на поверхность аппарата и трубопроводов защитных и термоизоляционных покрытий относится к специальным строительным работам и выполняется специализированными строительно-монтажными организациями. До нанесения теплоизоляции монтажная организация устанавливает крепежные изделия и приспособления на аппаратах (штыри, крючки, подвески и др.), если эти работы не выполнены на заводах-изготовителях.

В качестве изоляции чаще всего используют маты из минеральной ваты, которыми покрывают корпус аппарата снаружи; швы матов стягивают отоженной стальной проволокой диаметром 1—2 мм. Затем снаружи минеральную вату укрепляют крупноячейной проволочной сеткой, поверхность которой штукатурят. После высыхания слой штукатурки оклеивают тканью и окрашивают алюминиевой или другой устойчивой краской.

В качестве изоляции применяют также стекловату, стеклоткань, а для защиты теплоизоляции — асбошиферные плиты

и полуцилиндры, тонкие листы из алюминиевого сплава, а также оцинкованное железо.

Термоизоляционные работы проводят только при положительной температуре окружающей среды и термоизоляционных материалов (не ниже 5 °С).

Термоизоляционную футеровку аппаратов выполняют из огнеупорного кирпича или асбоцементной массы. Наиболее распространена термоизоляция асбоцементом благодаря его достаточной механической прочности, незначительной теплопроводности и невысокой стоимости. После нанесения термоизоляции и футеровки аппарата составляют соответствующий акт.

Сдача оборудования. Пусконаладочные работы. После завершения строительно-монтажных работ объект готовят к сдаче заказчику. Перед сдачей, как описано выше, аппараты подвергают гидравлическим или пневматическим испытаниям, а машины, механизмы и аппараты с приводами испытывают вхолостую и под нагрузкой.

Испытания вхолостую включают: пробные пуски с остановками для проверки работы всех узлов оборудования и устранения неполадок; непрерывные испытания вхолостую.

Испытания под нагрузкой состоят из следующих операций: пробные испытания с постепенным увеличением давления и остановками для осмотра; проверка работы всех узлов и устранение неполадок; непрерывное испытание под нагрузкой; устранение дефектов, обнаруженных в процессе испытания; заключительное контрольное испытание под нагрузкой.

После контрольного испытания оборудования под нагрузкой составляют акт о готовности оборудования к комплексному опробованию. При сдаче смонтированного оборудования в комплексное опробование предъявляют: акты готовности фундамента и приемки оборудования в монтаж; акты о выявленных дефектах оборудования; акты проверки правильности установки оборудования на фундамент; акты испытаний смазочной, гидравлической и пневматической систем, испытаний на прочность и плотность, испытаний вхолостую и под нагрузкой; монтажные и сборочные формуляры; комплект рабочих чертежей на монтаж оборудования с подписью ответственного представителя монтажной организации; акт о соответствии выполненных работ этим чертежам или изменениям, внесенным в процессе монтажа.

Комплексное опробование смонтированного оборудования на инертных средах в пусковой период, пуск производства на рабочих средах, испытания оборудования на проектных нагрузках и освоение мощностей проводят специализированные пусконаладочные управления. После выполнения указанных работ оборудование принимают в эксплуатацию с оформлением соответствующего акта.

§ 6.4. ЗАДАЧИ РЕМОНТНОЙ СЛУЖБЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В современных условиях при быстро возрастающем уровне механизации и автоматизации производственных процессов вопросы обеспечения надлежащего состояния оборудования, правильного ухода за ним, своевременного и качественного ремонта приобретают все большее значение.

Для исключения значительных потерь в производстве, связанных с неисправностью технологического и энергетического оборудования, необходимо уделять должное внимание организации технического обслуживания и ремонта оборудования, работе ремонтных служб предприятия.

Система планово-предупредительного ремонта. Принятая в химической промышленности система технического обслуживания и ремонта оборудования базируется на сочетании технического обслуживания и планово-предупредительных ремонтов.

Планово-предупредительные ремонты (ППР) проводят по методу планово-периодических ремонтов для основного оборудования и послеосмотровых ремонтов (ремонт по техническому состоянию) для вспомогательного оборудования.

Деление на основное или вспомогательное оборудование условно и зависит от конкретных условий эксплуатации данного оборудования и степени его влияния на получение конечного и промежуточного продукта. Обычно к основному относят оборудование, предназначенное для проведения основных химико-технологических процессов и получения целевого продукта. Выход из строя основного оборудования приводит к остановке технологической линии (установки) или резкому снижению ее производительности.

Сущность планово-периодического ремонта заключается в том, что ремонты всех видов планируют и выполняют в строго установленные ремонтными нормативами сроки. Сущность ремонта по техническому состоянию (метод послеосмотровых ремонтов) заключается в том, что виды и сроки ремонта планируют на основе сведений о техническом состоянии оборудования, полученных при проведении периодического технического обслуживания.

Система ППР оборудования предприятий химической промышленности предусматривает текущий и капитальный ремонт.

Текущий ремонт выполняют для обеспечения или восстановления работоспособности оборудования; он состоит в замене или восстановлении отдельных сборочных единиц и деталей оборудования. Текущие ремонты включают: операции периодического технического обслуживания; работы по замене или восстановлению быстроизнашивающихся деталей и сборочных единиц; ремонт футеровки и защитного покрытия; окрашивание; проверку крепежных соединений и замену вышедших из строя деталей; замену

набивки сальников и прокладок, ревизию арматуры, очистку, промывку и ревизию механизмов; смену масла в смазочных системах, проверку на точность и др.

Капитальный ремонт выполняют для восстановления исправности и полного или близкого к полному восстановлению ресурса оборудования с заменой или восстановлением любых его элементов, включая базовые. При капитальных ремонтах выполняют, как правило, работы по модернизации оборудования и внедрению новой техники.

Работы по капитальному ремонту финансируют за счет амортизационных отчислений. Объем капитального ремонта и подробный перечень работ устанавливаются ведомостью дефектов. Типовые работы при капитальном ремонте: мероприятия в объеме текущего ремонта; полная разборка, очистка и промывка ремонтируемого оборудования; замена и восстановление всех изношенных деталей и узлов, включая базовые; полная или частичная замена изоляции, футеровки и др.; сборка, выверка, регулирование и центрование оборудования; окраска и послеремонтные испытания. При капитальном ремонте устраняют дефекты оборудования, выявленные как в процессе эксплуатации, так и при проведении ремонта.

ППР оборудования проводят на основе ремонтных нормативов, определенных для машин и оборудования различных типов. Эти нормативы определяют: межремонтный период; продолжительность простоя в ремонте с разбивкой на подготовительный, ремонтный и заключительный периоды (в часах); трудоемкость ремонта (в человеко-часах).

Межремонтный период определяет время работы оборудования между двумя последовательно проведенными ремонтами и является основой для разработки такого показателя системы планово-предупредительного ремонта, как структура ремонтного цикла. Общее число рабочих часов оборудования условно принято 720 ч в месяц, 8640 ч в год. В зависимости от условий работы производства и с учетом технического состояния оборудования допускаются следующие отклонения от норматива межремонтного периода: $\pm 15\%$ между текущими ремонтами; $\pm 10\%$ между капитальными ремонтами.

Длительность простоя оборудования в ремонте исчисляют с момента отключения оборудования до момента сдачи отремонтированного оборудования эксплуатационному персоналу и вывода оборудования на рабочий режим и включает время проведения подготовительных, ремонтных и заключительных работ. К подготовительным работам относятся остановка оборудования, сброс давления, вывод продукта, продувка, промывка, нейтрализация, установка заглушек и др. Подготовительные работы завершают сдачей оборудования ремонтному персоналу. Продолжительность собственно ремонтных работ — это период от момента приемки оборудования в ремонт до момента сдачи отремонтированного

оборудования эксплуатационному персоналу, включая время испытаний на прочность и плотность и обкатки вхолостую.

К заключительным работам относятся подготовка, пуск оборудования в эксплуатацию и вывод его на рабочий режим.

Трудоемкость ремонта — трудозатраты на проведение одного ремонта оборудования данного вида — рассчитывают с учетом сложности и конструктивных особенностей оборудования (без изготовления запасных частей). В системе ППР используют нормативы трудоемкости ремонтов всех видов в человеко-часах для ремонтников четвертого разряда при шестirazрядной сетке.

При планировании ремонтов основными документами являются: годовой (перспективный) график планово-периодических ремонтов оборудования; месячный (оперативный) план-график ремонта оборудования; проект графика ремонтных остановок производств химической продукции; титульный список капитального ремонта основных фондов предприятия; установленные ремонтные нормативы; нормы периодичности освидетельствования и испытания сосудов и аппаратов; сметно-техническая документация; акт на установление (изменение) календарного срока ремонта предыдущего года. Кроме того, при планировании ремонта необходимы: план ремонтно-механического цеха, предназначенный для изготовления запасных частей и нестандартного оборудования; расчет объема ремонтных работ на плановый год в тыс. руб.; расчет трудоемкости ремонтных работ; расчет численности ремонтного персонала; план организационно-технических мероприятий по ремонтно-механической службе, включая мероприятия по борьбе с коррозией.

Техническое обслуживание. Техническое обслуживание — это комплекс работ, необходимых для поддержания работоспособности оборудования между ремонтами.

Роль технического обслуживания (ТО) в увеличении ресурса оборудования очень велика. Анализ статистических данных показывает, что в 50 % случаев отказ оборудования происходит из-за некачественного технического обслуживания.

Регламентированное ТО предусмотрено нормативно-технической документацией; его выполняют с периодичностью и в объеме, установленными этой документацией, независимо от технического состояния оборудования в момент начала ТО. К такой документации относятся: «Система технического обслуживания и ремонта оборудования предприятий химической промышленности» и «Инструкции по эксплуатации» или «Инструкции по техническому обслуживанию», содержание которых должно соответствовать ГОСТ 2.601—68 (ЕСКД. Эксплуатационные документы).

Техническое обслуживание осуществляется эксплуатационным (машинистами, аппаратчиками, операторами и др.) и обслуживающим (дежурными слесарями и электриками, помощниками мастеров и др.) персоналом производственного цеха в соответствии

с действующими на предприятиях правилами технической эксплуатации, регламентами и инструкциями по рабочим местам и технике безопасности.

В зависимости от характера и объема проводимых работ различают ежедневное и периодическое ТО.

Ежедневное ТО является основным и решающим профилактическим мероприятием, предназначенным для обеспечения надежной работы оборудования между ремонтами. Ежедневное ТО проводят, как правило, без остановки технологического процесса. В объем ежедневного ТО входят следующие основные работы: обтирка, чистка, регулярный наружный осмотр, выявление всех неисправностей, смазывание, подтяжка сальников, проверка состояния масляных и охлаждающих систем подшипников, наблюдение за состоянием крепежных деталей, соединений и их подтяжка, проверка исправности ограждающих устройств и заземления, устранение мелких дефектов, частичное регулирование и др.

Все обнаруженные неисправности в работе оборудования необходимо устранять в возможно короткие сроки и фиксировать в сменном журнале. Страницы журнала должны быть пронумерованы, записи в нем должны быть четкими и разборчивыми. Сменный журнал по учету выявленных дефектов и работ ежедневного ТО является первичным документом, отражающим техническое состояние и работоспособность действующего оборудования, и служит для контроля работы дежурного ремонтного персонала.

Периодическое ТО проводят через установленные в эксплуатационной документации интервалы времени. Его выполняют либо во время планово-периодической остановки оборудования (для оборудования химических производств с непрерывным технологическим процессом), либо в период нахождения оборудования в резерве или в нерабочий период. Необходимость, периодичность и продолжительность остановки оборудования определяются в зависимости от характера технологического процесса и возможности безопасного проведения работ с учетом данных статистики отказов оборудования. В выполнении периодического ТО наряду с ремонтным персоналом технологического цеха может участвовать ремонтный персонал централизованного ремонтного подразделения.

Основное назначение периодического ТО — устранение неисправностей и дефектов, которые не могут быть обнаружены или устранены в период работы оборудования. Главный метод ТО — осмотр, во время которого определяют техническое состояние наиболее ответственных узлов и деталей оборудования, а также уточняют объем предстоящего ремонта. Типовой перечень работ, подлежащих выполнению ремонтным персоналом во время периодического ТО, составляют в виде приложения к ремонтному журналу.

Правильно выбранная система ТО позволяет своевременно смазывать машины, предупреждать их изнашивание, аварии,

повышать надежность оборудования, уменьшать затраты времени, расход запчастей и материалов на обслуживание.

Структура организации и управления ремонтно-механических служб химических предприятий. На химических предприятиях приняты три формы организации ремонтных работ: децентрализованная, смешанная, централизованная. Они различаются степенью концентрации работ в ремонтно-механическом цехе (РМЦ).

При децентрализованной форме ремонтные работы всех видов осуществляются ремонтными участками технологических цехов под руководством механиков этих цехов. Ремонтно-механический цех, подчиняющийся главному механику, выполняет только капитальный ремонт сложного оборудования или изготавливает сложные запасные части и нестандартное оборудование. Межремонтное техническое обслуживание проводят дежурные слесари технологического цеха совместно с эксплуатационным персоналом.

Недостатки децентрализованной формы организации ремонтных работ: распыление сил и средств ремонтных служб; низкий уровень специализации и механизации ремонтных работ; низкое качество и высокая стоимость ремонтных работ; использование ремонтного персонала на работах, не относящихся к ремонту.

При смешанной организации ремонтных работ техническое обслуживание и текущий ремонт оборудования выполняются ремонтными отделениями (участками) технологических цехов, а капитальный ремонт — ремонтно-механическим цехом. Такая форма организации целесообразна для средних и крупных предприятий и широко распространена на химических заводах. Следует отметить, что этой системе присущи многие недостатки децентрализованной формы. Однако она имеет некоторые преимущества по сравнению с децентрализованной формой: техническое руководство и контроль за работой цеховых ремонтных участков со стороны главного механика имеют более конкретный характер, появляются более широкие возможности для специализации и механизации ремонтных работ.

Наиболее эффективная централизованная форма организации ремонтов, при которой все виды ремонта выполняются специализированными ремонтными цехами и участками, находящимися в составе отдела главного механика (ОГМ) завода, и специализированными ремонтными трестами и заводами.

Централизованная форма имеет ряд преимуществ по сравнению со смешанной и децентрализованной: выше уровень специализации и механизации ремонтных работ; шире возможности для внедрения передовых методов ремонта; лучше оснащенность ремонтной службы современным оборудованием и инструментом; выше уровень организации производства, так как механики освобождены от снабженческих функций и оформления заказов; меньше потери рабочего времени ремонтного персонала по организационно-техническим причинам.

Однако при централизованной форме снижается оперативность в аварийных или других непредвиденных ситуациях, когда для выполнения ремонтных работ необходимы предварительные контакты работников технологического цеха с работниками РМЦ; при смешанной форме все аварийные неполадки оперативно устраняются работниками цеховых ремонтных участков.

При централизованной форме организации ремонтной службы предприятия все цеховые ремонтные службы административно подчинены главному механику завода непосредственно или через начальника РМЦ. При децентрализованной форме цеховые ремонтные службы административно подчинены начальникам соответствующих цехов и лишь функционально — главному механику завода. При смешанной форме организации ремонтного производства наряду с цеховыми ремонтными службами, административно подчиненными начальникам цехов, имеются ремонтные подразделения, административно подчиненные главному механику завода.

Положение о главном механике и отделе главного механика. Главный механик предприятия химической промышленности подчиняется главному инженеру и осуществляет административно-техническое руководство (непосредственно или через работников отдела главного механика и механиков производственных цехов) эксплуатацией и всеми видами ремонта технологического и механического оборудования (кроме энергетического и наземных транспортных средств), а также технологических сооружений, установок и коммуникаций, подъемно-транспортных средств. На предприятиях, где отсутствует должность главного энергетика, главный механик руководит также эксплуатацией и ремонтом энергетического оборудования.

Главному механику подчинены: отдел главного механика; ремонтно-механический и антикоррозионный цехи (мастерские); службы технадзора, надежности оборудования, а также вентиляционного хозяйства; конструкторское бюро. Цеховые ремонтные базы и механики технологических цехов, подчиняющиеся начальнику цеха, в техническом отношении подчиняются также главному механику. Все указания главного механика по вопросам эксплуатации оборудования, зданий и сооружений, ремонта и техники безопасности при ремонте обязательны для выполнения всеми цехами и отделами предприятия.

На главного механика и руководимый им отдел возложены следующие основные функции: технический надзор за состоянием оборудования; составление графиков планово-предупредительных ремонтов оборудования; нормирование; регулирование; контроль; организация учета.

Первая функция заключается в систематическом контроле состояния всего оборудования, выполнения правил и инструкций по ремонту оборудования, проведения соответствующих проверок и испытаний. Сюда же относятся: участие в приемке вводимого

в эксплуатацию оборудования; участие в выявлении причин возникновения аварий и разработке мероприятий по их ликвидации; изучение причин преждевременного изнашивания оборудования.

Вторая функция включает: составление годовых общезаводских графиков ремонта оборудования, титульных списков капитальных ремонтов основных фондов предприятия; обеспечение проведения ППР оборудования необходимыми чертежами, запасными частями, изготавливаемыми в РМЦ, материалами, арматурой и контрольно-измерительными приборами; определение трудовых и материальных ресурсов для выполнения плана ремонтных работ; разработка технологии ремонта и проектов организации ремонтных работ; планирование и внедрение мероприятий по совершенствованию организации и управления ремонтом, снижению его себестоимости, мероприятий по борьбе с коррозией, экономии цветных и черных металлов и других дефицитных материалов.

Нормирование заключается в систематическом учете времени непрерывной работы и простоя в ремонте оборудования и цехов в целом, разработке новых ремонтных нормативов и их корректировке в соответствии с изменениями условий производства, нормировании трудовых затрат на ремонт.

Регулирование включает корректировку и изменение графиков выполнения ремонтных работ, сроков поставки запасных частей и материалов, изменение плановых заданий ремонтным подразделениям.

Функция контроля распространяется на: выполнение графиков ППР оборудования РМЦ, подрядными организациями и цеховыми ремонтными участками; качество ремонта; выполнение правил техники безопасности при проведении ремонтных работ; правильность расходования запасных частей и материалов; проведение в установленные сроки испытаний аппаратов и сосудов, работающих под давлением, грузоподъемных механизмов; правильность и целесообразность расходования средств на ремонт оборудования, зданий и сооружений, правильность загрузки ремонтных цехов и служб цеховых механиков.

В функции отдела главного механика (ОГМ) входят также организация постоянного учета и хранения резервного оборудования, запорной арматуры и запчастей на складах и в цехах, учет расхода трудовых и материальных ресурсов на выполнение ремонта.

Главный механик предприятия имеет право: контролировать деятельность производственных цехов по вопросам эксплуатации и ремонта оборудования; запрещать работу оборудования в случаях грубого нарушения правил технической эксплуатации, неподготовленности обслуживающего персонала, возможности аварии или несчастного случая; не допускать в эксплуатацию вновь смонтированное оборудование, не обеспеченное соответствующей технической документацией и инструкциями; распоряжаться фон-

дами и ассигнованиями на ремонт оборудования; производить подбор и расстановку работников ОГМ и подчиненных ему цехов; представлять руководству предприятия предложения о наложении взысканий или снижении премий инженерно-техническому персоналу ОГМ и производственных цехов за неправильную эксплуатацию и плохое состояние оборудования, а также за нарушения графиков ППР оборудования.

Структура и штаты ОГМ утверждаются директором предприятия применительно к типовым структурам и нормативам численности, утвержденным вышестоящей организацией, исходя из условий и особенностей производства.

В своей работе главный механик руководствуется распоряжениями директора и главного инженера предприятия, а также указаниями вышестоящих организаций управления химической промышленности.

Ремонтно-механический цех (РМЦ) выполняет централизованный ремонт оборудования всего завода, а также изготавливает запасные части и сменные детали. Концентрация производства запасных частей и сменных деталей в ремонтно-механических цехах предприятия позволяет исключить выполнение нерациональных станочных и слесарных работ на ремонтных участках технологических цехов. При этом создаются предпосылки для организации специализированных участков внутри РМЦ и соответствующего снижения себестоимости изготавливаемых деталей. В результате не только повышается эффективность ремонтного производства, но и создаются условия для широкого внедрения передовых методов труда и снижения себестоимости ремонта в целом.

Исходным элементом системы планирования потребности в запасных частях являются заявки производственных цехов и обоснование потребности в оборудовании и запасных частях для ремонтно-эксплуатационных нужд, а также заявки на оборудование вместо изношенного и морально устаревшего. При составлении заявок на запасные части и материалы исходят из фактически установленных годовых, квартальных и месячных расходов.

Качественное и своевременное проведение ремонтов во многом зависит также от надлежащего хранения и учета запасных частей. В наибольшей степени этим требованиям отвечает хранение запасных частей и оборудования на специализированных складах, оснащенных необходимыми средствами для проведения погрузо-разгрузочных и складских работ. Для контроля и учета запасных частей на складе имеются журналы или карточки учета. Получают распространение контроль и учет наличия запасных частей на складе с использованием ЭВМ. При этом запасные части кодируют на перфокартах, в которых цифровые обозначения соответствуют цеху, в котором установлен аппарат с данной запасной частью, аппарату, узлу и непосредственно запасной части, а также месту расположения ее на складе. После обработки на ЭВМ получают данные об одинаковых деталях, установленных

в различных аппаратах разных цехов. Это позволяет установить минимально необходимое число одинаковых деталей, хранящихся на складе, ликвидировать их излишки в цехах и обеспечить запасными частями все оборудование завода.

РМЦ административно подчиняется директору предприятия, а технически — главному механику. Организационная структура цеха зависит от масштаба ремонтной службы (численности рабочих РМЦ), номенклатуры технологического оборудования, количества съемного и несъемного оборудования в основных цехах, трудоемкости и периодичности ремонта оборудования различных видов, возможностей межзаводской кооперации по изготовлению запасных частей и др.

РМЦ включает следующие специализированные участки: ремонтно-строительный, ремонта основного технологического оборудования, ремонта вспомогательного технологического оборудования, слесарно-механический, слесарно-сварочный, кузнечно-литейный, гальванический, подготовки производства, инструментальный и др.

Помимо основных подразделений в состав РМЦ входят и подчиняются начальнику цеха: инженер ОТК, планово-экономическое бюро или старший экономист по планированию (при отсутствии планово-экономического бюро), бюро нормирования труда или старший нормировщик, экономист по труду, механик цеха, инженеры-конструкторы и инженеры-технологи, делопроизводитель или секретарь-машинистка, завхоз, табельщик.

Основные направления совершенствования организации ремонтной службы на предприятиях: повышение уровня внутризаводской централизации и специализации ремонтной службы; выполнение ремонтных работ с гарантированным уровнем качества, удостоверяемым гарантийным паспортом; повышение технической вооруженности ремонтного персонала с широким использованием средств механизации, специализированных инструментов и приспособлений при выполнении ремонтных работ; внедрение прогрессивных методов ремонта и использование ЭВМ при планировании ремонтов и учете материалов и запчастей.

Руководитель ремонтного подразделения (обычно мастер РМЦ) принимает подготовленное к текущему ремонту оборудование от начальника смены (установки) технологического цеха. По окончании текущего ремонта руководитель ремонтных работ сдает оборудование начальнику смены с записью в ремонтном журнале.

Оборудование, подготовленное к капитальному ремонту, руководитель ремонтных работ принимает от начальника цеха или от лица, им назначенного, с составлением акта по установленной форме. Капитально отремонтированное оборудование после испытаний и обкатки принимается начальником цеха или назначенным им лицом с составлением акта.

Ремонтные работы в РМЦ планируют с учетом и оценкой данных, полученных при контроле за работающим оборудованием.

На основании установленных нормативов руководитель ремонтного подразделения совместно с начальником технологического цеха составляют проект годового графика планово-периодического ремонта оборудования, который представляют на согласование в отделы главного механика, главного энергетика, и в производственно-технический отдел. После согласования с руководителями инженерных служб предприятия график утверждается главным инженером до 15 ноября года, предшествующего планируемому, и является основным документом для проведения ремонтов. На основании утвержденных годовых графиков ремонта с учетом фактического использования оборудования за прошедший период составляют месячный план-график-отчет ремонта оборудования цеха, утверждаемый главным механиком предприятия и начальником ПТО не позднее 25-го числа месяца, предшествующего планируемому.

§ 6.5. РЕМОНТ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ремонт колонных аппаратов. Основным видом износа колонной массообменной аппаратуры является забивка колонны отложениями и коррозия ее элементов. Содержание операций и их число при разборке колонны зависят от ее диаметра. Царговые колонны разбирают полностью. У цельносварных колонн демонтируют только внутренние устройства.

При подготовке колонного аппарата к ремонту следует: отключить его от газовых магистралей и электросети и установить заглушки на фланцевых соединениях штуцеров; продуть аппарат азотом, чтобы концентрация вредных и горючих веществ не превышала предельно допустимых санитарных норм; демонтировать коммуникации ввода газа в колонну; разъединить фланцевые соединения, демонтировать находящееся внутри колонны оборудование. Далее необходимо выполнить тщательный наружный и внутренний осмотр корпуса колонны для выявления возможных дефектов, образовавшихся в процессе эксплуатации (механические повреждения, трещины, коррозия и др.) Следует обращать особое внимание на состояние сварных швов и уплотнительных поверхностей корпуса и крышки.

При наличии повреждений наружной поверхности (вмятин, коррозионных разрушений и др.) необходимо удалить дефектный металл шлифованием. Надежность ликвидации поверхностных дефектов контролируют магнитной или ультразвуковой дефектоскопией. Допускается глубина повреждения в пределах 10—20 % толщины стенки в зависимости от размеров повреждения.

Для уплотнительных поверхностей корпусов, крышек и обтюраторов необходимо контролировать качество поверхности (забоины, риски, следы коррозии, трещины) и точность геометрической формы; при необходимости следует использовать методы

механической обработки. Запрещается устранять дефекты на уплотнительных поверхностях зачеканкой и установкой ввертышей. Все уплотнительные поверхности следует контролировать магнитной или ультразвуковой дефектоскопией на отсутствие трещин.

Тарелки разбирают внутри колонны, выносят через люки на обслуживающие площадки и транспортируют для чистки и ремонта. Иногда проводят чистку тарелок внутри аппарата. Для монтажа тарелок в верхней части колонны устанавливают поворотный кран-укосину, который через систему направляющих роликов и блоков соединен с лебедкой, расположенной у основания колонны.

При ремонте внутренние устройства колонн очищают от грязи, кокса и других отложений. Твердую и тестообразную массу удаляют лопаточками или скребками, кокс — пневматическими отбойными молотками. Операции, связанные с разборкой закоксованных тарелок и отбойников, — наиболее трудоемки; эти операции осуществляют с помощью талей, подвешиваемых внутри колонны на опорных балках.

Определение износа и отбраковку внутренних устройств выполняют в соответствии с действующими методиками и нормами. Изношенные детали, а иногда и целые узлы заменяют.

При ремонте и обслуживании насадочных колонн основное внимание уделяют очистке внутренних устройств аппарата, его корпуса и замене насадки. При помощи лебедки, бадьи и крана-укосины на верх колонны (или к любому люку) подают новую насадку и удаляют старую. Для загрузки и выгрузки насадки обычно используют бадьи с открывающимся днищем и сменные переносные лотки.

Изношенные штуцера и люки вырезают и заменяют новыми с обязательной установкой укрепляющих колец. При каждом ремонте измеряют фактическую толщину стенки корпуса колонного аппарата.

Корпус цельносварных колонн демонтируют при необходимости замены части корпуса или днища. Нижнюю часть корпуса или днища можно заменять и без демонтажа колонны. Для этого к верхней части колонны крепят опорную площадку, под которую подводят домкраты. Нижнюю часть колонны отрезают и удаляют после подъема верхней части на высоту 100 мм. После подведения новой нижней части верхнюю часть опускают и сваривают с нижней. При замене промежуточных обечаек и днищ используют мачты.

После ремонта колонны ее подвергают гидравлическим или пневматическим испытаниям.

Ремонт теплообменных аппаратов, печей, сушилок. Ремонт теплообменных аппаратов включает: подготовительные работы; разборку; выявление и устранение дефектов; чистку труб и корпуса; частичную замену труб; смену уплотнений разборных со-

единений; ремонт футеровки и защитных покрытий деталей с частичной заменой; сборку и испытания аппарата на прочность и плотность.

При подготовке теплообменника к ремонту следует: избыточное давление снизить до атмосферного, удалить из аппарата продукт и установить заглушки на всех коммуникациях; продуть аппарат азотом или водяным паром с последующей промывкой водой и продувкой воздухом до получения удовлетворительных анализов на содержание ядовитых и взрывоопасных веществ.

Наиболее трудоемкие операции при ремонте теплообменников: монтаж и демонтаж резьбовых соединений, очистка труб и корпуса; извлечение трубных пучков, замена труб и установка трубных пучков; испытания.

Для снижения трудоемкости работ по монтажу и демонтажу резьбовых соединений применяют гайковерты с пневматическим и гидравлическим приводом. Для извлечения трубных пучков из теплообменников с плавающей головкой можно использовать лебедки и домкраты, а также приспособления для захвата трубного пучка (лебедка или полиспаст) в сочетании с грузоподъемными механизмами (автомобильный кран, таль с передвижным монорельсом или тележка).

Трубы и корпус очищают от отложений химическими, абразивными и специальными методами.

Химическую очистку выполняют без разборки теплообменника с применением 5—15 %-ного раствора соляной кислоты или углеродородных растворителей, разрыхляющих твердый осадок, который затем смывают водой.

Абразивные методы очистки подразделяют на механический, гидропневматический, гидромеханический (струей воды высокого давления) и дробеструйный. Для механической очистки используют шомполы (длинный стальной прут с наконечником — ершом), сверла, щетки, шарошки, буры. Гидропневматическую очистку выполняют водой под давлением 0,5—0,6 МПа и сжатым воздухом под давлением 0,7—0,8 МПа, одновременно подаваемыми в загрязненную трубу. Под действием движущихся с большой скоростью воды и воздуха отложения на стенках труб разрушаются и смываются. Гидромеханическую очистку выполняют с помощью сопел, установленных на полых штангах. В сопла подается вода под давлением 15—70 МПа насосом высокого давления. Этот способ обеспечивает высокую степень очистки при небольших затратах времени на чистку. Сущность дробеструйной очистки заключается в обработке очищаемой поверхности смесью стальной дроби с воздухом или водой, подаваемыми с большой скоростью. Дробь вводится в смесь эжекционными насосами.

К специальным методам очистки относятся ультразвуковой. Твердые отложения разрушаются под действием ультразвуковых колебаний, которые создаются в воде специальными вибраторами с помощью ультразвуковых преобразователей.

Замена труб в трубной решетке включает удаление дефектных труб, правку вмятин в трубах, подготовку новых труб (резку в размер и зачистку концов под развальцовку или сварку), соединение труб в пучки и крепление их в решетках.

Ремонт теплообменных аппаратов завершают гидравлическими испытаниями, причем сначала испытывают межтрубное пространство, а затем трубное. Пробное давление обычно указано в паспорте аппарата. При отсутствии в паспорте этого параметра корпус аппарата (межтрубное пространство) испытывают как сосуд или аппарат, а трубное пространство — при удвоенном рабочем давлении.

Ремонт печей очень трудоемок. Это объясняется несовершенством конструкций трубчатых печей и тяжелыми условиями их работы (высокая температура, жесткость режима и др.). Особенно трудоемок ремонт футеровки печей, выполненной из огнеупорного кирпича.

Подготовка печи к ремонту включает: остановку печи; продувку трубчатого змеевика водяным паром; сушку кокса, отложившегося на внутренних поверхностях труб; охлаждение печи до необходимой температуры.

Внутренние поверхности трубчатых змеевиков чистят механическим способом или выжиганием отложившегося кокса. При использовании механического способа кокс сначала подсушивают водяным паром, а затем удаляют с внутренних поверхностей труб бойками из чугуна повышенной прочности или шарошками. Бойки и шарошки получают вращение от пневмотурбинки, которая свободно проходит внутри очищаемой трубы. Боек или шарошка соединены с валиком ротора пневмотурбинки через шарнир. Отделяемый кокс в виде пыли и небольших кусков выдувается из трубы отработанным воздухом, выходящим из пневмотурбинки. Воздух в турбинку подают по пневмошлангу.

При чистке труб выжиганием кокса в змеевик подают водяной пар. Одновременно зажигают несколько форсунок и доводят температуру топочных газов над перевальной стеной до 450 °С. При этой температуре в змеевик подают воздух под давлением не менее 0,4 МПа и затем, регулируя подачу топлива в форсунки, повышают температуру до 580—600 °С. Процесс выжигания кокса контролируют анализом выходящих из змеевика газов на содержание диоксида углерода, которое не должно превышать 10—18 %. Уменьшение концентрации диоксида углерода до 0,2—0,25 % свидетельствует об окончании процесса выжигания кокса.

Наружные поверхности труб очищают от отложений обдувкой воздухом или с помощью скребков, закрепленных на шестах.

Дефектные трубы змеевика удаляют газокислородной резкой. До установки новой трубы гнезда двойника и концы труб должны быть зачищены от ржавчины и отложений до металлического блеска. Трубы крепят развальцовкой или сваркой.

После ремонта, связанного с заменой труб, двойников, сваркой, змеевик печи должен быть подвергнут гидравлическим испытаниям.

При ремонте барабанных печей и сушилок необходимо контролировать состояние внутренних устройств барабана. При их изнашивании нарушается температурный режим процесса сушки, а также увеличивается износ стенок корпуса от трения проходящего материала. Для нормальной работы барабанной сушилки особенно важно хорошее состояние уплотнений горячего и холодного концов, а также отсутствие подсоса холодного воздуха через газоходы и лотки для выгрузки высушиваемого материала.

Графиком планово-предупредительного ремонта барабанных сушилок предусматривают текущие ремонты — через 4320 ч работы, капитальные ремонты — через 17 280 ч. Ремонтный цикл включает три текущих и один капитальный ремонты.

Основные демонтируемые или сменные детали — обечайки, опорные ролики, бандажи, зубчатые венцы и шестерни.

Ресурс обечаек сушильных аппаратов практически очень велик. Причины деформирования или разрушения обечаек: прогиб барабана вследствие неправильной установки роликов или их неравномерного изнашивания; оголение металла обечаек вследствие местных повреждений футеровки, что приводит к перегреву, короблению и прогоранию стенки. Обечайки восстанавливают по обычной для цилиндрических аппаратов технологии. Поврежденный или деформированный участок обечайки удаляют газокислородной резкой, на вырезанное место ставят предварительно изогнутую по шаблону заплату и присоединяют стыковой сваркой. При наличии значительных повреждений дефектную часть обечайки вырезают и заменяют.

Опорные ролики изготавливают из стали с несколько меньшей твердостью, чем сталь, из которой выполнены бандажи. Это обусловлено тем, что сменить или восстановить ролик легче, чем бандаж. Поверхности роликов должны быть хорошо обработаны.

В процессе работы бандажи изнашиваются и форма их искажается. Поверхности бандажей обтачивают на месте. Если степень износа так велика, что обтачивать бандаж нельзя, его заменяют. Эта операция очень трудоемка: снимают обечайку барабана, смежную с бандажом, срезают или расклепывают старый бандаж, ставят новый, затем обечайку вместе с бандажом устанавливают на место и заваривают.

После ремонта проверяют отклонения от прямолинейности и наклона оси барабана, равномерность опирания всех бандажей на свои роликоопоры, отклонение от соосности и герметичность уплотнительных колец.

Ремонт насосов, центрифуг, фильтров. Ремонт центробежных насосов включает следующие мероприятия:

при техническом обслуживании — проверка осевого разбега ротора; очистка и промывка картеров подшипников, смена масла,

промывка масляных трубопроводов; ревизия сальниковой набивки, промывка систем охлаждения и смазки и смена смазочного материала; проверка состояния защитных гильз и полумуфт; при текущем ремонте — полная разборка с проверкой и регулировкой зазоров в подшипниках скольжения, проверка радиального и торцового биения ротора и его статическая балансировка; ревизия и замена деталей торцовых уплотнений; осмотр и восстановление резьбовых соединений насоса, шпоночных канавок и резьб на валу;

при капитальном ремонте — ревизия всех сборочных единиц и деталей; замена рабочих колес, валов, уплотняющих колец корпуса, распорных втулок.

Наиболее вероятные дефекты корпусов насосов — коррозионный износ отдельных мест; дефекты отливки корпуса, выявленные в процессе эксплуатации; износ посадочных мест; забоины, риски на плоскости разъема. Износ отдельных мест корпуса устраняют наплавкой металла с помощью электросварки, цапаины и риски — зачисткой шабером или заваркой. Значительно изношенные уплотнительные поверхности протачивают или фрезеруют. Допускается расточка изношенных мест и запрессовка втулок с последующей расточкой до номинальных размеров.

Рабочие колеса подвержены наиболее интенсивному изнашиванию в результате действия механического трения, эрозийного и коррозионного действия перекачиваемой среды, кавитационного разрушения и ряда других факторов. При сильном кавитационном разрушении рабочего колеса (сквозные отверстия, полное или частичное разрушение лопастей) его заменяют. Визуально выявляются задиры и забоины, которые необходимо зачистить. Поврежденные места восстанавливают наплавкой с последующей проточкой. При ослаблении посадки рабочих колес (допуск $\pm 0,01$ мм) их следует заменить.

Наиболее вероятные дефекты валов: износ шеек вала; трещины; износ резьбы и шпоночных пазов; искривление вала. Износ шеек вала не должен превышать 2 % номинального диаметра. Овальность или конусность шеек вала под подшипники скольжения должны быть не более 0,004 мм.

При искривлении и повышенном биении вала его выправляют на специальном приспособлении или токарном станке. При значительных прогибах вала правку выполняют термическим способом. Задиры и риски на валу глубиной до 0,2 мм должны быть зашлифованы; при больших задирах поверхности вала следует проточить. Поврежденную резьбу на валу восстанавливают резцом. Если повреждения значительны, то вал заменяют или участок вала протачивают, затем наплавляют, обрабатывают и на нем нарезают новую резьбу. При проверке подшипников качения следует учитывать, что при вращении подшипника должен быть слышен глухой шипящий звук; резкий металлический и дребезжащий звук свидетельствует о повреждении.

После сборки насоса, которую выполняют в порядке, обратном разборке, проводят испытания и приемку насоса из ремонта.

При текущем ремонте центрифуг чистят барабан, регулируют зазор между корпусом барабана и ножами, проверяют набивку сальников, смазочный материал подшипников шнека, заменяют масло в подшипниках барабана, проверяют отклонение от соосности валов электродвигателя и редуктора. При капитальном ремонте кроме указанных работ заменяют сопла, ножи, манжеты гидросистемы, пальцы и втулки муфты привода, подшипника барабана и редуктора привода, контролируют тормоз барабана с заменой тормозной ленты.

Значительный износ корпуса барабана и других деталей ротора центрифуги, а также наличие трещин на них приводят к нарушению балансировки и появлению заметной вибрации. Вибрирующую центрифугу останавливают и не запускают в работу до тех пор, пока не будет обнаружена и устранена причина вибрации.

Часто изнашиваются тормозной обод на барабане и тормозная лента. Тормозной обод обрабатывают на станке, причем после каждого ремонта ротор подвергают статической и динамической балансировкам. Изношенную тормозную ленту заменяют. После установки новой ленты регулируют натяжение пружин для обеспечения необходимой скорости торможения ротора. Надежность крепления тормоза на станине и кожухе, а также тормозных пружин регулярно проверяют; дефекты ликвидируют.

Отремонтированную центрифугу сдают в эксплуатацию после пробного пуска, при котором контролируют устойчивость вращения ротора, уровень шума, температуру подшипников, работу системы блокировки электродвигателя, тормоза и механизма запираания крышки.

При текущем ремонте вакуум-фильтров промывают масленки и маслопроводы, заменяют масло в редукторе, проверяют состояние полумуфт. При капитальном ремонте кроме работ текущего ремонта снимают крышки фильтра, заменяют фильтровальную ткань, проволоку и сетки, ремонтируют шнек или нож, выполняют проточку и шабрение шайб распределительной головки, ремонт подшипников барабана, ревизию и (при необходимости) замену зубчатых колес и червяков редуктора и подшипников качения.

При текущем ремонте дисковых фильтров заменяют резиновые сальники корпуса фильтра, фильтровальную ткань, производят чеканку и пайку дисков, проверяют состояние поршня и штока гидравлической системы. При капитальном ремонте кроме работ текущего ремонта проверяют и ремонтируют корпус, поршень, шток, гидроподъемник, заменяют вентили, штуцера, кронштейны, корыто, изношенные зубчатые колеса. Проверяют отклонение от горизонтальности корпуса фильтра.

При текущем ремонте рамных фильтр-прессов заменяют фильтровальную ткань, сальники, кожаные манжеты поршня гидравлического зажима, масло в редукторе привода, проверяют центровку электродвигателя с редуктором. При капитальном ремонте кроме работ текущего ремонта выполняют ревизию и замену плит, рам, плунжеров, ремонт или замену гидравлического зажима, ревизию гидронасоса с заменой изношенных деталей.

При текущем ремонте электрофильтров проверяют состояние изоляторной коробки, изоляторов и шин, осматривают механизм встряхивания осадительных электродов. При капитальном ремонте кроме того заменяют газораспределительную решетку и механизм встряхивания, коронирующие электроды и термоизоляцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. М.: Химия, 1978. 277 с.
2. Барановский Н. В., Коваленко Л. М., Ястребенецкий А. Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. М.: Машиностроение, 1973. 288 с.
3. Вихман Г. А., Круглов С. А. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов. М.: Машиностроение, 1978. 328 с.
4. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1981. 812 с.
5. Гуревич Д. Ф. Трубопроводная арматура: Справ. пособие. Л.: Машиностроение. 1981. 368 с.
6. Ермаков В. И., Шенин В. С. Ремонт и монтаж химического оборудования. Л.: Химия, 1981. 368 с.
7. Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрябин Г. Н. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Л.: Химия, 1982. 255 с.
8. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 432 с.
9. Маньковский О. Н., Толчинский А. Р., Александров М. В. Теплообменная аппаратура химических производств: Инженерные методы расчета. Л.: Химия, 1976. 367 с.
10. Матвеев В. В. Примеры расчета такелажной оснастки. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Стройиздат, 1979. 239 с.
11. Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи/И. В. Доманский, В. И. Исаков, Г. М. Островский и др.; Под общ. ред. В. Н. Соколова. Л.: Машиностроение, 1982. 384 с.
12. Машины и аппараты химических производств/И. И. Чернобыльский, А. Г. Бондарь, Б. А. Гаевский и др.; Под ред. И. И. Чернобыльского, 3-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 456 с.
13. Михаил Р., Кырлогану К. Реакторы в химической промышленности: Пер. с румынского; Под ред. П. Г. Романкова и Н. Н. Смирнова. Л.: Химия, 1968. 388 с.
14. Моргулис М. Л., Мазус М. Г., Мандрико А. С., Биргер М. И. Рукавные фильтры. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.
15. Мустафев А. М., Гутман Б. М. Гидроциклоны в нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Недра, 1981. 260 с.

16. Муштаев В. И., Ульянов В. М., Тимошин А. С. Сушка в условиях пневмотранспорта. М.: Химия, 1984. 232 с.
17. Основы жидкостной экстракции/Под редакцией Г. А. Ягодина. М.: Химия, 1981. 400 с.
18. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др.; Под ред. Ю. И. Дытнерского. М.: Химия, 1983. 272 с.
19. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи/М. Ф. Михалев, Н. П. Третьяков, И. А. Мильченко и др.; Под общ. ред. М. Ф. Михалева. Л.: Машиностроение.
20. Рахмилевич З. З., Радзин И. М., Фарамазов С. А.: Справочник механика химических и нефтехимических производств. М.: Химия, 1985. 592 с.
21. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка во взвешенном состоянии. Л.: Химия, 1979. 272 с.
22. Соколов В. Н., Доманский И. В. Газожидкостные реакторы. Л.: Машиностроение, 1976. 216 с.
23. Соколов В. И. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств. М.: Машиностроение, 1983. 447 с.
24. Соколов В. И. Центрифугирование. М.: Химия, 1976. 407 с.
25. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. Л.: Химия, 1972. 248 с.
26. Фарамазов С. А. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация. М.: Химия, 1984. 328 с.
27. Фарамазов С. А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов. 2-е изд. перераб. М.: Химия, 1980. 312 с.
28. Холланд Ф., Чапман Ф. Химические реакторы и смесители для жидкофазных процессов: Пер. с англ./Под ред. Ю. М. Жорова. М.: Химия, 1974. 208 с.
29. Шкоропад Д. Е., Новиков О. П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. М.: Химия, 1987. 255 с.

А

Аппараты для проведения реакций жидкостных 244
 — газовых на твердом катализаторе 285
 — между газом и твердым веществом 276
 Аппараты колонные — Расчет на прочность и устойчивость 109
 Аппараты массообменные насадочные 95
 — оросители 103—104
 — тарелки перераспределительные 102
 — тарелки распределительные 105
 Аппараты массообменные тарельчатые 69
 Аппараты реакционные 243
 Аппараты колонные тарельчатые 69
 — расчет автоматизированный — См. *Расчет автоматизированный колонн ректификационных*
 — рекомендации по выбору 88
 Аппараты теплообменные блочные 64
 — классификация 5
 — кожухотрубчатые — См. *Теплообменники кожухотрубчатые*
 — монтаж 339
 — назначение 5
 — рекомендации по выбору 6, 7
 — «труба в трубе» — См. *Теплообменники «труба в трубе»*
 Аппараты экстракционные колонные 115—119
 — центробежные 120—124
 Арматура трубопроводная 303
 — выбор 311
 — запорная 304
 — классификация 303
 — предохранительная, защитная 310
 — регулирующая 308
 — фазоразделительная 309
 Аэрозоли 225

В

Вакуум-фильтр барабанный 173
 — работающий под давлением 190
 — расчет на прочность обечайки 177
 — расчет на прочность торцевой крышки 180
 — ячеиковый 174
 Вакуум-фильтр дисковый 184
 — ленточный 186
 — тарельчатый 188
 Вали жесткие 218
 — гибкие 219
 Варианты крепления трубных решеток к кожуху 9
 — размещения плавающей головки в кожухе 17
 — уплотнения пространства между перегородкой и кожухом 14
 Вентиль запорный угловой 305—306
 — мембранный 306
 Выгрузка механизированная 238

Г

Газогенератор с вертикально перемещающимся слоем 277
 Гидроциклоны 222
 — схема 223
 — типы 224
 — фактор разделения 222
 Горелки газовые панельные 266, 267

Д

Двойники печные 268
 Деформации температурные 11
 Документация проектно-техническая 316
 Документы эксплуатационные 318

З

Завихрители 227
 Задвижки 307
 Заслонки 303—308

И

Испаритель 19
Испытания оборудования гидравлические 341—343
— пневматические 343

К

Клапан пружинный 310
— регулирующий 308
— рычажно-грузовой 310
Компенсатор 12, 13, 301
— волнистый 301—302
— П-образный 301
— сальниковый 302
Конденсатоотводчик поплавковый 309
— термостатический 309
Кран пробковый 304
Краны стреловые самоходные 325
Крекинг 264
Критерий Ньютона 215

М

Мачта монтажная 325
Момент инерции динамический 221
Монтаж оборудования 321, 329
— безъякорными методами 333
— вертикальных цилиндрических аппаратов 329
— колонн тарельчатых и насадочных 336
— методом поворота вокруг шарнира 331
— методом скольжения без отрыва от земли 332
— методом скольжения с отрывом от земли 330
— методы 329
— основные операции 321
— порталами 335
— сушилок и теплообменных аппаратов 339—341

Н

Напряжения температурные — Расчет 22
Насадка 96
— выбор 100
— нерегулярная 96
— регулярная 98
— характеристики 100

О

Оборудование грузоподъемное 325
Оборудование пылеочистное 225
— выбор 236
Обслуживание техническое 347
— ежесменное 348
— периодическое 348
— регламентированное 347

Опоры трубопроводов 302
Освидетельствование 322
Отбойники 107, 108

П

Период межремонтный 346
Перспективная техника — См. *Техника перспективная*
Печи 264
— барабанные вращающиеся 279—281
— полочные 278
— трубчатые 265, 266
— шахтные 276
Пирролиз 265
Портал 327
Поставка оборудования 317
Прецессия 220
Приемка фундаментов 319
Приспособления сборочные 321
Проект организации строительства 317
Проект производства работ 317
Пылеуловитель 234, 235

Р

Работы пусконаладочные 344
Развальцовка 25
Расконсервация 322
Раствор коллоидный 167
Расчет деформаций трубной решетки 37
— критической угловой скорости вала центрифуги 219—222
Расчет автоматизированный колонн ректификационных 83
— теплообменников кожухотрубчатых 28
Расчет на прочность барабана сепаратора 213
— барабана центрифуги 213
— крышки торцевой вакуум-фильтра барабанного 180
— обечайки вакуум-фильтра барабанного 177
— сушилок 150—158
— элементов теплообменников кожухотрубчатых 31
— — — — упрощенный 34
— — — — уточненный 41
Расчет сосудов с рубашками, сопряженными с корпусом анкерными трубами и отбортовой 262
— U-образными 257
— цилиндрическими 261
— кинематическим методом 255
— по несущей способности 254
Реактор вытеснения (трубчатый) 243, 244
— — с выносным теплообменником 250
— с пучком двойных теплообменных

труб 250

— смешения (кубовый) 243, 244

Реакторы газожидкостные 270—275

— барботажного типа 273—274

— колонного типа насадочные 272

— колонного типа с тарелками 273

— пенные 274

— с механическим распылением жидкости 271

— с мешалкой 271

— типа газлифта 275—276

Реакторы высокого давления 290

— для полимеризации 248, 249

— каталитического крекинга 293

— низкого давления 286

— плазмохимические 295—298

— с псевдооживленным слоем 281, 292

— с ретортами 285

Реакция газожидкостная 269

— между газом и твердым веществом 270

Ремонт аппаратов колонных 354

— насосов 358

— планирование 347

— планово-предупредительный 345

— печей, сушилок 356—358

— текущий 345

— теплообменных аппаратов 354

— трудоемкость 347

— фильтров 360—361

— центрифуг 360

Решетка трубная — Расчет деформаций 37

С

Сверхцентрифуги осадительные — См. *Центрифуги*

Сдача оборудования 344

— в монтаж 318

Сепараторы 107, 108, 207

— вихревой 241

— динамика 218

— многокамерные 213

— однокамерные 208

— осветляющие 208

— разделяющие 208, 209

— расчет барабана на прочность 213

— тарельчатые 211

Скрубберы 233—235

Сосуды с рубашками

— конструкции 252, 253

— расчет кинематическим методом 255

— расчет по несущей способности 254—264

Способы разделения газов 225

— хранения оборудования 318

Суспензия 167

Сушилки 124

— автоматизированный расчет 158—

161

— барабанные 130

— выбор 145—150

— конвективные 125—142

— кондуктивные 142—145

— ленточные 126

— монтаж 339

— петлевые 129

— полочные 126

— распылительные 140

— расчет на прочность 150—158

— с псевдооживленным слоем 134

— туннельные 127

Т

Тарелки клапанные 78

— колпачковые 75

— решетчатые 84

— ситчатые 81

Теплообменники воздушного охлаждения 57, 58

— оросительные 62

— пластинчатые 47

— — схемы компоновки пластин 49

— — расчет на прочность 52

— погружные змеевиковые 63

— спиральные 53

— «труба в трубе» 60

Теплообменники кожухотрубчатые

— интенсификация процесса теплообмена 43

— параметры, размеры 7

— расчет автоматизированный 28

— расчет деформаций трубной решетки 37

— расчет на прочность 31

— расчет упрощенный 34

— расчет уточненный 41

— с неподвижными трубными решетками 8, 10

— с плавающей головкой 15

— с плавающей головкой и компенсатором 18

— с температурным компенсатором на кожухе 11

— с U-образными трубами 13

Термоизоляция аппаратов 343

Техника перспективная массообменная 161—166

— разделения неоднородных систем 238

— реакционная 294

— теплообменная 66

Транспортирование оборудования 320

Трубки Фильда 286

Трубопроводы технологические 299

— монтаж, эксплуатация 313

— приспособления для сборки 314

Трубы — Материалы 300

У

Установка оборудования на фундамент 323

Устройства массообменные контактные 73

- диапазон устойчивой работы 74
- конструкции 74—88
- производительность по паре (F -фактор), жидкости 73
- эффективность 73

Устройства массообменные секционированные 84

- перемешивающие для жидкости 245, 246

- сепарационные 107
- сепараторы, отбойники 107, 108
- теплообменные реакторов 247

Уравнение Лапласа 214

Ф

Фактор разделения 222

- гидроциклонов 222
- центрифуг, сепараторов 207

Фильтры — Выбор автоматизированный 191—194

- дисковые 238
- для жидкостей 167
- рукавные 232

Фильтр-пресс автоматизированный камерный 171

- камерный 170
- плиточно-рамный 168

Ц

Центрифуги — Динамика 218

- индекс производительности 196
- осадительные 194
- расчет барабана на прочность 213
- расчет критической скорости 219—222
- с гибким валом 219

- с жестким валом 218

— с инерционной выгрузкой осадка 204

- с пульсирующей выгрузкой осадка 197, 198

- скоростные (сверхцентрифуги) 207
- со шнековой выгрузкой осадка 201, 202

- фактор разделения 195

- фильтрующие 194

- шнековая осадительно-фильтрующая с пульсирующей выгрузкой осадка 240

Циклоны 225

- батарейные 227
- групповые 226
- компоновка 226
- прямоточный 229

Ш

Шевр монтажный 326

Э

Экстракторы — См. *Аппараты экстракционные*

Электрод коронирующий 229

Электрофильтры 229

- мокрые 230, 231
- сухие 230

Элементы аппаратов теплообменных кожухотрубчатых

- камера распределительная 21
- кожух 21
- компенсаторы 12
- перегородки, прокладки 26
- решетки трубные 23
- трубы теплообменные 23

Эффективность контактного устройства 73

Я

Якорь монтажный 328

Предисловие	3
Глава 1. Теплообменные аппараты	5
§ 1.1. Назначение, выбор и классификация теплообменных аппаратов	5
§ 1.2. Кожухотрубчатые теплообменники	7
§ 1.3. Элементы кожухотрубчатых теплообменных аппаратов	21
§ 1.4. Автоматизированный расчет кожухотрубчатых теплообменников	28
§ 1.5. Расчет на прочность элементов кожухотрубчатых теплообменных аппаратов	31
§ 1.6. Интенсификация процесса теплообмена в кожухотрубчатых теплообменниках	43
§ 1.7. Аппараты с поверхностью теплообмена, изготовленной из листового материала	47
§ 1.8. Теплообменники воздушного охлаждения, «труба в трубе», оросительные, погружные змеевиковые и блочные	57
§ 1.9. Перспективная теплообменная техника	66
Глава 2. Массообменные аппараты	69
§ 2.1. Тарельчатые массообменные аппараты для процессов ректификации и абсорбции	69
§ 2.2. Основные параметры контактных массообменных устройств	73
§ 2.3. Конструкции контактных массообменных устройств	74
§ 2.4. Рекомендации по выбору тарельчатых колонных аппаратов	88
§ 2.5. Автоматизированный расчет ректификационных колонн	89
§ 2.6. Насадочные массообменные аппараты	95
§ 2.7. Устройства для сепарации газожидкостных потоков	107
§ 2.8. Расчет колонных аппаратов на прочность и устойчивость	109
§ 2.9. Экстракционные аппараты для систем жидкость—жидкость	115
§ 2.10. Аппараты для сушки материалов	124
§ 2.11. Расчет на прочность аппаратов для сушки	150
§ 2.12. Автоматизированный расчет сушильных установок	158
§ 2.13. Перспективная массообменная техника	161
Глава 3. Машины и аппараты для разделения неоднородных систем	167
§ 3.1. Фильтры для жидкостей	167
§ 3.2. Центрифуги	194
§ 3.3. Сепараторы	207
§ 3.4. Расчет на прочность барабанов центрифуг и сепараторов	213
§ 3.5. Динамика центрифуг и сепараторов	218
§ 3.6. Гидроциклоны	222
§ 3.7. Пылеобистное оборудование	225
§ 3.8. Перспективная техника разделения неоднородных систем	238
	367

Глава 4. Реакционные аппараты	243
§ 4.1. Аппараты для жидкостных реакций	244
§ 4.2. Сосуды с рубашкой. Расчет на прочность	252
§ 4.3. Печи пиролиза и крекинга	264
§ 4.4. Аппараты для гетерогенных реакций	269
§ 4.5. Газожидкостные реакторы	270
§ 4.6. Аппараты для проведения реакций между газом и твердым веществом	276
§ 4.7. Аппараты для проведения газовых реакций на твердом катализаторе	285
§ 4.8. Перспективная реакционная техника	294
Глава 5. Технологические трубопроводы	299
§ 5.1. Технологические трубопроводы и их категорийность	299
§ 5.2. Трубы, соединительные детали, компенсаторы и опоры трубопроводов	300
§ 5.3. Трубопроводная арматура	303
§ 5.4. Выбор трубопроводной арматуры	311
§ 5.5. Особенности монтажа и эксплуатации трубопроводов	313
Глава 6. Основы монтажных и ремонтных работ на предприятиях хими- ческой промышленности	316
§ 6.1. Организация монтажных работ	316
§ 6.2. Монтажные работы	321
§ 6.3. Монтаж основных типов химического оборудования	329
§ 6.4. Задачи ремонтной службы на предприятиях хими- ческой промышленности	345
§ 6.5. Ремонт основных типов химического оборудования	354
Список литературы	361
Предметный указатель	363

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

*Поникаров Иван Ильич, Перслыгин Олег Андреевич,
Доронин Владимир Николаевич, Гайнуллин Мансур Гаязович*

МАШИНЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Редактор *О. В. Маргулис*
Художественный редактор *В. В. Лебедев*
Технический редактор *Л. П. Гордеева*
Корректоры *И. М. Борейша, О. Е. Мишина*

ИБ № 5403

Сдано в набор 21.07.88. Подписано в печать 03.11.88. Т-17635.
Формат 60×90^{1/8}. Бумага офсетная. Гарнитура литературная.
Печать офсетная. Усл. печ. 23,0. Усл. кр.-отт. 23,0.
Уч.-изд. л. 24,51. Тираж 12 000 экз. Заказ 529. Цена 1 р. 10 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.