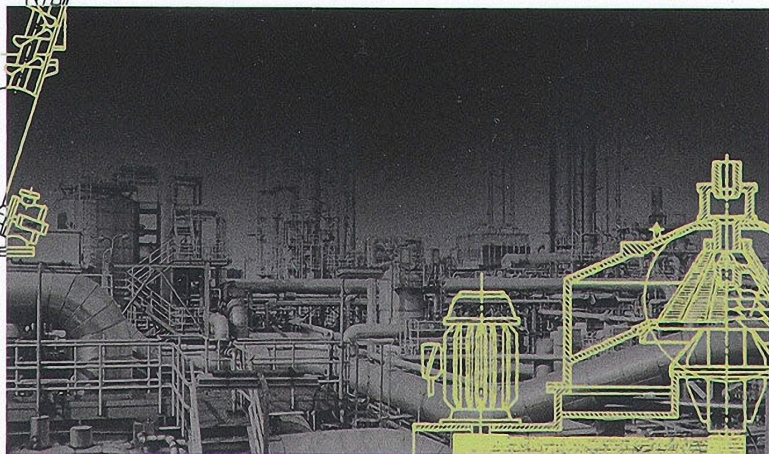
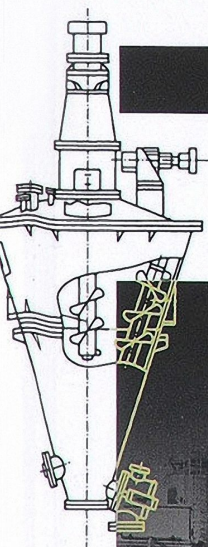


И. И. Поникаров, М. Г. Гайнуллин

МАШИНЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ И НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКИ



И. И. ПОНИКАРОВ,
М. Г. ГАЙНУЛЛИН

МАШИНЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ И НЕФТЕГАЗО- ПЕРЕРАБОТКИ

УЧЕБНИК

Издание шестое, стереотипное



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР
2020

УДК 66.0
ББК 35.11я73

П 56 Поникаров И. И. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки : учебник / И. И. Поникаров, М. Г. Гайнуллин. — 6-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 604 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-8114-4988-0

Излагаются конструкция, принцип действия, область применения и методы расчета на прочность и устойчивость химических машин и аппаратов. Рассматриваются трубопроводы, арматура, монтаж и ремонт химического оборудования, указаны перспективные направления его совершенствования. Приводятся основы безопасной эксплуатации машин и аппаратов. В конце каждой главы даются контрольные вопросы.

Для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки «Технологические машины и оборудование» и «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» и профилям: «Машины и аппараты химических производств», «Оборудование нефтегазопереработки» и «Технологическое оборудование химических и нефтехимических производств». Представляет интерес для студентов вузов и ссузов, обучающихся по направлениям химико-технологического профиля.

УДК 66.0
ББК 35.11я73

Рецензенты:

А. С. ТИМОНИН — доктор технических наук, профессор
Московского государственного университета инженерной экологии;

И. Р. КУЗЕЕВ — доктор технических наук, профессор
Уфимского государственного нефтяного университета.

Обложка
Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2020
© И. И. Поникаров, М. Г. Гайнуллин, 2020
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2020

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одно из основных направлений интенсификации экономики — химизация ее отраслей, обеспечивающая снижение материальных затрат в производстве промышленной и сельскохозяйственной продукции. Материальной базой развития основных отраслей промышленности, обеспечивающих химизацию экономики (химическая, нефтехимическая и нефтеперерабатывающая, нефтяная и газовая, целлюлозно-бумажная и микробиологическая), является химическое и нефтяное машиностроение.

Назовем важнейшие направления развития современного химического и нефтяного машиностроения: рост единичной мощности оборудования, т.е. увеличение съема продукции с единицы объема; увеличение 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.

Химическое оборудование отличается огромным разнообразием. Трудно назвать какую-либо другую отрасль промышленности, в которой использовалось бы такое множество различных по принципу действия, конструкции, материалам и размерам аппаратов и машин. Классификацию химического оборудования наиболее удобно проводить по принципу основного процесса, протекающего в аппарате. Именно этот принцип использован в учебнике при классификации технологического оборудования.

Во втором издании учебника (первое увидело свет в 1989 г. в издательстве «Машиностроение») материал изложен с учетом тех изменений, которые произошли в химической технике за прошедшие годы, обновлено содержание параграфов, посвященных перспективной технике. Кроме того, появились новые главы: «Машины и аппараты для механических процессов» и «Основы

безопасной эксплуатации машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки».

Учебник состоит из восьми глав. В гл. 1–5 рассмотрено основное оборудование химических производств (дробильно-размольное, тепло- и массообменное, реакционное, оборудование для разделения неоднородных систем), в гл. 6 — технологические трубопроводы, соединительные детали, компенсаторы, опоры и трубопроводная арматура. В гл. 7 представлены основы монтажных и ремонтных работ на предприятиях химической промышленности и смежных отраслей, в гл. 8 — основы безопасной эксплуатации машин и аппаратов.

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, проходящей лабораторные или промышленные испытания.

При подготовке учебника авторы учли, что до курса «Машины и аппараты химических производств» или «Оборудование нефтегазопереработки» студенты предварительно изучали курсы «Процессы и аппараты химической технологии» и «Расчет и конструирование элементов химического оборудования». В связи с этим в учебнике не приведены технологические расчеты аппаратов и машин, а механические расчеты даны, как правило, не для отдельных деталей аппаратов и машин, а для узлов с учетом взаимодействия сопряженных деталей.

Авторы выражают признательность профессору О.А. Перелыгину и доценту В.Н. Доронину, которые принимали участие в подготовке 1-го издания учебника, но по ряду причин не смогли участвовать в подготовке 2-го переработанного и дополненного издания.

Авторы благодарны профессору А.С. Тимонину и профессору И.Р. Кузееву, рецензентам учебника, советы и замечания которых заметно улучшили содержание книги, а также профессору В.Н. Блиничеву, профессору Ф.М. Гумерову, кандидатам технических наук А.В. Черенкову и Ю.В. Гутину за консультации по перспективной технике.

ГЛАВА 1 МАШИНЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Назначение, выбор и классификация дробильно-размольного оборудования

В химических производствах используются такие механические процессы, как измельчение твердых материалов, дозирование и смешивание твердых материалов, классификация (сортировка) материалов.

Для их осуществления разработан и применяется большой спектр различных машин и аппаратов. В общем плане их можно классифицировать как оборудование для измельчения (дробильно-размольное), смешения сыпучих и пастообразных материалов, классификации материалов.

Ниже рассматриваются основные типы упомянутого оборудования.

Дробление и измельчение (помол) — процессы разрушения под действием внешних сил упругохрупкого тела от первоначальной крупности до требуемой. Условно принято считать дроблением такой процесс разрушения, в результате которого получают продукты крупностью более 5 мм, *измельчением* — менее 5 мм. В зависимости от конечной крупности кусков материала различают следующие основные виды этих процессов:

Дробление	Измельчение
Крупное (КД) . 100–350 мм	Грубое (ГИ) 5–0,1 мм
Среднее (СД) . . 4–100 мм	Тонкое (ТИ) 0,1–0,05 мм
Мелкое (МД) . . . 5–40 мм	Сверхтонкое (СТИ) Менее 0,05 мм

Оборудование для дробления и измельчения широко распространено в химической промышленности. Это дробление и измельчение апатитов и фосфоритов, дробление и измельчение серного

колчедана в производстве серной кислоты, измельчение известняка в производстве преципитата, имеют место процессы измельчения в производствах ультрамарина, литопона, диоксида титана и др.

В дробильной машине могут использоваться следующие виды нагрузок на куски дробимого материала: раздавливание, раскалывание, излом, удар и истирание. В большинстве случаев различные виды нагрузок действуют одновременно, например раздавливание и истирание, удар и истирание и др. Необходимость в различных видах нагрузок, а также в различных по принципу действия конструкциях и размерах машин вызывается многообразием физико-механических свойств и размеров измельчаемых материалов, а также различными требованиями к крупности исходного и готового продуктов. В работе подавляющего большинства современных измельчителей применяются главным образом способы раздавливания и удара, а также сочетание этих способов с истиранием и раскалыванием.

Ниже приводится классификация дробильно-размольного оборудования по конструкции и степени дробления и измельчения.

Тип машин	Вид измельчения
Щековые дробилки	КД, СД
Конусные дробилки	КД, СД, МД
Валковые дробилки	СД, МД
Молотковые дробилки	МД
Роторные дробилки	КД, СД, МД
Дезинтегратор	СД, МД
Барабанные мельницы	ГИ, ТИ
Ролико-кольцевые мельницы	ГИ, ТИ
Жернова, бегуны	ГИ, ТИ
Бисерные мельницы	ТИ
Вибрационные мельницы	СТИ
Коллоидные мельницы	СТИ
Газоструйные мельницы	СТИ

При выборе машин для дробления и измельчения учитывают физико-механические свойства исходного продукта: прочность, хрупкость, абразивность, крупность кусков исходного материала и кусков готового продукта.

Прочность — свойство твердого материала сопротивляться разрушению при возникновении внутренних напряжений, появляющихся в результате какого-либо нагружения (например, при механическом сжатии). Количественными показателями этого свойства служат пределы прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и на растяжение σ_r . Исходя из предела прочности на сжатие твердые материалы разделяют на категории: особопрочные при $\sigma_{сж} > 250$ МПа, прочные при $\sigma_{сж} = 150\text{--}250$ МПа, средней прочности при $\sigma_{сж} = 80\text{--}150$, малой прочности при $\sigma_{сж} < 80$ МПа.

Хрупкость — свойство твердого материала разрушаться без заметных пластических деформаций.

Абразивность — способность перерабатываемого материала изнашивать рабочие органы машины.

Крупность кусков характеризуется линейными размерами — длиной a , шириной b и толщиной c . Чаще всего приводится однозначная характеристика крупности куска по его диаметру d , причем диаметр определяют разными способами: как среднее арифметическое длины, ширины и толщины куска $d = (a + b + c) / 3$; среднее геометрическое этих величин $d = \sqrt[3]{abc}$ или (наиболее часто) как $d = \sqrt{b^2 + c^2}$.

Степень дробления — отношение размера кусков исходного материала к размеру кусков готового продукта. Существуют различные оценки степени дробления. Например, ее можно выразить как отношение размера максимального куска в исходном материале к размеру максимального куска в готовом продукте: $i = D_{\max} / d_{\max}$. Для ориентировочной оценки дробилки ее возможную степень дробления определяют по формуле $i = 0,85B / b$, где B — ширина приемного отверстия; b — ширина выходной щели.

Наиболее часто степень дробления определяется соотношением средневзвешенных кусков исходного и конечного материалов $i = D_{св} / d_{св}$. Средневзвешенный размер рассчитывается по формуле

$$d = (d_1 m_1 + d_2 m_2 + \dots + d_n m_n) / 100,$$

где d — средневзвешенный размер кусков исходного ($D_{св}$) или конечного ($d_{св}$) материала; d_1, d_2, \dots, d_n — средний размер классов; m_1, m_2, \dots, m_n — содержание данных классов, %.

1.2. Дробилки

Машины для дробления разделяются по конструктивным признакам и по методу дробления на следующие основные виды:

- ♦ **щековые** (рис. 1.1, а), в которых материал дробится раздавливанием, раскалыванием и частичным истиранием в пространстве между двумя щеками при их периодическом сближении;
- ♦ **конусные** (рис. 1.1, б), в которых материал дробится раздавливанием, изломом, частичным истиранием между двумя коническими

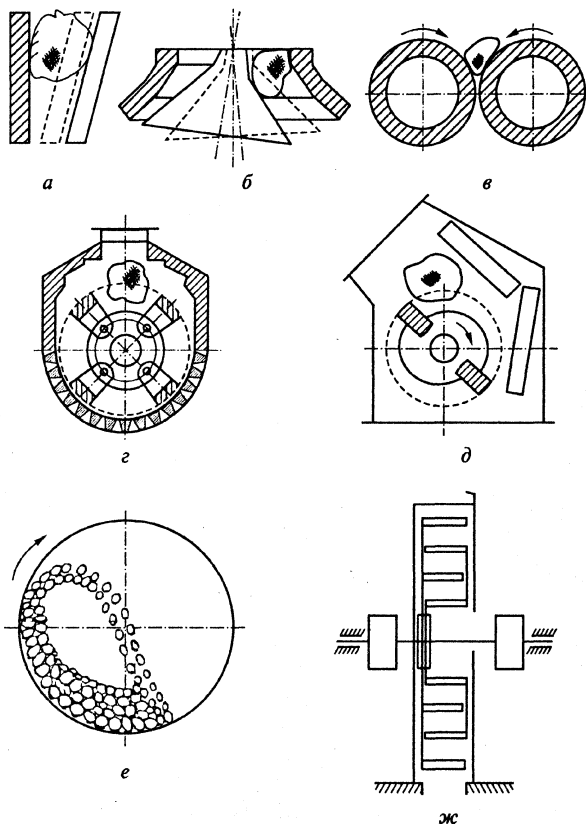


Рис. 1.1. Схемы дробилок

поверхностями, одна из которых вращается эксцентрично по отношению к другой, осуществляя тем самым непрерывное дробление материала;

- ♦ **валковые** (рис. 1.1, *в*), в которых материал раздавливается между двумя валками, вращающимися встречно, или валками и неподвижной поверхностью; нередко валки вращаются с разной частотой, и тогда раздавливание материала сочетается с его истиранием;
- ♦ **ударного действия**, которые, в свою очередь делятся на **молотковые** (рис. 1.1, *г*), где материал измельчается в основном ударом по нему шарнирно подвешенных молотков, а также истиранием; **роторные** (рис. 1.1, *д*), где дробление достигается в результате удара по материалу жестко прикрепленных к ротору бил, удара кусков материала об отражательные плиты и соударения кусков; **барабанные** (рис. 1.1, *е*), рабочими элементами которых являются защищенный бронированными плитами барабан и загруженные в него дробящие или мелющие тела — шары, стержни, диски и т.д.

В так называемых **дезинтеграторах** (рис. 1.1, *ж*) два диска с жестко закрепленными по окружностям стержнями вращаются в разные стороны, измельчая ударом попавший в сферу их вращения материал.

Щековые дробилки. Принцип работы таких дробилок заключается в следующем (см. рис. 1.1, *а*). В камеру дробления, имеющую форму клина и образованную двумя щеками, из которых одна неподвижна, а другая подвижна, подается материал, подлежащий дроблению. Благодаря клинообразной форме камеры куски материала располагаются по высоте камеры в зависимости от их крупности: более крупные вверху, менее крупные — внизу. Подвижная щека периодически приближается к неподвижной, причем при сближении щек (ход сжатия) куски материала дробятся, при отходе подвижной щеки (холостой ход) куски материала продвигаются вниз под действием силы тяжести, занимая новое положение, и выходят из камеры дробления, когда их размеры становятся меньше наиболее узкой части камеры, называемой выходной щелью.

Характер движения подвижной щеки зависит от кинематических особенностей механизма, обеспечивающего это движение, и положен в основу классификации щековых дробилок. По кинематическим особенностям механизма щековые дробилки делят на две группы. К первой группе относят дробилки, в которых движе-

ние от эксцентрикового вала 2 к подвижной щеке 1 передается кинематической цепью, состоящей из шатуна 3 и распорных плит 4 и 5 (рис. 1.2, а). При этом траектории движения точек подвижной щеки представляют собой или прямые линии или дуги окружности. Такие машины называют *щековыми дробилками с простым*

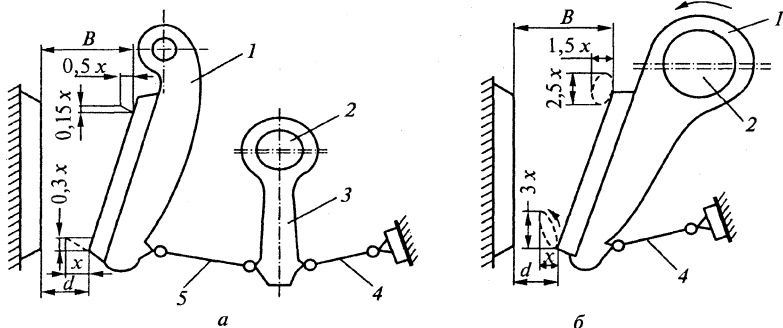


Рис. 1.2. Кинематические схемы щековых дробилок:

а — с простым движением подвижной щеки; б — со сложным движением подвижной щеки

движением подвижной щеки. Достоинствами этих дробилок следует считать: а) малую вертикальную составляющую хода сжатия $0,3x$ и $0,15x$ (где x — горизонтальная составляющая хода сжатия подвижной щеки в нижней точке камеры дробления), благодаря чему уменьшается трение дробящих плит о перерабатываемый материал и соответственно увеличивается срок их службы; б) выигрыш в силе в верхней части камеры дробления, что очень важно при дроблении кусков горной породы больших размеров и высокой прочности. Отмеченные достоинства определяют широкое применение этих дробилок, несмотря на такой существенный недостаток, как малый горизонтальный ход сжатия, который в верхней части камеры дробления примерно в 2 раза меньше, чем в нижней части. В результате верхняя часть камеры дробления не обеспечивает достаточным количеством материала нижнюю, что приводит к снижению производительности дробилки.

Во вторую группу (рис. 1.2, б) входят дробилки, у которых эксцентриковый вал 2 и подвижная щека 1 образуют единую кинематическую пару. В этом случае траектории движения точек подвиж-

ной щеки представляют собой замкнутые кривые, чаще всего эллипсы. Дробилки с такой кинематической схемой называют *щековыми дробилками со сложным движением подвижной щеки*. В этих дробилках горизонтальный ход щеки (ход сжатия) в верхней части камеры дробления примерно в 1,5 раза выше, чем в нижней части. Поэтому в верхней части камеры дробления создаются условия для интенсивного дробления, а направление движения верхних точек подвижной щеки в сторону разгрузки способствует лучшему захвату куска породы и продвижению его вниз к разгрузке. В то же время из-за наличия значительной вертикальной составляющей хода сжатия, равной $3x$ и $2,5x$ соответственно нижней и верхней точек подвижной щеки, дробимый материал интенсивно истирается, но в то же время быстро изнашиваются дробящие плиты, особенно в нижней части камеры дробления. Это значительно удорожает эксплуатацию таких дробилок. Однако простота конструкции и малые размеры обусловили широкое распространение подобных машин.

Изучение схем простого и сложного движения подвижной щеки показало, что они обе имеют право на жизнь. При этом дробилки с простым движением подвижной щеки предназначаются в основном для крупного дробления высокопрочных и абразивных материалов, а дробилки со сложным движением щеки — для среднего и мелкого дробления материалов средней прочности и абразивности. Отечественная машиностроительная промышленность выпускает щековые дробилки средних размеров со сложным движением щеки и крупные дробилки с простым движением щеки. Многие иностранные фирмы выпускают щековые дробилки одинаковых типоразмеров в двух исполнениях — со сложным и с простым движением подвижной щеки; эти дробилки практически одного назначения.

Типоразмер щековой дробилки характеризуется шириной B приемного отверстия, т.е. расстоянием между дробящими плитами в верхней части камеры дробления в момент максимального отхода подвижной щеки. Этот размер определяет максимально возможный размер загружаемых в дробилку кусков, который принимается равным $D_{\max} = 0,85B$.

Другим важным параметром служит длина приемного отверстия, т.е. длина камеры дробления, определяющая, сколько кус-

ков диаметром D_{\max} может быть загружено одновременно. Размер приемного отверстия щековой дробилки является ее главным параметром и обозначается $B \times L$. В зависимости от этого параметра щековые дробилки, выпускаемые отечественной промышленностью, составляют следующий размерный ряд (в мм): 160×250, 250×400, 250×900, 400×900, 600×900, 900×1200, 1200×1500, 1500×2100, 2100×2500. Первые пять типоразмеров представляют собой дробилки со сложным движением подвижной щеки, последние четыре — с простым. Щековые дробилки обозначаются по начальным буквам с указанием размера приемного отверстия в дециметрах: ЩДП-9×12 — щековая дробилка с простым движением подвижной щеки с размерами приемного отверстия 900×1200 мм; ЩДС-I-2,5×9 — щековая дробилка со сложным движением щеки, 250×900 мм; ЩДС-II-6×9 — щековая дробилка со сложным движением щеки, 600×900 мм. Здесь римские цифры I и II показывают отношение длины приемного отверстия к его ширине соответственно более 1,6 и до 1,6.

Для примера на рис. 1.3 показана типовая щековая дробилка для крупного дробления с простым движением подвижной щеки; все отечественные и зарубежные дробилки с простым движением

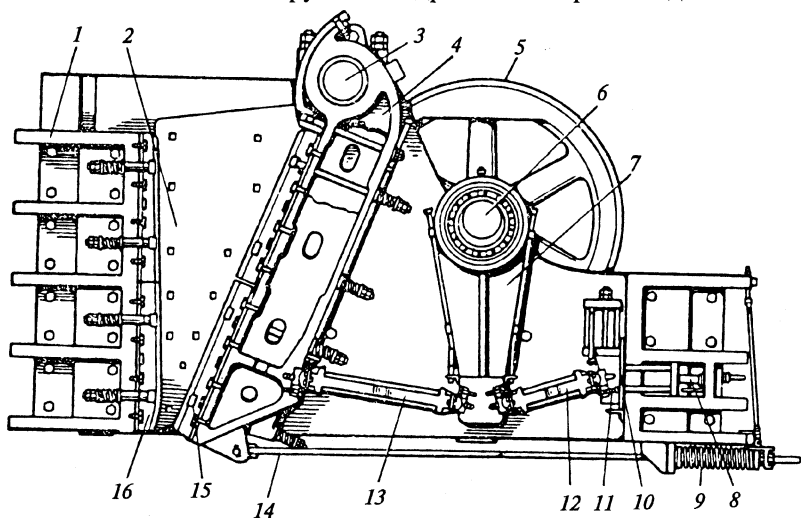


Рис. 1.3. Щековая дробилка с простым движением подвижной щеки

щеки имеют аналогичную конструкцию и различаются только размерами и некоторыми не принципиальными изменениями в конструкции отдельных узлов. В боковых стенках станины 1 закреплены подшипники эксцентрикового вала 6. На эксцентричной части вала подвешен шатун 7, в нижней части которого имеются пазы для установки сухарей, являющихся опорными поверхностями для передней 13 и задней 12 распорных плит.

При вращении эксцентрикового вала шатун получает качательное движение, передающееся с помощью распорных плит подвижной щеке 4. Щека получает маятниковое движение с центром в оси 3 подвеса, концы которой установлены в подшипниках с бронзовыми вкладышами в верхней части боковых стенок станины. В нижней части щеки 4 имеется паз для установки сухаря, в который упирается передняя распорная плита 13. Задняя распорная плита 12 упирается в сухарь регулировочного устройства. Силовое замыкание звеньев механизма привода подвижной щеки обеспечивается тягами 14 и пружинами 9.

За один оборот эксцентрикового вала подвижная щека совершает два полных качания — подход к неподвижной щеке и отход от нее. Периодичность работы щековой дробилки (наличие холостого хода и хода сжатия) вызывает неравномерную нагрузку на приводной двигатель. Для выравнивания этой нагрузки эксцентриковый вал дробилки снабжен массивными маховиками, которые «аккумулируют» энергию при холостом ходе и отдают ее при ходе сжатия. На один конец эксцентрикового вала насажен шкив-маховик 5, на другой — аналогичный маховик.

На неподвижной и подвижной щеках закреплены дробящие плиты 15 и 16, которые непосредственно соприкасаются с дробимым материалом и являются основными сменными рабочими элементами щековых дробилок. Рабочие поверхности дробящих плит и боковые стенки станины образуют камеру дробления. Часть боковых стенок станины, выходящих в камеру дробления, облицована сменными плитами 2.

Ширину выходной щели регулируют путем установки между упором 11 и задней стенкой станины прокладок 10 различной толщины. Для облегчения этой операции предусмотрен гидравлический домкрат 8, с помощью которого упор вместе с распорными плитами, нижним концом шатуна и подвижной щекой отжимается от станины, обеспечивая установку необходимого числа про-

кладок. После этого давление в домкрате снимается и упор прижимается к прокладкам силой пружины 9.

Конусные дробилки. В отечественной и зарубежной практике при осуществлении операций дробления широко применяются конусные дробилки. Их используют на стадиях крупного, среднего и мелкого дробления при переработке самых разнообразных руд и материалов.

На рис. 1.4 приведена кинематическая схема конусной дробилки. Рабочее пространство дробилки образовано подвижным (вращающимся) 4 и неподвижным дробящим 5 конусами. Ось 1

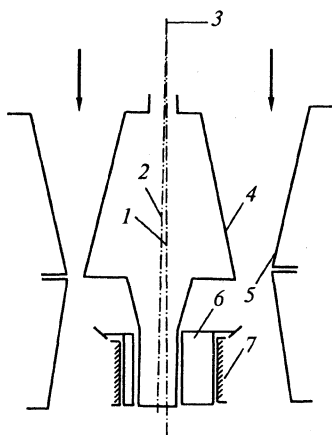


Рис. 1.4. Схема конусной дробилки

неподвижного и ось 2 подвижного конусов лежат в одной плоскости и пересекаются в точке 3, называемой точкой гириации. Вал, на котором крепится подвижный конус, своим нижним концом установлен в эксцентрик 6. При вращении эксцентрика 6, находящегося в центральной расточке 7 корпуса дробилки, ось 2 подвижного конуса вращается вокруг оси 1 дробилки, сообщая подвижному конусу гириационное движение. В результате при сближении конусов 4 и 5 происходит дробление материала, а при удалении конусов друг от друга — его разгрузка.

В зависимости от назначения конусные дробилки разделяют на дробилки для крупного (ККД), среднего (КСД) и мелкого (КМД) дробления.

Дробилки ККД применяют для дробления прочных материалов ($\sigma_{сж}$ до 250 МПа). Они характеризуются шириной приемной щели b , мм, и шириной разгрузочной щели в фазе раскрытия профилей b_1 , мм. В зависимости от параметра b/b_1 конусные дробилки, выпускаемые отечественной промышленностью, составляют следующий размерный ряд: ККД-500/75, ККД-900/140, ККД-1200/150 и ККД-1500/180. Например, ККД-1500/180 это конусная дробилка для крупного дробления с шириной приемной щели

$b = 1500$ мм и шириной разгрузочной щели в фазе раскрытия профиля $b_1 = 180$ мм.

Дробилки КСД и КМД применяют для дробления прочных и особопрочных материалов ($\sigma_{сж}$ до 300 МПа). Их характеристикой является диаметр основания подвижного конуса, который в серийных промышленных дробилках составляет 1750, 2200 и 3000 мм. Конусные дробилки для среднего дробления изготавливаются следующих типоразмеров: КСД-1750Гр-Д, КСД-1750Т-Д, КСД-2200Гр-ВД, КСД-2200Т-ВД и КСД-3000Т-Д. Дробилки выпускаются в исполнении для грубого дробления (Гр) и тонкого дробления (Т). Дополнительные исполнения: с виброизолирующими опорами (В) и дистанционным управлением (Д). В зависимости от типоразмера дробилки КСД могут принимать куски материала размером 200–380 мм, обеспечивая размер максимального куска продукта 42–75 мм.

Конусные дробилки для мелкого дробления изготавливаются следующих типоразмеров: КМД-1750Гр-Д, КМД-1750Т-Д, КМД-2200Гр-ВД, КМД-2200Т1-ВД, КМД-2200Т2-ДП и КМД-3000Т2-ДП. Дробилки выпускаются в исполнении для грубого дробления (Гр) и тонкого дробления (Т, Т1 и Т2). Дополнительные исполнения: с виброизолирующими опорами (В), дистанционным управлением (Д), распределителем питания (П). В зависимости от типоразмера дробилки КМД могут принимать куски твердого материала размером 70–100 мм, обеспечивая размер максимального куска продукта 18–35 мм.

Рассмотрим конструкции конусных дробилок на примере конусной дробилки среднего дробления КСД-2200Гр, типичной для этого класса машин.

Дробилка состоит из опорного блока (рис. 1.5), включающего в себя станину 9, опорное кольцо 3 и замыкающие их предохранительные пружины 6, а также эксцентрика 11, установленного в центральном стакане 12 станины на подпятнике 14 и взаимодействующего через коническую зубчатую передачу 8 и 16 с приводным валом 18, расположенным в корпусе 17, жестко связанном со станиной.

На цилиндрическую часть вала 15 жестко посажен корпус подвижного конуса 5, облицованный плитами (бронями) 4 из высокомарганцовистой стали. Зазоры между корпусом конуса и плитами залиты цинковым сплавом или высококачественным цемент-

ным раствором. В результате плиты не испытывают изгибающих напряжений и не двигаются под действием сил трения, возникающих вследствие проскальзывания кусков материала относительно рабочей поверхности подвижного конуса. Плиты 4 прижаты к

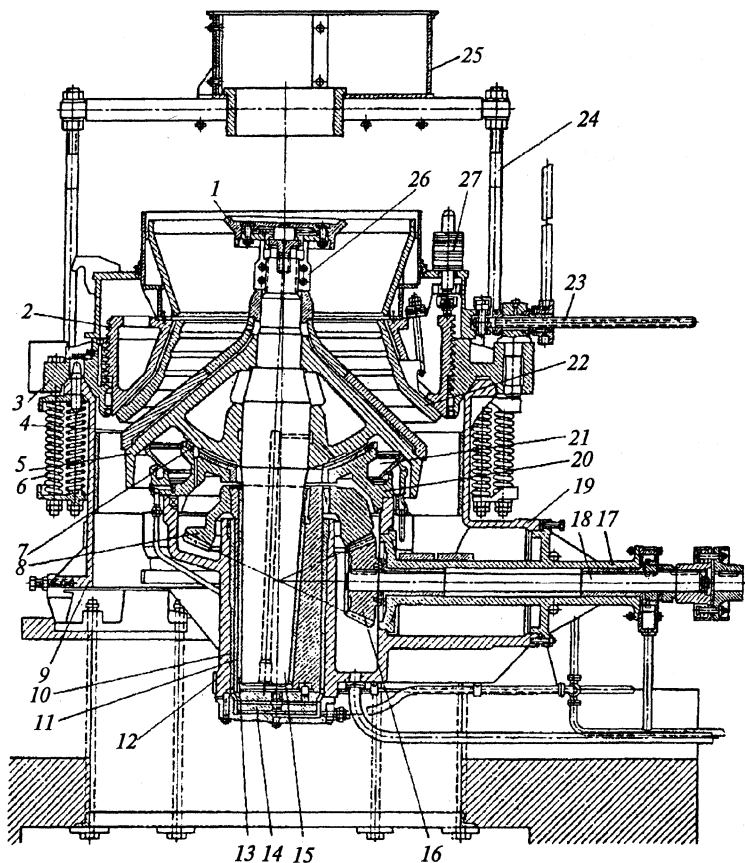


Рис. 1.5. Конусная дробилка среднего дробления

корпусу подвижного конуса 5 устройством 26, расположенным в верхней части подвижного конуса и препятствующим ослаблению посадки плит на корпус конуса. Сверху к этому устройству

прикреплена распределительная тарелка 1, которая вместе с подвижным конусом совершает колебательное движение, способствуя равномерному распределению дробимого материала по периметру загрузочного отверстия.

Подвижный конус опирается через бронзовое кольцо 7 на сферический подпятник 20, воспринимающий кроме веса подвижного конуса вертикальные составляющие усилия дробления. Нижний конец вала 15 входит в центральную расточку эксцентрика 11, ось которого пересекается с осью дробилки в точке гирации. Угол между осями дробилки и подвижного конуса в зависимости от типоразмера составляет $1,5-3,5^\circ$.

В центральный стакан 12 станины 9 запрессована цилиндрическая втулка 10, являющаяся радиальной опорой трения скольжения эксцентрика 11. В центральную расточку эксцентрика запрессована коническая втулка 13, которая служит радиальной опорой трения скольжения нижнего конца вала 15. Эта пара трения — хвостовик вала 15 подвижного конуса и коническая втулка 13 — воспринимает горизонтальную составляющую усилия дробления. К эксцентрику 11 прикреплено коническое зубчатое колесо 8, находящееся в зацеплении с конической шестерней 16 приводного вала 18 дробилки. Вес эксцентрикового узла в сборе воспринимается системой бронзовых и стальных шайб подпятника 14.

Нагрузки, приходящиеся на эксцентриковый узел, значительны, поэтому опорные поверхности узла (бронзовые втулки 10 и 13) подвержены изнашиванию. В последнее время получили распространение биметаллические втулки, рабочие поверхности которых наплавлены баббитом. Они экономичнее бронзовых и допускают восстановление при ремонте. Зазоры в подшипниках скольжения эксцентрикового узла (между эксцентриком 11 и цилиндрической втулкой 10, а также между конической втулкой 13 и хвостовиком вала 15) значительно больше, чем у обычных подшипников скольжения. Такое конструктивное решение позволяет организовать между трущимися поверхностями масляную «подушку», хорошо воспринимающую динамические нагрузки от усилий дробления, и прокачивать через эксцентриковый узел большое количество смазочного материала, который служит охлаждающей жидкостью.

На фланце верхней части станины 9 установлено опорное кольцо 3, которое прижато к фланцу станины блоками пружин 6, равномерно расположенных по ее периметру. Число пружин выбирают из условия необходимого усилия дробления. При его превышении, например при попадании в камеру дробления недробимого тела (металлические предметы), опорное кольцо 3 приподнимается в зоне попадания недробимого тела и амортизирующие пружины 6 получают дополнительную деформацию. Таким образом, максимальное усилие дробления ограничивается амортизирующими пружинами, которые выполняют функцию предохранительного устройства.

На внутренней поверхности опорного кольца 3 имеется упорная резьба, в которую ввинчивается регулирующее кольцо 2. К его внутренней поверхности прикреплена плита 22, которая является неподвижным дробящим конусом. Зазор между плитой 22 и регулирующим кольцом, так же как и в подвижном конусе, заполнен цинковым сплавом или цементным раствором. Регулирующее кольцо 2 можно перемещать вверх или вниз, поворачивая его в резьбовом соединении. Тем самым регулируется ширина разгрузочной щели дробилки. Регулирующее кольцо поворачивается специальным храповым механизмом 23. После установки необходимой ширины разгрузочной щели регулирующее кольцо 2 фиксируют относительно опорного кольца стопорным устройством, а затем клиновым соединением 27 уменьшают зазоры (люфт) в резьбовом соединении опорного и регулирующего колец. В других модификациях конусных дробилок среднего дробления осевой люфт в резьбе уменьшают с помощью пружинно-гидравлического механизма поворота и фиксации, установленного на опорном кольце.

Корпус 17 приводного вала 18 дробилки, являющийся самостоятельной сборочной единицей, установлен в горизонтальном патрубке 19 станины дробилки, к которому прикреплен болтами. Под фланцем корпуса привода имеется набор плоских прокладок, с помощью которых регулируют коническую зубчатую передачу. Нагрузки от усилий в конической передаче воспринимаются двумя подшипниковыми втулками, в которых установлен вал 18 привода.

Подлежащий дроблению материал подается сверху в приемную воронку 25 загрузочного устройства, установленного на

опорном блоке с помощью стоек 24, и далее на распределительную тарелку 1. Дробимый материал разгружается из дробилки по кольцевому пространству.

Для предохранения узлов трения дробилки от пыли в сферической опоре 20 служит водяная ванна, в которой находится воротник 21, скрепленный с корпусом подвижного конуса. В результате узлы трения дробилки оказываются всегда изолированными от зоны разгрузки дробленого материала. Водяная ванна является проточной. Вода в нее подается под давлением, а слив происходит самотеком.

Дробилки среднего и мелкого дробления снабжены смазочной системой. Масло под давлением подается специальным насосом в нижнюю часть эксцентрикового узла, смазывает трущиеся поверхности подпятника 14 и поднимается по зазорам втулок 10 и 13 эксцентрикового узла, обильно смазывая и охлаждая их. Одновременно масло поступает в осевое отверстие вала 15 подвижного конуса и далее по радиальному каналу к сферическому подпятнику. После смазывания поверхностей трения эксцентрикового узла и сферической опоры масло сливается на коническую зубчатую передачу и из нижней части станины 9 по сливной трубе поступает в бак-отстойник.

Валковые дробилки применяют для среднего и мелкого дробления материалов. Основным рабочим элементом валковой дробилки является вращающийся на горизонтальной оси цилиндрический валок. Подлежащий дроблению материал подается сверху, затягивается между валками или валком и неподвижной дробильной плитой и в результате этого дробится. В зависимости от числа валков различают одно-, двух-, трех- и четырехвалковые дробилки.

Поверхности валков бывают гладкие, рифленые, ребристые и зубчатые. Сочетание дробящих поверхностей может быть различным, например, оба валка могут иметь гладкую поверхность или один гладкую, другой — рифленую. Дробилки с гладкими и рифлеными валками обычно применяют для дробления материалов средней прочности ($\sigma_{сж} < 150$ МПа); дробилки с зубчатыми валками — для измельчения каменного угля и других материалов малой прочности ($\sigma_{сж} < 80$ МПа).

Существенным недостатком валковых дробилок является интенсивное и неравномерное изнашивание рабочих поверхностей

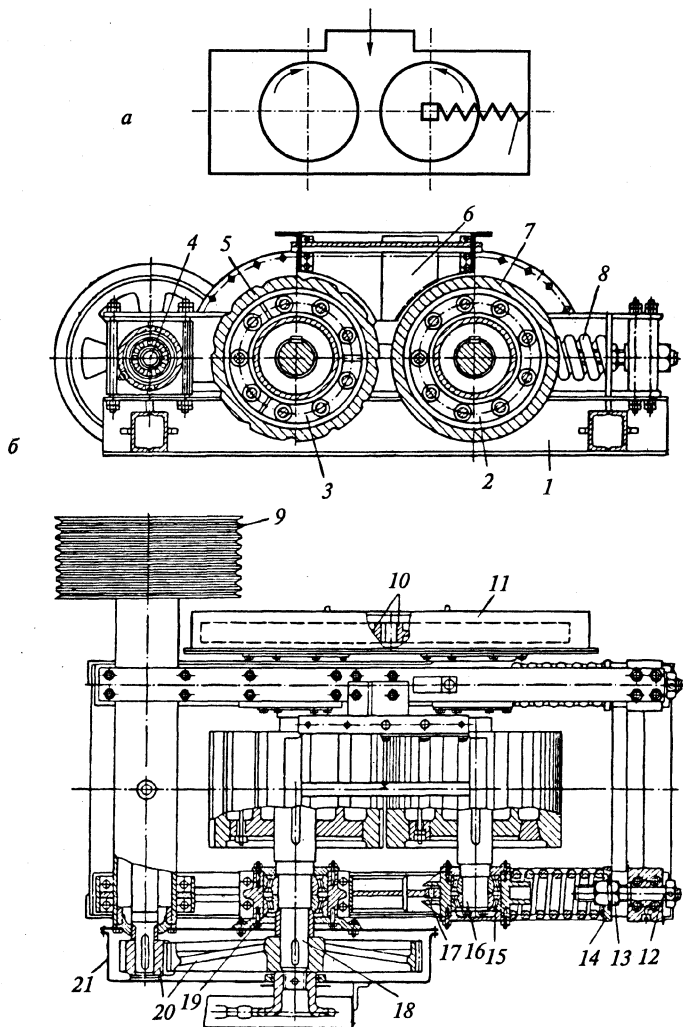


Рис. 1.6. Двухвалковая дробилка:
а — кинематическая схема; б — устройство

валков при обработке прочных и абразивных горных пород. Тем не менее они весьма распространены, поскольку наиболее приспособлены для переработки материалов, склонных к налипанию. Во время работы дробилок налипший на поверхность валков материал срезается очистными скребками и при необходимости отводится в сторону.

На рис. 1.6 показана широко распространенная двухвалковая дробилка с рифленным и гладким валками. Измельчение материала происходит путем раздавливания его при одинаковой частоте вращения валков или раздавливания с истиранием, если валки имеют разные частоты вращения.

Шкив 9 дробилки, закрепленный на валу 4, приводится во вращение электродвигателем. Через зубчатую пару 20, закрытую кожухом 21, вращение передается первому рифленому валку 3, закрепленному на оси 18. Ось 18 установлена в подшипниках 19 корпуса, которые неподвижно прикреплены к раме 1 дробилки. Подшипники 15 второго гладкого валка 2 установлены на оси 16 и могут перемещаться по направляющим вдоль оси дробилки. Гладкий валок 2 прикреплен к амортизирующим пружинам 8, которые служат для защиты дробилки от поломок в случае попадания в нее недробимых предметов. Силу сжатия пружины 8 регулируют с помощью гайки 13, шайбы 14 и шпильки 12, а ширину выходной щели (или крупность измельчения) — с помощью прокладок 17 соответствующей толщины, которые устанавливают между корпусом подвижного подшипника и упорной стенкой со стороны другого валка.

Вращение от первого валка 3 передается второму валку 2 посредством зубчатой пары 10, которая расположена в масляной ванне и закрыта кожухом 11. На валках установлены сменные дробящие бандажы 5 и 7 из высокопрочной марганцовистой стали.

Измельчаемый материал подается в дробилку через загрузочную воронку 6, расположенную в крышке дробилки.

Двухвалковые зубчатые дробилки отличаются от дробилок с гладкими валками наличием на валках зубьев. В зависимости от высоты зубьев валки бывают длиннозубчатые (высота зуба более 0,1 диаметра валка) и короткозубчатые (высота зуба менее 0,1 диаметра валка).

В качестве примера на рис. 1.7 представлен валок двухвалковой короткозубчатой дробилки. На сварную раму дробилки в под-

шипниках качения 1 установлены два валка. Подшипники одного из них неподвижны, а подшипники второго опираются на аморти-

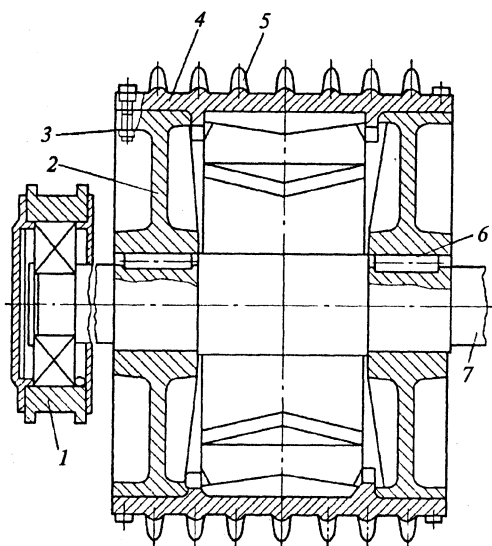


Рис. 1.7. Валок двухвалковой зубчатой дробилки

зирующие пружинные устройства; при попадании между валками недробимого предмета валок может отходить от неподвижного и возвращаться обратно. К валу 7 валка с помощью шпонок 6 прикреплены две ступицы 2, на которых болтами 3 закреплены высокопрочные зубчатые сегменты 4. Зубья 5 сегментов имеют клювообразную форму и отогнуты в сторону вращения валка, что способствует захвату недробимого материала.

Молотковые дробилки нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Молотковые дробилки — это дробилки ударного действия с шарнирно закрепленными на роторе ударными элементами — молотками. От щековых и конусных дробилок они отличаются высокой степенью дробления, малыми размерами, небольшой массой. Другими достоинствами молотковых дробилок являются простота конструкции, удобство обслуживания и ремонта, малая чувствительность к попаданию недробимых предметов в камеру дробления.

По конструктивным признакам молотковые дробилки различают: по числу роторов — однороторные и двухроторные; по положению вала ротора — с горизонтальным и вертикальным валом; по направлению вращения ротора — реверсивные и нереверсивные (односторонние); по исполнению разгрузочного узла — с колосниковой решеткой, полностью перекрывающей разгрузочное отверстие, частично перекрывающей разгрузочное отверстие, и без

колосниковой решетки. Однороторные молотковые дробилки — основной, наиболее многочисленный тип молотковых дробилок.

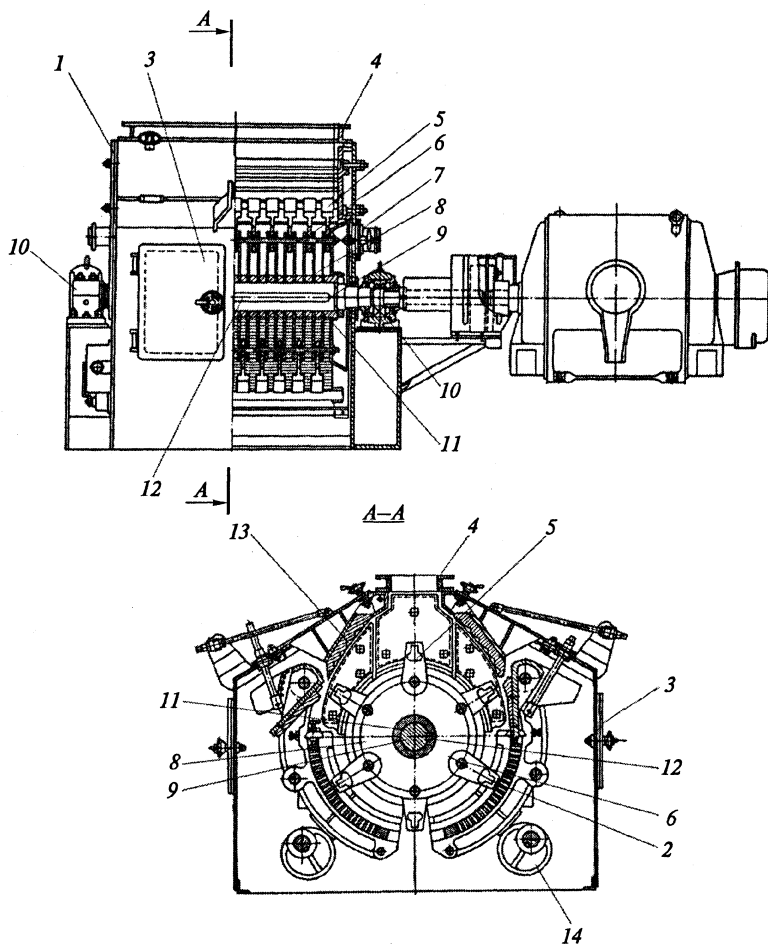


Рис. 1.8. Молотковая реверсивная дробилка

На рис. 1.8 представлена молотковая реверсивная дробилка ДМ 1500×1500 с диаметром ротора и длиной размольной части ро-

тора по молоткам 1500 мм, применяемая для дробления угля различных марок, известняка и др. Размер загружаемых кусков дробимого материала до 120 мм, а крупность кусков на выходе дробилки не превышает 3 мм.

Основными узлами дробилок являются: корпус в сборе, ротор в сборе, решетка колосниковая, механизм подъема колосниковой решетки, электропривод. Ротор дробилки состоит из вала 9, на который со шпонкой 12 насажены диски 8 и фиксирующие дистанционные кольца 11. По окружности дисков 8 просверлены отверстия, через которые пропущены стяжки (шпильки) 6. Между дисками на стяжках 6 шарнирно в шахматном порядке подвешены молотки 5. Диски и молотки удерживаются на валу в собранном состоянии с помощью концевых шайб 7, закрепленных на стяжках 6. Ротор вращается в подшипниках 10, закрепленных в корпусе 1 дробилки.

Корпус дробилки представляет собой сварную конструкцию коробчатой формы, футерованную внутри броневыми плитами 13 из износостойкого материала. Эти плиты воспринимают на себя удары отлетающих от молотков частиц измельчаемого материала. В верхней части корпуса имеется съемная загрузочная воронка 4, в нижней части — колосниковая решетка 2, которая состоит из двух одинаковых секций и охватывает полуцилиндр ротора. Зазор между колосниковой решеткой и вращающимися молотками 5 регулируется при помощи механизма подъема колосниковой решетки, который состоит из вала с насаженными на нем эксцентриками 14 и рычажной системы. В боковых стенках корпуса предусмотрены люки 3 для осмотра и ремонта колосниковой решетки и замены молотков ротора. Привод дробилки осуществляется от электродвигателя, соединенного с валом редуктора посредством муфты.

Поступающий через загрузочную воронку материал попадает под удар быстровращающихся молотков (частота вращения ротора 1000 об/мин), разрушается от столкновения с ними и отбрасывается к броневой плите. Ударившись о плиту, частицы отлетают от нее и опять попадают под молотки. Такое движение и разрушение материала происходят до тех пор, пока частицы не попадут на колосниковую решетку и не выйдут из зоны измельчения через ее отверстия. Куски материала, не успевшие разрушиться до нужного размера за первый проход через зону измельчения, разрушают-

ся движущимися молотками на колосниковой решетке, а часть их поднимается и возвращается снова в зону интенсивного измельчения. Размер частиц измельченного материала определяется размером отверстий в сменной колосниковой решетке.

Роторные дробилки относятся к числу дробилок ударного действия, типовая схема которых показана на рис. 1.9.

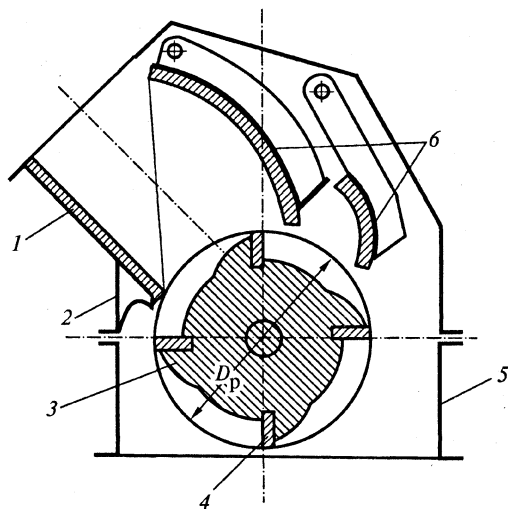


Рис. 1.9. Схема роторной дробилки

По лотку 1 в корпусе 2, установленном на станине 5, исходный материал поступает на вращающийся ротор 3 с билами 4 и отбрасывается ими на шарнирно подвешенные отражательные плиты 6. Дробление осуществляется при ударах бил 4 по материалу и при ударах кусков материала об отражательные плиты 6, футерованные износостойким материалом. Кроме того, отраженные от плит 6 куски на большой скорости сталкиваются (соударяются) с кусками материала, отброшенными ротором. При этом происходит дополнительное самоизмельчение материала.

Роторные дробилки бывают крупного, среднего и мелкого дробления. Они разделяются относительной (к диаметру ротора) крупностью кусков. У дробилок крупного дробления это отношение составляет более 0,3; среднего дробления — 0,1–0,3; мелкого

дробления — менее 0,1. По конструктивным признакам роторные дробилки делятся на следующие группы:

- ♦ *по числу роторов*: однороторные (распространены наиболее широко), двух- и трехроторные. В свою очередь роторы по числу бил бывают двух-, трех-, четырех- и шестибильные;
- ♦ *по способу разгрузки* готового продукта: со свободной разгрузкой (см. рис. 1.9), с разгрузкой через контрольную колосниковую решетку, которая охватывает всю нижнюю полуокружность ротора;
- ♦ *по характеру исполнения* отражательных устройств: с отражательными плитами; с отражательными колосниковыми решетками (которые служат одновременно ситом и определяют крупность готового продукта);
- ♦ *по числу камер дробления*: однокамерные, многокамерные (на рис. 1.9 двухкамерная дробилка). Чаще всего число камер соответствует количеству отражательных плит;
- ♦ *по способу подвески* отражательных устройств: с жесткой подвеской; с шарнирной подвеской;
- ♦ *по направлению вращения ротора*: реверсивные и нереверсивные;
- ♦ *по характеру отражательной поверхности*: с гладкой поверхностью; с рифленной или зубчатой поверхностью.

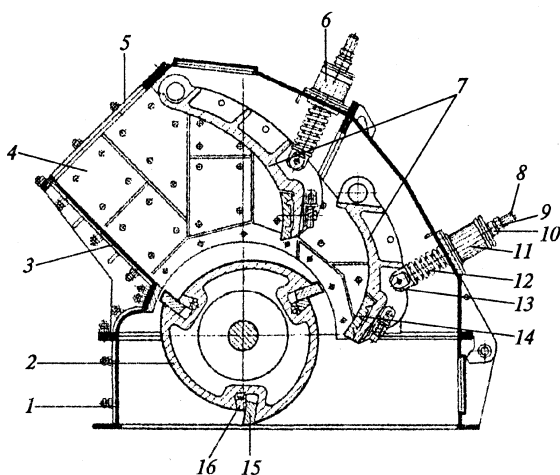


Рис. 1.10. Роторная дробилка

На рис. 1.10 представлена нереверсивная однороторная трех-бильная дробилка со свободной разгрузкой и с двумя отражательными плитами, имеющими шарнирную подвеску (т.е. двухкамерная). Она предназначена для дробления материалов с пределом прочности при сжатии 150–200 МПа. Основными ее узлами являются: ротор, корпус, отражательные плиты, возвратно-регулирующее устройство отражательных плит.

Дробилка состоит из станины 1, корпуса 3, футерованного изнутри износостойкими плитами 4, ротора 2 с билами 15, отражательных плит 7 со сменными пластинами 14 и пружинных возвратно-регулирующих устройств 6. Загрузка материала осуществляется через люк 5.

Била 15 крепятся в продольных пазах ротора дробилки с помощью клиньев 16, причем это крепление затягивается под действием центробежных сил во время работы. Пружинное регулировочное устройство 6 служит для установки выходного зазора между нижними кромками сменных пластин 14 и билами 15, а также для предохранения элементов дробилки от поломок при попадании в нее недробимых предметов. Это устройство включает в себя тягу 13, гайку 10 с контргайкой 9, навинчиваемых на конец тяги, пружину 12 и регулировочный стакан 11, который крепится болтами к стенке корпуса дробилки. Таким образом, регулирование выходной щели обеспечивается сжатием пружины 12 при навинчивании гайки 10 на тягу 8. Пределы регулирования выходной щели для первой камеры составляют 0,02–0,2 мм, для второй — 0,02–0,125 мм.

Отражательные плиты 7 на шарнирной подвеске устанавливаются под углом к горизонтальной оси. Их профиль выполнен по логарифмической спирали. В результате этого первая отражательная плита обеспечивает возвращение кусков основного потока в приемный загрузочный лоток для повторных ударов, чем достигается высокая степень дробления (при увеличении ширины выходной щели степень дробления снижается), а вторая отражательная плита направляет отраженные куски на ротор, обеспечивая максимальное их возвращение в рабочую зону, поскольку углы падения кусков на нее меньше, чем у первой.

Ротор дробилки приводится во вращение от электродвигателя через клиноременную передачу. Частота вращения ротора может

изменяться сменой ведомых шкивов, входящих в комплект поставки.

Типоразмер роторных дробилок характеризуется параметром $D \times L$, где D — диаметр ротора, мм; L — длина ротора, мм. В зависимости от этого параметра выпускаемые дробилки роторные крупного дробления (ДРК) имеют следующий размерный ряд: 800×630 ; 1250×1000 ; 1600×1250 ; 2000×1600 . Отношение L/D для этих дробилок составляет 0,8. Дробилки роторные среднего и мелкого дробления (ДРС) выпускаются с ротором диаметром: 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000 мм. Длина ротора у этих дробилок равна диаметру, т.е. $L/D = 1$.

Дезинтегратор относится к дробилкам ударного действия и изображен на рис. 1.11. Основными рабочими элементами этой дробилки являются два вращающихся в разные стороны ротора, закрытых кожухом 8. Каждый ротор состоит из дисков 10, соединенных с кольцевыми дисками 11 стальными цилиндрическими пальцами 9 и закрепленных с помощью ступиц 6 и 12 на отдельных валах 5 и 14. Валы роторов приводятся во вращение от индивидуальных электродвигателей через шкивы 3 и 13 (частота вращения роторов до 900 об/мин). Валы установлены в подшипниках 4, корпуса которых закреплены на стойках 2, смонтированных на

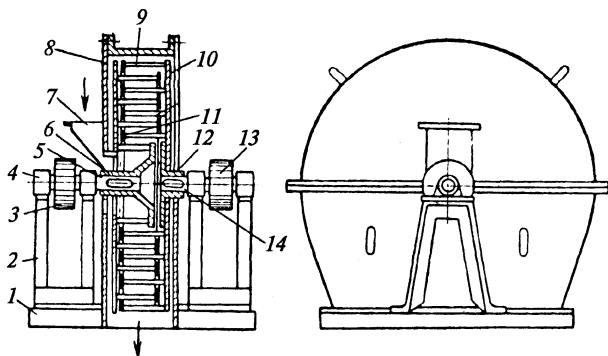


Рис. 1.11. Дезинтегратор

станине 1. Пальцы 9 на дисках роторов размещены по концентрическим окружностям так, что каждый ряд пальцев одного ротора входит между двумя рядами пальцев другого ротора.

Подлежащий дроблению материал подается через загрузочную воронку 7 к центру одного из роторов. Пальцы, расположенные по внутренней окружности, дробят материал и отбрасывают его куски к следующему концентрическому ряду, вращающемуся в противоположном направлении. Продвигаясь от центра к периферии, частицы многократно ударяются о пальцы и разрушаются, при этом интенсивность разрушения усиливается, поскольку уменьшается шаг между пальцами и возрастает их окружная скорость. Чем выше скорость вращения роторов и чем больше пальцев на дисках, тем выше степень измельчения материала. Расстояние (шаг) между пальцами наружного ряда определяет максимальный размер частиц раздробленного продукта. Измельченный материал выбрасывается в кожух 8 дезинтегратора и спускается вниз, к выходному штуцеру.

В зависимости от размера дезинтеграторов число концентрических рядов пальцев на одном диске колеблется от 2 до 4 и, следовательно, на двух дисках от 4 до 8 рядов. Самым уязвимым элементом дезинтегратора являются пальцы. Они сравнительно быстро изнашиваются, а операция по их замене громоздка и длительна. Поэтому дезинтеграторы используются для дробления хрупких, мягких материалов с малой абразивностью (мел, известняк и т.д.).

В отличие от дезинтеграторов *дисмембраторы* имеют один вращающийся ротор. Внутренняя стенка корпуса дробилки выполняет роль второго (неподвижного) диска. Пальцам дисмембратора, установленным на корпусе и роторе, часто придают форму ножей для измельчения материала срезом. Число оборотов ротора дисмембратора значительно выше, чем у дисков дезинтегратора (до 3800 об/мин).

1.3. Расчет на прочность основных элементов дробилок

Щековые дробилки. Для построения профиля камеры дробления кроме ширины приемного отверстия и ширины выходной щели необходимо также определить угол захвата α — угол между неподвижной и подвижной щеками (рис. 1.12), кото-

рый должен обеспечивать «захват» куска (а не выталкивание его вверх) и разрушение материала при сжатии.

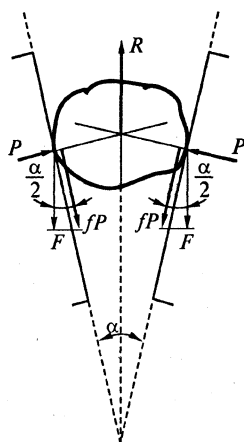


Рис. 1.12. Расчетная схема щековой дробилки

На кусок, зажатый между щеками, действуют усилия P и равнодействующая R , причем $R = 2P \sin \frac{\alpha}{2}$.

Силы трения, вызванные сжимающими усилиями, равны fP и действуют на кусок материала против направления выталкивающей силы, т.е. направлены вниз, как показано на рис. 1.12 (массу куска из-за ее незначительности не учитываем). При сжатии кусок материала не будет выталкиваться вверх, если силы F , вызываемые силами трения, будут больше или равны выталкивающей силе R : $2F \geq R$.

Учитывая, что

$$F = fP \cos \frac{\alpha}{2}, \text{ а } R = 2P \sin \frac{\alpha}{2}, \text{ получаем}$$

$$f \cos \frac{\alpha}{2} \geq \sin \frac{\alpha}{2} \text{ или } f \geq \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

Так как коэффициент трения f равен $\operatorname{tg} \varphi$ (где φ — угол трения), то $\operatorname{tg} \varphi \geq \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ или $2\varphi \geq \alpha$.

Значит, нормальное дробление возможно, если угол захвата равен двойному углу трения или меньше его.

Коэффициент трения скольжения камня по металлу равен 0,3, что соответствует углу трения около 16° . Следовательно, угол захвата щековых дробилок может достигать 32° . Фактически у существующих машин α не превышает 24° , а для дробилок со сложным движением оптимальным считается угол захвата 19° .

Расчет шатуна. При движении шатуна от точки A к точке A' (по часовой стрелке на рис. 1.13, а) в нем возникают растягивающие усилия P , изменяющиеся по линейному закону от 0 до P_{\max} . Для определения P_{\max} пользуются положением, согласно которому работа, совершаемая электродвигателем за один оборот приводного вала, равна работе, совершаемой за это же время шатуном. Поскольку

$P_{cp} = (0 + P_{max})/2 = P_{max}/2$, то $A = N/\omega = P_{cp} 2r = P_{max} r$, откуда $P_{max} = Nr/\omega$,

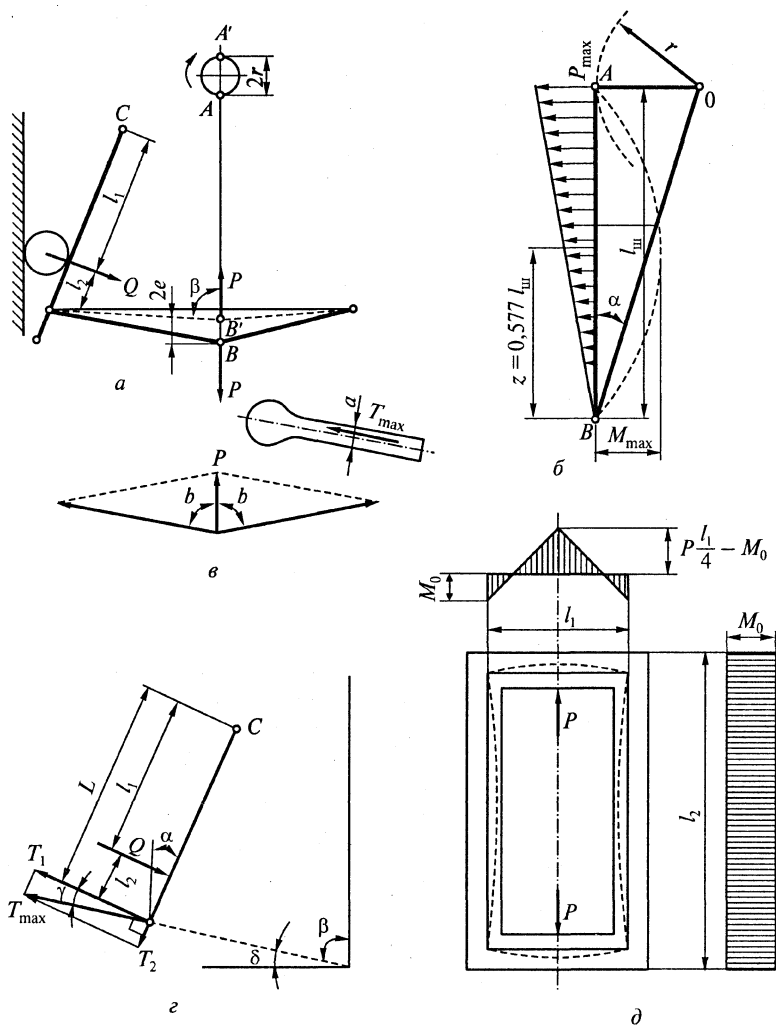


Рис. 1.13. К прочностному расчету деталей дробилки с простым качанием щеки

где N — мощность двигателя, Вт; ω — угловая скорость приводного вала, рад/с; r — эксцентриситет приводного вала, м; P_{\max} — максимальное усилие в шатуне за один оборот приводного вала, Н.

С учетом возможных перегрузок и динамики процесса измельчения вводится коэффициент превышения номинальной нагрузки, т.е.

$$P_{\text{расч}} = 1,5 P_{\max}.$$

Тогда напряжение в шатуне от действия растягивающих нагрузок

$$\sigma_p = P_{\text{расч}} / S,$$

где S — площадь поперечного сечения шатуна, м^2 .

Кроме растягивающих усилий в результате качания шатуна при его движении возникают инерционные силы, вызывающие изгибающие моменты. Для их определения принимаются следующие допущения: 1) масса шатуна распределена равномерно по его длине; 2) наибольшее значение изгибающих нагрузок в шатуне возникает при расположении его перпендикулярно эксцентриковой части приводного вала; 3) ускорение точек шатуна изменяются вдоль длины по линейному закону. При этих допущениях расчет шатуна сводится к расчету двухопорной балки, нагруженной распределенной нагрузкой (рис. 1.13, б).

Угловое ускорение точки A шатуна $j_A = r \omega^2$, а сила инерции в этой точке $P_{iA} = m r \omega^2$, где m — единичная масса шатуна, т.е. масса, приходящаяся на единицу его длины, кг/м; ω — угловая скорость шатуна в точке A , рад/с.

$$\text{Равнодействующая сил инерции } R_1 = P_{iA} l_{\text{ш}} / 2,$$

где $l_{\text{ш}}$ — длина шатуна, м.

При инерционной нагрузке, распределенной по закону треугольника, изгибающий момент будет наибольшим в сечении, отстоящем от точки B на расстоянии $Z = 0,577 l_{\text{ш}}$:

$$M_{\max} = 0,128 R_1 l_{\text{ш}}.$$

Подставляя в последнюю формулу значения R_1 , получаем

$$M_{\max} = 0,064 R_{iA} l_{\text{ш}}^2 = 0,064 m r \omega^2 l_{\text{ш}}^2.$$

Напряжения от изгибающего момента

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{0,064 r \omega^2 l_{\text{ш}}^2}{W},$$

где W — момент сопротивления поперечного сечения шатуна, м^3 .

Суммарное напряжение (от растяжения и изгиба), возникающее в опасном сечении шатуна, МПа:

$$\sigma = \frac{P_{\text{расч}}}{S} \pm \frac{M_{\text{max}}}{W}.$$

Расчет распорных плит ведется по наибольшему значению сжимаемого усилия T_{max} и изгибающему моменту M , возникающему от внецентренного приложения этой силы (рис. 1.13, в).

Наибольшее сжимающее усилие T_{max} возникает в распорной плите при расположении шатуна в точке A' (рис. 1.13, а) и его можно определить из выражения

$$T_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{2 \cos \beta},$$

где β — угол между шатуном и распорной плитой при нахождении шатуна в точке A' (рис. 1.13, в). Наибольшее рациональное значение угла β принимается в диапазоне $80...88^\circ$, так как при этом подвижной щеке передаются наибольшие усилия. Угол β должен быть обязательно меньше 90° , так как при $\beta = 90^\circ$ усилие T_{max} возрастает до ∞ и может произойти поломка машины.

Суммарное напряжение, возникающее в распорной плите

$$\sigma = \frac{T_{\text{max}}}{F} \pm \frac{T_{\text{max}} a}{W},$$

где F — расчетная площадь сечения плиты, м^2 ; a — расстояние от точки приложения T_{max} до продольной оси распорной плиты, м (см. рис. 1.13, в); W — момент сопротивления сечения распорной плиты, м^3 .

Расчет подвижной щеки. Усилие T_{max} , передаваемое распорной плитой подвижной щеке, может быть разложено на две составляющие: T_1 , нормальную поверхности щеки, и T_2 , действующую вдоль щеки, растягивая ее (рис. 1.13, г). Угол γ между T_{max} и T_1

$$\gamma = 90 - \delta - (90 - \alpha) = \alpha - \delta.$$

Тогда $T_1 = T_{\text{max}} \cos \gamma = T_{\text{max}} \cos (\alpha - \delta)$; $T_2 = T_{\text{max}} \sin \gamma = T_{\text{max}} \sin (\alpha - \delta)$.

Усилие дробления Q определяется из условия равновесия действующих на щеку сил относительно точки ее подвеса, т.е. точки C :

$$\Sigma M_C = Ql_1 - T_1L = 0,$$

$$\text{откуда } Q = T_1 \frac{L}{l_1} = T_{\max} \cos(\alpha - \delta) \frac{L}{l_1},$$

где ΣM_C — сумма моментов относительно точки C , Н·м; L — длина подвижной щеки от точки C до точки соединения с распорной плитой, м; l_1 — расстояние от точки приложения силы Q до точки C , м.

Суммарное напряжение в щеке от совместного действия изгибающего момента от силы Q и растягивающего усилия T_2

$$\sigma = \frac{T_2}{F} \pm \frac{M_{\text{и}}}{W},$$

где $M_{\text{и}}$ — изгибающий момент в опасном сечении щеки, Н·м; W — момент сопротивления сечения щеки, м³; F — площадь поперечного сечения щеки, м².

В дробилках со сложным качанием щеки (рис. 1.14) равнодействующая сопротивления измельчаемого материала разрушению Q определяется следующим образом. На подвижную щеку этих дробилок действуют силы P в точке A подвеса щеки на приводном валу и T в точке B соединения щеки с распорной плитой. Эти силы раскладываются на составляющие P_1 и T_1 , нормальные поверхности щеки, и P_2 и T_2 , действующие вдоль щеки. Составляющие P_1 и T_1 определяются из условия равновесия системы действующих на щеку сил относительно точек A и B :

$$\Sigma M_A = 0; L = Ql_1; T_1 = Q \frac{l_1}{L};$$

$$\Sigma M_B = 0; L = Ql_2; P_1 = Q \frac{l_2}{L},$$

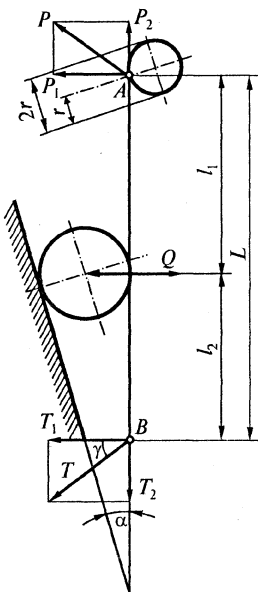


Рис. 1.14. Расчетная схема дробилки со сложным качанием щеки

где l_1 и l_2 — соответственно расстояния от точки приложения силы Q до точки подвеса щеки на приводном валу и до соединения щеки с распорной плитой, м; $L = l_1 + l_2$.

Составляющая T_2 , численно равная P_2 , определяется следующим образом:

$$T_2 = T_1 \operatorname{tg} \gamma = Q \frac{l_1}{L} \operatorname{tg} \gamma,$$

где γ — угол между силами T и T_1 , град.;

$$T = T_1 \frac{1}{\cos \gamma} = Q \frac{l_1}{(\cos \gamma) L}.$$

Найдем силу P :

$$P^2 = P_1^2 + P_2^2 = \left(Q \frac{l_2}{L} \right)^2 + \left(Q \frac{l_1}{L} \operatorname{tg} \gamma \right)^2;$$

$$P = \frac{Q}{L} \sqrt{l_2^2 + l_1^2 \operatorname{tg}^2 \gamma},$$

откуда

$$Q = \frac{PL}{\sqrt{l_2^2 + l_1^2 \operatorname{tg}^2 \gamma}}.$$

Напряжение в подвижной щеке от действия силы T_2 и усилия Q определяется по описанной выше методике для дробилок с простым качанием щеки.

Расчет станины. При работе дробилки поперечные стенки закрытой станины (цельнолитой или сварной) воспринимают нагрузки, передаваемые им дробящими щеками, которые равны по модулю и приложены сосредоточенно (рис. 1.13, д).

При упрощенном расчете станина представляется как упругая симметричная рама прямоугольной формы, состоящая из двух одинаковых поперечин и двух стоек. Поперечные стенки станины рассматриваются как балки на двух опорах, нагруженные силой P и статически неопределимыми моментами M_0 , которые возникают от изгибающего действия силы P за счет жесткого соединения станины.

Наибольшие напряжения в стойках будут на поверхности со стороны окна станины. Стойки можно рассматривать как балки,

нагруженные на концах статически неопределимыми моментами M_0 .

Наибольшие напряжения в стойках σ_{\max} , Н/м², определяются из выражения

$$\sigma_{\max} = \alpha \left(\frac{P}{2F_2} + \frac{M_0}{W_2} \right),$$

где α — коэффициент концентрации напряжений; F_2 — площадь поперечного сечения стойки станины, м²; W_2 — момент сопротивления стойки, м³.

Статически неопределимый момент

$$M_0 = \frac{Pl_2}{8} \frac{1}{1 + \frac{l_2 J_1}{l_1 J_2}},$$

где l_1, l_2 — соответственно длины поперечин и стоек станины, м; J_1, J_2 — средние моменты инерции поперечины и стойки, м⁴.

Поперечины станины подвергаются только изгибу. Наибольший изгибающий момент действует посередине поперечины:

$$M_{\max} = \frac{Pl_1}{4} - M_0.$$

Конусные дробилки. Угол захвата в конусных дробилках, равный углу между поверхностями подвижного и неподвижного конусов, не должен превышать двойного угла трения φ , т.е. $\beta \leq 2\varphi$ (рис. 1.15, а). Обычно для ККД $\beta = 21 \dots 23^\circ$.

Усилия на элементы дробилок. Нагрузки, действующие на элементы конусных дробилок для крупного дробления, целесообразно определять исходя из мощности установленного двигателя.

Если пренебречь потерями на трение в подвеске подвижного конуса, то можно считать, что вращающий момент $M_{\text{в}}$, подводимый к эксцентриковой втулке, уравнивается моментом $M_{\text{з}}$ от реакции $R_{\text{з}}$ и моментом $M_{\text{тр}}$ сил трения в подшипниках втулки:

$$M_{\text{в}} = M_{\text{з}} + M_{\text{тр}}.$$

Из схемы нагрузок и реакций опор подвижного конуса с верхней подвеской, показанной на рис. 1.15, а, определяются:

♦ момент, создаваемый силой $R_{\text{з}}$,

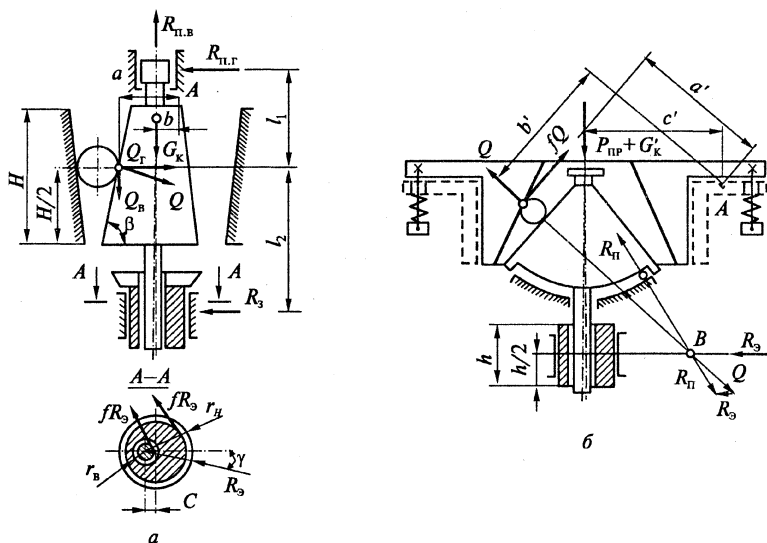


Рис. 1.15. Схемы для расчета нагрузок, действующих в конусных дробилках:
а — с двухопорным валом; б — с консольным валом

$$M_3 = R_3 c \sin \gamma.$$

где c — эксцентриситет втулки, м; $\gamma = 25...30^\circ$ — угол между линией действия реакции R_3 и следом плоскости наибольшего эксцентриситета втулки;

- ♦ момент сил трения на внешней и внутренней поверхностях эксцентриковой втулки

$$M_{тр} = f R_3 (r_н + r_в),$$

где f — коэффициент трения в подшипниках; $r_н$ и $r_в$ — радиусы наружной поверхности втулки и внутреннего отверстия, м;

- ♦ вращающий момент, передаваемый от двигателя на эксцентриковую втулку,

$$M_в = \frac{N\eta}{\omega_в},$$

где N — мощность двигателя, Вт; η — КПД передачи; $\omega_в$ — угловая скорость втулки, рад/с.

Из уравнения моментов

$$\frac{\eta N}{\omega_b} = R_3 c \sin \gamma + f R_3 (r_n + r_b)$$

найдем реакцию в эксцентриковом узле

$$R_3 = \frac{(N\eta/\omega_b)}{c \sin \gamma + f(r_n + r_b)}.$$

Сила дробления Q приложена посередине высоты камеры дробления. Ее вертикальная составляющая $Q_b = Q_t \operatorname{ctg} \beta$; Q_t – горизонтальная составляющая силы Q ; β – угол наклона образующей конуса к его основанию.

Из уравнения моментов сил относительно точки A определяем горизонтальную составляющую силы дробления, вызывающую изгиб вала:

$$Q_t = \frac{R_3(l_1 + l_2) - G_k b}{l_1 + a \operatorname{ctg} \beta},$$

где G_k – сила тяжести подвижного конуса, Н.

Далее определяем:

- ♦ боковую реакцию в верхней опоре подвижного конуса

$$R_{п.г} = R_3 - Q_t;$$

- ♦ вертикальную нагрузку, воспринимаемую подпятником подвески и создающая растягивающие напряжения вала конуса:

$$R_{п.в} = Q_b + G_k.$$

Нагрузки, действующие на элементы конусных дробилок для среднего и мелкого дробления, определяют исходя из силы дробления Q в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.15, б. Силу дробления для конусных дробилок можно вычислить по формуле, полученной В.А. Олевским:

$$Q = 46 \cdot 10^4 F_6 \approx 56 \cdot 10^4 D_n^2,$$

где F_6 – площадь боковой поверхности подвижного конуса, м²; D_n – диаметр основания конуса, м.

Предприятие, производящее эти дробилки, рекомендует рассчитывать силу дробления исходя из нормируемой суммарной

силы затяжки $P_{\text{пр}}$ предохранительных пружин, прижимающих кольцо наружного конуса к станине. Из уравнения моментов относительно точки поворота A кольца получим максимальную силу дробления (при попадании в камеру недробимых предметов):

$$Q = \frac{(P_{\text{пр}} + G'_k) c'}{(b' + fa')},$$

где G'_k — сила тяжести массы кольца наружного конуса, Н.

Найденные значения усилий позволяют рассчитать на прочность отдельные элементы дробилок.

Валковые дробилки. Для обеспечения процесса дробления в валковых дробилках необходимо, чтобы куски дробимой породы втягивались в пространство между валками. Это условие осуществляется, если сумма сил, направленных вниз, будет больше суммы сил, направленных вверх (рис. 1.16), т.е. если выполняется неравенство

$$2P \sin \frac{\alpha}{2} \leq 2F \cos \frac{\alpha}{2},$$

где P — сила, действующая на дробимое тело, направленная нормально к окружности валка; $F = fP$ — сила трения камня о валок, направленная по касательной к окружности валка; α — угол захвата.

Произведя преобразования, получим

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \leq f,$$

где f — коэффициент трения камня о поверхность валка.

Из рис. 1.16 следует:

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{R+e}{R+r} = \frac{D+2e}{D+2r},$$

откуда

$$\frac{D}{d} = \frac{\cos \frac{\alpha}{2} - \frac{2e}{d}}{1 - \cos \frac{\alpha}{2}},$$

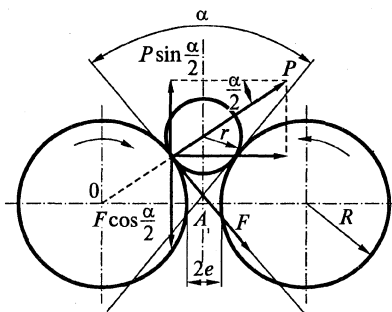


Рис. 1.16. Схема к расчету угла захвата валковых дробилок

где D — диаметр валка; d — диаметр камня; $2e$ — расстояние между валками.

Приняв $f = 0,3$ и $\alpha \approx 18^\circ$ и учитывая, что степень измельчения в валковых дробилках с гладкими валками $i \approx 4$, т.е. $\frac{2e}{d} = \frac{1}{4}$, получаем для гладких валков

$$\frac{D}{d} \approx 18.$$

Практически принимается $D = (18...25)d$ для гладких валков; $D = (10...12)d$ для рифленых валков.

Расчет усилий, действующих в валковых дробилках. Усилие, необходимое для дробления материалов между валками, создается затяжкой пружин, на которые опирается подвижный валок, и определяется по эмпирической формуле

$$P = pF, \quad (1.1)$$

где p — удельное давление дробимого материала на валок в зоне контакта, Н/м^2 ; F — площадь контакта валка с дробимым камнем, м^2 , равная

$$F = \alpha RL, \quad (1.2)$$

где α — угол захвата, рад; R, L — соответственно радиус и длина валка, м.

Подставляя формулу (1.2) в (1.1), получаем

$$P = p\alpha RLk,$$

где k — коэффициент, учитывающий нестабильность питания породой дробилки и свойства материала (для сухих пород принимается $0,2...0,3$, а для влажных — $0,4...0,6$).

Удельное давление принимается равным: для малых валков ($D < 500$ мм) $p = 9 \cdot 10^6$ Н/м^2 ; для средних валков ($D = 500...900$ мм) $p = (12...14) \cdot 10^6$ Н/м^2 ; для крупных валков ($D > 900$ мм) $p = 25 \cdot 10^6$ Н/м^2 .

Расчет деталей валковых дробилок на прочность производится по определенному выше усилию P .

1.4. Мельницы грубого и тонкого измельчения

Для грубого, тонкого и сверхтонкого измельчений используются мельницы различных конструкций и назначения.

Барабанные мельницы. Для грубого и тонкого измельчения материалов преимущественно применяются барабанные мельницы. Рабочими элементами этих мельниц являются защищенный бронированными плитами вращающийся барабан и загруженные в него дробящие тела — шары, стержни и т.д. Материал измельчается в основном за счет энергии удара падающих шаров, а также раздавливанием и истиранием между перекатывающимися шарами и внутренней поверхностью мельницы при ее вращении. Для удовлетворения различных технологических потребностей производства машиностроительные предприятия выпускают барабанные мельницы многих типоразмеров как для сухого измельчения материалов, когда необходимо получить измельченный материал в виде сухих порошков (например, фосфорная мука, угольная пыль, цемент и т.п.), так и для мокрого, когда измельченный материал в дальнейшем подвергается обработке в виде суспензии, а это чаще всего имеет место при обогащении полезных ископаемых методом флотации и при извлечении ценных компонентов химическим путем.

Барабанные шаровые мельницы. Для мокрого измельчения в зависимости от способа загрузки продукта выпускаются мельницы двух типов: МШР-мельницы шаровые с принудительной разгрузкой через решетку и МШЦ — мельницы шаровые с центральной (сливной) разгрузкой.

Типоразмер шаровых мельниц обозначается цифрами, которые характеризуют диаметр и длину барабана в миллиметрах. Например, МШР-2100×1500 — мельница шаровая с разгрузкой через решетку (диаметр барабана 2100 мм, длина барабана 1500 мм); МШЦ - 2100×3000 — мельница шаровая с центральной разгрузкой (диаметр барабана 2100 мм, длина барабана 3000 мм). Шаровые мельницы с разгрузкой через решетку предназначены для получения сравнительно крупного продукта измельчения, а мельницы с центральной разгрузкой — более мелкого продукта. Время пребы-

вания частиц материала в рабочей зоне мельниц типа МШР меньше, а производительность выше, чем у мельниц типа МШЦ.

Барабанные шаровые мельницы (рис. 1.17) состоят из полого стального горизонтально расположенного барабана 5, закрытого с обоих торцов крышками 4 и 8. Если внутреннюю поверхность барабана и торцевых крышек не защитить изнутри особо прочной облицовкой, они быстро изнашиваются и выходят из строя, поэтому поверхности футеруют сменными защитными броневыми плитами 14 из высокомарганцовистой стали. При этом значительно снижается шум при работе мельницы.

Торцевые крышки имеют полые цапфы 2 и 10 (для загрузки и выгрузки материала), которыми они опираются на два подшипника скольжения 3. На полую цапфу 2 установлено устройство 1 для ввода в мельницу питания. Это барабанный или комбинированный питатель, подающий измельчаемый материал через пустотелую цапфу 2, внутри которой имеется спираль 16 для перемещения загружаемого материала внутрь барабана. Исходный материал вместе с определенным объемом воды поступает в специальный приемный короб (на рис. 1.17 не показан), устанавливаемый под питателем 1. Днище короба имеет форму цилиндра, радиус которого несколько больше радиуса вращения крайней точки черпака 15 питателя. При вращении барабана вместе с ним вращается и питатель, захватывая черпаком измельчаемый материал из короба. Зачерпнутая питателем пульпа по улитке питателя 1 проходит через загрузочную цапфу 2 в зону измельчения.

Удаление материала из шаровых мельниц производится через полую цапфу 10 в разгрузочный кожух 11, откуда принудительно выводится наружу с помощью системы элеваторов (на рис. 1.17 не

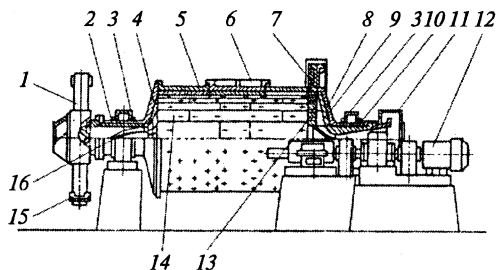


Рис. 1.17. Барабанная шаровая мельница

показаны). У мельниц типа МШР разгрузочная решетка 13 снабжена радиальными ребрами (лифтерами) 9, которые вращаются вместе с барабаном и принудительно поднимают и разгружают измельченный продукт в виде пульпы в разгрузочную цапфу. Этим обеспечивается принудительная разгрузка измельченного материала у мельниц типа МШР. У мельниц с центральной разгрузкой (типа МШЦ) слив осуществляется через разгрузочную цапфу свободным истечением с помощью спирали (шнека), расположенной в полости цапфы 10.

Приводной зубатый венец 7 шаровых мельниц крепится непосредственно на барабан 5 через фланец на разгрузочной крышке 8. Крутящий момент на подвенцовую шестерню передается от привода 12, включающего в себя электродвигатель и редуктор.

Мелющими телами в шаровых мельницах являются литые, кованные или прокатанные стальные шары диаметром 30–125 мм. Шаровая загрузка составляет 35–45% внутреннего объема барабана, который вращается с частотой 20–24 об/мин в зависимости от типоразмера мельницы. Загрузку шаров в мельницу и их выгрузку производят через люк 6.

Узлы трения мельниц обеспечиваются смазкой от двух установок — жидкой и густой смазки. Жидкая смазка подается к подшипникам 3, а также к подшипникам приводного вала и редуктору; густая — к сопряжению зубчатого венца и подвенцовой шестерни.

Питанием шаровых мельниц служит продукт конусных дробилок мелкого дробления крупностью до 25 мм. Крупность готового продукта шаровых мельниц зависит от многих факторов: крупности питания, физико-механических свойств материала, состава и объема шаровой загрузки и т.д. Мельницы типа МШР выдают продукт с максимальной крупностью частиц 0,4 мм. Мельницы типа МШЦ выдают продукт с максимальной крупностью не более 0,2 мм. В зависимости от назначения шаровые мельницы могут работать в открытом цикле или в замкнутом цикле с гидравлическими классификаторами, когда измельченный материал делится еще и на фракции.

Стержневые мельницы. Самостоятельную группу барабанных мельниц составляют так называемые стержневые мельницы, которые применяют как для сухого, так и для мокрого измельчения материалов. Название «стержневые» они получили в связи с тем, что в качестве мелющих тел в барабан загружают металлические

стержни диаметром 40–125 мм и длиной, несколько меньшей длины барабана. Если при падении шаров в барабанных шаровых мельницах происходят точечные удары, то при падении стержней удар распределяется по линии. Поэтому крупность частиц продукта в стержневых мельницах выше, чем в шаровых. Однако в стержневых мельницах процесс идет без переизмельчения материала и продукт получается более однородный по крупности и с меньшим содержанием пыли.

По конструкции стержневые мельницы незначительно отличаются от шаровых. В зависимости от способа измельчения и способа разгрузки продукта стержневые мельницы выпускаются двух типов: МСП – мельницы стержневые сухого помола с периферийной разгрузкой; МСЦ – мельницы стержневые мокрого помола с центральной (сливной) разгрузкой. Диаметр и длина барабана ($D \times L$) положены в основу размерного ряда стержневых мельниц. Отечественной промышленностью выпускаются следующие типоразмеры: МСП-2100×3000, МСП-2700×3000, МСЦ-2100×2200, МСЦ-2100×3000, МСЦ-2700×3600, МСЦ-3200×4500, МСЦ-3600×5000, МСЦ-4000×5500.

Питанием стержневых мельниц служит продукт конусных дробилок мелкого дробления крупностью до 50 мм. Мельницы типа МСП обеспечивают получение продукта крупностью 1,5–5 мм, могут работать в открытом цикле или, если необходимо разделить измельченный материал на фракции и избежать переизмельчения, в замкнутом цикле с классифицирующими устройствами – грохотами, воздушными сепараторами. Мельницы типа МСЦ позволяют получить продукт крупностью 0,5–2 мм и работают обычно в открытом цикле.

Мельницы сухого измельчения. Во многих процессах химической технологии и промышленности строительных материалов находит применение процесс самоизмельчения. Сущность его заключается в том, что куски материала, поступающие в мельницу, измельчаясь, в то же время измельчают более мелкие куски. При этом крупные куски выполняют роль дробящих тел, а мелкие – измельчаемого материала.

Сухое самоизмельчение производится в мельнице (рис. 1.18), представляющей собой короткий барабан 4 большого диаметра, частота вращения которого составляет до 12 об/мин. На внутрен-

ней поверхности вдоль образующей барабана закреплены полки (лифтеры) 8, при помощи которых куски измельчаемого материа-

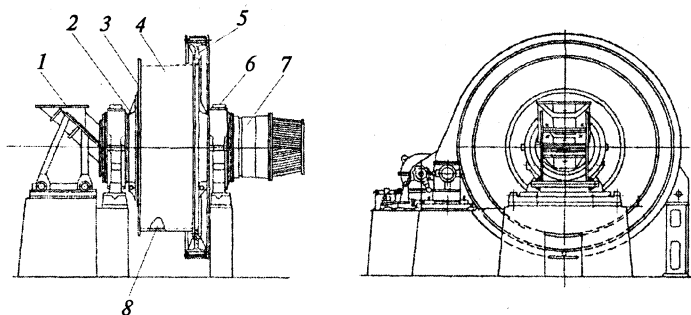


Рис. 1.18. Мельница сухого самоизмельчения

ла поднимаются на определенную высоту и при падении измельчаются от удара и истирания. Для повышения эффективности измельчения иногда в мельницу загружают небольшое количество (до 5% объема барабана) стальных шаров. Торцевые крышки 3 барабана имеют полые цапфы 2, которые установлены в подшипниках 6. Привод барабана осуществляется от электродвигателя, редуктора (на рис. 1.18 не показаны) и зубчатого венца 5, закрепленного на фланце торцевой крышки барабана. К полым цапфам подсоединены загрузочный 1 и разгрузочный 7 патрубки.

В загрузочный патрубок 1 через полую цапфу в барабан непрерывно подается исходный материал и воздух от отдельно стоящего вентилятора, нагретый до температуры 400–600 °С. Через патрубок 7 воздушным потоком отводится готовый продукт. Недоизмельченный материал крупностью свыше 1 мм оседает в зоне разгрузки и либо используется в виде готового продукта, либо возвращается в загрузочный патрубок, а частицы крупностью менее 1 мм удаляются и далее улавливаются в воздушном классификаторе (сепараторе), т.е. мельница работает в замкнутом цикле.

Возможность достижения значительных степеней измельчения без специальных мелющих тел — основное достоинство этого типа мельниц. Недостатками являются сложность установки и

большие затраты энергии на транспортировку и классификацию материала.

Для *мокрого самоизмельчения* используются барабанные мельницы аналогичной конструкции, работающие в замкнутом цикле с гидравлическими классификаторами. Разгрузка таких мельниц осуществляется через решетку.

В измельчителях для *тонкого измельчения* наряду с раздавливанием и ударом основным разрушающим фактором становится истирание. Чтобы получить истирающий эффект, раздавливающий материал должен в соответствующих точках иметь разность линейных скоростей движения. Это предусмотрено во всех конструкциях измельчителей истирающе-раздавливающего действия. К ним относятся: роlikокольцевые и шарокольцевые мельницы, жернова, бегуны, катково-тарельчатые и бисерные мельницы.

Роlikокольцевые мельницы. Рабочими органами таких мельниц являются ролики, измельчающие материал раздавливанием и исти-

рением на поверхности размольного кольца. Используют мельницы двух конструктивных исполнений — вертикальные и горизонтальные. Главными их различиями являются положение рабочих элементов (роlikов и размольного кольца) и принцип создания раздавливающих усилий: у вертикальных мельниц эти усилия создаются пружинами, у горизонтальных — центробежными силами.

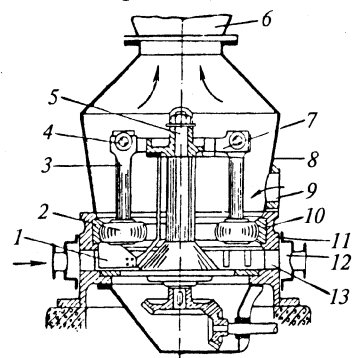


Рис. 1.19. Роlikокольцевая горизонтальная мельница

На рис. 1.19 показана горизонтальная роlikокольцевая мельница, называемая еще роlikомаятниковой. Она состоит из следующих основных узлов: станины 11 с окнами 13 для воздуха и запрессованным в нее размольным кольцом 10; кожуха 8 со штуцером питания 9; воздушного сепаратора 6, установленного над кожухом; размольного узла, включающего ролики 2, оси роlikов 3, шарниры 4 и крестовину 7, которая крепится на валу гайкой; центрального вала 5 с установленными на

нем наклонными скребками 1; воздушного короба 12 со штуцерами для подвода воздуха, которые крепятся к станине. Привод вала осуществляется через коническую зубчатую пару.

В этой мельнице материал измельчается между неподвижным кольцом 10 и быстро вращающимися роликами 2, подвешенными на осях 3 через осевой шарнир 4 на крестовине 7, закрепленной на вертикальном валу 5. Число роликов в зависимости от размеров мельницы составляет от двух до шести, частота вращения вала от 200 до 142 об/мин. При вращении вала ролики центробежной силой прижимаются к рабочей поверхности неподвижного размольного кольца и, вращаясь вокруг своей оси, измельчают материал.

Исходный материал питателем (на рис. 1.19 не показан) подается в корпус 8 мельницы через штуцер 9. Затем наклонными скребками 1, закрепленными на валу 5, материал поднимается на размольное кольцо 10, где он попадает под вращающиеся ролики 2 и размалывается. Измельченный материал потоком воздуха, поступающим от вентилятора через штуцеры в коробе 12 и отверстия 13 в станине, подхватывается и перемещается в воздушный сепаратор 6, где крупная фракция отделяется и возвращается в мельницу на доизмельчение, а мелкая фракция в качестве готового продукта направляется на дальнейшую переработку.

Роликокольцевые мельницы применяют для сухого тонкого измельчения материалов малой и средней прочности (известняк, мел, тальк, кварцевый песок и др.). Их достоинствами является компактность и возможность изменения степени измельчения в широких пределах. К недостаткам можно отнести сложность конструкции и большие эксплуатационные расходы.

Шарокольцевые мельницы. Здесь измельчение материала происходит между шарами и размольным кольцом либо под действием усилий в сжатых пружинах, либо за счет центробежных сил. Конструктивное исполнение может быть вертикальным и горизонтальным, как и роликокольцевых мельниц.

На рис. 1.20 представлена одноярусная шарокольцевая мельница. В такой мельнице материал измельчается между шарами 6 и размольным кольцом 14, закрепленным на вращающемся водиле 5. Водило получает вращение от вала 1 через коническую зубчатую передачу 3. Вал нижним концом установлен в подпятнике 2, закрепленном в корпусе 4. К рабочей дорожке размольного коль-

ца 14 шары прижимаются при помощи кольца 7 и пружин 8, сжатие которых можно изменять регулировочными винтами 9. В результате в такой мельнице возможно измельчать хрупкие материалы различной прочности.

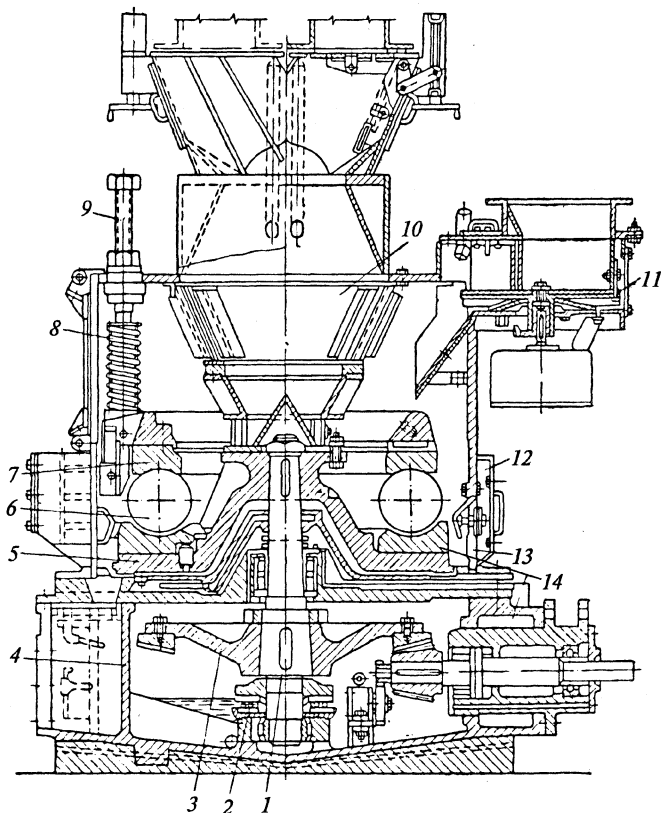


Рис. 1.20. Шарокольцевая мельница

Измельчаемый материал подается питателем 11 в центральную часть водила 5. При его вращении материал отбрасывается центробежной силой, попадает под шары 6 и измельчается. Идущий снизу из воздушного короба 12 через окна 13 воздух подхватывает измельченный материал и выносит его в сепаратор 10, откуда крупные частицы возвращаются в мельницу на доизмель-

чение, а целевой продукт уносится потоком на дальнейшую переработку. Таким образом, измельчение и улавливание готового продукта осуществляются в замкнутом цикле, как и в роlikокольных мельницах.

Жерновые измельчители. Основными рабочими элементами жернового измельчителя (рис. 1.21) являются два каменных круга 3 и 4 — жернова, которые размещены в кожухе 7. Нижний жернов крепится на опорном колесе 9 и приводится во вращение от вала 10 (частота вращения достигает 3000 об/мин и более), который нижним концом опирается на подпятник 11. Верхний жернов остается неподвижным и своим весом, а также с помощью пружин 8 через бандаж 5 прижимается к подвижному.

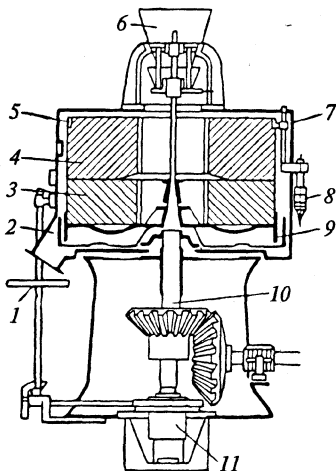


Рис. 1.21. Жерновая мельница

Измельчаемый материал через воронку 6 поступает внутрь верхнего жернова и затем центробежными силами, а также с помощью специальных насечек на рабочих поверхностях жерновов затягивается между последними и измельчается. Измельченный материал выбрасывается в кожух 7 и выходит через штуцер 2. Крупность помола регулируется установочным устройством 1, позволяющим перемещать один из жерновов в осевом направлении.

В химической промышленности жерновые мельницы применяют для размалывания и истирания красителей. Главным их достоинством является инертность материала мелющих элементов — жерновов. Дело в том, что при измельчении и растирании материалов рабочие поверхности измельчителя частично изнашиваются и загрязняют измельчаемый материал. Загрязнение красителей частицами металла приводит к изменению цвета красителя, неустойчивости его при воздействии света, теплоты или атмосферных осадков. Такая опасность уменьшается, если рабочие поверхности измельчителя изготовлены из инертного матери-

ала. В современных жерновых мельницах жернова изготавливаются из корунда.

Бегуны (рис. 1.22) состоят из массивных катков 1, закрепленных на полуосях 2, шарнирно соединенных с водилом 3. Водило установлено на валу 4, опирающемся на подпятник 7 и через втулку 9 на чашу 5. Привод вала осуществляется через коническую зубчатую пару 6. Водило 3, вращаясь, увлекает за собой катки 1, заставляя их бегать (отсюда «бегуны») по дну чаши.

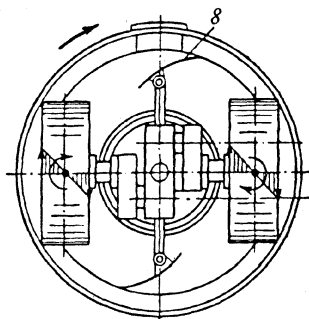
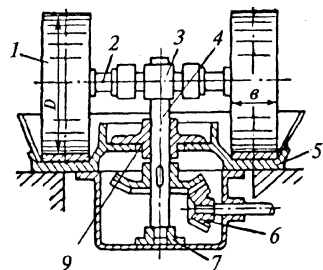


Рис. 1.22. Бегуны

Сырье подается в чашу, где измельчается катками до частиц нужного размера (0,04 мм и менее). В процессе измельчения центробежные силы сдвигают материал к наружной стенке чаши, откуда его возвращают снова под катки с помощью специальных скребков 8. При попадании кусков под тяжелые катки происходит их раздавливание, а при поворачивании катков относительно их вертикальной оси — истирание.

Существуют различные конструкции бегунов для сухого и мокрого измельчения, но основной принцип их работы такой же, как у рассмотренных бегунов.

Катково-тарельчатые мельницы. К раздавливающе-истирающим измельчителям относятся также катково-тарельчатые (или катково-дисковые) мельницы, устройство одной из которых показано на рис. 1.23. Измельчаемый материал через штуцер питания 7 поступает на вращающуюся тарелку 2 с закрепленными на ней броневыми плитами 3. Далее материал попадает под катки 5, которые закреплены на осях 6 и прижимаются к плите 3 под действием как собственного веса, так и пружин 9 через рычаги 8, установленные на осях 4. Фиксация рычагов осуществляется упорными винтами 11. Под катками материал измельчается и центробежной силой

отбрасывается к броневому кольцу 12. Поступающий через окна 14 в корпусе 1 воздух проходит по кольцевой щели между тарелкой 2 и броневым кольцом 12, подхватывает измельченный материал и выносит его в сепаратор 10. Крупная фракция из сепаратора возвращается в мельницу на доизмельчение, а целевой продукт вместе с потоком воздуха уходит на дальнейшую переработку. Работа осуществляется посредством привода 13.

Катково-тарельчатые мельницы по способу измельчения похожи на бегуны, но имеют ряд особенностей. В обычных бегунах материал разрушается под действием силы тяжести катков, поэтому катки должны быть массивными и бегуны весьма громоздки. Так как в катково-тарельчатых мельницах к весу катков добавляется усилие, создаваемое специальными пружинами, у измельчителей этого типа катки имеют значительно меньшие размеры и сама машина более компактна. В рабочем положении между катками и тарелкой с помощью упорных винтов 11 устанавливают зазор примерно 0,5 мм, который предохраняет рабочие поверхности мельницы от преждевременного износа.

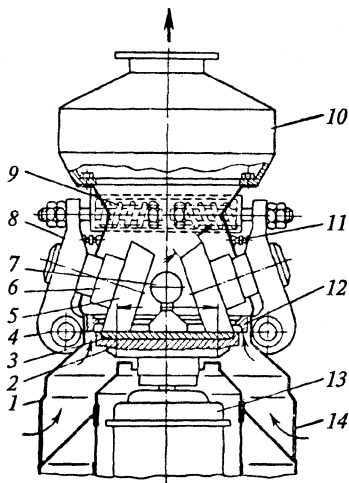


Рис. 1.23. Катково-тарельчатая мельница

Бисерные мельницы относятся к измельчителям истирающе-раздавливающего действия и находят широкое применение в производстве пигментов, красок, эмалей и других аналогичных материалов.

Бисерный измельчитель (рис. 1.24) состоит из корпуса, внутри которого размещены один или два дисковых ротора, и станины, на которой размещены привод и насос. Вертикальный цилиндрический сосуд 1 с рубашкой охлаждения 2 (рис. 1.24, а) примерно на 80% заполняют специально приготовленным кремне-кварцевым бисером 10 (стеклянные шары диаметром 1–2 мм) или крупнозернистым износостойким песком (размер частиц 0,6–0,8 мм). При

вращении ротора (вал 3 с насаженными на него дисками 4) с помощью привода 8 бисер приводится в движение и в результате ин-

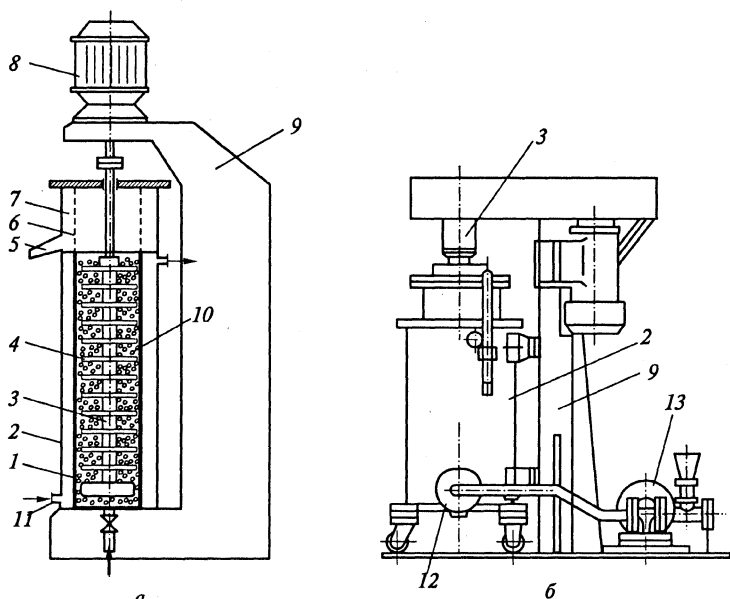


Рис. 1.24. Бисерный измельчитель:
а — схема; б — общий вид

тенсивного трения и соударения мелющих тел частицы материала измельчаются. Диаметр дисков равен примерно $4/5$ диаметра цилиндрического корпуса.

Предварительно приготовленная суспензия подается насосом 13 (рис. 1.24, б), установленным на станине 9, через входной штуцер 12 в камеру измельчения. Там суспензия поднимается вверх, проходя через слой бисеринок, интенсивно измельчается и перетирается, затем фильтруется через сито 6, попадает в приемную кольцевую камеру 7 и выводится по штуцеру 5 на дальнейшую обработку. Чем медленнее подъем суспензии по камере измельчения и интенсивнее вибрация бисеринок, тем лучше перетираются частицы материала. Для охлаждения цилиндрического корпуса в рубашку 2 через штуцер 11 подают холодильный агент.

Отечественной промышленностью выпускаются также бисерные двухроторные мельницы с номинальным объемом камеры измельчения 5, 50 и 125 л. Производительность этих измельчителей по суспензии составляет не менее 20, 230 и 500 кг/ч соответственно, частота вращения валов роторов — 1770, 1160 и 930 об/мин.

В измельчителях ударно-истирающего действия измельчение материала достигается вследствие либо удара со скольжением тела по измельчаемому материалу, либо удара с некоторым поворотом дробящего тела относительно какой-нибудь оси. Этот способ измельчения материала реализуется в вибрационных и планетарных мельницах.

1.5. Расчет на прочность шаровых барабанных мельниц

Угловая скорость вращения ω барабана определяет режим движения мелющих тел, от которого зависит эффективность помола в мельницах. При небольшой угловой скорости загрузка циркулирует в левом нижнем квадранте (рис. 1.25), поднимаясь по концентрическим круговым траекториям на некоторую высоту и затем скатываясь параллельными слоями вниз, не производя удара.

Такой режим работы принято называть каскадным. При большой скорости центробежная сила инерции $P_{\text{и}}$ может превысить силу тяжести мелющего тела (шара) и оно не будет отрываться от стенок даже в верхней точке C , т.е. условие прилипания шара к стенке барабана при вращении имеет вид

$$m \omega_k^2 R > mg,$$

откуда $\omega_k \geq \sqrt{g/R}$,

где ω_k — угловая скорость вращения барабана, при которой шар не будет отрываться от стенки, рад/с; m — масса шара, кг; g — ускорение сво-

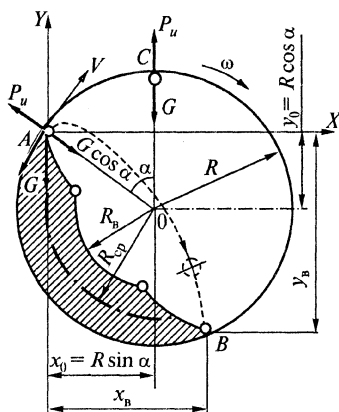


Рис. 1.25. Схема для расчета параметров шаровой барабанной мельницы

бодного падения, м/с²; R — радиус внутренней поверхности барабана, м.

Более рациональным является режим работы мельницы, при котором мелющие тела поднимаются, например, в точку A , а затем, отрываясь от стенок, перемещаются «водопадом» по параболическим траекториям. При этом измельчение осуществляется ударом падающих тел и истиранием.

При подъеме шара в зону отрыва имеет место его подпор расположенными ниже телами. Пренебрегая этим, можно принять, что на шар действуют составляющая силы тяжести $G \cos \alpha$ и сила инерции $P_{\text{и}}$. Шар отрывается от стенок барабана при условии

$$G \cos \alpha \geq P_{\text{и}} \text{ или } mg \cos \alpha \geq m\omega^2 R,$$

откуда можно найти угловую скорость, при которой произойдет отрыв шара от стенок барабана:

$$\omega \leq \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{R}}.$$

Координаты точки A отрыва шара от стенок должны быть такими, чтобы он обладал максимальным запасом кинетической энергии при ударе, т.е. высота его падения должна быть наибольшей.

Траектория параболы (при начале координат в точке A), по которой движется шар после отрыва от стенок, описывается системой уравнений

$$x = vt \cos \alpha; \quad y = vt \sin \alpha - \frac{gt^2}{2},$$

где v — окружная скорость барабана, м/с; t — время с момента отрыва, с.

Подставив в эти уравнения выражение для скорости

$$v = \omega R = R \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{R}}$$

и решив их совместно, получим значение текущей ординаты (уравнение параболы)

$$y = x \operatorname{tg} \alpha - \frac{x^2}{2R \cos^3 \alpha}.$$

Уравнение окружности стенок барабана в координатах с началом в точке A имеет вид

$$(x_B - x_0)^2 + (y_B - y_0)^2 = R^2$$

или

$$x_B^2 - 2Rx_B \sin \alpha - y_B^2 - 2y_B R \cos \alpha = 0.$$

Подставив в это уравнение выражение y с учетом его знака (ниже оси OX ординаты параболы отрицательные) и решив его, получим ординату точки B соприкосновения шара с барабаном после падения:

$$y_B = -4R \sin^2 \alpha \cos \alpha.$$

Для определения максимальной высоты падения шара приравняем первую производную этой функции нулю:

$$y'_B = 8R \sin \alpha \cos^2 \alpha - R \sin^2 \alpha = 4R \sin \alpha (2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) = 0.$$

Очевидно, что α и R не равны нулю, тогда

$$2 \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 0 \text{ или } \operatorname{tg}^2 \alpha = 2$$

и наивыгоднейший угол отрыва $\alpha = 54^\circ 40'$.

Оптимальная угловая скорость, рад/с, барабана при $\alpha = 54^\circ 40'$

$$\omega_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{g \cos 54^\circ 40'}{R}} = \frac{2,38}{\sqrt{R}}.$$

При «водопадном» режиме работы мельницы мелющие тела и материал, называемые загрузкой, на каждом цикле необходимо поднимать по круговой траектории от точки B до точки отрыва A (см. рис. 1.25) и сообщать им кинетическую энергию для полета по параболической траектории со скоростью v . При этом затрачивается работа

$$A_1 = G_{\text{заг}} y_B = m_3 g 4R \sin^2 \alpha \cos \alpha,$$

где m_3 — масса загрузки, кг; $G_{\text{заг}}$ — сила тяжести загрузки, Н.

При расчете мощности можно заменить (без больших погрешностей) все слои загрузки, движущиеся на своих радиусах, одним приведенным слоем радиусом

$$R_0 = \sqrt{\frac{R^2 + R_B^2}{2}},$$

где R_b — расстояние от центра барабана до внутреннего слоя загрузки.

При степени заполнения загрузкой барабана, принимаемой обычно равной 0,3, $R_b = 0,7R$, тогда $R_0 = 0,866R$.

Расчет на прочность. Нагрузки в основных элементах барабанных мельниц бывают статическими и инерционными. Статичес-

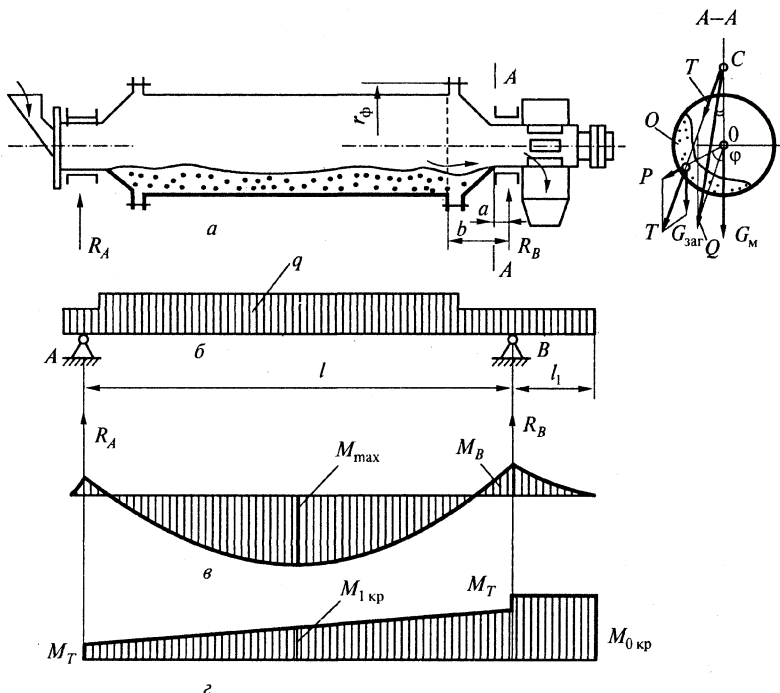


Рис. 1.26. Схема к расчету нагрузок барабанной мельницы:
а — схема нагрузок на барабан; б — в — эпюры соответственно нагрузок, изгибающих и крутящих моментов

кие нагрузки (рис. 1.26, а) создаются силами тяжести вращающихся частей корпуса мельницы G_M и загрузки $G_{\text{заг}}$, контактирующей в данный момент времени с корпусом:

$$G_M = G_1 + G_2 + G_3,$$

где G_1 , G_2 и G_3 — сила тяжести соответственно корпуса с футеровкой, фланцев и диафрагм, Н.

Сила тяжести загрузки, Н,

$$G_{\text{заг}} = k_{\text{ч}} (G_{\text{ш}} + G_{\text{мат}}),$$

где $G_{\text{ш}}$ — сила тяжести шаров, Н; $G_{\text{мат}}$ — сила тяжести измельчаемого материала, Н (принимается равной 14% $G_{\text{ш}}$); $k_{\text{ч}}$ — коэффициент, учитывающий, какая часть загрузки в данный момент движется по круговой траектории, и равный отношению времени движения шаров по круговой траектории к времени цикла

$$k_{\text{ч}} = \frac{t_2}{t} = \frac{2,1}{3,84} = 0,55,$$

где $t_2 = 2,1/\omega$; $t = 3,84/\omega$; ω — угловая скорость вращения барабана, рад/с.

Тогда

$$G_{\text{заг}} = 0,55 (G_{\text{ш}} + 0,14 G_{\text{ш}}) = 0,627 G_{\text{ш}}.$$

Центробежная сила инерции массы загрузки, движущейся по круговой траектории:

$$P = 0,627 m_{\text{ш}} \omega^2 R.$$

Учитывая, что $\omega_{\text{опт}} = 2,38/\sqrt{R}$, получаем

$$P = 3,56 m_{\text{ш}}.$$

Точка приложения сил $G_{\text{заг}}$ и P определяется приведенным радиусом загрузки $R_0 = 0,866 R$ (здесь R — внутренний радиус барабана) и углом $\varphi = 60^\circ$.

Найдем равнодействующие (см. рис. 1.26, а) сил $G_{\text{заг}}$ и P :

$$T = \sqrt{P^2 + G_{\text{заг}}^2 - 2PG_{\text{заг}} \cos 120^\circ};$$

сил T и $G_{\text{м}}$:

$$Q = \sqrt{T^2 + G_{\text{м}}^2 - 2TG_{\text{м}} \cos 160^\circ}.$$

Угол между силами находим графически или по теореме синусов.

Интенсивность распределенной нагрузки, действующей на корпус мельницы в плоскости равнодействующей Q , Н/м (рис. 1.26, б):

$$q = Q/l.$$

Максимальный изгибающий момент, Н·м (рис. 1.26, в):

$$M_{\max} = ql^2/8 = Ql/8,$$

где l — расстояние между подшипниками, м.

Эпюра крутящих моментов, действующих на корпус мельницы, показана на рис. 1.26, г.

На участке от муфты до первого (со стороны муфты) подшипника действует полный крутящий момент, Н·м, подводимый к барабану:

$$M_0 = 1000 N/\omega,$$

где N — мощность, подводимая к валу мельницы, кВт; ω — угловая скорость, рад/с.

Вследствие трения в подшипнике крутящий момент уменьшается на величину

$$M_T = R_B \mu r_{\text{ц}},$$

где R_B — нагрузка на подшипник, Н; μ — коэффициент трения в подшипнике; $r_{\text{ц}}$ — радиус цапфы, м.

По длине корпуса крутящий момент изменяется по наклонной. Наиболее опасное сечение — в середине пролета, где приведенный момент

$$M_{\text{пр}} = \sqrt{M_{\max}^2 + M_{\text{лкр}}^2}.$$

Напряжение в этом сечении, Н/м²:

$$\sigma = \frac{M_{\text{пр}}}{kW},$$

где $k = 0,8$ — коэффициент, учитывающий ослабление сечения вырезами и отверстиями для болтов; W — момент сопротивления сечения корпуса, м³.

Болты, крепящие фланцы к корпусу мельницы, рассчитывают на срез и растяжение.

Суммарная сила среза болтовых соединений, Н

$$P_{\Sigma} = Q + P_0,$$

где Q — перерезывающая сила в рассматриваемом сечении, Н (см. рис. 1.26, в); P_0 — окружное усилие приложенное к болтовому соединению:

$$P_0 = M_{\text{кр}}/r_0,$$

r_6 — радиус окружности центров болтов, м.

Усилие, растягивающее болты, является суммой усилия, вызываемого действием изгибающего момента, и усилия затяжки болтов:

$$S_p = k_y S_M + S_3,$$

где $k_y = 0,2 \dots 0,3$ — коэффициент, учитывающий упругость болтового соединения.

Усилие, растягивающее болт, вызывается изгибающим моментом M , действующим в сечении болтового соединения:

$$S_M = \frac{M}{\varepsilon z r_\phi} = \frac{R_b b}{\varepsilon z r_\phi},$$

где R_b — реакция в опоре, Н; b — расстояние от середины подшипника до плоскости разреза, м; ε — коэффициент, учитывающий неравномерность затяжки; z — число болтов; r_ϕ — радиус фланцев.

Усилие затяжки определяется как

$$S_3 = (0,4 \dots 0,5) \sigma_T F,$$

где σ_T — предел текучести материала болтов, Н/м²; F — площадь сечения нарезной части болта, м².

1.6. Мельницы сверхтонкого измельчения

Вибрационные мельницы (рис. 1.27) представляют собой цилиндрический корпус 1 с загрузочным люком 8, примерно на 80% своего объема загруженный стальными или фарфоровыми ша-

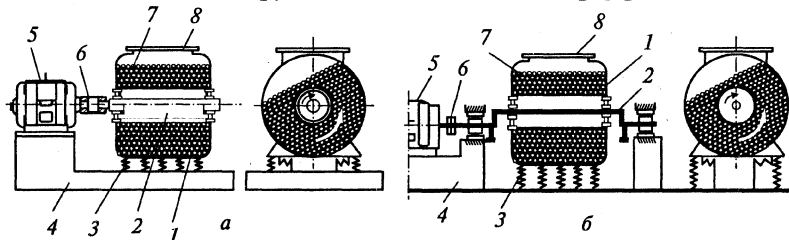


Рис. 1.27. Схема вибрационной мельницы:
а — инерционного типа; б — гирационная

рами 7. Корпус установлен на раме 4 с помощью пружинных или резиновых опор 3, которые предотвращают передачу вибраций на раму мельницы. Корпус приводится в колебательное движение валом (вибратором) 2, снабженным дебалансом. Вибратор вращается от электродвигателя 5 через муфту 6. Мельницы, имеющие вибратор с дебалансовым валом (рис. 1.27, а), называют *инерционными*. Если на валу вибратора вместо дебалансового груза предусматриваются эксцентриковые шейки, на которые с помощью подшипников подвешивается барабан мельницы, то барабан вместе с шарами совершает круговые движения в соответствии с эксцентриситетом шейки вала. Мельницы с таким вибратором носят название *гирационных* (рис. 1.27, б). По эффективности измельчения они не отличаются от инерционных, но из-за трудности их уравнивания получили гораздо меньшее распространение.

При вращении неуравновешенной массы вибратора 2 с высокой скоростью (1500–3000 об/мин) корпус 1 с загруженными в него шарами и измельчаемым материалом вибрирует (амплитуда колебаний 2–4 мм), передавая колебания шарам. В результате при соударении вибрирующих шаров материал интенсивно измельчается.

На рис. 1.28 показана вибрационная мельница инерционного типа с гуммированным покрытием корпуса, предназначенная для измельчения таких материалов, которые качественно меняются от соприкосновения с открытыми металлическими частями измельчителя. Она состоит из цилиндрического корпуса 3 с люком 10, вала с дебалансом 11, пружинных опор 2, опорной рамы 1, электродвигателя 14 и эластичной муфты 13, соединяющей вал двигателя с валом вибратора. Вибратор состоит из вала с дебалансом 11, установленного на двух подшипниках 7, посаженных в трубе 4. Вибратор крепится в корпусе с помощью клиновидных разрезных колец 8 и предохраняется от повреждений защитной гильзой 9. По концам вала закреплены дополнительные дебалансы 6, которые позволяют регулировать амплитуду колебаний вибратора. При высокой интенсивности измельчения внутри мельницы может повышаться температура, поэтому в ее конструкции предусматриваются штуцеры 5 и 12 для охлаждающей воды.

Вибрационные мельницы используют для сухого и мокрого измельчения периодическим и непрерывным способами. Исходная крупность частиц составляет 1–2 мм, крупность частиц в про-

дукте — до 0,005 мм. Частицы материала все время находятся во взвешенном состоянии и вибрируют, что препятствует их слипанию и спрессовыванию.

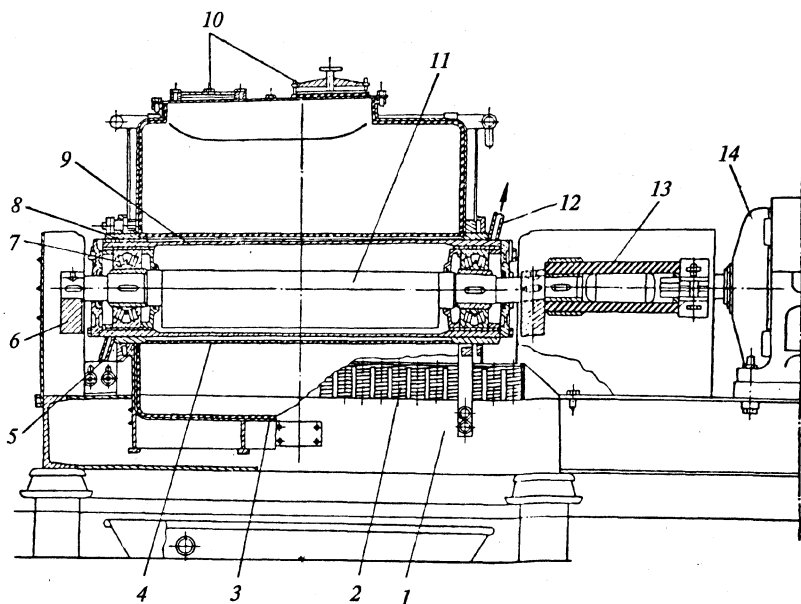


Рис. 1.28. Вибрационная мельница инерционного типа

Коллоидные мельницы. При *коллоидном* измельчении получается продукт, размер частиц которого близок к коллоидным, т.е. порядка единиц или долей микрометра. В этом случае частицы материала слипаются или даже спрессовываются под действием внешних сил. Чтобы избежать укрупнения частиц, коллоидное измельчение ведется в присутствии диспергирующей среды, в качестве которой обычно применяют жидкость и реже газ. Главное требование к диспергирующей среде — она не должна растворять дисперсную фазу. Отношение твердой фазы к жидкой обрабатываемой системы в зависимости от измельчаемого материала меняется от 1:2 до 1:6. Так как частицы коллоидного размера под действием сил притяжения могут укрупняться и выпадать в осадок даже в диспергирующей среде, для предотвращения этого процесса к

диспергирующей среде добавляют электролиты, которые образуют на поверхности раздела фаз ионные слои и гидратную оболочку, таким образом стабилизируя систему.

Конусные коллоидные мельницы с рифлеными рабочими поверхностями. Главными элементами этой мельницы (рис. 1.29) являются конусный ротор 2 и статор 5, заключенные в корпус 3. Ротор и статор по высоте разделены на несколько (на рис. 1.29 — на две) кольцевых зон, имеющих на поверхности наклонные параллельные канавки 6, ширина которых уменьшается, а количество увеличивается по мере перехода от верхних зон к нижним (по ходу

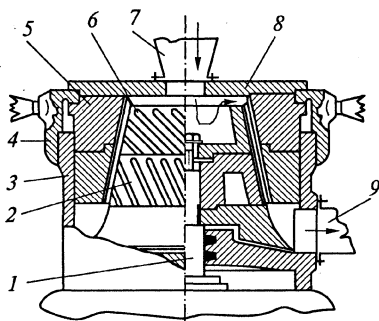


Рис. 1.29. Конусная коллоидная мельница

движения суспензии). Канавки статора и ротора направлены в противоположные стороны и пересекаются. Статор укрепляется в корпусе 3 накидной гайкой 4, а ротор посажен на вал 1 двигателя.

Подлежащий измельчению материал в виде пульпы через воронку 7 в крышке 8 поступает на верхний торец ротора, попадает в зазор между статором и ротором, продвигается по этому зазору вниз, измельчается между

пересекающимися канавками и удаляется через выводной штуцер 9. Интенсивность измельчения материала по мере продвижения его вниз увеличивается.

Степень измельчения регулируется зазором между ротором и статором. Этот зазор может меняться навинчиванием или отвинчиванием накидной гайки 4, что позволяет приспособить мельницу к крупности исходного сырья. Такие мельницы предназначены для измельчения материалов в лакокрасочной, резиновой, пищевой и других отраслях промышленности.

Роторно-бильные коллоидные мельницы. Рабочими элементами этой конструкции являются била 3 (рис. 1.30), закрепленные на роторе 4, и контрударники 6, заделанные в корпус 1. При этом ряды бил ротора расположены между рядами контрударников корпуса. Ротор посажен на вал 5, который вращается с частотой от 1500 до 3000 об/мин. С торца корпус закрыт крышкой 2.

Подлежащий измельчению материал поступает в мельницу через штуцер 8 в направлении, противоположном вращению ро-

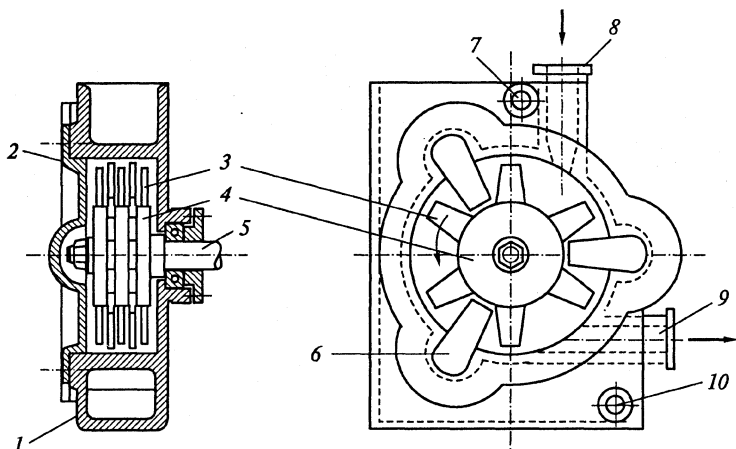


Рис. 1.30. Роторно-бильная коллоидная мельница

тора, а измельченный материал удаляется через штуцер 9. Корпус мельницы снабжен рубашкой для охлаждения (или подогрева) измельчаемой суспензии. Теплоноситель подается через штуцер 10 и выводится через штуцер 7.

Высокая степень измельчения материала в этих мельницах (частицы продукта имеют размер от 1 до 20 мкм) достигается не только в результате истирания и сжатия частиц между билами и контрударниками, но и за счет кавитационного эффекта, возникающего вследствие высокой скорости движения частиц и соударения их с контрударниками.

Газоструйные мельницы. В этих мельницах для измельчения используется энергия газовой струи, подаваемой с большой скоростью из сопел в размольную камеру различных конструкций. По устройству размольных камер газоструйные мельницы делят на три типа: с плоской горизонтальной камерой, трубчатой вертикальной камерой и противоточной камерой.

На рис. 1.31 показана схема устройства *струйной мельницы с плоской горизонтальной размольной камерой*. Она состоит из размольной камеры 1 и установленного под ней циклона-сепаратора 6.

Подлежащий измельчению материал специальным инжектором через штуцер 5 подается в камеру измельчения 1, куда по штуцеру

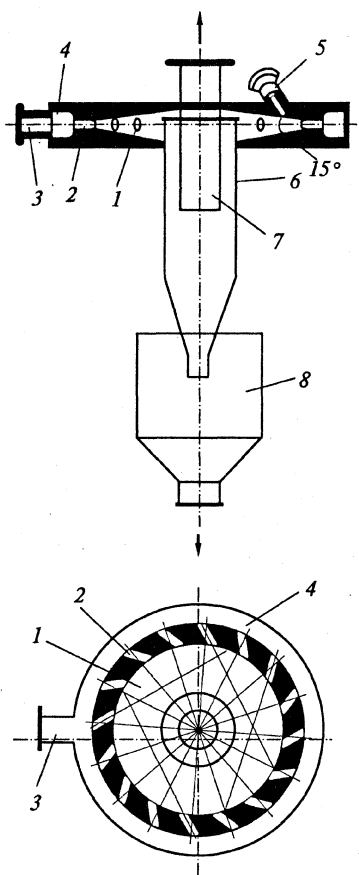


Рис. 1.31. Схема струйной мельницы с горизонтальной размольной камерой

3 через распределительное кольцо 4 и сопла 2 поступает также энергоноситель (газ или пар). Сопла в камере измельчения установлены таким образом, что струи газа пересекаются с частицами материала. Частицы материала в местах пересечения струй соударяются с большой скоростью и измельчаются. Поскольку струи газа входят в камеру измельчения под некоторым углом, вся масса пылегазовой смеси приобретает вращательное движение. Частицы по мере уменьшения размера и массы испытывают все меньшее воздействие центробежной силы инерции и, измельчившись до определенного размера, попадают из камеры измельчения вместе с газовым потоком в кольцевую щель между корпусом циклона-сепаратора 6 и трубой 7. До 80% крупных частиц осаждаются на внутренней поверхности сепаратора и удаляются в сборник 8, а мелкая фракция через отводную трубу 7 вместе с потоком газа направляется на окончательную очистку.

Струйные мельницы с плоской размольной камерой (диаметром от 50 до 1000 мм) применяют для тонкого измельчения серы, сурика, талька, известняка, диоксида титана и т.д. Крупность исходного сырья для таких мельниц находится в пределах 0,1–0,5 мм. Конечный продукт имеет крупность 20 мкм и менее. Например,

Конечный продукт имеет крупность 20 мкм и менее. Например,

при измельчении оксида титана получают продукт крупностью 1 мкм и менее.

На рис. 1.32 показана схема устройства *струйной мельницы с трубчатой вертикальной размольной камерой*. Измельчитель состоит из размольной трубчатой камеры, в нижней части которой

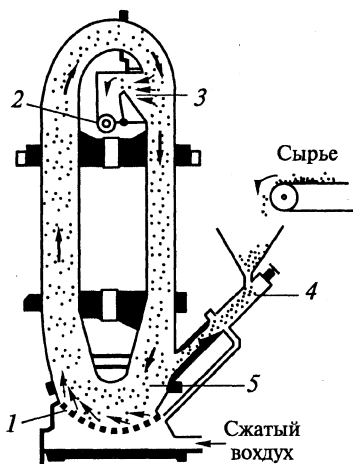


Рис. 1.32. Схема струйной мельницы с трубчатой вертикальной размольной камерой

расположены два ряда сопел 1. Каждая пара сопел наклонена друг к другу таким образом, чтобы каждая пара струй пересекалась в вертикальной плоскости на некотором расстоянии от противоположной стенки трубы. Как и в плоской размольной камере, материал измельчается при многократных соударениях частиц в точках пересечения струй.

Подлежащий измельчению материал (сырье) подается в камеру измельчения 5 из приемной воронки инжектором 4, в который по трубке поступает энергоноситель (сжатый воздух). Измельченный материал по трубе поднимается

сверху, и при повороте пылегазового потока частицы подвергаются действию центробежных сил. Крупные частицы прижимаются к внешней стенке сепарационной трубы и опускаются в размольную камеру на доизмельчение. Мелкие частицы, движущиеся у внутренней стенки трубы, выходят вместе с газом через классификатор 3 в штуцер 2 для вывода продукта и далее на окончательную очистку в циклонах или матерчатых фильтрах. Классификатор 3 дополнительно отражает крупные частицы, которые по трубе опускаются вниз в размольную камеру 5.

Крупность частиц исходного сырья составляет 0,2–0,5 мм, крупность частиц продукта, которая зависит от радиуса закругления сепарационной трубы, ее диаметра, положения жалюзийной решетки, достигает нескольких микрометров. В трубчатых мельницах достигается большая однородность измельченного продукта, чем в мельницах с плоской горизонтальной камерой.

1.7. Расчет параметров колебательных движений вибромельниц

Колебательные движения корпуса вибромельницы (рис. 1.33) можно описать системой дифференциальных уравнений:

$$M\ddot{x} + b_x \dot{x} + c_x x = m_d \omega^2 R \cos \omega t;$$

$$M\ddot{y} + b_y \dot{y} + c_y y = m_d \omega^2 R \sin \omega t,$$

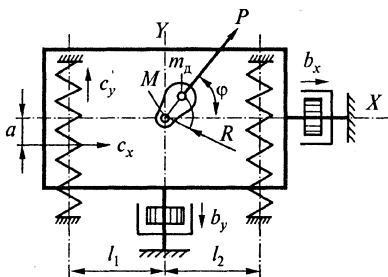


Рис. 1.33. К расчету вибромельниц

где x и y — координаты колеблющегося центра масс, отсчитываемые от положения равновесия; c_x и c_y — жесткости опорных устройств по соответствующим координатам; b_x и b_y — коэффициенты сопротивления диссипативных сил по соответствующим осям; m_d — масса дебаланса

вибратора, кг; ω — угловая скорость вала вибратора, рад/с; R — радиус центра масс дебаланса, м; t — время, с; $M = m_k + m_b + K_{\Pi} (m_T + m_M)$ — масса колеблющейся системы, кг, где m_k и m_b — массы корпуса мельницы и вибратора соответственно; $K_{\Pi} = 0,2 \dots 0,3$ — коэффициент присоединения загрузки к колебаниям; m_T и m_M — массы мелющих тел и измельчаемого материала соответственно.

Решая исходные дифференциальные уравнения, для установившегося режима имеем

$$x = x_A \cos (\omega t - \varphi_x);$$

$$y = y_A \sin (\omega t - \varphi_y),$$

где φ_x и φ_y — начальные фазы колебаний по соответствующим координатам x и y .

Амплитудные значения перемещений системы

$$x_A = \frac{m_d \omega^2 R}{\sqrt{(c_x - M \omega^2)^2 - b_x^2 \omega^2}}; \quad y_A = \frac{m_d \omega^2 R}{\sqrt{(c_y - M \omega^2)^2 - b_y^2 \omega^2}}.$$

Начальные фазы колебаний

$$\varphi_x = \arctg \frac{b_x \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}; \quad \varphi_y = \arctg \frac{b_y \omega}{\omega_0^2 - \omega^2},$$

где ω_0 — собственная частота колебаний системы, рад/с.

Улучшение условий работы вибромельницы и упрощение виброизоляции несущих конструкций достигаются, если ось вращения вибратора совмещается с осью центра масс системы, реакции опор проходят через центр масс пружин, т.е. $l_1 = l_2$ и $a = 0$ (здесь l_1, l_2 — расстояния от центра масс до соответствующих опор; a — расстояние от центра масс системы до центра масс пружины) и собственные частоты всех видов колебаний равны между собой, но поскольку частоты собственных колебаний системы $\omega_0 = \sqrt{c/M}$, то $c_x = c_y$.

При таких условиях траектория колебаний будет близка к круговой. Сопротивления диссипативных сил (сопротивление воздуха, трение в опорных узлах и др.) обычно составляют менее 10% общих сопротивлений, и для упрощения расчетов ими можно пренебречь, т.е. $b_x = b_y = 0$. Тогда $x_A = y_A = A$. Учитывая это, а также, что $c = M\omega_0^2$, получаем амплитуду колебаний

$$A = \frac{m_d \omega^2 R}{M(\omega_0^2 - \omega^2)}.$$

Лучшая виброизоляция несущих конструкций реализуется при жесткости пружин такой, что отношение $\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{1}{4} \dots \frac{1}{5}$, т.е. если мельница работает в режиме гибкого вала — в зарезонансном режиме. Обычно частоту и амплитуду колебаний задают из технологических соображений, а дебалансовый момент вибратора рассчитывают:

$$M_b = m_d R = MA.$$

1.8. Назначение и классификация оборудования для смешения сыпучих и пастообразных материалов

Процесс смешения сыпучих и пастообразных материалов широко распространен в химической, нефтехимиче-

ской, пищевой, строительной и других отраслях промышленности. Для этих целей химическое машиностроение выпускает смесители разнообразных конструкций.

Под смешением понимается такой механический процесс, в результате которого первоначально находящиеся раздельно компоненты после равномерного распределения их в смешиваемом объеме материала образуют однородную смесь.

При выборе смесителя необходимо знать параметры материала. Так, сыпучий материал характеризуется в основном следующими параметрами: *насыпная плотность*, кг/м^3 , — это масса сыпучего материала, находящаяся в единице занимаемого им объема; *влажность* (или влагосодержание) — отношение массы влаги, содержащейся в сыпучем материале, к массе абсолютного сухого материала; *текучесть* — способность сыпучих материалов вытекать с той или иной скоростью из отверстий; *угол естественного откоса* — угол, образуемый линией естественного откоса сыпучего материала с горизонтальной плоскостью; *адгезия* — способность прилипать к твердым поверхностям, которая оценивается силой отрыва частицы от поверхности, направленной перпендикулярно этой силе; *слеживаемость* — способность сыпучих материалов уплотняться при длительном хранении.

К *пастообразным материалам* относятся густые суспензии, эмульсии, расплавы и некоторые растворы. Для них характерны ограниченная подвижность, обусловленная высокой вязкостью, и сравнительно большой период релаксации напряжений.

Все разнообразие существующих смесителей разделяют на смесители для сыпучих и для пастообразных материалов, которые в свою очередь классифицируют по различным признакам. Пример такой классификации приведен на рис. 1.34.

1.9. Смесители для сыпучих материалов

Во многих отраслях промышленности часто возникает задача усреднения (смешения) отдельных партий материала, а также задача введения малых добавок в большие объемы смеси. В химической промышленности это относится к производству полимерных материалов, красителей, минеральных удобрений и т.д.



Р и с. 1.34. Классификация смесителей

Планетарно-шнековые смесители. Отечественной промышленностью выпускаются шесть типоразмеров таких смесителей с рабочим объемом смесительной камеры: 0,63; 1,6; 3,2; 6,3; 10 и 16 м³.

На рис. 1.35 показан планетарно-шнековый смеситель периодического действия (тип ПШ), предназначенный для смешения и

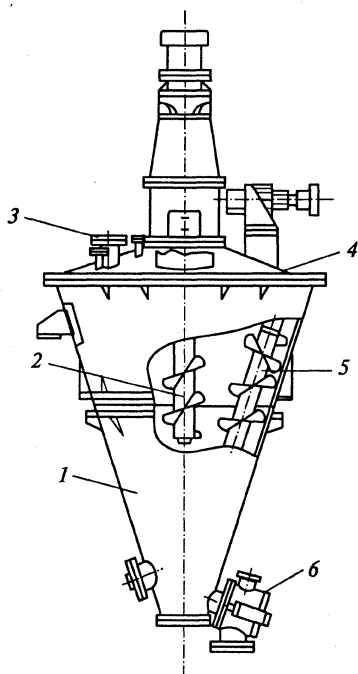


Рис. 1.35. Планетарно-шнековый смеситель

усреднения партий сыпучих материалов с размером частиц не более 5 мм и насыпной плотностью не более 1300 кг/м³. Смеситель представляет собой конический корпус 1, установленный основанием конуса вверх. Внутри корпуса расположены два шнека — центральный 2, смонтированный консольно по оси смесительной камеры, и наклонный 5, установленный вдоль образующей конуса. Частота вращения шнеков составляет 63 об/мин. Наклонный шнек верхним концом с помощью муфты соединен с валом водила и в результате помимо вращения вокруг собственной оси совершает также движение вдоль образующей конуса. Частота вращения водила составляет 2,3 об/мин. Индивидуальные приводы шнеков расположены на крышке 4 корпуса. Вращение шнеков вокруг собственных осей осуществляется от привода, состоящего из мотор-редуктора

или электродвигателя и редуктора; вращение водила — от мотор-редуктора через муфту и червячную передачу. Материал загружают через штуцер 3; выгрузка продукта производится через штуцер 6 с разгрузочным клапаном.

Ленточные смесители (тип Лн) предназначены для смешения сыпучих материалов насыпной плотностью не более 1500 кг/м³, а

также сыпучих материалов с небольшим количеством жидких компонентов, вводимых в распыленном состоянии, с получением готового продукта в виде сыпучей смеси.

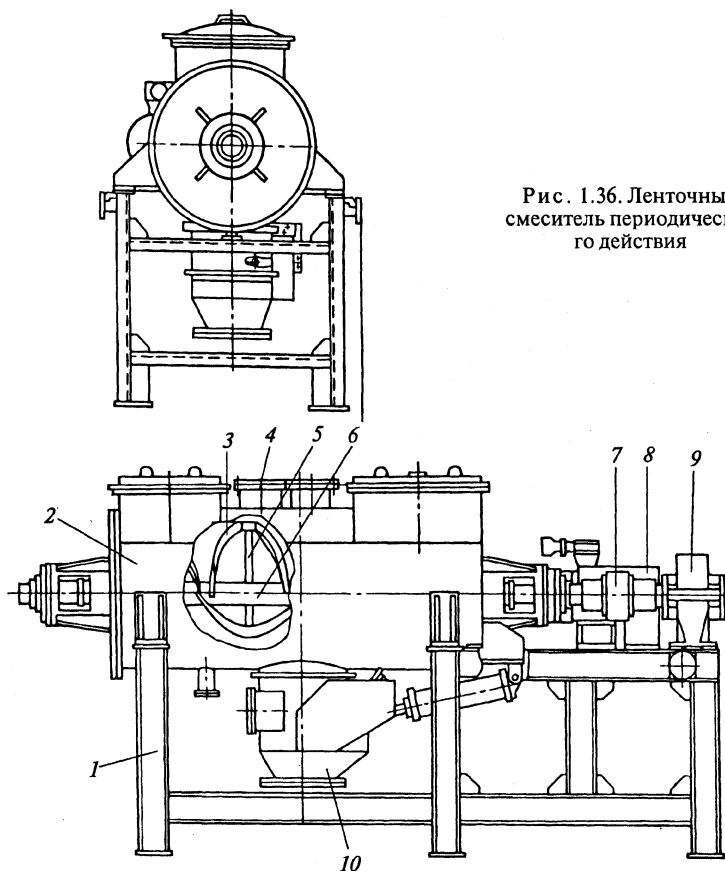


Рис. 1.36. Ленточный смеситель периодического действия

Смеситель (рис. 1.36) представляет собой цилиндрический или корытообразный корпус 2, закрепленный на раме 1 в горизонтальном положении. Внутри корпуса расположен вал 6, на котором на стойках 5 закреплены две пары концентрических спиральных лево- и правозаходных лент 3. В процессе работы наружные ленты перемещают материал в центральную часть корпуса, а внутренние — к его торцовым стенкам.

Вращение вала с частотой 32–20 об/мин (в зависимости от типоразмера смесителя) осуществляется от электродвигателя 8 через редуктор 9 и муфту 7. Исходный материал загружают через штуцер 4; выгрузка продукта происходит через штуцер 10 с разгрузочным клапаном. Серийно изготавливаются ленточные смесители четырех типоразмеров с номинальным объемом смесительной камеры 1,0; 1,6; 3,2 и 10 м³. Рабочий объем составляет 40–70% номинального.

Центробежные смесители эффективны для смешения сыпучих материалов и одновременного разрушения агломератов. *Центробежный лопастной смеситель* периодического действия (тип ЦЛ),

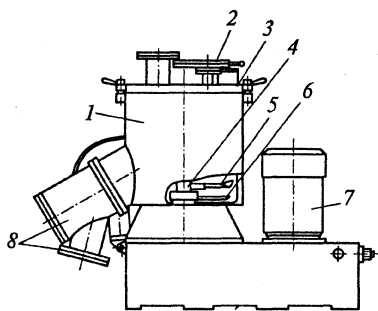


Рис. 1.37. Центробежный лопастной смеситель

показанный на рис. 1.37, состоит из смесительной камеры, представляющей собой вертикальный цилиндрический корпус 1 с рубашкой и плоским отбортованным дном. Рабочий объем смесительной камеры в зависимости от типоразмера составляет от 0,1 до 0,4 м³. Сверху корпус закрыт крышкой 3 со штуцером 2 для загрузки материала. Внутри смесительной камеры размещен рабочий орган, состоящий из лопастной мешалки 5 и скребка 6, установленных на общем вертикальном валу 4. Вал вращается с частотой 720–560 об/мин в зависимости от типоразмера смесителя. Привод вала осуществляется от электродвигателя 7 через клиноременную передачу. Готовый продукт выгружается через разгрузочный клапан в штуцере 8.

На рис. 1.38 показан *центробежный волчковый смеситель* периодического действия. Свое название он получил из-за внешнего сходства вращающегося конуса с волчком. Смеситель состоит из смесительной камеры 4 цилиндрической формы, внутри которой расположены ротор 3 и очистные скребки 2. Ротор представляет собой усеченный конус, установленный на валу 5 основанием вверх. Скребки 2 предусмотрены для очистки внутренних поверхностей смесительной камеры и внутренней поверхности конуса. Они получают вращательное движение от потока материала, увле-

каемого ротором. Частота вращения очистных скребков регулируется ленточным тормозом, расположенным на крышке смесительной камеры. Привод ротора осуществляется от электродвигателя и специального трехскоростного редуктора (частота вращения 160, 100 и 63 об/мин).

При вращении конуса 3 материал, попавший в него при засыпке по штуцеру 1, вследствие сил трения начинает вовлекаться во вращение. Частицы материала под влиянием возникающих при их вращении центробежных сил начинают двигаться вверх по внутренней поверхности конуса, а затем сбрасываются с него в кольцевое пространство между конусом и корпусом смесителя.

Далее материал поступает внутрь конуса из кольцевого пространства и таким образом осуществляются циркуляция и перемешивание материала в смесительной камере. Выгрузка готового продукта производится через штуцер 6.

Волчковый смеситель предназначен для смешивания сыпучих материалов насыпной плотностью не более 1700 кг/м^3 и для приготовления пастообразных смесей с динамической вязкостью 50–200 Па·с.

Фрезерно-лопастные смесители (типа ФЛ) периодического действия (рис. 1.39) предназначены для смешения сыпучих материалов насыпной плотностью до 2000 кг/м^3 и пастообразных жидкотекучих материалов с вязкостью от 10 до 200 Па·с. Такие смесители выпускаются четырех типоразмеров (с номинальным объемом смесителей камеры 0,01; 0,04; 0,16 и $0,63 \text{ м}^3$) и двух модификаций: с рабочим органом в виде двух спиральных лопастей для сыпучих и жидкотекучих смесей, не требующих разрушения агломератов и диспергирования; с рабочим органом в виде зубчатого диска для

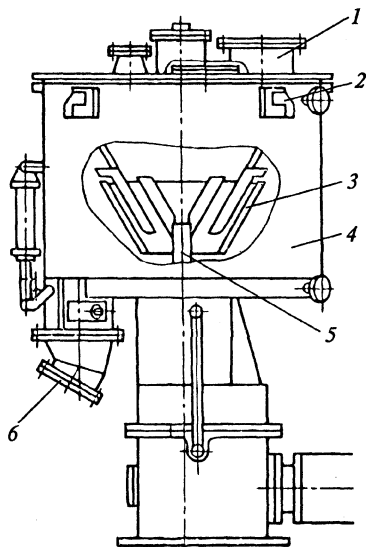


Рис. 1.38. Центробежный волчковый смеситель

пастообразных жидкотекучих смесей, требующих разрушения агломератов и частичного диспергирования.

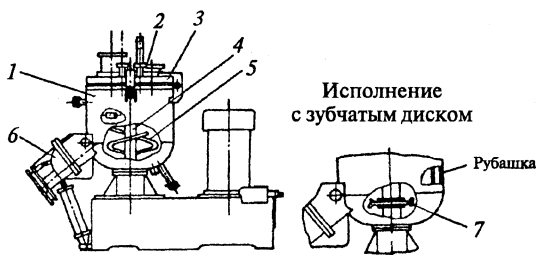


Рис. 1.39. Фрезерно-лопастной смеситель

Корпус 1 смесителя представляет собой вертикальную цилиндрическую емкость с эллиптическим дном и рубашкой. В нижней части он снабжен затвором 6 для выгрузки готовой смеси. На плоской крышке 3 корпуса расположены технологические штуцеры, в том числе штуцер 2 для загрузки материала.

На рабочем органе в виде вертикальной полой гильзы (вал) 4 в зависимости от назначения закреплены две спиральные лопасти 5 или зубчатый диск 7. Отсюда название смесителя — фрезерно-лопастной. Привод рабочего органа осуществляется от электродвигателя через клиноременную передачу. Лопастной рабочий орган вращается с частотой 500 об/мин, зубчатый диск — с частотой 2400 об/мин. За счет большой скорости вращения зубчатого диска происходит разрушение агломератов и диспергирование твердых частиц в жидкости.

Барабанные двухконусные смесители используются главным образом в тех случаях, когда смешиваются высокоабразивные тяжелые порошкообразные материалы и не допускается их загрязнение примесями от износа рабочих поверхностей смесителей. На рис. 1.40 представлен один из таких смесителей. Он имеет вращающийся биконический корпус 1, установленный цапфами 7 в подшипниках скольжения 6, и привод, включающий редуктор 3, клиноременную передачу и электродвигатель 9. Подшипники закреплены на стойках 5. Сыпучие компоненты, заполняющие корпус примерно на 40%, смешиваются в закрытом объеме вследствие связи силами трения с движущейся стенкой корпуса и падения под действием сил гравитации.

Корпус смесителя сварен из двух конических днищ с углом конусности 90° , соединенных между собой короткой цилиндрической

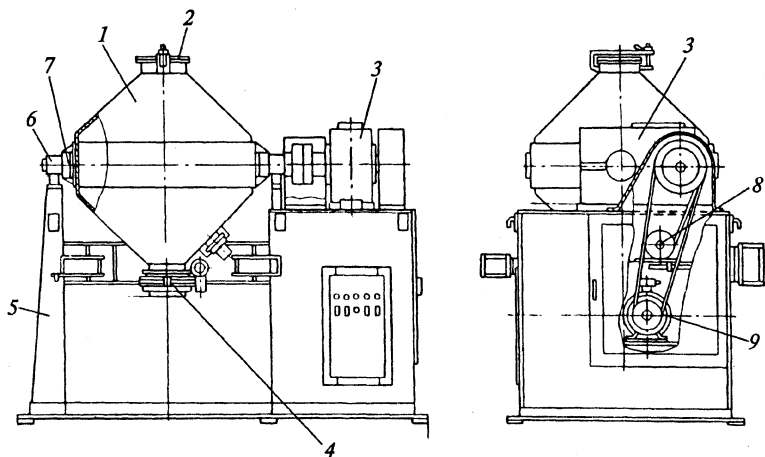


Рис. 1.40. Барабанный двухконусный смеситель

ской обечайкой, к которой соосно приварены две горизонтальные цапфы 7. Такая форма корпуса способствует перекрещиванию потоков материала и соответственно более эффективному смешению. Для остановки корпуса смесителя в требуемом положении служит электромагнитная муфта, размещенная на быстроходном валу редуктора. Вспомогательный привод 8 (мотор-редуктор и клиноременная передача) служит для остановки корпуса в вертикальном положении при загрузке материала и выгрузке продукта. Частота вращения корпуса от основного привода — 20 об/мин, от вспомогательного привода — примерно 1 об/мин.

В верхней части корпуса расположен загрузочный люк 2 (он же используется для осмотров), в нижней части — патрубок 4 для выгрузки, герметично закрываемый дисковым поворотным затвором типовой конструкции с ручным управлением. В нижней части корпуса установлен также вибратор, подключаемый во время разгрузки смесителя для полного его освобождения от продукта. Барабанные двухконусные смесители предназначены для сухого смешения материалов насыпной плотностью не более 3000 кг/м^3 . Они выпускаются двух типоразмеров с номинальным объемом

смесительной камеры 1,6 и 2,5 м³. Объем загрузки исходного материала (т.е. рабочий объем смесительной камеры) составляет не более 40% номинального объема смесителя.

Смесители непрерывного действия. В этих смесителях качество приготовления смесей зависит не только от факторов, определяющих собственно процесс смешения, но и от характера и точности дозирования исходных компонентов. Смеситель непрерывного действия должен обеспечить перераспределение компонентов и сглаживание флуктуаций питающих потоков. Поэтому их работа эффективна при использовании питателей с высокой точностью подачи материала. Наибольшее распространение среди смесителей непрерывного действия получили смесители рециркуляционного типа, в которых используются устройства, изменяющие направление движения потока материала и возвращающие его в зону действия рабочих органов.

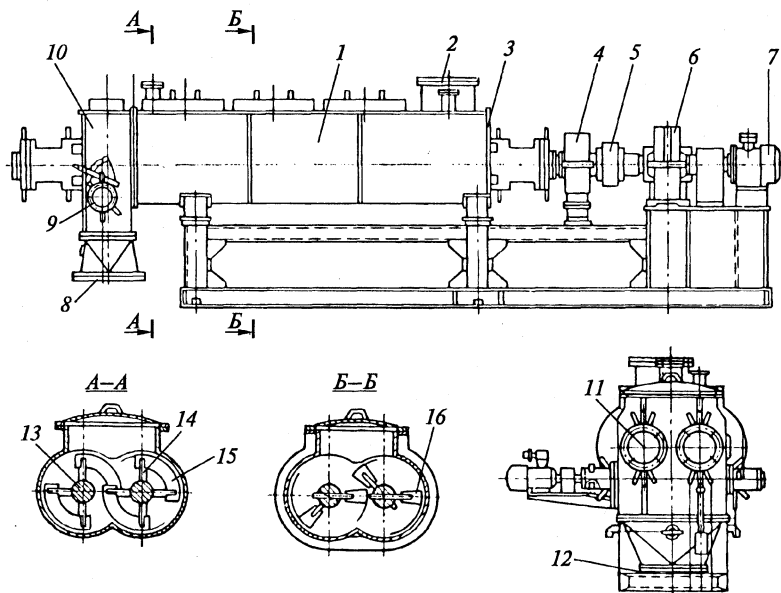


Рис. 1.41. Ленточный смеситель непрерывного действия

К такого типа аппаратам относится *ленточный смеситель непрерывного действия (НДЛ)*, предназначенный для смешивания сыпучих

чих материалов с насыпной плотностью не более 1500 кг/м^3 или сыпучих материалов с небольшими добавками жидких компонентов. Смеситель (рис. 1.41) состоит из горизонтального корпуса 1 корытообразной формы с плоскими торцовыми крышками 3, в которых закреплены два ротора 11 с одним приводом от электродвигателя 7 через редуктор 6, муфту 5 и зубчатую передачу 4. Каждый ротор вращается с частотой 50 об/мин и представляет собой вал 13 с лопатками 16, закрепленными на нем ленточными спиральными лопастями 15 посредством стержней 14 и расположенными по винтовой линии. С одной стороны корпус заканчивается разгрузочной камерой 10, внутри которой установлен рыхлитель массы 9 с индивидуальным приводом. Рыхлитель вращается с частотой 940 об/мин. Выгрузка продукта осуществляется через штуцер 8 и разгрузочный клапан 12, открываемый вручную. С другой стороны корпуса смеситель снабжен штуцером 2 для загрузки материалов.

На рис. 1.42 показан *центробежный смеситель непрерывного действия* (тип НДЦ). Основное назначение таких смесителей — приготовление смесей сыпучих материалов с насыпной плотностью не более 1500 кг/м^3 или сыпучих материалов с небольшими добавками жидкостей.

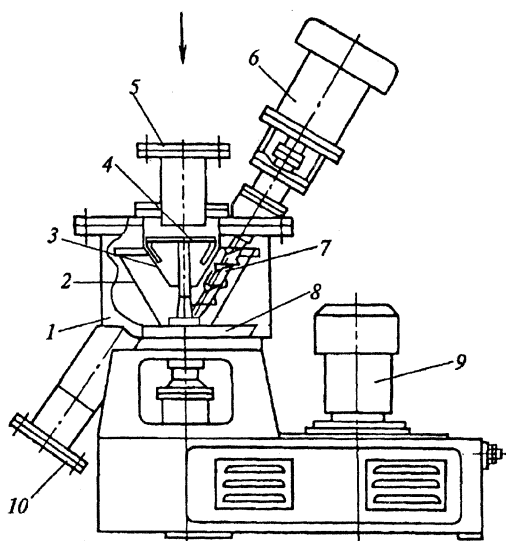


Рис. 1.42. Центробежный смеситель непрерывного действия

Смеситель типа НДЦ состоит из корпуса 1 с плоской крышкой, внутри которого расположены ротор 2, питающая тарель 4, неподвижный направляющий конус 3, разгрузочная лопасть 8 и шнек 7. Ротор 2 имеет форму усеченного конуса, расположенного вершиной вниз и закрепленного на одном валу с тарелью 4. Внутри ротора параллельно его образующей и в некоторой близости к стенке установлен шнек 7, выполняющий роль турбулизатора потока и задерживающий материал в зоне действия ротора. Конический ротор и шнек приводятся во вращение от индивидуальных приводов 9 и 6, причем вал ротора получает вращение через клиноременную передачу, а шнек — непосредственно от электродвигателя. Частота вращения ротора составляет 300 об/мин, шнека — 1500 об/мин.

Исходные компоненты подаются через загрузочный штуцер 5 на питающую тарель 4, с которой они под действием центробежных сил сбрасываются на стенки неподвижного направляющего конуса 3, и кольцевым потоком поступают в нижнюю часть ротора, куда при необходимости подаются и жидкие компоненты. Под действием центробежной силы компоненты перемещаются по конической поверхности ротора вверх и, подвергаясь воздействию шнека, смешиваются. В результате того, что направления движения шнека и движения материала по конической поверхности ротора встречны, часть материала возвращается шнеком вниз. Этим обеспечиваются циркуляция и высокое качество смешения. Другая часть материала сбрасывается с ротора в кольцевое пространство между корпусом и ротором, а разгрузочная лопасть 8 выгружает готовую смесь через штуцер 10.

Преимуществами смесителей НДЦ по сравнению с серийно выпускаемыми для этих целей ленточными смесителями непрерывного действия (типа НДЛ) является значительно меньшая занимаемая производственная площадь, масса смесителей и мощность электродвигателей.

1.10. Смесители для пастообразных материалов

Пастообразные материалы характеризуются очень высокой вязкостью, в связи с чем основным требованием к таким

смесителям является обеспечение рационального движения перемешиваемой массы. Этому требованию в значительной мере отвечают двухроторные смесители с рабочими органами Z-образной формы, размещенными в горизонтальной смесительной камере. Отечественной промышленностью и иностранными фирмами выпускается много типоразмеров таких смесителей, наиболее универсальных для паст различной вязкости. Фактически они могут решить практически любую технологическую задачу.

Смесители с Z-образными лопастями (тип ЗЛ) изготавливаются семи типоразмеров (с рабочим объемом 0,01; 0,025; 0,063; 0,1; 0,25; 0,4 и 0,63 м³) в различных исполнениях: невзрывозащищенном и взрывозащищенном; без рубашки, с рубашкой или с электрообогревом; из углеродистой или коррозионностойкой стали. Эти смесители предназначены для приготовления пастообразных смесей с динамической вязкостью $200 \cdot 10^5$ Па·с.

Смеситель (рис. 1.43) представляет собой смесительную камеру 1 корытообразной формы с рубашкой 4 для нагрева или охлаждения смеси. Внутри смесительной камеры размещены два ротора 3 с Z-образными лопастями, у которых различные частота и направление вращения. Быстроходный ротор получает вращение от мотор-редуктора 9 через цепную передачу 10 (для смесителей объемом 0,01 и 0,025 м³) либо от электродвигателя через редуктор и муфту. Частота вращения быстроходного ротора колеблется от 32 до 60 об/мин в зависимости от типоразмера смесителя. Тихоходный ротор получает вращение от быстроходного через понижающую шестеренчатую передачу (с примерной редукцией 1/1,5), заключенную в кожух 5.

Исходный материал загружают в смесительную камеру через шарнирно прикрепленную к корпусу крышку 2 (для смесителей объемом 0,01 и 0,025 м³) либо через штуцер в крышке (для смесителей большего объема). Степень заполнения смесительной камеры достигает 60–70% ее номинального объема. Выгрузка продукта осуществляется через те же устройства при опрокидывании смесительной камеры. Угол опрокидывания составляет 110°. Для смесителей объемом 0,01 и 0,025 м³ опрокидывание производится с помощью червячного механизма 11 посредством рукоятки 12. В смесителях большего объема для опрокидывания используется

гидравлический механизм (на рис. 1.43 не показан). Все узлы смонтированы на станине 8, устанавливаемой на фундаменте. Подвод и отвод теплоносителя происходит по гибким шлангам через штуцеры 6 и 7.

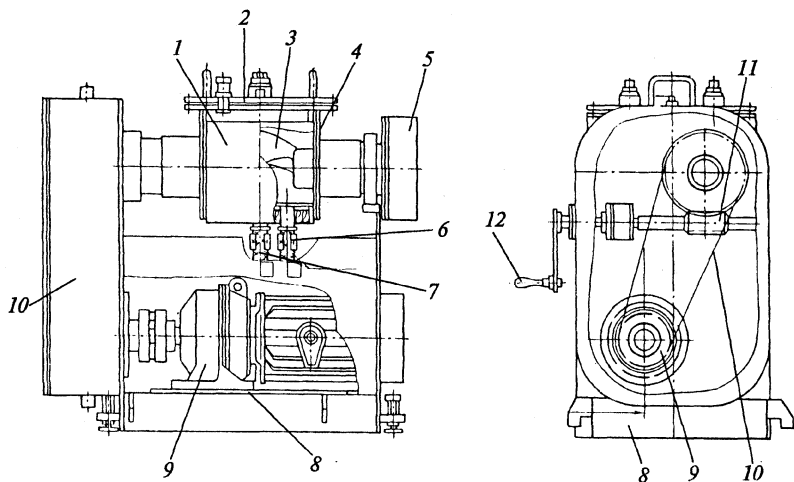


Рис. 1.43. Смеситель периодического действия с Z-образными лопастями

В результате усовершенствования смесителей типа ЗЛ были созданы новые конструкции, в частности снабженные дополнительным рабочим органом — шнеком, выполняющим после завершения смещения роль разгрузочного механизма. Отечественной промышленностью освоен ряд таких смесителей (типа ЗШ) с номинальным объемом 0,004; 0,025; 0,4; 0,63; 1,0 и 2,0 м³.

Планетарно-лопастные смесители (тип ПЛ) используются для приготовления легкоподвижных пастообразных смесей с вязкостью не более 50–200 Па·с. Смеситель (рис. 1.44) состоит из смесительной камеры 1 с затвором 10 для выгрузки готовой смеси, мешалок 9 импеллерного типа, планетарной зубчатой передачи 4, а также штуцеров 2 и 3 для загрузки сыпучих и жидких компонентов. Мешалки вращаются вокруг собственной оси с частотой 104–84 об/мин (в зависимости от типоразмера) и вокруг оси смесительной камеры с частотой 55–36 об/мин. Привод мешалок закреплен на верхней плите 6, которая может подниматься и опус-

каться. Механизм подъема размещен в стойке 5. Привод механизма подъема осуществляется от электродвигателя через редуктор, которые установлены на станине 8 и заключены в кожух 7.

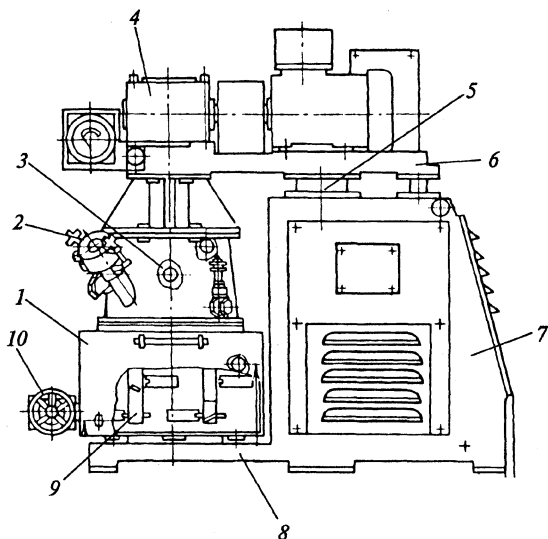


Рис. 1.44. Планетарно-лопастной смеситель

Смесители непрерывного действия для пастообразных материалов. В химических производствах и в других отраслях промышленности они составляют небольшую часть общего объема выпуска всех типов смесителей. На рис. 1.45 представлен *смеситель непрерывного действия* типа СНД-1500 (производительностью 1500 кг/ч), предназначенный для приготовления пастообразных смесей вязкостью $200 \cdot 10^5$ Па·с.

Смеситель состоит из смесительной камеры 6 корытообразной формы с рубашкой. Внутри смесительной камеры размещены два ротора 5, представляющих собой валы с закрепленными на них лопастями 4. Все узлы смонтированы на раме 8. Частота вращения роторов составляет 21 об/мин. Их привод осуществляется от электродвигателя 1 через редуктор 2 и муфту. На плоской крышке 7 расположены технологические штуцеры, в том числе штуцер 3 для загрузки материала. Выгрузка материала осуществ-

ляется через окно в торцевой стенке корпуса (на рис. 1.45 не показано).

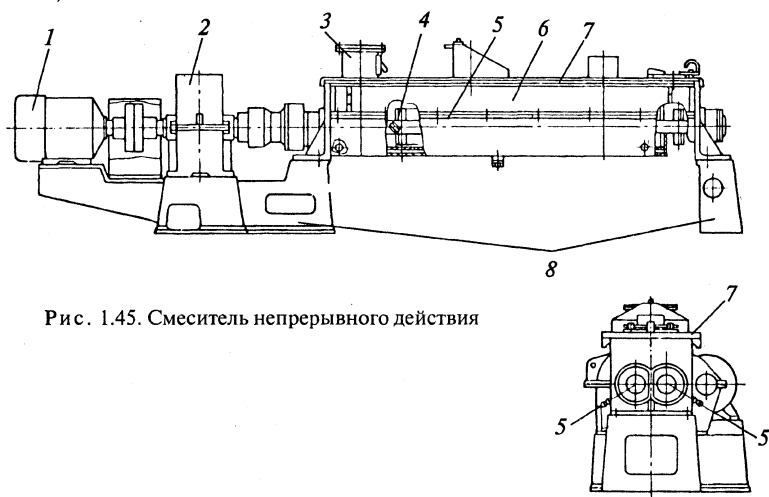


Рис. 1.45. Смеситель непрерывного действия

1.11. Назначение и классификация оборудования для разделения сыпучих материалов на фракции

При измельчении твердых материалов редко удается сразу получить продукт требуемого состава по крупности. Обычно продукты измельчения состоят из частиц различных размеров и форм, и из них приходится выделять нужные фракции. *Разделение сыпучих материалов на фракции по крупности частиц называют классификацией.*

В промышленности применяют различные способы разделения сыпучих материалов на фракции. Из них наиболее распространены:

- ♦ разделение просеиванием (грохочением) через сита и решетки;
- ♦ разделение под действием гравитационно-инерционных сил (осаждение частиц из несущей жидкой или воздушной среды под действием сил тяжести);

♦ разделение под действием гравитационно-центробежных сил.

Способ разделения сыпучих материалов на фракции *просеиванием* их через сита наиболее простой и соответственно широко используемый. Суть его состоит в том, что материал пропускают через сито с отверстиями определенного размера. Частицы, размер которых меньше размера отверстия в сите, проходят через него, а более крупные задерживаются.

Сита изготавливают из металлических проволочных сеток с квадратными отверстиями и из перфорированных стальных решеток с проштампованными щелевидными или круглыми отверстиями. Все сетки стандартизованы, и их подробную характеристику можно найти в ГОСТах.

Размер стороны ячеек проволочных сит, выпускаемых отечественной промышленностью, стандартизован в соответствии с нормальным рядом чисел в машиностроении и составляет 0,04–100 мм. В зависимости от размеров ячеек (площадь отверстия, мм²) сетки делят на следующие классы:

Наимельчайшая	До 0,025
Мельчайшая	0,025–0,25
Мелкая	0,25–1
Средняя	1–25
Крупная	25–625
Очень крупная	Свыше 625

Отношение суммарной площади отверстий сетки ко всей площади сита, называемое площадью в свету, для всех сеток остается постоянным и составляет 0,36 (или 36%). Это означает, что с увеличением числа отверстий на 1 см² сетки уменьшается диаметр проволоки, из которой она изготовлена.

В США распространена дюймовая шкала сит. Употребляемое в технике американское понятие «меш» означает количество отверстий на один линейный дюйм (25,4 мм). Например, сито, имеющее 10 отверстий на 1 дюйм, называют ситом в 10 меш.

Процесс разделения сыпучих материалов на фракции с помощью сит носит название «рассеивание» или «грохочение», а устройства, в которых происходит этот процесс, называют ситами или грохотами. Термины «рассеивание» и «сита» употребляют в случае разделения мелкозернистых сыпучих материалов, а «грохо-

чение» и «грохот» — при разделении крупнозернистых и кусковых материалов.

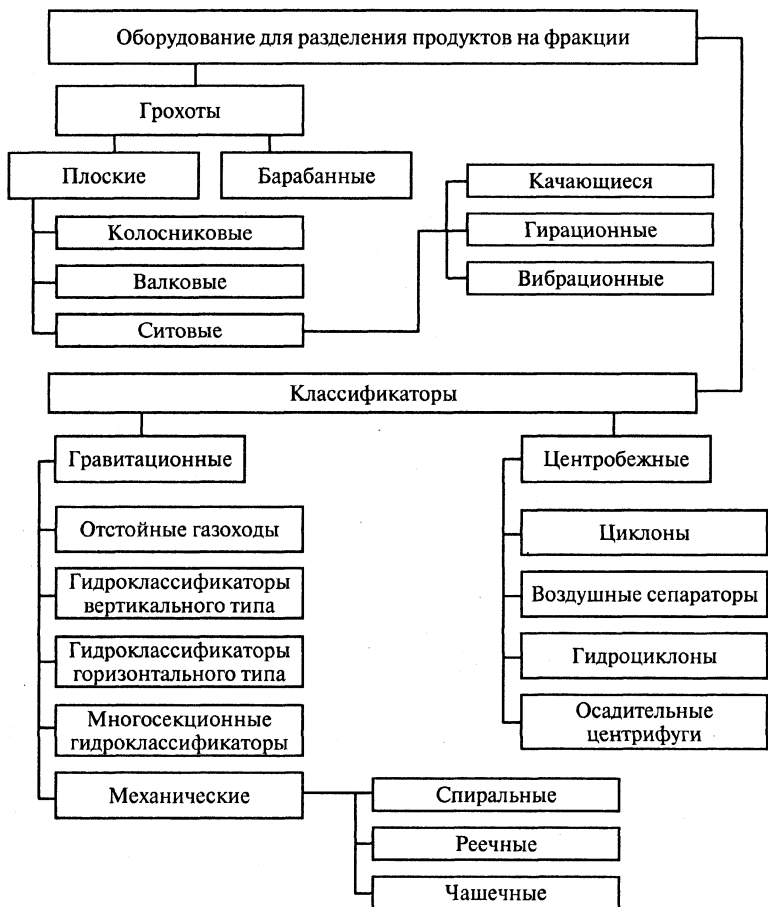


Рис. 1.46. Классификация оборудования для получения фракций сыпучего материала

Для получения особо тонких порошков используется метод раздельного осаждения частиц из несущей среды под действием гравитационно-инерционных сил (сил тяжести) или гравитационно-центробежных сил. В качестве несущей среды при сухой

классификации чаще всего применяют воздух, а при мокрой — воду. Оборудование, применяемое для этих целей, называют классификаторами.

Классификация оборудования для получения фракций сыпучего материала по размерам приведена на рис. 1.46.

1.12. Грохоты

Неподвижный колосниковый грохот. Этот простейший грохот (рис. 1.47) состоит из колосников 1, собранных на стяжках 2 на некотором расстоянии друг от друга. Это расстояние фиксируется дистанционными трубками 3, длина которых определяется крупностью кусков материала, подлежащего выводу из основного потока сырья. Борт 4 удерживает материал на грохоте и является направляющим элементом. Такой грохот устанавливают перед дробилками крупного дробления, чтобы выводить из потока сырья фракцию материала, не подлежащую дроблению. Угол наклона α должен быть таким, чтобы материал свободно скатывался вниз по колосникам; обычно $\alpha = 30-50^\circ$. Колосники изготавливаются литыми или из стальных балок. Чтобы уменьшить или совсем исключить возможность застревания кусков материала между колосниками, последние выполняют трапецевидного или Т-образного сечения и устанавливают широким основанием вверх.

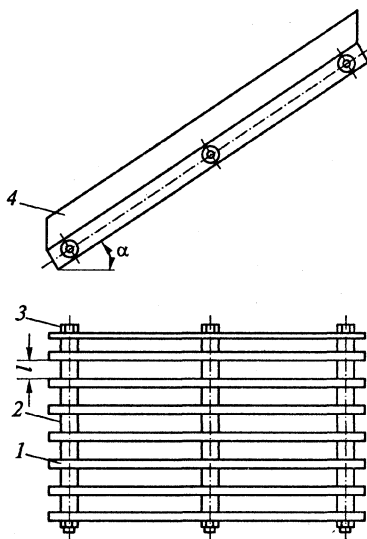


Рис. 1.47. Неподвижный колосниковый грохот

Ситовые грохоты. Из всех известных грохотов наиболее распространены ситовые (рис. 1.48). Их применяют как для классификации, так и для промывки, обезвоживания или освобождения сы-

пучих материалов от шлама. Подлежащий грохочению материал (рис. 1.48, *a*) поступает в короб 1 с ситом 2 и под действием гравитационных

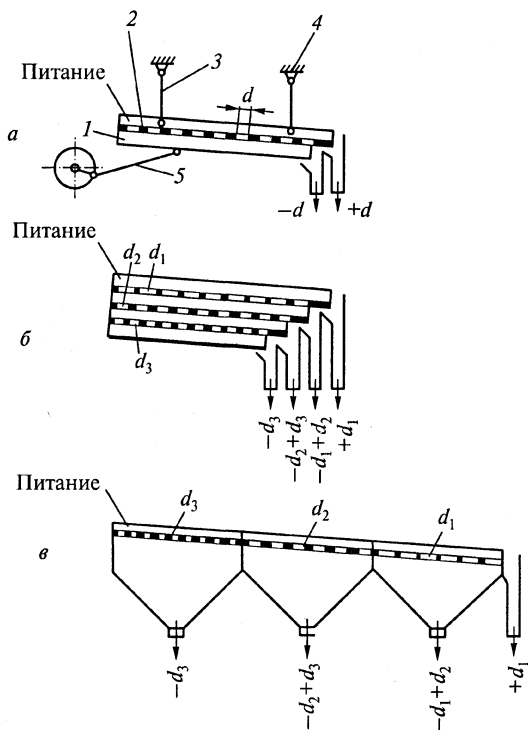


Рис. 1.48. Схемы ситовых грохотов:
a — односитовой; *б* — многоситовой с вертикальной компоновкой сит; *в* — многоситовой с горизонтальной компоновкой сит

тационных и инерционных сил продвигается по ситам к выходному концу короба. Короб грохота с ситом закреплен на раме 4 на подвесках 3 и с помощью приводного механизма 5 совершает возвратно-поступательное движение.

При классификации на ситовом грохоте материал делится на число фракций, равное числу сит плюс единица, т.е. число получаемых фракций на единицу больше числа сит. Границы раздела сыпучего материала на фракции определяются размером отверстий в ситах грохота. Для разделения материала на несколько фракций изготавливают многоситовые грохоты. При этом сита компонуются

либо по высоте (рис. 1.48, б), либо по длине (рис. 1.48, в). В обоих случаях эффективность классификации и производительность грохота примерно одинаковы, но вертикальная компоновка сит занимает меньше места в плане и больше по высоте, а при горизонтальной — наоборот.

В случае промывки и обезвоживания сыпучего материала (без классификации) применяют штампованные сита с небольшими отверстиями щелевидной формы, назначение которых — пропускать воду и задерживать куски материала.

Ситовые грохоты по конструктивным особенностям и устройству привода делятся на качающиеся, гирационные и вибрационные.

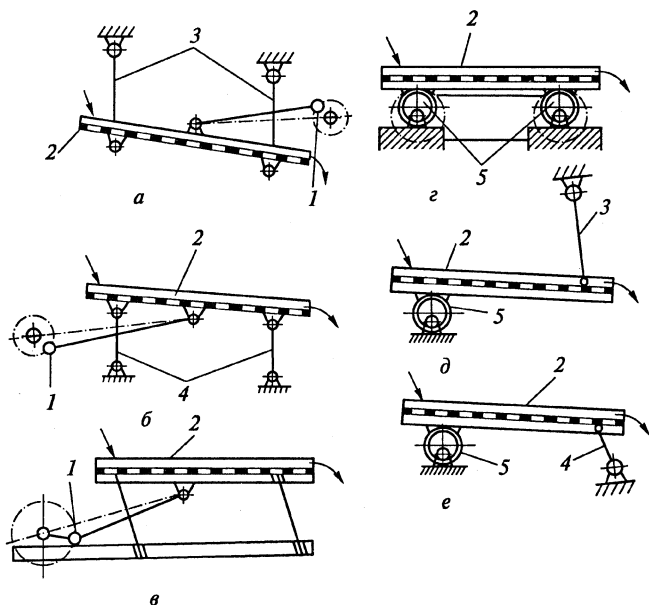


Рис. 1.49. Схемы качающихся грохотов:

- а — наклонный на шарнирных подвесках; б — наклонный на шарнирных опорах;
- в — горизонтальный на пружинных опорах; г — наклонный на кривошипной опоре;
- д — наклонный на шарнирной опоре и шарнирной подвеске;
- е — наклонный на шарнирной и кривошипной опорах

На рис. 1.49 представлены схемы различных по устройству качающихся грохотов, просеивающая поверхность которых с

помощью приводного механизма совершает возвратно-поступательное движение (принудительные качания), обусловленное жесткой кинематической связью приводного эксцентрика 1 с коробом 2, закрепленным либо на шарнирных подвесках 3 (рис. 1.49, а), либо на шарнирных опорах 4 (рис. 1.49, б), либо на пружинных опорах (рис. 1.49, в), либо на кривошипных опорах 5 (рис. 1.49, г–е). Во всех случаях материал движется по ситам к выходному концу и рассеивается на фракции или промывается в зависимости от технологических требований. Достоинствами плоских качающихся грохотов являются высокая производительность и эффективность грохочения, компактность и удобство обслуживания. К недостаткам можно отнести неуравновешенность конструкции и быстрый выход из строя опорных элементов.

Гиационные грохоты. Основной частью гиационного грохота (рис. 1.50) является короб 6 с одним или двумя ситами 1, совершающий в вертикальной плоскости круговые движения с помощью

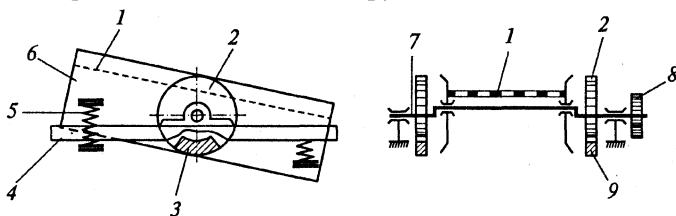


Рис. 1.50. Схема гиационного грохота

эксцентрикового вала 7, который получает вращение от шкива 8. Сито грохота за оборот вала перемещается параллельно самому себе. Концы корпуса сит соединяются с неподвижной рамой 4 пружинными амортизаторами 5. Центробежные силы инерции, возникающие при движении корпуса, уравниваются контргрузами 3 на симметрично расположенных дисках 2.

Вибрационные грохоты бывают одно-, двух- и трехситовые. Свое название они получили от инерционного привода. Вибрационный грохот, схема которого показана на рис. 1.51, состоит из опорной рамы 1, пружинящих опор 2 или пружинных подвесок, корпуса с ситом 3, вала 4 с дебалансом 5, маховика 6 с регулятором дебаланса 7, называемым балансиром, шкива 8 и подшипников 9.

Вибрация корпуса 3 с ситом происходит вследствие неуравновешенности масс вращающихся дебаланса 5 и балансира 7. Амплитуда

литуда колебаний грохота зависит от общего дебаланса. Сортируемый материал непрерывно подбрасывается на наклонно установ-

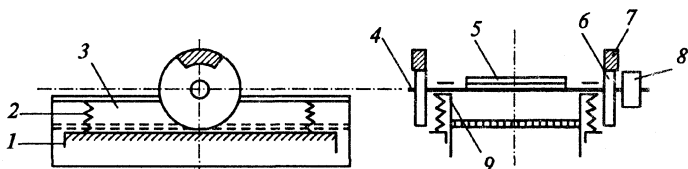


Рис. 1.51. Схема вибрационного грохота

ленном сите, при этом мелкие куски проваливаются через отверстия сит, а крупные — перемещаются к нижнему концу короба. Особенность этих грохотов связана с наличием приводного вибрационного механизма, который является сборочной единицей и включает в себя вал с дебалансом, маховик с балансиром, шкив и подшипники.

Барabanные грохоты. Принципиальная схема барабанного грохота показана на рис. 1.52. Он состоит из дырчатого вращающегося барабана 3, опорного устройства 1 и приводного механизма 4. Исходный сыпучий материал загружается через воронку 2. Ось барабана наклонена к горизонту под углом $3-8^\circ$ в сторону приемного бункера 5. При вращении барабана с частотой 10–25 об/мин подлежащий фракционированию материал под действием силы трения поднимается по стенке барабана на некоторую высоту и затем сползает вниз. Одновременно частицы материала двигаются вниз к разгрузочному концу барабана. В результате при таком движении и происходит разделение материала на фракции. Нижняя

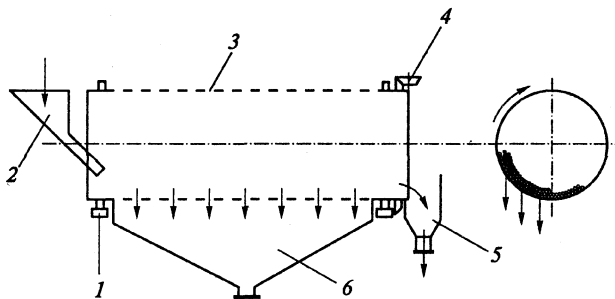


Рис. 1.52. Схема барабанного грохота

фракция, пройдя через отверстия сита, собирается в бункере 6, а верхняя (крупная) поступает в бункер 5.

При разделении материала на три фракции и более используют барабанные грохоты с несколькими ситами, собранными concentрично или последовательно друг за другом.

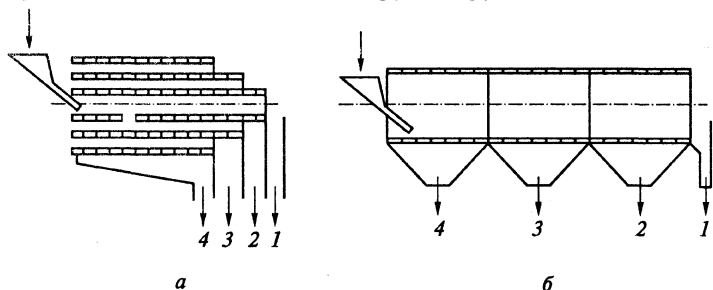


Рис. 1.53. Схема многоситовых барабанных грохотов:

а — concentрическое расположение сит; б — последовательное расположение сит

При *concentричном расположении сит* (рис. 1.53, а) материал сначала поступает на внутреннее сито с самыми большими отверстиями. Здесь задерживается крупная фракция, которая собирается в бункере 1. Нижняя фракция первого сита попадает на второе и делится также на две фракции, верхняя из которых выводится в бункер 2, а нижняя, пройдя через второе сито, попадает на третье, где снова делится на две фракции, верхняя из которых попадает в бункер 3, а нижняя — в бункер 4. При *последовательном расположении сит* (рис. 1.53, б) исходный материал сначала поступает на мелкое сито, где отбирают самую мелкую фракцию. По мере продвижения материала вдоль барабанного грохота размер отверстий в ситах увеличивается и соответственно возрастает крупность отделяемых фракций.

Многоситовые грохоты с concentрическим расположением сит по своему устройству сложнее, чем с последовательным, и более трудоемки в эксплуатации, так как наблюдение, осмотр и смена внутренних сит затруднены. Единственное их преимущество — компактность.

На рис. 1.54 показан барабанный грохот с *последовательным расположением сит*. Он состоит из опорной рамы 1, опорных роликов 2, установленных на раме, ситчатого барабана 3 с опорными

бандажами 4 и двигателя 6 с редуктором 5. Двигатель приводит во вращение одну пару роликов, которые под действием сил трения

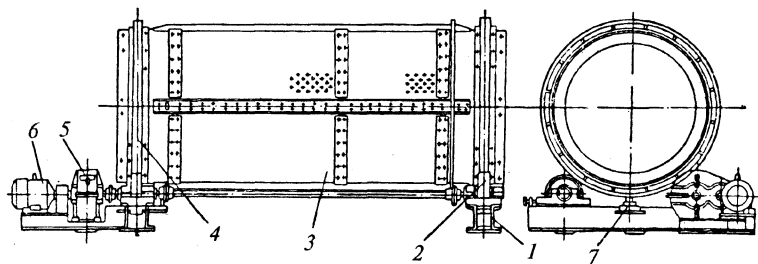


Рис. 1.54. Барабанный грохот

вращают барабан, установленный под углом к горизонту. Чтобы исключить его сползание под уклон, предусмотрен упорный ролик 7.

На барабане установлены последовательно два цилиндрических сита. Первое по ходу сито имеет отверстия диаметром 10 мм, а второе — диаметром 50 мм, т.е. такой грохот делит материал на три фракции.

Барабанные грохоты просты по конструкции, у них нет качающихся масс, как у плоских грохотов, поэтому они являются динамически уравновешенными аппаратами. Однако барабанные грохоты громоздки, имеют малую удельную производительность и низкую эффективность грохочения. Эти недостатки обусловлены низким коэффициентом использования поверхности сит. При заполнении барабана на 15–18% объема поверхность сит используется всего на 20–30%. Поэтому барабанные грохоты применяются значительно реже плоских.

1.13. Классификаторы

Отстойные газоходы — простейшие классификаторы гравитационного типа. К примеру, рассмотрим аппарат, показанный на рис. 1.55. Исходная газовая смесь с измельченным материалом поступает через штуцер 3 в камеру 4. Так как скорость газового потока в камере уменьшается и из-за перегородок 5 меняет свое направление, твердые частицы начинают выделяться из

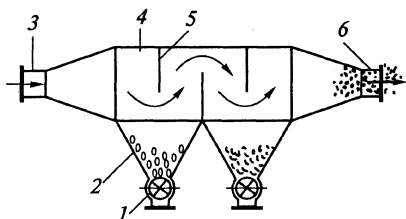


Рис. 1.55. Отстойный газоход

потока под действием сил тяжести и инерционных сил. В первом по направлению потока сборнике 2 осаждаются самые крупные частицы, во втором — более мелкие, а самая тонкая фракция выносятся потоком через штуцер 6, и ее можно в дальнейшем отделить от газа в специальных аппаратах — фильтрах, циклонах и т.д. Таким образом, данный сепаратор обеспечивает деление материала на три фракции. Материал из сборников периодически или непрерывно удаляется с помощью выгрузателя 1.

Гидравлические классификаторы относятся к группе гравитационных аппаратов, в которых вода служит несущей средой для разделения зернистого материала на фракции, т.е. по результату действия к гидравлическим классификаторам можно отнести и отстойники.

На рис. 1.56 представлена для примера схема *гидроклассификатора вертикального типа*, в котором классификация осуществляется в восходящих потоках воды.

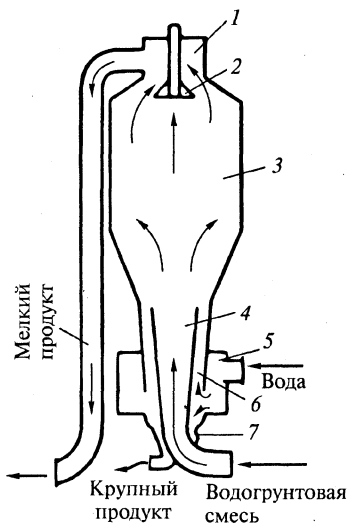


Рис. 1.56. Схема гидроклассификатора вертикального типа

Классификатор работает следующим образом. Исходная смесь вводится в классификатор через нижний патрубок и, пройдя диффузор 4, поступает в обогатительную камеру 3, площадь сечения которой намного превышает площадь верхнего сечения диффузора, в результате чего скорость восходящего потока разделяемой смеси после выхода ее из диффузора значительно уменьшается. Это влечет за собой осаждение наиболее крупных частиц, которые из обогатительной камеры попадают сначала в классификационную камеру 6, распо-

женную между диффузором и корпусом аппарата, а затем в сборник 7, откуда по выходному патрубку выводятся из аппарата. В нижнюю часть классификационной камеры тангенциально через коллектор 5 подается чистая вода, образующая в камере 6 винтовой восходящей поток, в котором материал разделяется по заданному граничному размеру частиц.

Частицы материала, скорость осаждения которых меньше скорости восходящего потока, через верхний сливной коллектор 1 по трубе отводятся как шлам. Отражатель 2 служит для предотвращения уноса крупных частиц, не успевших осесть в нижней части обогатительной камеры.

Таким образом, вертикальный гидроклассификатор разделяет исходную смесь на две фракции. Граница разделения в пределах 0,5–3 мм регулируется количеством воды, подаваемой в классификационную камеру, и площадью ее поперечного сечения, которую можно менять путем перестановки трех диффузоров, входящих в комплект поставки классификатора. Диффузоры однотипны по своей конструкции, и последовательная их перестановка в гидроклассификаторе дает возможность менять площадь камеры классификации в пропорции 1:0,7:0,5.

Транспортирование как крупного продукта, так и мелкого происходит за счет давления, создаваемого внутри классификатора гидронасосом, подающим исходную смесь, и водяным насосом, подающим воду. В зависимости от типоразмеров гидроклассификаторов их производительность по крупному продукту колеблется в пределах 20–300 м³/ч, а по исходной смеси – в пределах 100–1600 м³/ч, т.е. соотношение твердого к жидкому продукту составляет примерно 1:5. Максимально допустимый размер частиц в исходном материале 25–75 мм.

Многосекционные классификаторы – наиболее перспективные аппараты среди гидроклассификаторов. Они позволяют получать такое количество фракций, которое технологически необходимо. На рис. 1.57 показан один из таких аппаратов, применяемый для разделения на фракции частиц, находящихся в жидкой среде. Классификатор состоит из корпуса 5, расширяющегося по ходу потока, конических сборников 3 для различных фракций материала, затворов 1 для вывода продукта, мешалок 2 для предотвращения уплотнения оседающей в конусе фракции, загрузочного шту-

цера 4, порога 7, выводного штуцера 8 и приводного устройства для мешалок 6.

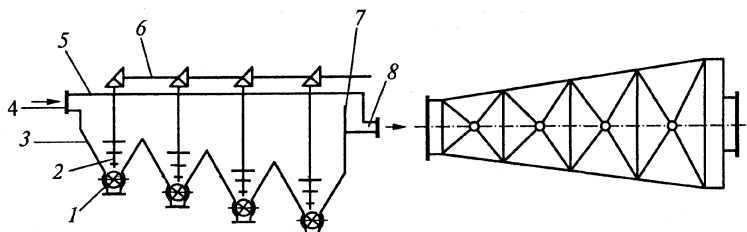


Рис. 1.57. Многосекционный классификатор

Данный классификатор предназначен для разделения частиц на классы по крупности и удельным массам. Поступившая в него суспензия постепенно теряет скорость в направлении выходного штуцера. В первом сборнике оседает самая крупная (или тяжелая) фракция, а в каждом последующем — все более мелкие (или легкие) фракции. Самая мелкая фракция выносится потоком через штуцер 8 и отделяется от жидкого носителя в специальном устройстве либо уходит в слив.

Механические классификаторы. Из этих классификаторов наиболее широкое распространение получили *спиральные классификаторы*, отличающиеся простотой конструкции и эффективностью работы. Основной их частью является одно-двухспираль-

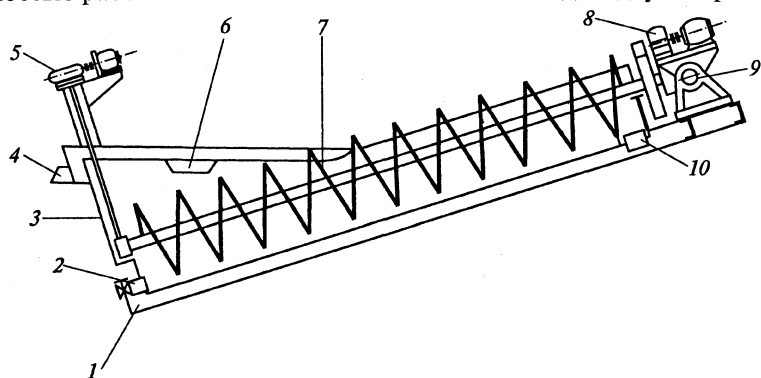


Рис. 1.58. Спиральный классификатор

ное устройство (шнек), при вращении которого с частотой 2–12 об/мин происходит взмучивание пульпы и крупные частицы транспортируются к разгрузочному окну.

На рис. 1.58 показан спиральный классификатор с погружной спиралью. Он состоит из рамы 1, корыта 3 с полукруглым дном, установленного под углом 15–18° к горизонту, спирали 7, привода спирали 8 и механизма подъема спирали 5.

Материал, подлежащий разделению, поступает в корыто из приемного лотка 6 и под действием силы тяжести делится на два класса. Крупные, более тяжелые частицы опускаются на дно корыта и спиралью транспортируются в верхнюю часть корыта для выгрузки через штуцер 10. Мелкие частицы выносятся потоком жидкости в карман 4, откуда через слив отводятся на дальнейшую переработку. Для освобождения корыта от пульпы предусмотрен штуцер 2.

При остановке классификатора спираль с помощью механизма 5 приподнимается, а при пуске — опускается. С этой целью соединение спирали 7 с приводом 8 выполнено шарнирно через ось 9. Угол наклона корыта, высота сливного порога и число оборотов спирали являются основными факторами, влияющими на эффективность классификации и производительность аппарата. С увеличением угла наклона корыта производительность по крупному продукту несколько падает, а крупность частиц в сливе возрастает. С повышением числа оборотов спирали производительность классификатора по крупному продукту возрастает, причем эта зависимость линейная.

Спиральные классификаторы подразделяются на два типа: с *непогружной спиралью* (незатопленным нижним концом спирали), используемые преимущественно для грубого деления материала на классы, когда в слив уходят частицы крупностью 0,15 мм и более, и *погружной спиралью*. Затопление нижнего конца спирали достигается тем, что борта нижней части корыта и сливной порог делают выше верхней кромки спирали на сливном конце, как показано на рис. 1.58. В этом случае нижний конец спирали полностью погружен в суспензию, вследствие чего зона осаждения твердых частиц над спиралью находится в относительном покое, чем достигается более четкая классификация.

Те и другие классификаторы изготавливаются односпиральными и двухспиральными, соответственно различающимися шириной корыта и производительностью при одинаковой длине.

Центробежные классификаторы. Работа центробежных классификационных аппаратов основана на использовании поля центробежных сил инерции, возникающих во вращающемся потоке суспензии. В соответствии с принципом центробежного разделения сыпучих материалов при вращении материалов вместе с несущей средой более крупные частицы, обладая большей центробежной силой, перемещаются в радиальном направлении к периферии, вытесняя к центру более мелкие частицы. Центробежные аппараты применяются главным образом для классификации мелких частиц с граничным размером от 0,005 до 0,5 мм.

В промышленности находят применение разные центробежные классификаторы. Среди них:

- ♦ *осадительные центрифуги* — аппараты, в которых вращение смеси достигается в результате вращения движущихся рабочих поверхностей;
- ♦ *циклоны* (несущая среда — газ) и *гидроциклоны* (несущая среда — жидкость) — неподвижные аппараты, в которых пылевоздушная смесь или суспензия подводится тангенциально с необходимой скоростью;
- ♦ *сепараторы воздушно-проходные и воздушно-замкнутые*, в которых разделение частиц на фракции осуществляется за счет как сил гравитации, так и центробежных сил.

1.14. Параметры движения и расчет усилий в быстроходных грохотах с плоскими ситами

Параметры движения. Для осуществления грохочения необходимо относительное движение частиц по ситу. Если не учитывать влияния соседних частиц материала и неровностей сита, то скорость, обеспечивающая наилучшие условия прохождения частиц сквозь отверстия горизонтального сита, может быть определена следующим образом. Из рис. 1.59, а следует, что дви-

жение частицы диаметром d по ситус с размерами ячеек D под действием скорости v и сил тяжести можно выразить уравнениями

$$x = vt \text{ и } y = gt^2/2,$$

где t — время, с.

С учетом того, что $y = d/2$, $x = D - d/2$ и соотношение $d/D \approx 0,8$, решая исходные уравнения, находим относительную скорость движения частицы по ситус:

$$v = \left(D - \frac{d}{2}\right) \sqrt{\frac{g}{d}} \approx 2,36 \sqrt{d}.$$

Чтобы частица двигалась по ситус, ему надо сообщить ускорение, развивающее силу инерции, превышающую силы сопротивления.

В грохоте с прямолинейными колебаниями сила инерции действует под постоянным углом β к плоскости сита, как, например, в вибрационном грохоте с направленными колебаниями или в ка-

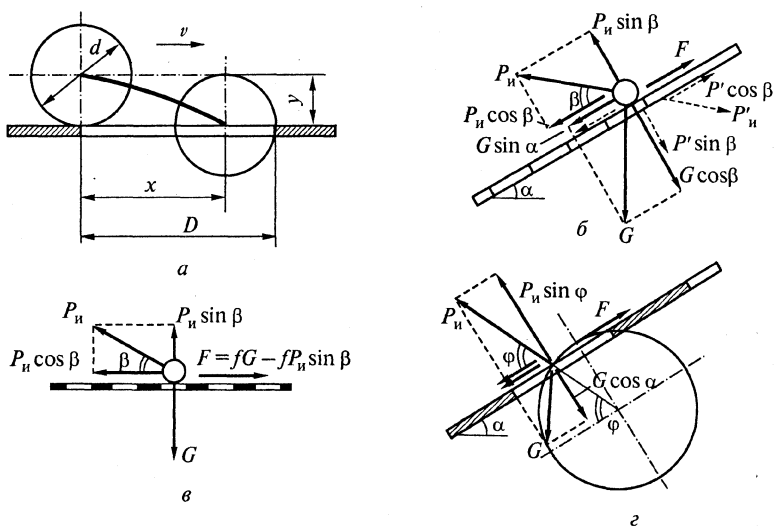


Рис. 1.59. Схемы к расчету оптимальных скоростей движения грохотов:
 а — движение зерен в идеальном процессе; б — наклонный грохот с направленными колебаниями; в — горизонтальный грохот с прямолинейными колебаниями; г — грохоты с круговыми колебаниями

чающихся грохотах, и это условие (рис. 1.59, б) запишется в виде следующих неравенств:

для обеспечения движения материала вниз по сити

$$P_{\text{и}} \cos \beta + G \sin \alpha > f G \cos \alpha - f P_{\text{и}} \sin \beta;$$

для движения вверх (силы показаны штриховой линией)

$$P'_{\text{и}} \cos \beta - G \sin \alpha > f G \cos \alpha + f P'_{\text{и}} \sin \beta,$$

где $P_{\text{и}}$ и $P'_{\text{и}}$ — соответственно силы инерции, действующие на частицу при движении материала вниз и вверх по сити; G — сила тяжести массы частицы; f — коэффициент трения частицы о сито.

Обозначив силы $P_{\text{и}}$ и G через массу и соответствующие ускорения, получим

$$ma \cos \beta + mg \sin \alpha > fmg \cos \alpha - fma \sin \beta,$$

откуда найдем необходимое ускорение для движения материала вниз по сити

$$a > \frac{fg \cos \alpha - g \sin \alpha}{\cos \beta + f \sin \beta} \quad (1.3)$$

и для движения вверх

$$a > \frac{fg \cos \alpha + g \sin \alpha}{\cos \beta - f \sin \beta}. \quad (1.4)$$

Из (1.3) и (1.4) следует, что при симметричном движении грохота материал всегда будет перемещаться вниз по сити.

Для обеспечения движения материала вверх нужно иметь механизм, который будет создавать разные ускорения сити при ходе его вперед и назад, что конструктивно достаточно сложно и практически нерационально. Поэтому все последующие выводы будем проводить лишь для случая движения материала вниз по сити.

Амплитудное значение ускорения для эксцентриковых механизмов с достаточной точностью определяется по формуле

$$a_a = A\omega^2,$$

где A — амплитуда колебаний, м; ω — угловая скорость, рад/с.

Подставив значение a_a в (1.3), находим необходимую угловую скорость для движения материала вниз по сити:

$$\omega \geq \sqrt{\frac{fg \cos \alpha - g \sin \alpha}{A(\cos \beta + f \sin \beta)}}.$$

Для горизонтального грохота ($\alpha = 0^\circ$) с прямолинейными колебаниями, как следует из схемы рис. 1.59, ω , угловая скорость, обеспечивающая движение материала влево, будет равна

$$\omega \geq \sqrt{\frac{fg}{A(\cos \beta + f \sin \beta)}}.$$

Очистка сит от застрявших зерен лучше осуществляется при подбрасывании последних над ситом. Отрыв частиц от сита произойдет при условии

$$P_n \sin \beta \geq G \cos \alpha$$

или

$$mA\omega^2 \sin \beta \geq mg \cos \alpha,$$

откуда найдем угловую скорость, минимально необходимую для обеспечения подбрасывания частиц на наклонном грохоте

$$\omega = \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{A \sin \beta}},$$

и на горизонтальном грохоте

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{A \sin \beta}}.$$

В грохотах с замкнутой траекторией движения направление силы инерции определяется углом поворота φ эксцентрикового механизма или дебаланса вибратора. Из рис. 1.59, g следует, что вектор силы инерции меняет свое направление и в некоторый наиболее выгодный момент частицы выпадают из ячеек, т.е. у этих грохотов лучшие условия самоочистки сит.

Подбрасывающая сила максимальна при $\varphi = 90^\circ$, следовательно, угловая скорость, минимально необходимая для обеспечения отрыва частицы, равна

$$\omega = \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{A}}.$$

У грохотов с направленными колебаниями наиболее высокая эффективность сортировки, но в то же время значительная засоряемость сит, поэтому в последнее время стали внедряться грохоты с эллиптическими траекториями движения.

Реальные условия движения частиц материала на полотне грохота отличаются от принятых нами идеальных условий: проявляется влияние соседних частиц, неровностей самих частиц и сит и др., поэтому скорости, обеспечивающие самоочистку сит, будут несколько выше. В.А. Бауман установил, что если частицы материала подбрасываются на высоту $h = 0,4$ с (где c — размер ячейки сита), то условие очистки сит обеспечено. На основе анализа баллистики полета частиц им предложены следующие формулы для определения начальной скорости v_0 , обеспечивающей выбрасывание частицы из ячейки:

для горизонтального грохота с направленными колебаниями

$$v_0 \approx 7,72\sqrt{h};$$

для наклонного грохота с круговыми колебаниями

$$v_0 \approx 4,28\sqrt{h}.$$

Скорость движения грохотов надо выбирать не выше той, которая следует из условия самоочистки сит, так как излишняя скорость снижает эффективность сортировки и создает повышенные динамические нагрузки. Исследованиями ВНИИстройдормаша установлена эмпирическая зависимость, которая связывает скорость движения горизонтального грохота, обеспечивающую самоочистку сит, с размерами ее ячеек в реальных условиях работы, т.е.

$$V_0 = 0,52 + 6,2 c.$$

Отсюда найдем угловую скорость ω , рад/с:

$$\omega = \frac{0,52 + 6,2c}{A}.$$

Для наклонных виброгрохотов соответственно

$$\omega = 2,78 \frac{\sqrt{c}}{A}.$$

При назначении параметров колебаний грохотов необходимо учитывать динамические нагрузки на их конструкцию. Во избежа-

ние перенапряжения ускорения в современных грохотах выбираются в интервале 45–65 м/с².

Скорость колебаний в общем случае выгоднее повышать за счет увеличения амплитуды, а не угловой скорости, так как ускорение $a = A \omega^2$, следовательно, с ростом ω резко возрастают ускорение и динамическое напряжение конструкции.

Следует иметь в виду, что для сит с размерами ячеек более 80 мм условия их самоочистки могут быть выполнены при недопустимых динамических режимах. Поэтому горизонтальные виброгрохоты рекомендуется использовать для сортировки материалов крупностью менее 80 мм при разделении на фракции по граничному зерну до 40 мм.

Параметры колебаний многоситовых грохотов следует определять по наиболее крупному сити.

Нагрузки в инерционном грохоте. Нагрузки, возникающие от вращения дебалансов и движения короба, во многом зависят от траекторий движения одной массы относительно другой. На траекторию движения влияет характер упругих связей грохота.

Рассмотрим траекторию движения короба, когда упругие связи одинаковы во всех направлениях, т.е. $K_x = K_y$ (K_x и K_y – жесткости упругих связей в горизонтальном и вертикальном направлении).

На рис. 1.60, а показано взаимное расположение массы дебаланса и массы короба, когда частота p собственных колебаний ко-

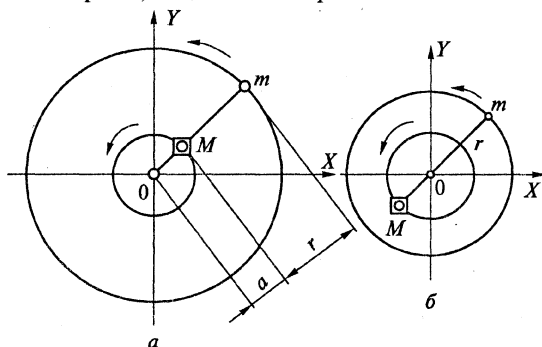


Рис. 1.60. Схема расположения массы дебаланса и короба:
а – в резонансном режиме; б – в нерезонансном режиме

роба грохота больше частоты ω вынужденных колебаний (дорезонансный режим). Сила инерции F_m , развиваемая массой дебалансов m в абсолютном движении в этом режиме работы, больше, чем центробежная сила массы m в ее относительном движении, т.е.

$$F_m = m(a + r)\omega^2 > mr\omega^2,$$

где a — амплитуда колебаний короба грохота; r — эксцентриситет дебалансов.

Поэтому подшипники вала вибратора при дорезонансном режиме следует рассчитывать по величине $m(a + r)\omega^2$.

Для зарезонансного режима, когда $\omega \gg p$, амплитуда колебаний короба отрицательна (рис. 1.60, б), сила инерции F_m , развиваемая массой ротора m , будет меньше центробежной силы при ее относительном движении, т.е.

$$F_m = m\omega^2[r - a],$$

поэтому подшипник нужно рассчитывать на центробежную силу.

Отсюда следует, что зарезонансный режим имеет большие преимущества по сравнению с дорезонансным в отношении нагрузок на подшипники вибратора и реакций, передаваемых упругими связями на конструкции, поддерживающие грохот.

Расчет пружинных амортизаторов. При расчете упругих связей частоту собственных колебаний грохота на опорах в вертикальном направлении выбирают равной 2–3,5 Гц.

Общая жесткость $K_{\text{общ}}$, Н/м, стальных пружин грохота в вертикальном направлении определяется как

$$K_{\text{общ}} = \frac{G(2\pi p_y)^2}{g},$$

где G — суммарная нагрузка от массы колеблющихся частей и материала, находящегося на грохоте, Н; p_y — частота собственных колебаний грохота на опорах в вертикальном направлении, Гц; g — ускорение свободного падения, м/с².

По значению $K_{\text{общ}}$ подбирают число пружин z , а также вертикальную жесткость пружин K_y и горизонтальную жесткость K_x , Н/м:

$$K_y = \frac{K_{\text{общ}}}{z}; K_x = \frac{Ed^4}{8nD^3},$$

где E — модуль упругости при сдвиге материала пружин, Н/м²; d — диаметр проволоки пружины, м; n — число рабочих витков; D — средний диаметр пружины, м.

Горизонтальную жесткость пружин определяем по формуле

$$K_x = \frac{K_y}{1,44\alpha \left[0,204(h/D)^2 + 0,256 \right]},$$

где α — коэффициент Рауша, учитывающий осевую нагрузку; h — рабочая высота пружины, м.

Значения коэффициента α следующие:

Отношение статической деформации к рабочей высоте пружины	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
α при $K_x / K_y = 1$	1,0	1,10	1,21	1,29	1,34	1,42

Выбранные пружины подвергают проверочному расчету на прочность, усталость и соударение витков.

Чтобы не было соударения витков пружины, необходимо обеспечить условие:

$$H_0 - H_{сж} > A_p + \lambda,$$

где H_0 — высота пружины в свободном состоянии; $H_{сж}$ — высота пружины при сжатии до смыкания витков; A_p — резонансная амплитуда колебаний, которую рекомендуется принимать для наклонных грохотов, работающих на пружинах, равной $10a$, на пневматических опорах $8a$, для горизонтальных соответственно $5a$ и $4a$ (здесь a — амплитуда колебаний); λ — осадка пружины от статической нагрузки.

Для уменьшения резонансных амплитуд колебаний на грохотах используют различные устройства. Так, для локализации резонанса на грохотах некоторые заводы-изготовители применяют резиновые ленты, охватывающие пружинную подвеску; используют пневмобаллонную подвеску и демпферы сухого трения, вибраторы с выдвигаемыми дебалансами, а также торможение привода грохота.

Усилия, передающиеся на фундамент. При назначении жесткости упругих опор следует помнить, что эффективная виброизоляция грохота обеспечивается при условии, когда частота вынужденных

колебаний ω превышает частоту любой из форм собственных колебаний p_c грохота на опорах не менее чем в 4 раза, т.е.

$$\omega/p_c > 4. \quad (1.5)$$

Поэтому при расчетах необходимо правильно определять максимальную частоту собственных колебаний грохота и сопоставлять ее с частотой вынужденных колебаний в соответствии с (1.5).

При круговых колебаниях максимальной частотой собственных колебаний грохота на опорах обычно является частота поворотных колебаний.

В первом приближении при расположении опор грохота на одинаковых расстояниях b от вертикали, проходящей через центр его масс, частоту собственных поворотных колебаний с достаточным приближением можно рассчитывать по упрощенной формуле

$$p_c = \frac{p_y b}{r_z}, \quad (1.6)$$

откуда следует, что при удалении опор от вертикали, проходящей через центр массы короба грохота, на расстояние, превышающее его радиус инерции r_z , наибольшей частотой собственных колебаний будет частота поворотных колебаний p_c . Поскольку $b/r_z \approx 2$, то в этом случае неверно выбирать упругую опору по частоте p_y .

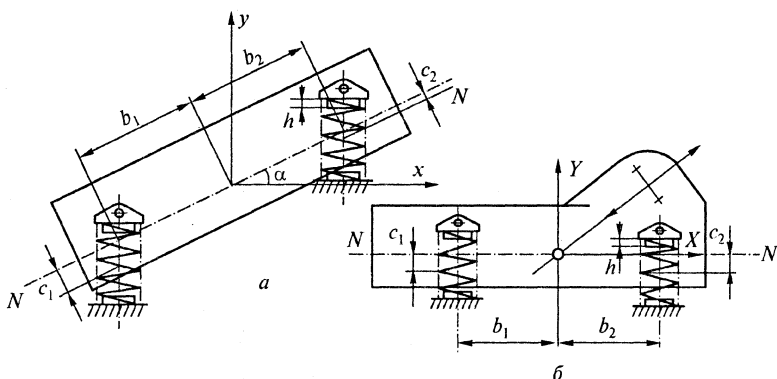


Рис. 1.61. Расположение опор грохота:
а — наклонный грохот; б — горизонтальный грохот

При заданных траектории и амплитуде колебания короба грохота эффективность виброизоляции, устойчивость грохота на опорах и равенство собственных частот при всех формах колебаний будут достигнуты, если:

- ♦ вибратор располагается в центре масс грохота;
- ♦ жесткости упругих опор в вертикальном и горизонтальном направлениях равны между собой;
- ♦ расстояния b_1 и b_2 от центра масс до точки пересечения оси NN (рис. 1.61, а, б) с вертикальной осью пружины равны радиусу инерции короба r_z относительно его центра массы в плоскости чертежа, т.е. $b_1 = b_2 = r_z$;
- ♦ расстояние от оси до геометрического центра пружины равно нулю, т.е. $c_1 = c_2 = 0$.

Сила, передаваемая на фундамент, равна произведению жесткости опоры на смещение массы от нейтрального положения, т.е. на амплитуду колебаний короба грохота.

Зная жесткости K_x и K_y и амплитуды смещений грохота a_x и a_y , можно определить силу, передающуюся на фундамент:

$$F_x = K_x a_x; \quad F_y = K_y a_y.$$

Чтобы рассчитать усилия, передающиеся на фундамент в периоды резонанса (при пуске, остановке), значения a_x и a_y следует заменить на значения резонансных амплитуд колебаний A_{px} и A_{py} .

1.15. Перспективная техника для механических процессов

К сожалению, последние десятилетия в мировой практике уделялось малое внимание совершенствованию дробилок и разработке новых методов дробления, поэтому в промышленности используются дробилки давно разработанных конструкций. В то же время создаются новые виды мельниц и смесителей, которые находят широкое применение в промышленности.

Высокие технико-экономические показатели имеют многоступенчатые мельницы ударно-отражательного действия Ивановского государственного химико-технологического университета

(ИГХТУ), характеризующиеся развитой внутренней сепарацией измельчаемых частиц, схема одной из которых представлена на рис. 1.62.

В подобных машинах выгрузочный патрубок готового продукта 5 смещается либо в центр крышки (как показано на рис. 1.62),

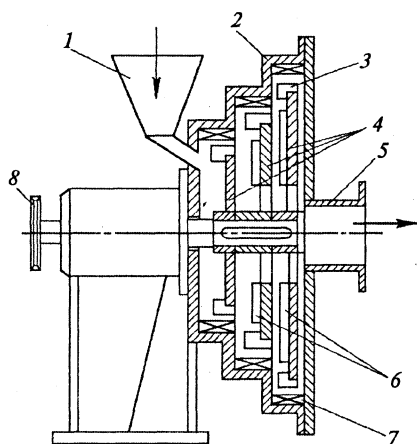


Рис. 1.62. Многоступенчатая мельница ИГХТУ

либо от центра к отбойникам. Измельченные тонкодисперсные частицы потоком воздуха, создаваемого лопастями 6 вентилятора, через отверстия в дисках ротора 4 выводятся в патрубок 5. Крупные частицы под действием центробежных сил отбрасываются биллами 3 на отбойники 7 и продолжают далее измельчаться.

В табл. 1.1 приведены некоторые технико-экономические показатели мельницы ИГХТУ, свидетельствующие о возможности получения сверхтонких порошков.

Таблица 1.1. Техничко-экономические показатели мельниц ИГХТУ

Измельчаемый материал	Размер исходного материала, не более, мм	Тонина измельчения, не более, мкм	Производительность, кг/ч	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
Мел	8,0	10	500	55
Известняк	5,0	10	600	60
Мрамор	3,0	30	1100	35
Мрамор	3,0	8	600	68
Мрамор	3,0	2	200	150
Гранит	1,0	5	400	55

В Казанском государственном технологическом университете (КГТУ) разработана установка мокрого измельчения.

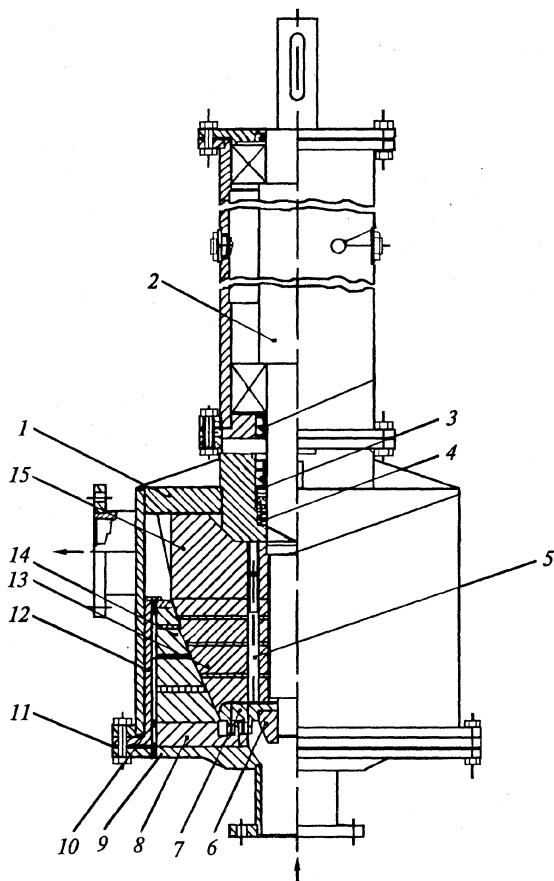


Рис. 1.63. Мельница коническая КГТУ

Основным узлом установки измельчения является коническая мельница, которая состоит из следующих узлов (рис. 1.63): корпуса мельницы 1, вала 2, ротора дисмембратора 7, гайки-приемника 6, корпуса статора 12, дисков ротора 13, колеса ротора 15, крышки статора 9 и дисков статора 14.

Ротор установлен на валу 2 с помощью шпонки и крепится к валу резьбовой частью ротора дисмембратора 7 и гайкой-приемником 6. Чтобы предотвратить отвинчивание элементов 7 и 6 с вала, на них нарезана левая резьба (вращение вала по часовой стрелке).

Уплотнение корпуса мельницы достигается сочетанием блока радиальных уплотнительных колец 4 и блока манжетных уплотнений 3. Просочившаяся жидкость при мокром измельчении удаляется через радиальное отверстие корпуса мельницы.

Ротор состоит из четырех конических дисков измельчения 13 и колеса ротора 15. Вся конструкция собирается с помощью четырех винтов 5. Каждый из дисков имеет канавки на конической поверхности и от диска к диску (по возрастанию диаметра), канавки уменьшаются в размерах, но увеличивается их количество.

Статор, ввернутый в корпус мельницы на резьбе, состоит из корпуса 12, четырех дисков измельчения 14, статора дисмембратора с пальцами 8 и крышки статора 9. Диски измельчения и статор дисмембратора стопорятся от проворачивания в корпусе статора шпонкой 10. Уплотнение крышки статора 9 достигается резиновой прокладкой 11. У дисков статора аналогичные канавки, как на соответствующих дисках ротора.

Крышка статора имеет входной патрубок с фланцем для подвода измельчаемого материала.

Поступающая через входной патрубок водная суспензия измельчаемого материала малой и средней твердости отбрасывается гайкой-приемником в радиальном направлении от оси на пальцы дисмембратора 7. Материал, предварительно измельченный в результате многократного соударения с пальцами ротора и статора дисмембратора, попадает в кольцевой зазор между статором и ротором и продвигается по этому зазору и канавкам по оси за счет центробежных сил и наклона канавок измельчающей гарнитуры. Благодаря сочетанию измельчения соударением с пальцами ротора и статора, резания гарнитурой дисков и касательными напряжениями в зазоре между ротором и статором, а также измельчения воздействием кавитации, возникающей в жидкости, достигается высокая степень измельчения. Выйдя из зазора, измельченный материал отбрасывается лопатками колеса ротора к периферии и выводится через выпускной патрубок корпуса мельницы.

Ниже приводятся некоторые технические данные этой мельницы (здесь Т — твердое тело, Ж — жидкость).

Производительность, т/ч	12
Исходный размер частиц материала, мм	Не более 3—5
Отношение Т:Ж	1:2,5—3
Тонина помола, мкм	50
Насосная характеристика:	
напор, м	20
подача, м ³ /ч	12

На рис. 1.64 представлена схема типовой мельницы «Пульвокрон» ударно-отражательного действия со встроенным внутри корпуса машины сепаратором (производство США и Германии). Мельница работает следующим образом.

Исходный материал через патрубок 4 поступает на вход в измельчитель, куда также по воздуховоду 3 подается воздух. Измельченный билами материал вместе с потоком воздуха направляется в сепаратор 6, откуда крупные фракции по каналу 5 поступают на повторное измельчение, а тонкодисперсный продукт вместе с воздухом выводится по патрубку 1 в пылеотделительные устройства. Жидкость, используемая для охлаждения измельчителя, удаляется через патрубок 2. Некоторые технические параметры мельницы представлены в табл. 1.2.

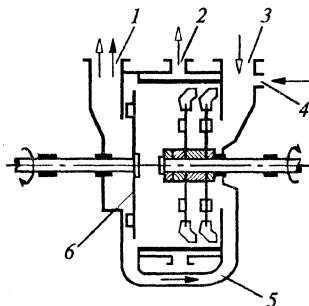


Рис. 1.64. Мельница «Пульвокрон»

В последние десятилетия в Германии фирмой «Альпинс» выпускаются струйные мельницы. На рис. 1.65 показан принцип работы такой мельницы (AFG). Исходный материал по штуцеру 1 поступает в бункер 9, откуда непрерывно шнеком 8 направляется в измельчительную камеру 7, где расположены сопла 5 для подачи энергоносителя. Материал измельчается как во встречных струях, так и в турбулентных потоках над соплами. В верхней части измельчительной камеры 7 установлены центробежные сепараторы, которые отбрасывают в низ камеры крупные фракции частиц. Измельченный продукт выводится энергоносителем по патрубку 3.

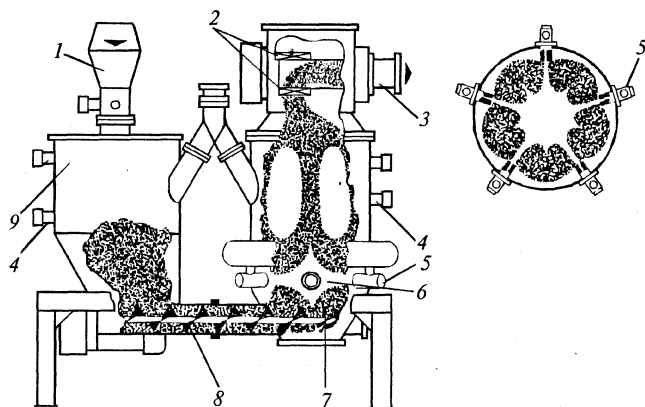


Рис. 1.65. Мельница AFG:

1 – штуцер подачи исходного материала; 2 – сепаратор; 3 – патрубок вывода готового продукта; 4 – вспомогательные сопла; 5 – сопла; 6 – зона ударного измельчения; 7 – камера измельчения; 8 – шнек; 9 – бункер

Таблица 1.2. Данные по измельчению материалов в мельнице «Пульвокрон»

Измельча- емый ма- териал	Размер ячейки сита, через которое про- ходит 50% исходно- го материала, мм	Тонина мельче- ния, не более, мкм	Произво- дительно- сть, т/ч	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
1	2	3	4	5
Перхлорат аммония	2	35	2,5	46
	2	10	1,3	85
Ацетамид	1	20	1,0	110
Бакелит	1	47	1,2	62
Костяной уголь	2	10	0,6	185
	2	30	1,6	70
Известняк	0,5	50	4,9	41
Какао	0,3	43	0,64	120
Графит	0,9	5	0,2	58
Лактоза	0,5	50	1,5	51
Парафор- мальдегид	2	43	1,6	47

Окончание табл. 1.2

1	2	3	4	5
Пентахло-роформ	0,3	147	1,5	31
Твердый каучук	0,4	147	1,2	92
Стирол	1	5	0,9	130
Сахар	0,3	147	6,8	9
	0,3	43	2,5	46
	0,3	25	1	115
	0,3	5	0,25	455
Тальк	0,7	10	2,2	51

К достоинствам таких струйных мельниц с псевдоожиженным слоем измельчаемых частиц необходимо отнести, в о - п е р в ы х, практически полное отсутствие загрязнения измельчаемого материала, поскольку футеровка у них практически не изнашивается; в о - в т о р ы х, меньший, чем у других струйных мельниц, удельный расход энергии и соответственно энергоносителя, что в свою очередь уменьшает габариты пылеулавливающих устройств.

Технические характеристики шести типов струйных мельниц представлены в табл. 1.3.

Т а б л и ц а 1.3. Технические характеристики струйных мельниц AFG

Тип противоточной струйной мельницы	100 AFG	200 AFG	400 AFG	630 AFG	800 AFG	1250 AFG
Тонина измельчения, мкм 97%	2,5–40	4–50	5,5–80	7–90	7–90	7–90
Расход воздуха при давлении 0,6 МПа, м ³ /ч	50	200	800	2000	5200	10 500
Диаметр сопел, мм	2	4	8	11	16	22
Количество сопел, шт.	3	3	3	4	5	6
Объем рабочего бункера, дм ³	0,85	30	90	340	1250	3400
Объем запасного бункера, дм ³	—	15	55	230	1100	3000
Мощность, кВт	1	3(4)	5,5	11(15)	3×11(15)	6×11(15)
Число оборотов, об/мин	22 000	11 500	6000	4000	4000	4000

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие физико-химические свойства продукта необходимо учитывать при выборе машин для его дробления и измельчения?
2. В чем различие между щековыми дробилками с простым движением щеки и со сложным движением подвижной щеки?
3. Что произойдет, если выбрать неправильный угол (завышенный или заниженный) между неподвижной и подвижной щеками в щековой дробилке?
4. Что такое точка гирации в конусных дробилках? Чем различаются дробилки типов ККД, КСД, КМД?
5. В чем преимущества и недостатки валковых дробилок?
6. Какими достоинствами обладают дробилки ударного действия (молотковые, роторные, дезинтеграторы) в сравнении с дробилками других конструкций?
7. Какие типы барабанных мельниц вы знаете? В чем их основные различия?
8. Какие мелящие тела обычно используются в барабанных мельницах и какова их роль?
9. В чем суть использования центробежных сил в горизонтальных роликоткольцевых мельницах?
10. При изготовлении красителей важно, чтобы в технологическом процессе не изменялся цвет красителя. Почему в этом случае предпочитают жерновые измельчители?
11. В чем отличие инерционных мельниц от гиравационных?
12. Каким образом регулируется степень измельчения продукта в конусных коллоидных мельницах?
13. Какими достоинствами обладают струйные мельницы с псевдоожиженным слоем измельчаемых материалов?
14. В смесителях непрерывного действия важное значение для качества смешения имеют характер и точность дозирования исходных компонентов. Как достигаются заданные параметры в ленточных и центробежных смесителях непрерывного действия?
15. Почему барабанные грохоты применяют значительно реже плоских, хотя они более динамически уравновешены?
16. В грохотах горизонтальных, наклонных, с замкнутой траекторией движения необходимо создавать условия, при которых продукт при движении подбрасывается. Для чего это нужно?
17. В чем сущность взаимодействия жидкой и твердой фаз для разделения на фракции твердых частиц в многосекционном классификаторе?
18. Как осуществляется размол материала в мельницах ударно-отражательного действия?

ГЛАВА 2 ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

2.1. 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 теплообменного оборудования на предприятиях химической промышленности, где почти все основные процессы химической технологии (выпаривание, ректификация, сушка и др.) связаны с необходимостью подвода или отвода теплоты, составляет в среднем 15–18%, в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности — 50%.

Теплообменные аппараты можно классифицировать по следующим основаниям:

- ♦ *по способу передачи теплоты* от одного теплоносителя к другому — рекуперативные теплообменники, в которых процесс теплообмена осуществляется через твердую стенку (кожухотрубчатые, змеевиковые теплообменники, теплообменники «труба в трубе», аппараты воздушного охлаждения, пластинчатые, спиральные, блочные теплообменники); регенеративные теплообменники, в которых передача теплоты происходит с помощью теплоаккумулирующей массы, называемой насадкой; смешительные теплообменники, в которых передача теплоты от одного теплоносителя к другому осуществляется посредством их смешения;
- ♦ *по конструкции* — аппараты, изготовленные из труб; аппараты с поверхностью теплообмена из листового материала; аппараты с поверхностью теплообмена 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 большую долю занимают кожухотрубчатые теплообменники. Они 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 в последние годы они находят все большее применение в промышленности.

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

Широкая номенклатура теплообменников по типам, размерам, параметрам и материалам позволяет выбрать аппарат, оптимальный по размерам и материалам для конкретных условий теплообмена. 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; при этом 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; например, при конденсации паров для улучшения теплообмена необходимо обеспечить хороший отвод конденсата с теплообменной поверхности, для чего следует подобрать аппарат соответствующей конструкции.

2.2. Кожухотрубчатые теплообменники

Кожухотрубчатые теплообменники — наиболее распространенная конструкция теплообменной аппаратуры.

По ГОСТ 9929—82, *стальные кожухотрубчатые аппараты* изготавливают 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.

Медные кожухотрубчатые аппараты изготавливают двух типов: Н и К.

В зависимости от назначения кожухотрубчатые аппараты могут быть теплообменниками, холодильниками, конденсаторами и испарителями; их изготавливают 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. 2.1. Их использование в химических производствах характеризуется приблизительно следующими данными: Н — 75%, К — 15%; У — 3%, П и ПК — остальное.

Т а б л и ц а 2.1. 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; 4,0; 6,3; 8,0; 10,0; 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.

Теплообменники с неподвижными трубными решетками (тип Н). Схема теплообменника с неподвижными трубными решетками приведена на рис. 2.1. В кожухе 1 размещен трубный пучок, теплообменные трубы 2 которого развальцованы в трубных решетках 3, жестко соединенных с кожухом. С торцов кожух аппарата закрыт распределительными камерами 4 и 6. Кожух и камеры соединены

фланцами. Для обеспечения направленного движения теплоносителя в межтрубном пространстве устанавливают перегородки 5.

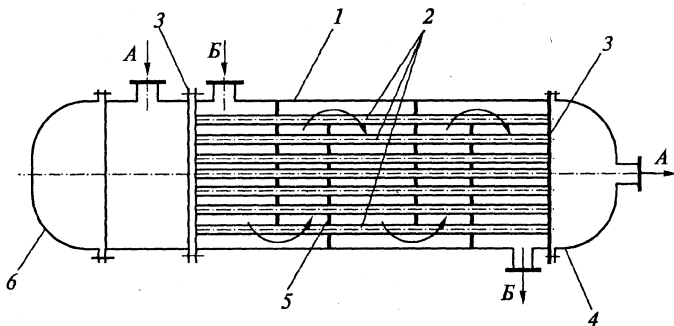


Рис. 2.1. Одноходовый кожухотрубчатый теплообменник

Для подвода и отвода рабочих сред (теплоносителей) аппарат снабжен штуцерами. Теплоноситель *A* в этих аппаратах движется по трубам, теплоноситель *B* — 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 чем исключена

возможность взаимных перемещений труб и кожуха; поэтому аппараты данного типа называют еще теплообменниками жесткой конструкции. Некоторые варианты крепления трубных решеток к кожуху в стальных аппаратах приведены на рис. 2.2. Варианты *б, в* наиболее удачные, поскольку позволяют вынести сварной шов из зоны максимальных напряжений, связанных с разной толщиной соединяемых деталей.

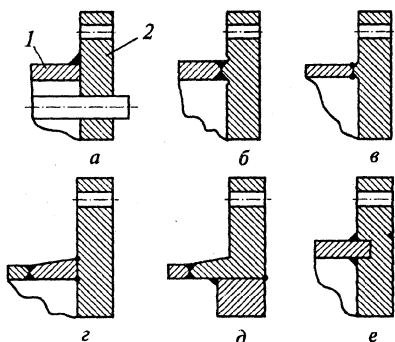


Рис. 2.2. Варианты крепления кожуха и трубных решеток:

а — крепление встык; *б* — крепление на утопленной шейке; *в* — крепление на выступе; *г* — крепление встык с использованием промежуточной чарги; *д* — крепление на фланце; *е* — крепление со сваркой в паз

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 миновать основную поверхность теплообмена.

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 пространств.

Если площадь сечения трубного пространства (число и диаметр труб) выбрана, то проводят тепловой расчет и 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 шестиходовые теплообменники жесткой конструкции.

Двухходовый горизонтальный теплообменник (рис. 2.3) состоит из цилиндрического сварного кожуха 8, распределительной камеры 11 и двух крышек 4. Трубный пучок образован трубами 7, которые закреплены в двух трубных решетках 3, приваренных к кожуху. Крышки, распределительная камера и кожух соединены фланцами. В кожухе и распределительной камере выполнены штуцер для ввода и вывода теплоносителей из трубного (штуцер 1, 12) и межтрубного (штуцер 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 эрозионного изнашивания.

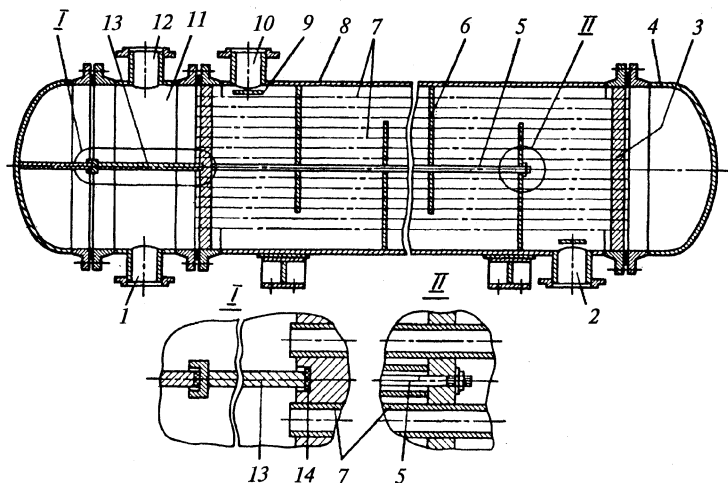


Рис. 2.3. Двухходовый горизонтальный теплообменник с неподвижными решетками

Теплообменники типа Н отличаются простым устройством и сравнительно дешевы, однако им присущи два крупных недостатка. В о - п е р в ы х, наружную поверхность труб невозможно очистить от загрязнений механическим способом, а теплоносители в ряде случаев могут содержать примеси, которые оседают 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 - в т о р ы х, область применения теплообменных аппаратов типа Н ограничена возникновением так называемых температурных напряжений в кожухе и трубах аппарата. Это явление объясняется тем, что при работе теплообменника кожух и трубы претерпевают разные температурные деформации, поскольку температура кожуха близка к температуре теплоносителя, циркулирующего в межтрубном пространстве, а температура труб — к температуре теплоносителя в трубном пространстве. Разность температурных удлинений возрастает, если кожух и трубы изготовлены из

материалов с различными температурными коэффициентами линейного расширения. Возникающие при этом напряжения в сумме с напряжениями от давления среды в аппарате могут вызвать устойчивые деформации и даже разрушение конструкций.

По указанной причине теплообменники типа Н используют при небольшой разности температур (менее 50°C) кожуха и труб, когда еще возможна самокомпенсация конструкции. Однако многие аппараты типа Н, серийно выпускаемые отечественной промышленностью, рекомендованы для работы при еще меньшей разности температур (менее 30°C). Чтобы исключить значительные температурные напряжения, при пуске аппаратов типа Н теплообменную среду сначала направляют в межтрубное пространство для выравнивания температур кожуха и труб, а затем вводят среду в трубы.

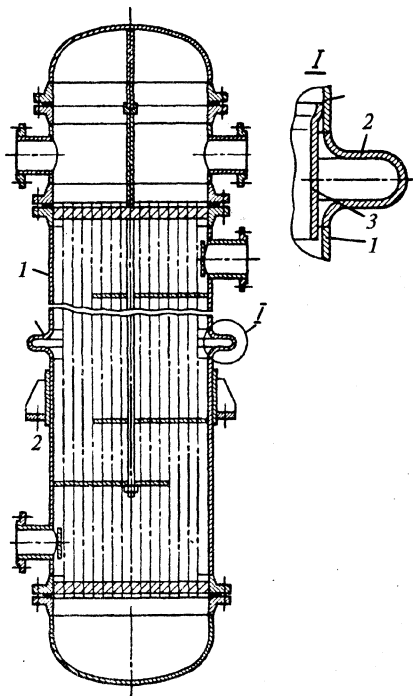


Рис. 2.4. Вертикальный кожухотрубчатый теплообменник с температурным компенсатором на кожухе

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.

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. 2.4) отличается от теплообменника типа Н тем, что между двумя частями кожуха 1 сварен линзовый

компенсатор 2, а к кожуху с внутренней его стороны приварен обтекатель 3, уменьшающий гидравлическое сопротивление межтрубного пространства такого аппарата.

В аппаратах типа К используют как одно-, так и многоэлементные линзовые компенсаторы (рис. 2.5), изготавливаемые обкаткой из коротких цилиндрических обечаек. Линзовый элемент, показанный на

рис. 2.5, 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 линзовый компенсатор 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. 2.6, а); сваренные из двух элементов сферы (рис. 2.6, б); тороидальные (рис. 2.6, в) и др. Для изготовления последних, довольно дешевых и простых, используют трубы, сгибая их в тор с последующей резкой его по внутренней поверхности. Эти компенсаторы характеризуются много меньшими (чем у линзовых компенсаторов) напряжениями, плавно изменяющимися по сечению компенсатора. Однако из-за того,

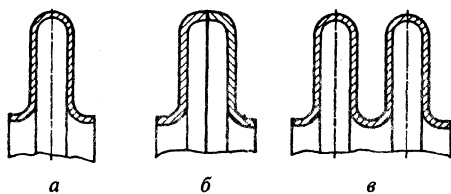


Рис. 2.5. Компенсаторы:
а — однолинзовый; б — однолинзовый сваренный из двух полулинз; в — двухлинзовый

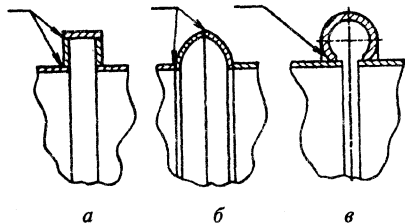


Рис. 2.6. Компенсаторы

что сварной шов, соединяющий компенсатор с кожухом, работает в тяжелых условиях, они находят сдержанное применение.

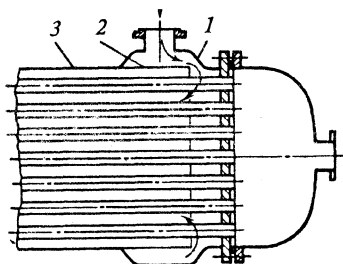


Рис. 2.7. Теплообменник с расширителем на кожухе

Частичную компенсацию температурного расширения за счет гибких элементов в кожухе обеспечивает аппарат с расширителем 1 на кожухе 3 (рис. 2.7). Преимущество этой конструкции — эффективность теплообмена вследствие исключения застойных зон в межтрубном пространстве. В кожухотрубчатых теплообменниках такие зоны образуются вблизи трубных решеток, поскольку штуцеры 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 удлинение труб, что исключает возможность возникновения температурных напряжений.

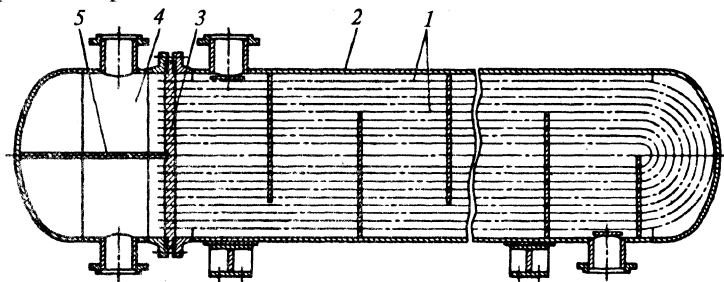


Рис. 2.8. Теплообменник с U-образными трубами

Такие аппараты (рис. 2.8) состоят из кожуха 2 и трубного пучка, имеющего U-образные трубы 1 и одну трубную решетку 3, которая 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.

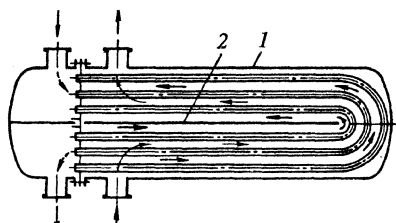


Рис. 2.9. Двухходовый теплообменник с U-образными трубами

Теплообменники типа У изготавливают двухходовыми по трубному пространству и одно- или двухходовыми по межтрубному пространству. В последнем случае (рис. 2.9) в аппарате установлена продольная перегородка 2, извлекаемая из кожуха 1 вместе с трубным пучком. Чтобы исключить перетекание теплоносителя в зазорах между кожухом аппарата (рис. 2.10) и перегородкой 3, у стенки кожуха устанавливают гибкие металлические пластины 2 (рис. 2.10, а) или прокладку 2 (рис. 2.10, б) из прорезиненного асбестового шнура, которую укладывают в паз перегородки 3.

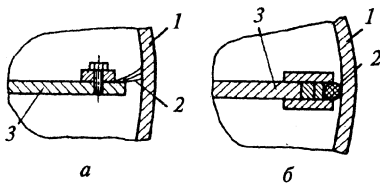


Рис. 2.10. Варианты уплотнения пространства между перегородкой и кожухом:
а — металлической пластиной;
б — шнуром

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°C . 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 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. 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. 2.11. Специальная шпилька 3 с

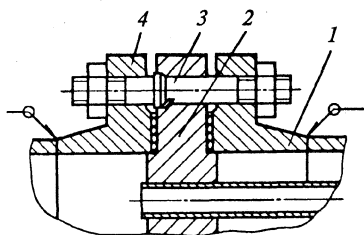


Рис. 2.11. Способ крепления распределительной камеры к кожуху теплообменника

коническим стопорным выступом позволяет снимать распределительную камеру без нарушения соединения трубной решетки 2 с кожухом.

Один из наиболее распространенных дефектов такого теплообменника — нарушение герметичности узла соединения труб с трубной решеткой из-за весьма значительных изгибающих напряжений, возникающих от мас-

сы труб и протекающей в них среды. В связи с этим данные аппараты диаметром 800 мм и более для удобства монтажа и уменьшения изгибающих напряжений в трубном пучке снабжают роликовыми опорами.

Обычно U-образные трубы изготавливают 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 недостаткам теплообменных аппаратов типа У следует отнести относительно плохое заполнение кожуха трубами из-за ограничений, обусловленных изгибом труб, а также невозможность замены труб (за исключением крайних) при выходе их из строя и 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 таких теплообменниках теплообменные трубы закреплены в двух трубных решетках, одна из которых неподвижно связана с корпусом, а другая имеет возможность свободного осевого перемещения, что исключает возможность температурных напряжений кожуха и труб.

Горизонтальный двухходовый конденсатор типа П (рис. 2.12) состоит из кожуха 10 и трубного пучка. Левая трубная решетка 1 соединена фланцевым соединением с кожухом и распределитель-

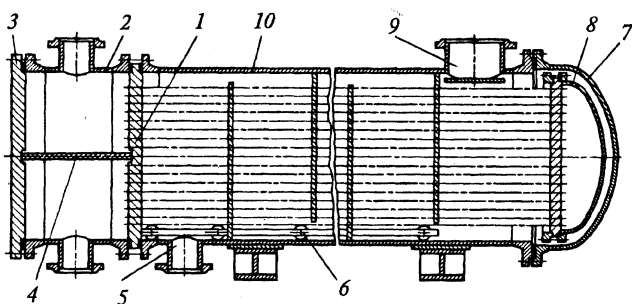


Рис. 2.12. Горизонтальный двухходовый конденсатор с плавающей головкой

ной камерой 2, снабженной перегородкой 4 и закрытой плоской крышкой 3. Правая, подвижная, трубная решетка установлена внутри кожуха свободно и образует вместе с присоединенной к ней крышкой 8 плавающую головку. При нагревании и удлинении трубок плавающая головка перемещается внутри кожуха. С правой стороны к корпусу крепится, как правило, эллиптическая крышка 7.

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 меньших размеров предназначен для вывода конденсата.

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 жесткости трубному пучку.

Аппараты с плавающей головкой обычно выполняют одноходовыми по межтрубному пространству, однако установкой продольных перегородок в межтрубном пространстве можно получить многоходовые конструкции. На рис. 2.13 показаны двухходовые по межтрубному пространству теплообменники.

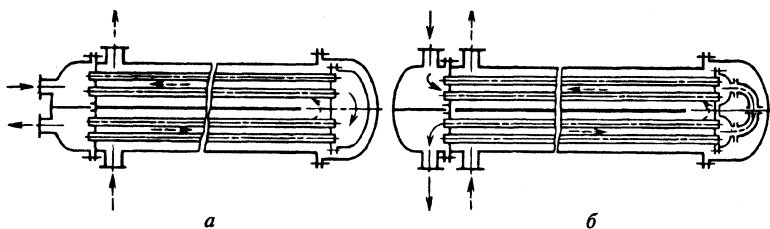


Рис. 2.13. Двухходовый теплообменник типа П с плавающей головкой:
а — цельной; б — разрезной

В аппаратах типа П обеспечивается хорошая компенсация температурных деформаций, но она 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 (рис. 2.13, б).

Наиболее важный узел теплообменников с плавающей головкой — соединение плавающей трубной решетки с крышкой, которое должно обеспечивать возможность легкого извлечения трубного пучка из кожуха аппарата, а также минимальный зазор Δ между кожухом и пучком труб. Вариант, показанный на рис. 2.14, позволяет извлекать трубный пучок, но зазор Δ получается больше

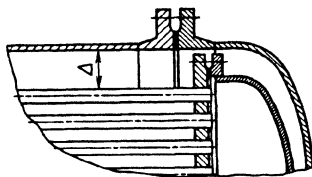


Рис. 2.14. Вариант размещения плавающей головки в кожухе большего диаметра

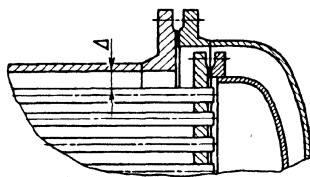


Рис. 2.15. Вариант размещения плавающей головки в кожухе меньшего диаметра

(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.

При размещении плавающей головки внутри крышки, диаметр которой больше диаметра кожуха, зазор уменьшается, но усложняется демонтаж аппарата, так как плавающую головку нельзя извлечь из кожуха теплообменника (рис. 2.15).

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. 2.16. В одном из таких простых соединений использованы разрезные фланцы (рис. 2.16, а). Конструкция включает разрезной фланец 2 (состоит из двух полуколец, стянутых шпилькой 1), уплотняющую прокладку 5, крышку 4 плавающей головки и трубную решетку 3.

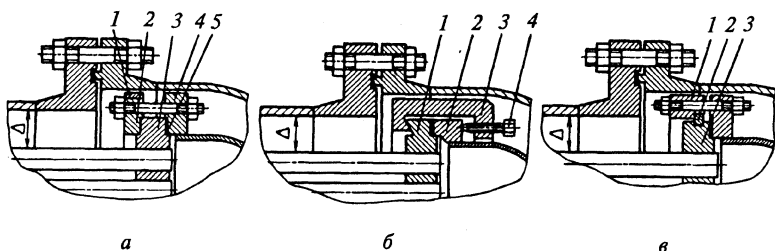


Рис. 2.16. Способы крепления крышки плавающей головки к трубной решетке: а — разрезным фланцем; б — разрезной фланцевой скобой; в — разрезным кольцом

Широко распространены соединения фланцевой скобой 3 (рис. 2.16, б), представляющие собой приспособление типа струбины. Соединение состоит из двух полуколец, охватывающих край трубной решетки 1 и фланец 2 крышки. Винты 4 должны быть расположены посередине уплотнения, что обеспечивает разгрузку фланца от изгибающих моментов.

В другой конструкции (рис. 2.16, в) накидной фланец 1 удерживается разрезным кольцом 2, вставленным в паз трубной решетки 3.

В некоторых одноходовых теплообменниках с плавающей головкой используется сальниковое уплотнение плавающей головки (рис. 2.17), которое состоит из двух кольцевых уплотнений 2 и

дренажного кольца 4, уложенных в пазы фланцев 1 и 3. Уплотнения обеспечивают герметичность по полированной поверхности подвижной трубной решетки 5 с цилиндрическим удлинителем.

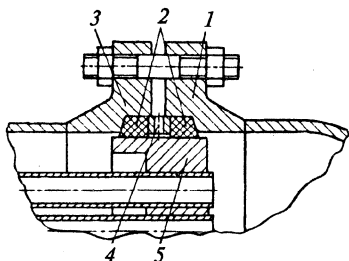


Рис. 2.17. Внутреннее сальниковое соединение

Аппараты с таким уплотнением нельзя использовать для летучих и воспламеняющихся жидкостей. Следует также учитывать, что в таких аппаратах при повышенном давлении в межтрубном пространстве сальник является источником утечек теплоносителя.

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. 2.18) уровень жидкости в кожухе 11 поддерживается перегородкой 2. Достаточный объем парового простран-

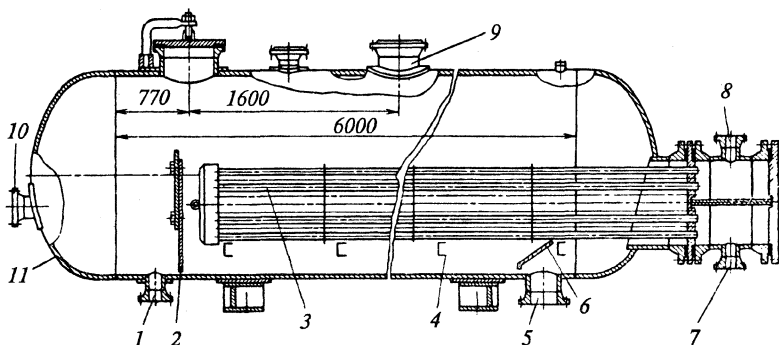


Рис. 2.18. Испаритель

ства и увеличение поверхности испарения достигается, если 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 труб-

ного пучка в 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.

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

Теплообменник этой конструкции (рис. 2.19) отличается от рассмотренных наличием на крышке 2 удлиненного штуцера (горловины) 3, внутри которого размещен компенсатор 4, соеди-

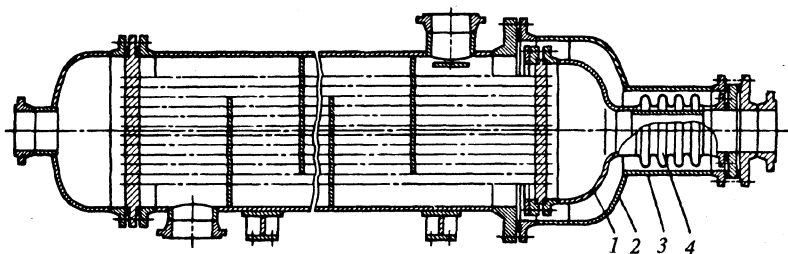


Рис. 2.19. Теплообменник с плавающей головкой и компенсатором

ненный 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. 2.19 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 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.

2.3. Элементы кожухотрубчатых теплообменных аппаратов

Основные элементы кожухотрубчатых теплообменных аппаратов — кожух (корпус), распределительная камера и трубный пучок, состоящий 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 обечаяек — центральной и двух концевых. Длина концевых обечаяек $l = 2\sqrt{D_n \delta_n}$ (D_n — наружный диаметр кожуха; δ_n — толщина стенки кожуха), но не менее 100 мм. Толщины концевых обечаяек должны в 1,2–1,4 раза превосходить толщину центральной обечайки, чтобы компенсировать напряжения, возникающие в месте соединения кожуха с трубной решеткой.

Для теплообменных аппаратов, особенно аппаратов типов У, П и ПК, должна быть обеспечена необходимая устойчивость формы кожуха; к этой характеристике обечайки предъявляют особые требования, потому что для очистки аппаратов приходится периодически извлекать трубный пучок с перегородками. Так как зазор между кожухом и перегородкой невелик (несколько миллимет-

ров), 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 E_k и E_t , МПа, и температурными коэффициентами линейного расширения α_k и α_t , $^{\circ}\text{C}^{-1}$, соответственно. Введем обозначения: L — длина труб, м; F_t и F_k — площади поперечного сечения труб и кожуха, м^2 ; t_t и t_k — их температуры, $^{\circ}\text{C}$; для определенности примем $t_t > t_k$.

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

$$\Delta/L = \varepsilon = \alpha_t (t_t - t_0) - \alpha_k (t_k - t_0), \quad (2.1)$$

где t_0 — температура окружающей среды при сборке аппарата; Δ — разность абсолютных деформаций, м, которая в реальных условиях компенсируется относительными деформациями кожуха $\Delta'_k/L = \varepsilon_k$ (растяжение) и труб $\Delta'_t/L = \varepsilon_t$ (сжатие), где Δ'_k и Δ'_t — реальные деформации кожуха и труб соответственно, м.

Очевидно, что

$$\varepsilon = \varepsilon_k + \varepsilon_t. \quad (2.2)$$

Деформации кожуха и труб вызывают напряжения растяжения в кожухе σ_k и сжатия в трубах σ_t :

$$\sigma_k = \varepsilon_k E_k; \sigma_t = \varepsilon_t E_t. \quad (2.3)$$

Поскольку осевая сила Q , вызывающая эти напряжения, одинакова для кожуха и труб, можно записать

$$\varepsilon_k E_k F_k = \varepsilon_t E_t F_t. \quad (2.4)$$

Подставив (2.4) и (2.1) в (2.2), с учетом (2.3) найдем

$$\begin{aligned}\sigma_{\tau} &= \frac{\theta}{F_{\tau}} [\alpha_{\tau} (t_{\tau} - t_0) - \alpha_{\kappa} (t_{\kappa} - t_0)] / F_{\tau}; \\ \sigma_{\kappa} &= \frac{\theta}{F_{\kappa}} [\alpha_{\tau} (t_{\tau} - t_0) - \alpha_{\kappa} (t_{\kappa} - t_0)] / F_{\kappa},\end{aligned}\quad (2.5)$$

где

$$\theta = \frac{E_{\kappa} F_{\kappa} E_{\tau} F_{\tau}}{E_{\kappa} F_{\kappa} + E_{\tau} F_{\tau}}. \quad (2.6)$$

Для стальных теплообменников, корпус и трубы которых изготовлены из материала с модулем упругости $E = 200$ ГПа и температурным коэффициентом линейного расширения $\alpha = 1,21 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, при разности температур кожуха и труб $\Delta t = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$ (допустимой для теплообменников типа Н) и при равных площадях поперечного сечения кожуха и труб ($F_{\kappa} = F_{\tau}$) напряжения $\sigma_{\kappa} = \sigma_{\tau} = 0,5\alpha E \Delta t = 60,5$ МПа. Установкой линзовых компенсаторов напряжения в кожухе уменьшают на $\Delta\sigma_{\kappa}$, в трубах — на $\Delta\sigma_{\tau}$:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{\kappa} &\approx \frac{\Delta'_L z \theta}{F_{\kappa} L} [\alpha_{\tau} (t_{\tau} - t_0) - \alpha_{\kappa} (t_{\kappa} - t_0)]; \\ \Delta\sigma_{\tau} &\approx \frac{\Delta'_L z \theta}{F_{\tau} L} [\alpha_{\tau} (t_{\tau} - t_0) - \alpha_{\kappa} (t_{\kappa} - t_0)],\end{aligned}\quad (2.7)$$

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

Из выражения (2.7) следует, что при введении компенсатора в конструкцию температурные напряжения уменьшаются 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 и представляют собой обечайку с фланцами, соединенными с трубной решеткой и съемной эллиптической или плоской крышкой. В некоторых конструкциях крышка приварена к цилиндрической обечайке (см. рис. 2.8).

Для образования ходов теплоносителя по трубам распределительную камеру снабжают продольной перегородкой. Вариант герметизации узла соединения перегородки показан на рис. 2.3.

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 плоскую 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 обычно выполняют 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, на коэффициент теплоотдачи в трубном пространстве и на габариты аппарата; чем меньше диаметр труб, тем большее их число можно разместить 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. 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 дешевым является теплообменный аппарат с длиной труб 5—7 м.

Трубные решетки кожухотрубчатых теплообменников изготавливают 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. 2.20, а), а для теплообменников типов П, У и ПК — по вершинам квадратов (рис. 2.20, б) или равносторонних треугольников. При размещении труб диаметром

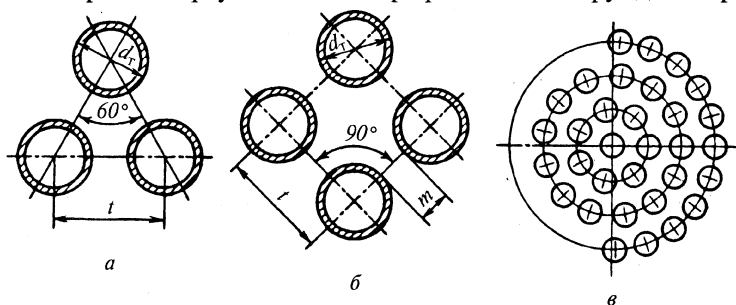


Рис. 2.20. Схемы размещения труб в трубной решетке:
а — по вершинам равностороннего треугольника; б — по вершинам квадратов;
в — по окружностям

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. 2.21, в) трубы располагают лишь в кислородной аппаратуре.

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. 2.21, а, б, в), сваркой (рис. 2.21, д, е), развальцовкой со сваркой (рис. 2.21, з). Пайку и заливку металлом концов

труб в решетках (рис. 2.21, *ж*) применяют при изготовлении теплообменников из меди и ее сплавов, а склеивание — при изготовлении аппаратов из полимерных материалов (рис. 2.21, *з*).

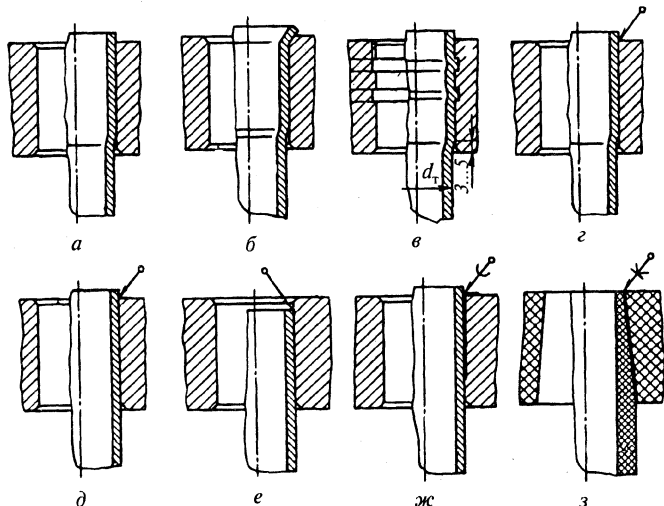


Рис. 2.21. Варианты крепления труб в трубных решетках:
а — развальцовка по гладкой поверхности; *б* — развальцовка с отбортовкой;
в — развальцовка с канавками; *г* — развальцовка со сваркой; *д* — сварка по внешней кромке; *е* — сварка по внутренней кромке; *ж* — пайка; *з* — склеивание

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 того, качественная развальцовка и возможность замены труб обеспечиваются, если твердость материала трубной решетки превышает 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. 2.21, б).

Наиболее простой способ — развальцовку в гладких отверстиях — применяют при относительно небольших рабочих давлениях (до 0,6 МПа). Прочность и герметичность вальцовочного соединения значительно возрастает 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: со стороны распределительной камеры шириной $1,5d_t$ и со стороны межтрубного пространства шириной $0,75d_t$. Это позволяет исключить коррозию и проникновение среды в щель между трубой и решеткой.

Крепление труб сваркой с развальцовкой применяют без ограничений давления и температуры теплоносителей; при этом 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 для увеличения скорости теплоносителя в межтрубном пространстве. В обоих случаях возрастает коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности труб.

Установленные в межтрубном пространстве конденсаторов и испарителей поперечные перегородки выполняют роль опор

трубного пучка, фиксируя трубы на заданном расстоянии одна от другой, а также уменьшают вибрацию труб.

Вибрация труб обычно не приводит к серьезным неприятностям, 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.

Известно несколько конструкций поперечных перегородок: с сегментным (рис. 2.22, а), секторным (рис. 2.22, б) и щелевым (рис. 2.22, в) вырезами, с чередованием дисков и колец (рис. 2.22, г).

Наиболее широко в мировой практике применяют сегментные перегородки. Высота вырезаемого сегмента равна примерно

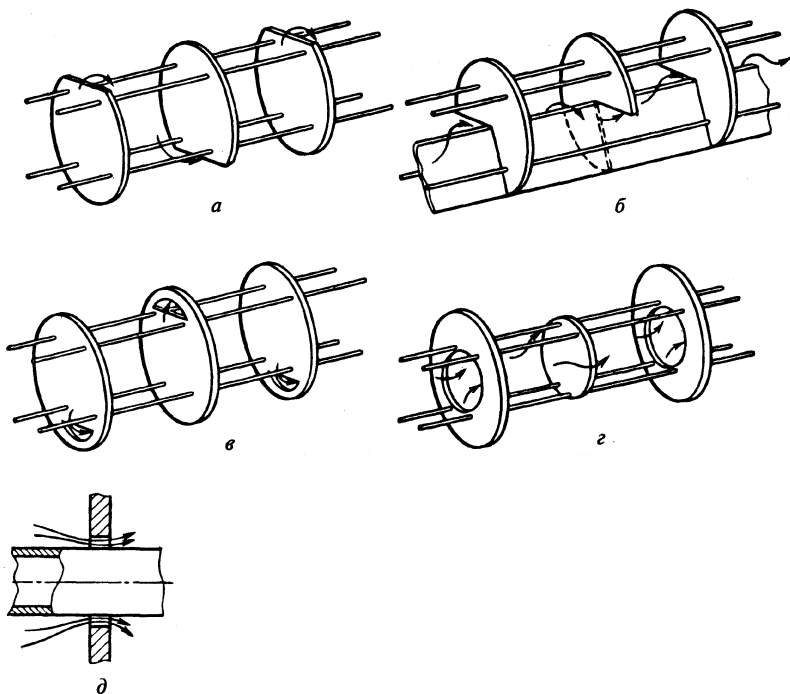


Рис. 2.22. Варианты поперечных перегородок

$1/3$ диаметра аппарата, а расстояние между перегородками — около $1/2$ диаметра аппарата.

Аппараты со сплошными перегородками обычно используют для чистых жидкостей. В этом случае поток жидкости, протекая по кольцевому зазору (около 1,5 мм) между трубой и перегородкой (рис. 2.22, д), сильно турбулизуется, что приводит к уменьшению толщины ламинарного пограничного слоя и, как следствие, к увеличению коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности труб.

Иногда в теплообменниках в пространстве между трубными решетками 4, 6 (рис. 2.23) устанавливают поперечные перегород-

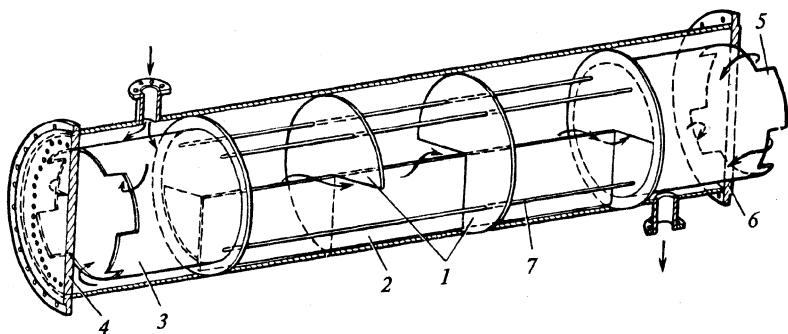


Рис. 2.23. Вариант установки перегородок, обеспечивающий винтовое движение теплоносителя

ки 1 с секторными вырезами и продольную перегородку 2 высотой, равной половине диаметра аппарата. Секторные вырезы, по площади равные 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. Уменьшение утечек достигается при следующих ограничениях: 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 нормативным документам.

Для уменьшения зазоров между корпусом и поперечными перегородками иногда используют упругие уплотняющие кольца 1, закладываемые в паз перегородки 2 (рис. 2.24).

В межтрубном пространстве теплообменников в ряде случаев устанавливают и *продольные перегородки* (см. рис. 2.9). Толщина продольных перегородок трубного пучка, распределительных камер и крышек должна быть не менее 6 мм.

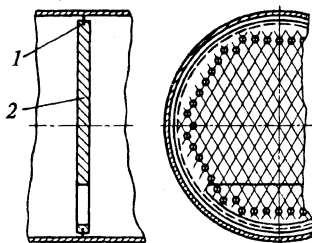


Рис. 2.24. Вариант уплотнения зазора между поперечной перегородкой и корпусом аппарата

2.4. 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»). Рассматриваемые методы применяются для расчета стальных, работающих при статических и повторно-статических нагрузках аппаратов с неподвижными трубными решетками, с компенсатором или расширителем на кожухе, а также аппаратов 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 элемента 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, нагрузки и напряжения в теплообменниках типов 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 t_t теплообменных труб постоянна.

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

$$t_r = 0,5 \left(t_g - \frac{q}{\beta_r} + t_x + \frac{q}{\beta_x} \right),$$

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

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

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_t удлинения кожуха и трубы составят (рис. 2.25):

$$\Delta_{kl} = \alpha_k (t_k - t_0) L; \Delta_{tl} = \alpha_t (t_t - t_0) L. \quad (2.8)$$

Здесь α_k и α_t — температурные коэффициенты линейного расширения соответственно кожуха и труб, °С⁻¹; L — расстояние между трубными решетками (длина кожуха и труб), мм.

Если, например, $\Delta_{kl} > \Delta_{tl}$, то при нагревании аппарата кожух сжимается на

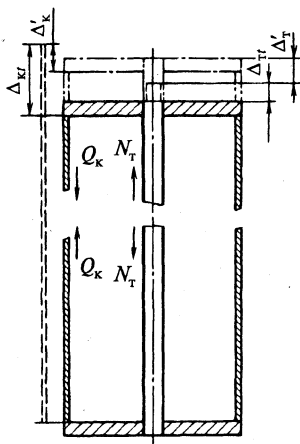


Рис. 2.25. К определению температурных деформаций элементов теплообменника

величину Δ'_k , а каждая труба растягивается на величину Δ'_t (условие совместности деформаций кожуха и труб).

Сжатие кожуха вызывает появление осевой силы Q_k , Н/мм (на единицу длины окружности кожуха). Связь между Δ'_k и Q_k имеет вид

$$\Delta'_k = \frac{Q_k L}{s_k E_k}, \quad (2.9)$$

где s_k — толщина стенки кожуха, мм; E_k — модуль упругости материала кожуха, МПа.

Соотношение между Δ'_t и осевой силой в трубе N_t

$$\Delta'_t = \frac{N_t L}{\pi(d_t - s_t)s_t E_t}, \quad (2.10)$$

где d_t и s_t — соответственно наружный диаметр и толщина стенки теплообменной трубы, мм; E_t — модуль упругости материала труб, МПа.

Приравняв деформации кожуха и труб

$$\Delta_{kt} - \Delta'_k = \Delta_{tt} + \Delta'_t$$

и воспользовавшись условием равновесия трубной решетки $\pi D_{cp} Q_k = i N_t$, получим

$$N_t = \frac{\pi(d_t - s_t)s_t E_t [\alpha_k(t_k - t_0) - \alpha_t(t_t - t_0)]}{(1 + \rho)},$$

$$Q_k = \frac{i N_t}{\pi D_{cp}},$$

где $\rho = \frac{E_t i (d_t - s_t)s_t}{E_k s_k D_{cp}}$; i — число труб, закрепленных в решетке;

D_{cp} — средний диаметр кожуха, мм.

Зная Q_k и N_t , можно определить температурные напряжения

$$\sigma_{kt} = \frac{\pi D_{cp} Q_k}{F_k}; \quad \sigma_{tt} = \frac{N_t}{F_t},$$

где σ_{kt} , σ_{tt} — температурные напряжения в кожухе и трубах, МПа; F_k , F_t — площади сечения кожуха и трубы, мм².

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

$$\sigma_{\tau p} = \frac{0,5(p_{\tau} - p_{\text{м}})(d_{\tau} - s_{\tau})}{s_{\tau}};$$

соответствующая осевая деформация

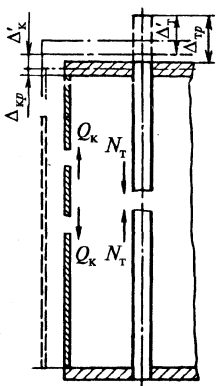
$$\Delta_{\tau p} = \frac{\mu \sigma_{\tau p} L}{E_{\tau}} = \frac{0,5\mu(p_{\tau} - p_{\text{м}})(d_{\tau} - s_{\tau})L}{E_{\tau} s_{\tau}}, \quad (2.11)$$

где μ — коэффициент Пуассона; p_{τ} и $p_{\text{м}}$ — давления соответственно в трубном и межтрубном пространствах, МПа.

Действие давления в межтрубном пространстве приводит к возникновению кольцевых напряжений в обечайке кожуха

$$\sigma_p = \frac{0,5 p_{\text{м}} D_{\text{ср}}}{s_{\kappa}}$$

и осевой деформации кожуха



$$\Delta_{\kappa p} = \frac{\mu \sigma_{\kappa p} L}{E_{\kappa}} = \frac{0,5\mu p_{\text{м}} D_{\text{ср}} L}{s_{\kappa} E_{\kappa}}. \quad (2.12)$$

Условие совместности деформаций кожуха и труб при действии только давления имеет вид (рис. 2.26):

$$\Delta_{\kappa p} + \Delta'_{\kappa} = \Delta_{\tau p} - \Delta'_{\tau}.$$

В этом случае условие равновесия трубной решетки можно записать в виде

$$\pi D_{\text{ср}} Q_{\kappa} = -Q_{\text{м}} + Q_{\tau} + iN_{\tau}, \quad (2.13)$$

Рис. 2.26. К определению деформаций элементов теплообменника под действием давления

где $Q_{\text{м}}$ — сила, действующая на трубную решетку со стороны межтрубного пространства, Н; $Q_{\text{м}} = p_{\text{м}}(\pi a^2 - 0,25\pi d_{\tau}^2)$; a — внутренний радиус кожуха, мм; $Q_{\tau} = 0,25p_{\tau}\pi(d_{\tau} - 2s_{\tau})^2$ — неуравновешенная сила, возникающая от

давления в трубном пространстве и действующая на трубную решетку со стороны греющей камеры, H (рис. 2.27). Уравнение (2.13) примет вид

$$\pi D_{\text{ср}} Q_k = -p_m (\pi a^2 - 0,25 \pi d_t^2) + \quad (2.14)$$

$$+ 0,25 p_t \pi (d_t - 2s_t)^2 + iN_t.$$

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

$$\Delta_{\text{кл}} + \Delta_{\text{кр}} + \Delta''_{\text{к}} = \Delta_{\text{тл}} + \Delta_{\text{тр}} - \Delta''_{\text{т}}. \quad (2.15)$$

Подставив (2.8)–(2.12) в (2.15), получим

$$\frac{\alpha_{\text{к}} (t_{\text{к}} - t_0) + 0,5 \mu p_m D_{\text{ср}}}{s_{\text{к}} E_{\text{к}}} + \frac{Q'_k}{s_{\text{к}} E_{\text{к}}} = \alpha_{\text{т}} (t_{\text{т}} - t_0) + \quad (2.16)$$

$$+ \frac{0,5 \mu (p_t - p_m) (d_t - s_t)}{E_{\text{т}} s_{\text{т}}} - \frac{N'_t}{\pi (d_t - s_t) s_{\text{т}} E_{\text{т}}},$$

где Q'_k и N'_t — осевые силы в кожухе и трубах при совместном действии давления и температуры.

Совместное решение (2.16) и (2.14) дает значения, зная которые, находим осевые напряжения в корпусе и трубах

$$\sigma'_k = \frac{\pi D_{\text{ср}} Q'_k}{F_{\text{к}}}; \quad \sigma'_t = \frac{N'_t}{F_{\text{т}}}.$$

Таким образом, получены кольцевые напряжения $\sigma_{\text{кр}}$, $\sigma_{\text{тр}}$ и осевые σ'_k , σ'_t . Используя теорию прочности, находят эквивалентные напряжения и проверяют прочность кожуха и труб по условиям

$$\sigma_{\text{к экв}} \leq [\sigma]; \quad \sigma_{\text{т экв}} \leq [\sigma],$$

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

Расчет трубной решетки и условия прочности труб в решетке. На основе анализа теплообменников жесткой конструкции был разработан упрощенный метод расчета трубных решеток (ОСТ

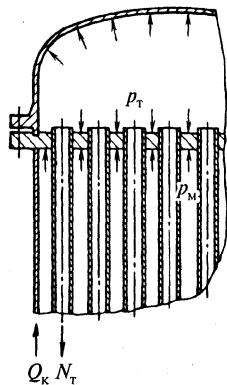


Рис. 2.27. Схема равновесия элемента теплообменника

26.1185–81). Такой расчет выполняют для аппаратов, предназначенных для работы под давлением не более 6,4 МПа и при 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, мм; a, a_1 — радиусы кожуха и перфорированной части трубной решетки соответственно, мм, см. рис. 2.28) и отсутствии дополнительных требований к жесткости трубной решетки.

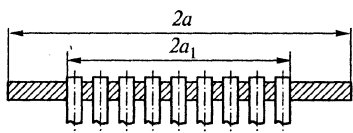


Рис. 2.28. Схема к определению размеров трубной решетки

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

$$s_p = \frac{f_1 s_k}{(\eta_T - \eta_M)} + c,$$

где $f_1 = f_1(A', B')$ — вспомогательная функция (рис. 2.29); s_k — толщина стенки кожуха аппарата, мм; η_T и η_M — коэффициенты влияния давления на трубную решетку, равные

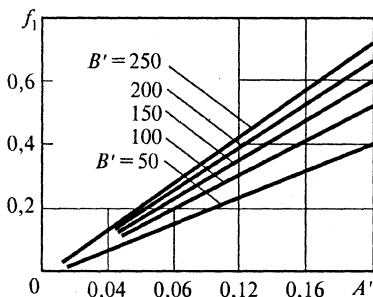
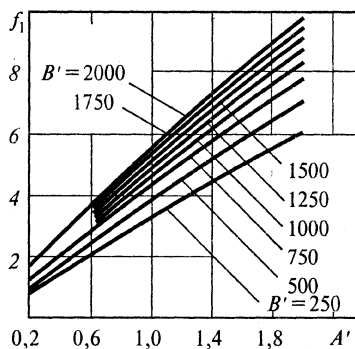


Рис. 2.29. Зависимость f_1 от A' и B'



$$\eta_T = \frac{1 - 0,25i(d_T - 2s_T)^2}{a_1^2}; \quad \eta_M = \frac{1 - 0,25id_T^2}{a_1^2};$$

$$A' = \frac{0,5p_0}{[\sigma_a]_p \varphi_p}; \quad B' = \frac{\psi_0 L}{s_k};$$

c — конструктивная прибавка, мм; $[\sigma]_p$ — 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_0 — коэффициент жесткости перфорированной плиты:

η_r	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
ψ_0	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,

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

где $D_{\text{сп}}$ — средний диаметр прокладки, мм; $p = \max \{p_m; p_T; p_T - p_m\}$.

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

$$s_p \geq 0,5 D_E \sqrt{\frac{p_T - p_m}{[\sigma]_p}} + c,$$

где 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

$$0,5 K_0 \alpha_{\max} \leq [\sigma_a]_K,$$

где K_0 — эффективный коэффициент концентрации напряжений, зависящий от способа крепления решетки к фланцу или кожуху (по ОСТ 26.1185–81); $\sigma_{\max} = \max [\sigma_1; \sigma_2]$; $\sigma_1 = Q_k/s_k$; $\sigma_2 = |p_m| a/s_k$; $[\sigma_a]_k$ — допускаемое напряжение для материала кожуха в условиях малоциклового нагружения, МПа.

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

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

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

Если $N_T < 0$, то трубы проверяют на устойчивость по условию

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

где φ_T — коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при продольном изгибе, определяемый по рис. 2.30 в зависимости от

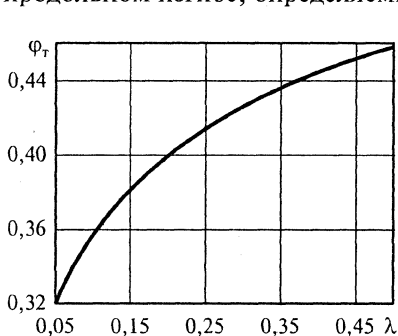


Рис. 2.30. Зависимость φ_T от λ

$$\lambda = 1,3 \sqrt{\frac{[\sigma]_T}{E_T} \frac{L_p}{(d_T - s_T)}}; \quad L_p = L$$

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.

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, причем $[q] = 29,4$ 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.

Для труб, соединенных с решеткой сваркой с развальцовкой,

$$[N]_T = d_T l_B [q] + 0,57 d_T \delta \min \{[\sigma]_T; [\sigma]_p\}.$$

2.5. Интенсификация процесса теплообмена в кожухотрубчатых теплообменниках

Интенсификация работы кожухотрубчатых теплообменников связана главным образом с выравниванием термических сопротивлений $(\beta F)^{-1}$ на противоположных сторонах теплообменной поверхности. Этого достигают увеличением либо поверхности теплообмена F , например оребрением ее со стороны теплоносителя с меньшим коэффициентом теплоотдачи β , либо увеличением коэффициента теплоотдачи путем рационального подбора 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, когда термическое сопротивление определяется: 1) межтрубным пространством; 2) трубным пространством.

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. Такие зоны особенно

часто образуются вблизи трубных решеток, поскольку штуцеры 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.

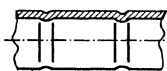


Рис. 2.31. Труба с кольцевыми канавками

Эффект теплоотдачи на наружной поверхности труб существенно повышают кольцевые канавки (рис. 2.31), интенсифицирующие теплообмен в межтрубном пространстве примерно в 2 раза

в результате турбулизации потока в пограничном слое.

В теплообменниках с передачей теплоты от жидкости в трубном пространстве к вязкой жидкости или газу в межтрубном про-

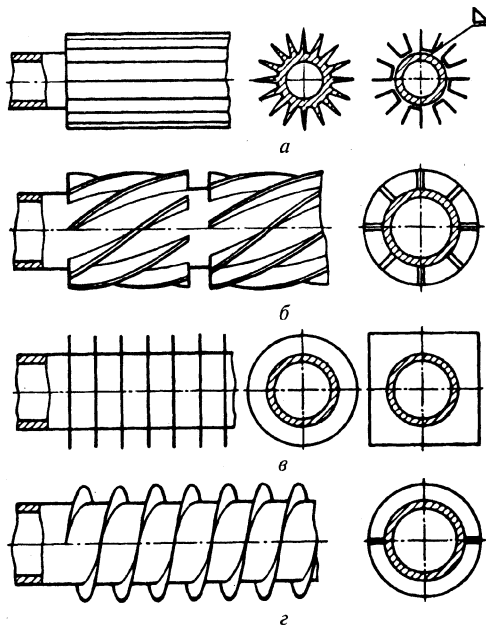


Рис. 2.32. Трубы с оребрением

странстве коэффициенты теплоотдачи с наружной стороны труб примерно на порядок меньше, чем с внутренней стороны. Например, в газожидкостных теплообменниках коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости $\beta_{\text{ж}}$ может достигать 6 кВт/(м²·К), а со стороны газа $\beta_{\text{г}}$ не превышает 0,1 кВт/(м²·К). Естественно, что применение гладких труб в таких теплообменниках приводит к резкому увеличению их массы и размеров. Стремление интенсифицировать теплоотдачу со стороны малоэффективного теплоносителя (газы, вязкие жидкости) реализовалось в 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. Однако при этом возрастают затраты на прокачивание теплоносителя. Применяют трубы с продольными (рис. 2.32, а) и разрезными (рис. 2.32, б) ребрами, с поперечными ребрами различного профиля (рис. 2.32, в). Оребрение на трубах можно выполнить в виде спирали (рис. 2.32, г), игл различной толщины и др. Оребрение наиболее эффективно, если обеспечивается соотношение $\beta_{\text{г}} F_{\text{г}} = \beta_{\text{ж}} F_{\text{ж}}$, где $F_{\text{г}}$ 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. Так, если требуется невысокий коэффициент теплоотдачи, необходимую эффективность могут обеспечить стальные ребра; большие коэффициенты теплоотдачи достигаются применением медных или алюминиевых ребер.

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

Во втором случае, когда термическое сопротивление определяется трубным пространством, используют методы воздействия на поток устройствами, разрушающими и турбулизующими внутренний пограничный слой. Это различного рода турбулизаторы (спирали, диафрагмы, диски) и насадки (кольца, шарики), помещаемые в трубу. Естественно, что при этом возрастает гидравлическое сопротивление трубы.

Турбулизаторы в виде диафрагмы (рис. 2.33, 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

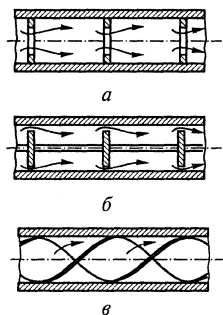


Рис. 2.33. Трубы с турбулизирующими вставками

позволяет приблизительно в 4 раза интенсифицировать теплообмен. Вставки в виде дисков (рис. 2.33, б) с определенным шагом укрепляют на тонком стержне, вставленном в трубы. По своему воздействию на поток такие вставки близки к диафрагмам. Спиральные вставки (рис. 2.33, в) обычно изготавливают из тонких алюминиевых или латунных лент. При низких значениях Re они позволяют повысить коэффициент теплоотдачи в 2–3 раза.

Теплообмен в трубах можно интенсифицировать также с помощью шероховатых поверхностей, накатки кольцевых канавок, изменения поперечного сечения трубы путем ее сжатия. В этом случае даже при ламинарном режиме течения теплоносителя теплоотдача в трубах на 20–100% выше, чем в гладких трубах.

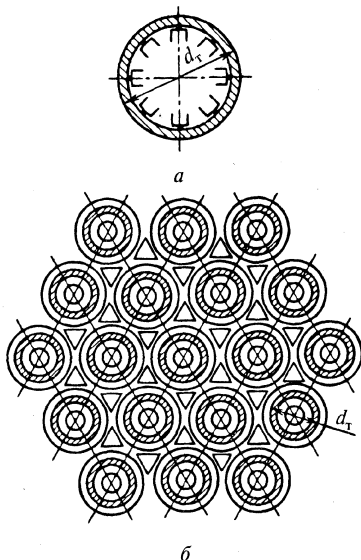


Рис. 2.34. Варианты оребрения труб:
а — внутреннее; б — наружное

Если коэффициент теплоотдачи от среды, проходящей в трубах, на порядок ниже, чем коэффициент для наружной стороны труб, весьма выгодно использовать в теплообменниках трубы с внутренним оребрением. Примером является конструкция, показанная на рис. 2.34, а. При теплообмене в системе газ–газ в качестве теплообменной поверхности рационально применять пучки труб с внешними и внутренними ребрами (рис. 2.34, б). Для обеспечения направленного потока газа между наружными ребрами труб помещают треугольные вставки.

Кроме перечисленных методов в отечественной и зарубежной практике делают попытки интен-

сифицировать теплопередачу и другими методами, например использованием вращающихся турбулизаторов.

2.6. Аппараты с поверхностью теплообмена, изготовленной из листового материала

В последнее время наряду с кожухотрубчатыми теплообменниками — наиболее распространенной конструкцией теплообменной аппаратуры в химической и нефтеперерабатывающей промышленности — 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. В о - п е р в ы х, 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. Аналогичный коэффициент для пластинчатых теплообменников достигает 0,9. В о - в т о р ы х, по сравнению с аппаратами, изготовленными из листового металла, кожухотрубчатые теплообменники более металлоемки.

Таким образом, высокий коэффициент унификации, довольно низкая металлоемкость, легкость очистки и ряд других преимуществ делают аппараты из листового металла перспективными и эффективными.

Пластинчатые теплообменники представляют собой аппараты, теплообменная поверхность которых образована набором тонких штампованных пластин с гофрированной поверхностью. По конструкции эти теплообменники классифицируются на разборные (ТПР), полуразборные (ТПП), блочные сварные (ТПБС), сварные неразборные (ТПСН), ламельные (ТПЛ).

Разборные пластинчатые теплообменники применяются в следующих случаях: 1) когда аппарат часто подвергается разборке и

чистке из-за образования на теплопередающих стенках различных отложений, пригара от термически нестойких сред; 2) когда имеется необходимость перекомпоновки поверхности теплообмена и изменения числа параллельно работающих каналов, например в связи с изменением технологического режима; 3) когда приходится производить замену некоторых участков поверхности теплообмена из-за неравномерного коррозионного или эрозийного разрушения.

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

Однако из-за сложности изготовления разборных теплообменников в других случаях предпочтительны полуразборные, блочные, сварные неразборные теплообменники. Рабочие параметры сред, обрабатываемых в разборных пластинчатых теплообменниках: давление P до 2 МПа, температура t до 200 °С.

Такие теплообменники изготавливают на консольной раме (исполнение 1), на двухопорной раме (исполнение 2), на трехопорной раме (исполнение 3).

Разборный пластинчатый теплообменник на двухопорной раме (рис. 2.35) состоит из ряда теплообменных пластин 5, размещенных на верхней и нижней горизонтальных штангах 4. Концы штанг закреплены в неподвижной плите 3 и на стойке 8. Нажимной плитой 12 и винтом 9 пластины сжимаются, образуя теплообменную секцию.

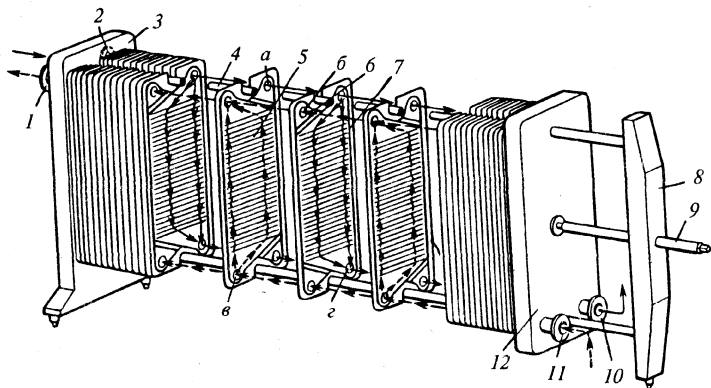


Рис. 2.35. Разборный пластинчатый теплообменник на двухопорной раме

Теплообменные пластины имеют четыре проходных отверстия (*а, б, в, г*), которые образуют две изолированные одна от дру-

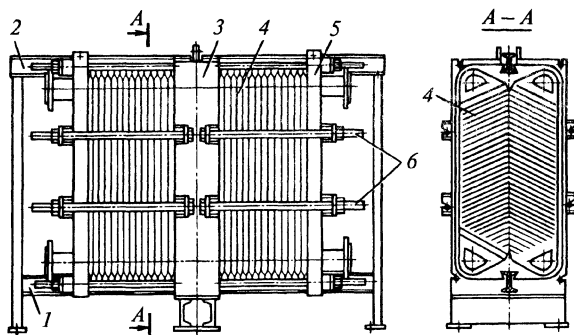


Рис. 2.36. Пластина́тый теплообменник на трехпорной раме

гой системы каналов. Для уплотнения пластин и каналов служат резиновые прокладки. Прокладка 7 уложена в паз по контуру пластины и охватывает два отверстия на пластине, через которые происходят приток и вывод теплоносителя в канал между смежными пластинами, а прокладки 6 герметизируют два других отверстия на пластине. Для ввода теплоносителей в аппарат и вывода предназначены штуцеры 1, 2, 10, 11, расположенные на неподвижной и подвижной плитах.

Теплообменник на трехпорной раме состоит из неподвижной плиты 3 (рис. 2.36), в которой закреплены верхняя 2 и нижняя 1 горизонтальные штанги. На штангах размещены теплообменные пластины 4 и подвижные плиты 5. Для сжатия пакета предназначены стяжки 6.

Полуразборные пластина́тые теплообменники используются, когда одна из сред не образует отложений, требующих разборки аппарата для технологической чистки; например, когда средой является конденсирующийся пар, чистый газ, минеральные или органические кислоты, щелочи и некоторые растворы солей. Рабочие параметры сред аналогичны параметрам сред в разборных теплообменниках. В аналогичных случаях могут применяться и ламельные теплообменники (для P до 4,5 МПа и t до 400 °С).

Полуразборный пластина́тый теплообменник по конструкции аналогичен разборному. Отличие заключается в том, что пластины попарно сварены (рис. 2.37). В результате формируется ка-

нал для того теплоносителя, который не образует отложений. При этом свариваемые пластины 1, 2 различны, и вторая представляет собой зеркальное отражение первой.

По контуру каждой пластины выштампован U-образный паз. При сборке двух пластин под сварку одна из пластин переворачивается на 180° таким образом, чтобы пазы плотно прилегали друг к другу, по ним и проводят сварку (показана штриховой линией на

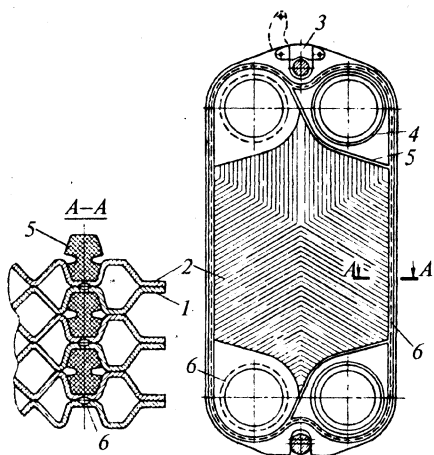


Рис. 2.37. Конструкция попарно сваренных пластин полуразборного аппарата:
1 — левая пластина; 2 — правая пластина;
3 — подвеска; 4 — малая прокладка; 5 — большая прокладка; 6 — штриховая линия — линия контактного шва попарной сварки пластин

рис. 2.37). Пластины свариваются также в двух угловых отверстиях, служащих для транзитного прохода среды. Два других отверстия, служащих для входа и выхода второй среды в межпластинный неразборный канал, выполняются без сварки.

В полученном блоке устанавливаются прокладки — большая 5 и малая 4, которые работают как самоуплотняющиеся, что позволяет использовать этот аппарат при большем давлении, чем разборные теплообменники аналогичной конструкции.

Работа такого теплообменника похожа на работу разборного. Одна из сред подается в коллектор и распределяется по неразборным каналам.

После прохождения канала она собирается в противоположном коллекторе и выводится из аппарата. Вторая среда проходит через систему разборных каналов и коллекторов.

Блочные сварные пластинчатые теплообменники предназначены для подогрева и охлаждения жидкой или газообразной рабочей среды, а также для конденсации паров в условиях, когда ни одна рабочая среда не образует на поверхностях теплообмена труднорастворимых отложений (P до 3 МПа и t до 400°C).

Теплообменник (рис. 2.38) составлен из унифицированных сварных блоков 1. Схема их компоновки и количество определя-

ются тепловым и гидромеханическим расчетами аппарата. Блоки установлены на раме, аналогичной по конструкции рамам разборных пластинчатых теплообменников. Угловые распределительные камеры, имеющие отверстия для входа и выхода рабочих сред, соединяются между собой проходными 5 и глухими 4 втулками, уплотненными в отверстиях малыми кольцевыми прокладками 6. Применение втулок позволяет собирать пакеты по параллельной, противоточной или смешанной схеме движения рабочих сред. Блоки расположены на раме между подвижной 3 и неподвижной 7 плитами и плотно сжаты болтами. На плитах установлены съемные патрубки 2 и 8 для выхода и входа рабочей среды. В зависимости от требуемой компоновки их можно устанавливать в любом углу концевых плит. Кольцевые прокладки защищены втулками от непосредственного воздействия сред. Конструкция позволяет обеспечить большое усилие сжатия прокладки, поэтому могут применяться прокладки из паронита, алюминия, меди, фторопласта и др. Работа этих аппаратов аналогична работе разборных пластинчатых теплообменников.

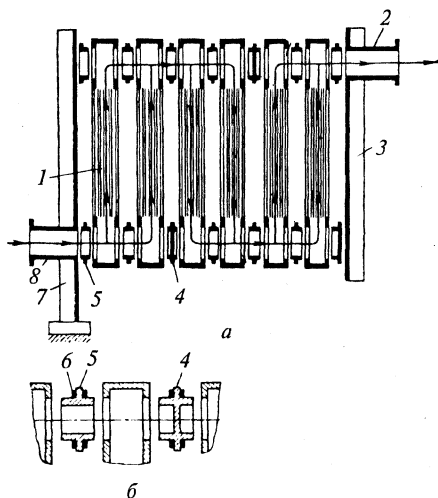


Рис. 2.38. Блочный сварной теплообменник:

а — схема внутреннего устройства;
б — узел соединения блоков

Конструкция сварного блока показана на рис. 2.39. Пластины 1, имеющие форму шестиугольника, с размещенными между ними по контуру металлическими прокладками собирают в специальном приспособлении. Затем сваривают кромки пластин с прокладками. Наклонные кромки пластин соединяются с прокладками, уложенными через одну таким образом, чтобы образовались каналы для входа и выхода рабочих сред. К местам входа и выхода рабочей среды из щелевидных каналов приваривают соответственно четыре распределительные камеры 2 с круглыми от-

версиями и канавками для соединения блоков между собой посредством проходных или глухих втулок.

Сварные неразборные пластинчатые теплообменники. В некоторых технологических установках, например при производстве азотной кислоты, требуются теплообменники большой единичной теплопроизводительности. Часто они должны работать длительное время при одном и том же технологическом режиме с газообразными рабочими средами, не дающими загрязнений на поверхности теплообмена. Для таких условий применяют сварные неразборные теплообменники.

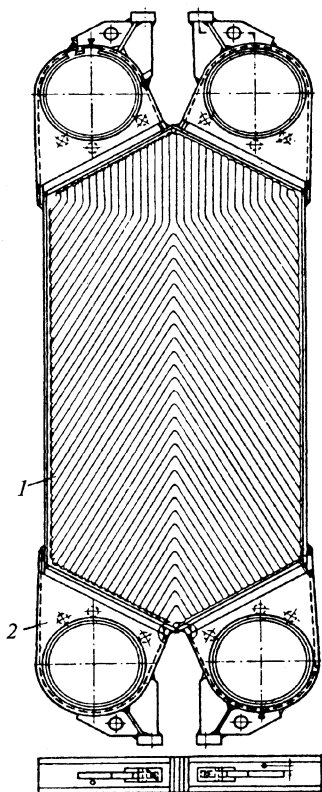


Рис. 2.39. Сварной блок из гофрированных пластин

Теплообменники состоят из тонких пластин, которые сварены в теплообменный элемент (рис. 2.40). Расстояние между пластинами зависит от высоты гофр или специальных дистанционных штифтов. Сварной моноблок помещается между парой концевых плит, которые воспринимают на себя давление рабочих сред. С торцевых сторон блока приварены распределительные камеры со штуцерами. Через камеры рабочие среды подводятся к межпластинным каналам и отводятся от них. Эти теплообменники работают аналогично описанным выше разборным пластинчатым теплообменникам.

Одно из достоинств пластинчатых теплообменных аппаратов связано с возможностью создания различных схем движения рабочих сред в зависимости от сочетания общего и частных направлений движения рабочих сред в целом через аппарат и через межпластинные каналы. В изображенном на рис. 2.41 теплообменнике пластины скомпонованы в два симметричных пакета — каждый для одного

теплоносителя. Такая схема компоновки теплообменника обозначается $Cx[(2 + 2)/(2 + 2)]$.

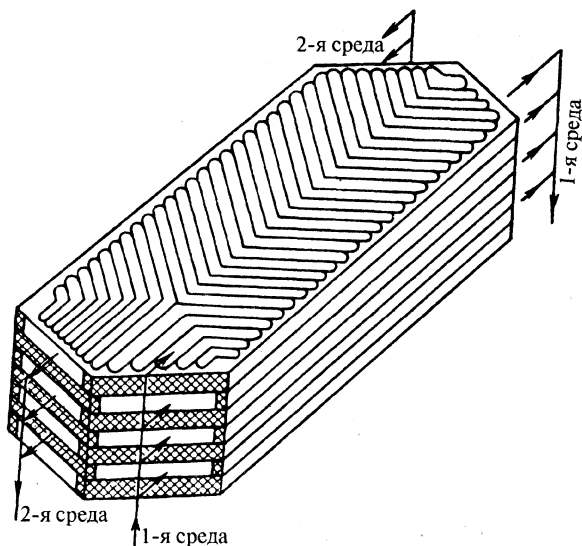


Рис. 2.40. Теплообменный элемент сварного неразборного аппарата

В общем случае схему компоновки пластин обозначают так:

$Cx \left[\sum_{i=1}^k m_1^i / \sum_{i=1}^n m_2^i \right]$; здесь m_1 и m_2 — число каналов в пакете для соот-

ветственно охлаждаемого и нагреваемого теплоносителей; k и n — число последовательно включенных пакетов в аппарате для соответственно охлаждаемого и нагреваемого теплоносителей. Достичь требуемой скорости движения теплоносителя по каналам между пластинами при заданном его расходе можно подбором числа пластин в пакете.

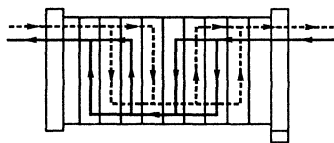


Рис. 2.41. Схема компоновки пластинчатого теплообменника в два симметричных пакета

Если расходы теплоносителей значительно различаются, то для поддержания постоянного гидравлического сопротивления каналов применяют несимметричные схемы компоновки пластин с неоиди-

наковым числом каналов и пакетов для каждого теплоносителя. Примером может служить схема компоновки теплообменника

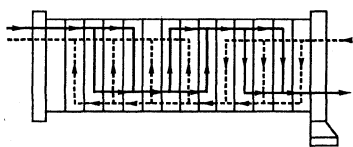


Рис. 2.42. Несимметричная схема компоновки пластин

$Sx(2 + 2 + 2)/(4 + 3)$ (рис. 2.42).

Для конденсации паров из смеси с неконденсирующимися газами используют схему компоновки $Sx[(m_1^I + m_1^{II})/m_2]$ (рис. 2.43, а).

Сконденсировавшаяся фаза IV выделяется из парогазовой смеси II в каналах δ' и ϵ' первого пакета и выводится из аппарата, а не-

сконденсировавшиеся газы I попадают в каналы a' и b' второго пакета, охлаждаются и выводятся из аппарата. Охлаждающая фаза III (вода) движется по каналам одного пакета. У таких конденсаторов парогазовых смесей более высокий коэффициент теп-

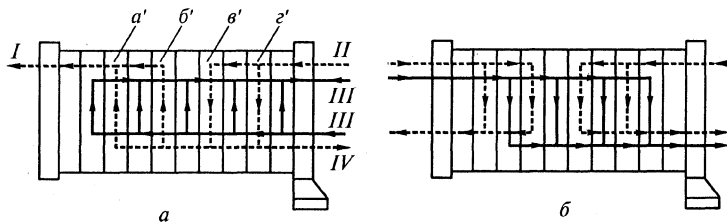


Рис. 2.43. Схемы специальных пластинчатых аппаратов: а — конденсатор; б — теплообменник для трех теплоносителей

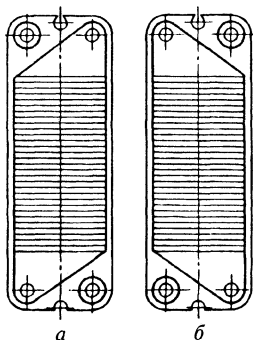


Рис. 2.44. Пластина с диагональным расположением отверстий: а — левая; б — правая

лоотдачи, чем у стандартных кожухотрубчатых аппаратов.

При определенной компоновке можно получить многосекционный аппарат, в котором теплообмен между одним теплоносителем и двумя другими осуществляется в соответствующих зонах (рис. 2.43, б).

Теплообменные пластины различаются по расположению в них отверстий для теплоносителей. Пластины выполняют с диагональным (рис. 2.44) и односторонним (рис. 2.45) расположением отверстий, и те и другие бывают правыми и левыми. За счет чередования 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 различаются расположением прокладки и поэтому не являются взаимозаменяемыми.

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

Серийно выпускаемые пластинчатые теплообменники комплектуют пластинами, штампованными из листового металла толщиной 1 мм. В сечении гофры пластин обычно имеют профиль равностороннего треугольника высотой 4–7 мм и основанием 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 3 (рис. 2.46) обычно крепят скобой 2 на верхней штанге 1. Нижняя штанга не несет нагрузки от массы пластин и служит лишь для фиксации их в заданном положении. При таком закреплении пластины легко извлекаются из пакета и вставляются в него без снятия подвижной плиты и остальных пластин.

Прокладки пластинчатых теплообменников (рис. 2.47) изготавливают из резины формованием и укрепляют на клею в пазу пластины.

Стойки и прижимные плиты пластинчатых теплообменников выполняют из углеродистых сталей толщиной 8–12 мм.

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.

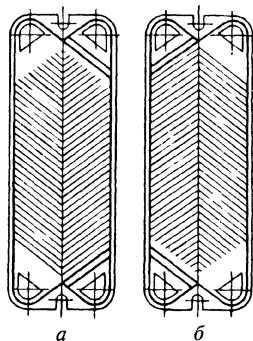


Рис. 2.45. Пластина с односторонним расположением отверстий: а — левая; б — правая

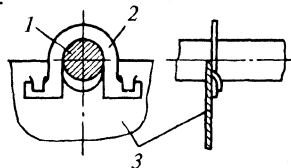


Рис. 2.46. Узел крепления пластины на верхней штанге

В качестве примера рассмотрим расчет неоребранных нажимных плит.

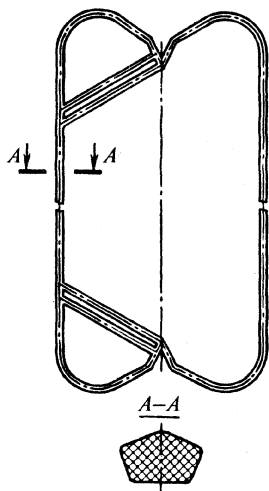


Рис. 2.47. Прокладка пластинчатого теплообменника

При расчете плиту условно разбивают в зависимости от реакции прокладок на панели — крайнюю *I* (рис. 2.48), промежуточную *II* и среднюю *III*.

Расчетное давление P , МПа, для крайней панели *I*

$$p = \frac{q_0 L_n}{F_n} + p_p,$$

где q_0 — реакция прокладки, Н/мм; L_n — длина прокладки, приходящаяся на рассматриваемую панель, мм; F_n — площадь пластины, приходящаяся на рассматриваемую панель, мм²; p_p — давление в рабочей полости, МПа.

Расчетное давление для промежуточной панели

$$p = \frac{q_0 L_n}{b_1 t} + p_p,$$

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

Так как длина прокладки, приходящаяся на среднюю панель, незначительна, для нее принимают $p = p_p$.

При выводе уравнений для расчета толщины нажимной плиты ее рассматривают как плоскую, опертую в точках установки стяжных болтов пластину, нагруженную распределенной по поверхности нагрузкой p и распределенной по контуру пластины реакцией прокладки q_0 (рис. 2.49).

Толщину крайней панели можно рассчитать по формуле

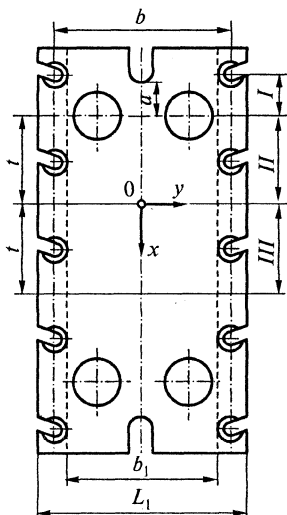


Рис. 2.48. Схема к расчету неоребранных плит пластинчатого теплообменника

$$s \geq \sqrt{\frac{3 p F_n (b - 0,5 b_1)}{2 n_p \sigma_n a}},$$

где b — расстояние между осями стяжных болтов, мм; n_p — коэффициент нагрузки (принимают $n_p = 1,0$ для рабочего режима и $n_p = 1,4$ для режима гидроиспытаний); σ_T — предел текучести материала плиты, МПа; a — ширина крайней панели (см. рис. 2.48), мм.

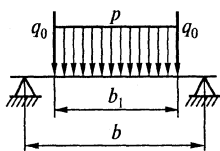


Рис. 2.49. Схема нагружения пластины

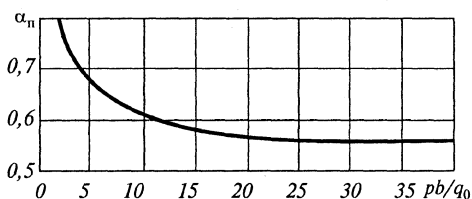


Рис. 2.50. Зависимость α_n от pb/q_0

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. 2.50.

С учетом указанных вариантов толщину плиты для промежуточной и средней панелей рассчитывают по уравнениям

$$s = \sqrt{\frac{6}{n_p \sigma_T} q_0 b \left(\alpha'_2 + \frac{pb}{q_0} \alpha''_2 \right)} \quad \text{при } \alpha < \alpha_n;$$

$$s = \sqrt{\frac{6}{n_p \sigma_T} q_0 b \left(\alpha'_1 + \frac{pb}{q_0} \alpha''_1 \right)} \quad \text{при } \alpha_n \leq \alpha < 1,5;$$

$$s = \sqrt{\frac{3 p b_1 (b - 0,5 b_1) + 2 q_0 (b - b_1)}{2 n_p \sigma_T}} \quad \text{при } \alpha \geq 1,5,$$

где $\alpha'_1, \alpha''_1, \alpha'_2, \alpha''_2$ — коэффициенты (табл. 2.2).

Т а б л и ц а 2.2. Коэффициенты $\alpha'_1, \alpha''_1, \alpha'_2, \alpha''_2$

$\alpha = \frac{b}{t}$	$x = 0,5t;$ $y = 0$		$x = 0;$ $y = 0,5t$		$\alpha = \frac{b}{t}$	$x = 0,5t;$ $y = 0$		$x = 0;$ $y = 0,5t$	
	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					

Полученные расчетные формулы для неоребренной плиты применимы при условиях $b/s \geq 5$ и $L_1/b \geq 2$ (L_1 см. рис. 2.48).

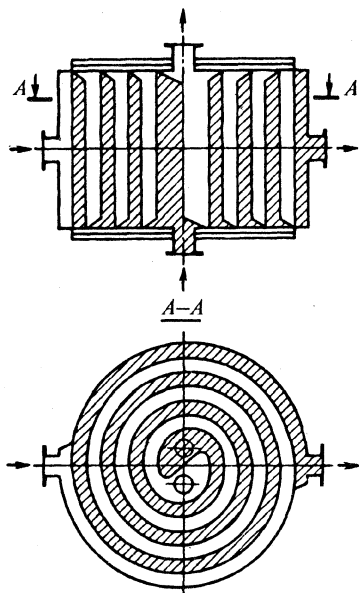


Рис. 2.51. Схема движения теплоносителей в спиральном теплообменнике

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 для 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. 2.51) поступает в периферийный канал аппарата и, двигаясь по спирали, выходит из верхнего цент-

рального канала. Другой теплоноситель поступает в нижний центральный канал и выходит из периферийного канала.

Поскольку площадь поперечного сечения каналов в таком теплообменнике постоянна по всей длине, 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. 2.52), свернутыми в спираль так, что получаются каналы *a* и *b* прямоугольного профиля, по которым противоточно движутся теплоносители. Первый (от центра аппарата) виток спирали закреплен распорными дисками 4, которые фиксируются продольными распорками 3. На поверхность спирали с шагом 70–100 мм приварены штифты 6, придающие жесткость теплообменнику.

Кроме штифтов при навивке спирали между ее витками устанавливают полосовые дистанционные вставки 5, которые вместе со штифтами обеспечивают требуемый зазор между лентами — для стандартных теплообменников 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. 2.53, *a*) образуют приваркой полосовых вставок 2 к торцу спирали; с торцов каналы закрыты крышками 3 с прокладкой 1. После снятия крышек и прокладок оба кана-

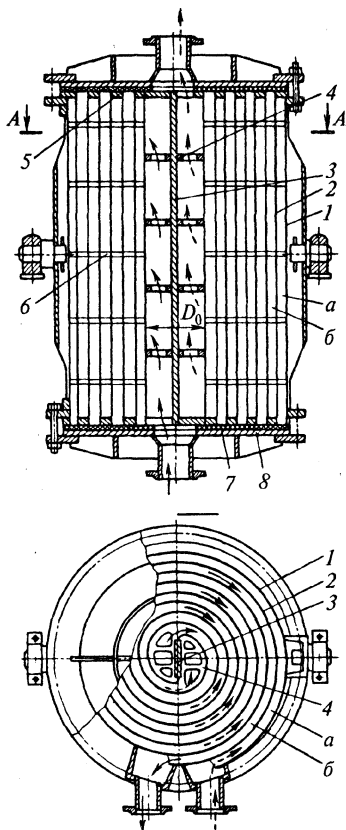


Рис. 2.52. Спиральный теплообменник

ла можно прочистить. Такой способ уплотнения каналов исключает возможность смешения теплоносителей при прорыве прокладки и поэтому наиболее распространен.

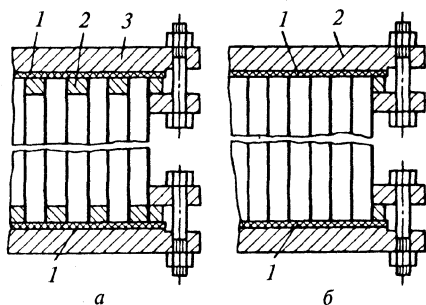


Рис. 2.53. Спиральные теплообменники:
а — с тупиковыми каналами; б — со сквозными

Сквозные каналы (рис. 2.53, 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), что обеспечивает противоточное движение фаз, и с конической или сферической крышкой (для конденсации паров и нагрева высоковязких жидкостей), где происходит перекрестное движение фаз.

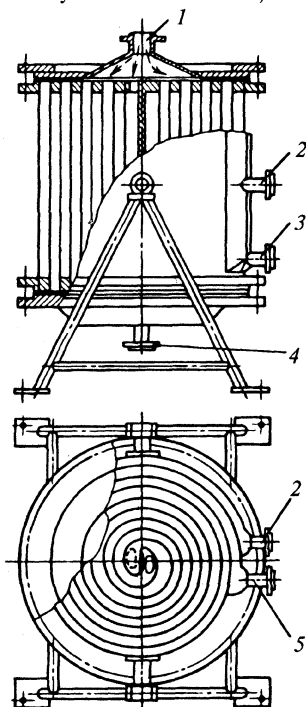


Рис. 2.54. Спиральный конденсатор

Теплообменники с тупиковыми каналами и конической крышкой, используемые как конденсаторы, обычно устанавливают вертикально, что исключает образование пробок конденсата и гидравлические удары (рис. 2.54). 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 выводит-ся 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:

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

где p — расчетное давление, МПа;

$$D = D_0 + \left[2\sqrt{\left(\frac{0,5D_0}{t}\right)^2 + \frac{L}{\pi t} - \frac{D_0}{t} - 1 \right] t - \text{внутренний диаметр наруж-}$$

ного витка спирали; D_0 — диаметр «центровика» (см. рис. 2.52), 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

$$[p] = \eta p_{кр} \geq p_{исп},$$

где $[p]$ — допускаемое давление, МПа; $\eta = \eta(\sigma_y)$ определяют по рис. 2.55, $\sigma_y = 0,95 p_{кр} R/(s - c)$; $R = 0,5D$; $p_{кр}$ — критическое давление; $p_{исп}$ — расчетное давление, принимаемое равным давлению при испытании, МПа;

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

$$\alpha = \frac{(1 + t)^2}{(1 + 0,3t)}; \beta = \frac{0,123t}{[(1 + 0,3t)(2,86 + t)]}; t = \left(\frac{l_1}{l}\right)^2.$$

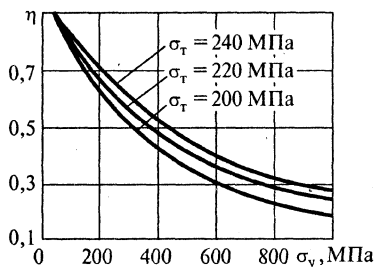


Рис. 2.55. Зависимость η от σ_y

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

2.7. Теплообменники воздушного охлаждения, «труба в трубе», оросительные, погружные змеевиковые и смесительные

Аппараты воздушного охлаждения. В химической и особенно нефтехимической промышленности большую часть теплообменных аппаратов составляют конденсаторы и холодильники. Использование для этих целей аппаратов водяного охлаждения, например 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; снижаются трудоемкость и стоимость ремонтных работ; не требуется специальной очистки наружной обтекаемой воздушным потоком поверхности труб; упрощается регулирование процесса охлаждения и т.п.

Горизонтальный аппарат воздушного охлаждения (рис. 2.56) 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 среды, пропускаемой по трубам.

Для повышения эффективности аппарата в его конструкции предусмотрены распыливающие водяные форсунки 4, автомати-

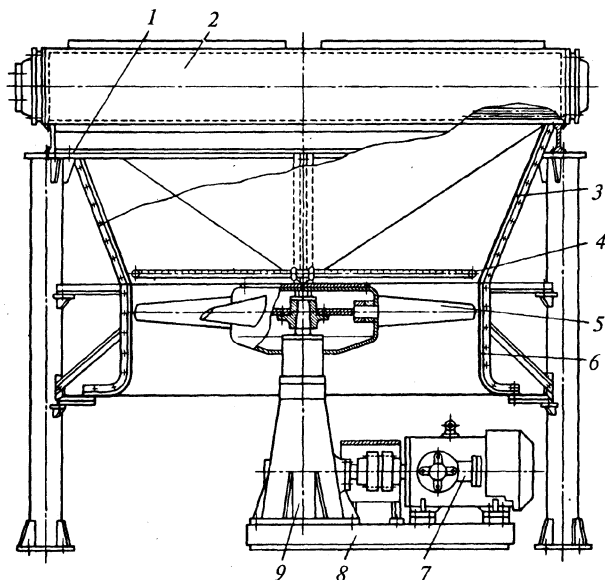


Рис. 2.56. Горизонтальный аппарат воздушного охлаждения

чески включающиеся при повышенной температуре окружающей среды в летний период. При низких температурах (зимой) можно отключать электродвигатель и вентилятор; при этом конденсация и охлаждение происходят естественной конвекцией.

Кроме того, интенсивность теплосъема можно регулировать, меняя расход прокачиваемого воздуха путем изменения угла наклона лопастей вентилятора. Для этого в аппаратах воздушного охлаждения предусмотрены механизм дистанционного поворота лопастей с ручным или пневматическим приводом и жалюзийные заслонки, установленные над теплообменными секциями и поворачиваемые вручную или автоматически посредством пневмопривода.

Один из способов регулирования воздуха — ручной с помощью дистанционного механизма поворота лопастей (рис. 2.57, а).

Дистанционный механизм состоит из червячно-винтового подъемника 5, закрепленного на ступице 7 и приводимого в движение маховиком 2 посредством валика 3. Подъемник сообщает

поступательное движение винту 4, соединенному с водилом 6. В кольцевой паз водила входят пальцы 8 рычагов 9, закрепленных на валах 10 лопастей 1. При помощи рычагов поступательное дви-

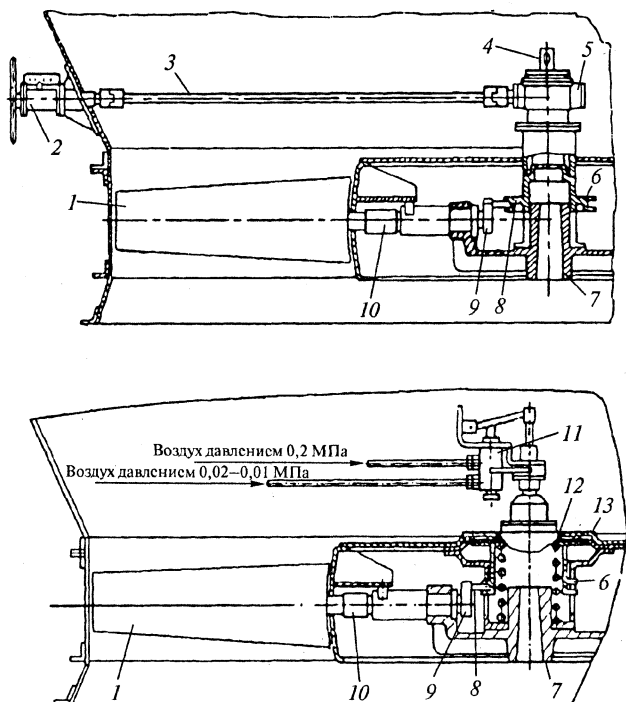


Рис. 2.57. Дистанционные механизмы поворота лопастей колеса аппаратов воздушного охлаждения:
а — ручной; б — пневматический

жение водила преобразуется во вращательное, и происходит одновременный поворот всех лопастей. Ручной поворот лопастей вентилятора вручную позволяет несколько раз в течение суток изменять рабочий режим аппарата воздушного охлаждения, что обеспечивает экономию расхода электроэнергии до 60%.

Другой вариант — регулирование с помощью пневматического механизма, работающего следующим образом (рис. 2.57, б). Давление сжатого воздуха через коллектор 11 действует на мембрану 13, создавая усилие, необходимое для перемещения водила 6. Посту-

пательное движение водила при помощи рычагов 9 и пальцев 8 преобразуется во вращательное и поворачивает лопасти 1. Угол поворота лопастей регулируется подачей соответствующего давления воздуха. При отсутствии в системе воздуха пружина 12 возвращает лопасти в первоначальное положение. Оно может соответствовать максимальному или минимальному углу наклона лопастей. В первом случае при отсутствии в системе сжатого воздуха аппарат воздушного охлаждения будет работать с наибольшей теплопроизводительностью, во втором — теплопроизводительность будет минимальной, что позволит предотвратить переохлаждение среды.

В зимнее время возможно переохлаждение конденсируемого в аппарате продукта. Во избежание этого под теплообменными секциями устанавливают змеевиковый подогреватель воздуха, выполненный также из оребренных труб.

Теплообменная секция аппарата воздушного охлаждения (рис. 2.58) состоит из четырех, шести или восьми рядов труб 3, раз-

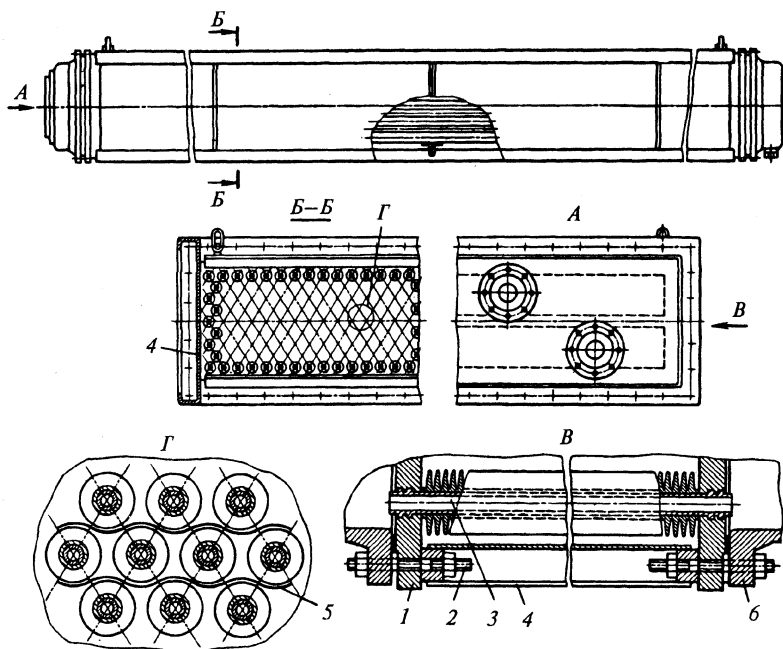


Рис. 2.58. Теплообменные секции аппаратов воздушного охлаждения

мещенных по вершинам равносторонних треугольников в двух трубных решетках 1 и закрепленных развальцовкой или развальцовкой со сваркой. Секции могут быть одно- и многоходовыми. В многоходовых секциях воздушного охлаждения объем охлаждаемой среды уменьшается по мере его движения по трубам и последовательно по ходам уменьшается число труб.

Для обеспечения жесткости трубного пучка секция укреплена металлическим каркасом 4. 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 труб верхнего ряда 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 указывалось, 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 компенсирует низкую теплоотдачу со стороны воздуха. Коэффициент оребрения таких труб, характеризующий отношение площадей наружной поверхности оребренной трубы и поверхности гладкой трубы того же диаметра, колеблется от 10 до 20.

В аппаратах воздушного охлаждения используют вентиляторы с колесом диаметром до 7 м. Колеса вентилятора 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.

Теплообменники «труба в трубе» имеют меньшее гидравлическое сопротивление межтрубного пространства, но при равных теплообменных характеристиках менее компактные и более металлоемкие, чем кожухотрубчатые.

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

Однопоточный неразборный теплообменник (рис. 2.59) состоит из отдельных звеньев, в каждое из которых входят трубы наружная (или кожуховая) 1 и внутренняя (или теплообменная) 2. Наружная труба связана с внутренней трубой 2 двумя приварными кольцами. 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.

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.

На рис. 2.60 показана конструкция разборного многопоточного теплообменника «труба в трубе», напоминающего кожухотрубчатый теплообменник типа У. В этих конструкциях теплообменников обеспечивается компенсация деформаций теплообменных труб.

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. Пластинами 11 кожуховые трубы жестко связаны с опорами 10.

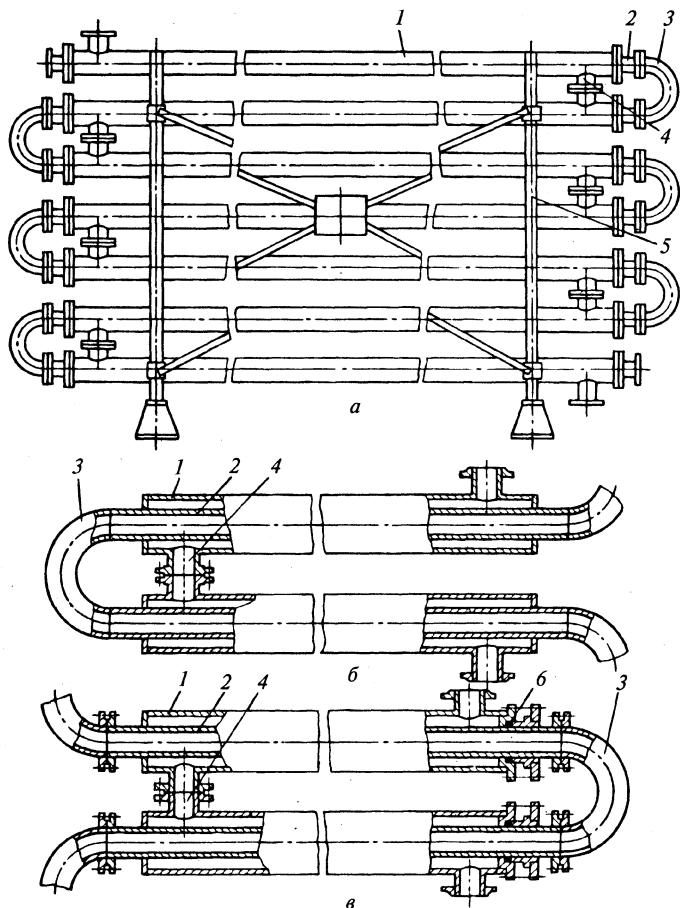


Рис. 2.59. Теплообменник «труба в трубе»:
а — общий вид; *б* — вариант жесткого крепления труб; *в* — вариант крепления труб с компенсирующим устройством

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 с 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 °С.

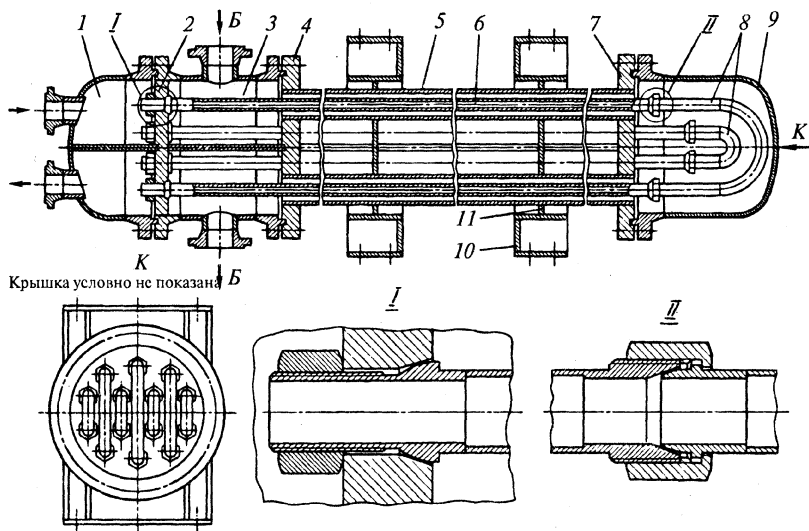


Рис. 2.60. Разборный двухпоточный теплообменник «труба в трубе»

Оросительные теплообменники состоят из нескольких рядов труб, расположенных одна над другой, по наружной поверхности которых тонкой пленкой стекает охлаждающая вода (рис. 2.61). Трубы 2, через которые прокачивается охлаждаемая рабочая среда, соединены коленами 3. Для распределения орошающей воды над верхней трубой установлен трубчатый или желобковый ороситель *I*. В трубчатых оросителях вода вытекает многочисленными

ми 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.

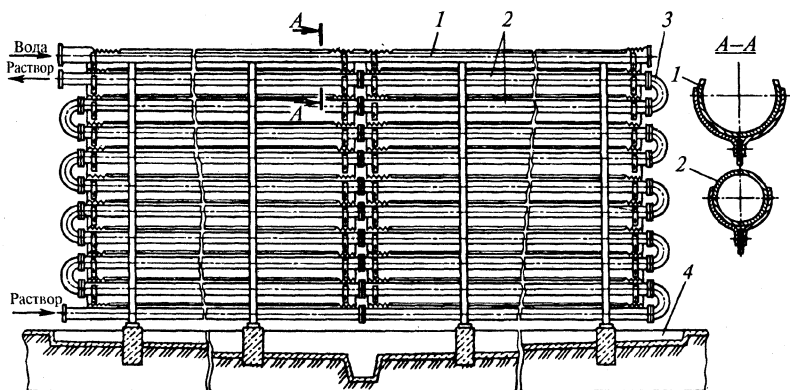


Рис. 2.61. Оросительный теплообменник

Теплообменники, устанавливаемые вне здания, ограждены во избежание уноса воды ветром.

Теплота перекачиваемой по трубам рабочей жидкости отводится за счет нагрева орошающей воды и частично за счет ее испарения, вследствие чего расход воды несколько меньше, чем для теплообменников других типов. Кроме того, подобные теплообменники просты в изготовлении и ремонте и могут быть выполнены из коррозионно-стойкого дешевого материала, плохо поддающегося обработке, например из кислотоупорного ферросилида. Поэтому несмотря на низкую эффективность их используют в химической промышленности для охлаждения химически агрессивных сред, например серной кислоты.

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. 2.62), предназначенный для охлаждения азотоводородной смеси, состоит из четырех кольцевых

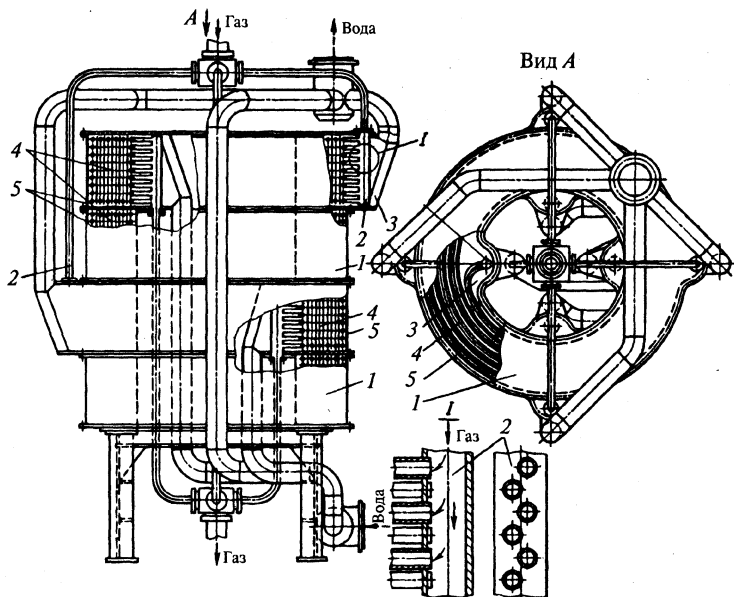


Рис. 2.62. Змеевиковый холодильник для охлаждения азотоводородной смеси

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 плоскоспиральным 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 змеевика противоточно газу.

Данные теплообменники характеризуются хорошей способностью к самокомпенсации температурных напряжений и низ-

ким гидравлическим сопротивлением. Их недостаток — сложность изготовления и монтажа.

Смесительные теплообменники предназначены для нагрева и охлаждения различного рода жидких, газообразных, твердых рабочих тел, конденсации паров, испарения (выпаривания) и кристаллизации. В химической промышленности смесительные теплообменники используются во многих производствах. Например, это контактные конденсаторы и испарители хлора; аппараты для охлаждения газов при получении аммиачной селитры; аппараты для охлаждения воздухом катализатора при контактном производстве серной кислоты; охладители ацетилена; градирни в замкнутых системах охлаждения воды и др.

Смесительные теплообменники используют также в энергетических установках различных типов (для нагрева воды перед деаэрацией, в системах регенерации энергии в паротурбинных блоках); в установках деминерализации и очистки сточных промышленных вод; в коммунальном хозяйстве для нагрева воды продуктами сгорания.

Преимущества смесительных теплообменников по сравнению с поверхностными — высокая интенсивность процесса теплообмена, существенное уменьшение коррозии оборудования; исключение возможности отложений на поверхности нагрева; повышение температурного уровня технологических процессов; простота конструкции и снижение затрат дефицитных материалов и соответственно материальных затрат; отсутствие разделяющей поверхности, что позволяет использовать в качестве теплоносителей загрязненные и агрессивные газы, жидкости, высококонцентрированные растворы и др. Недостатки — загрязнение одного теплоносителя другими, ограниченность предельных температур охлаждения и нагрева сред, существенные потери температурного напора, сложность организации равномерного распределения потоков и др.

Области применения в промышленности основных типов смесительных теплообменников указаны в табл. 2.3, где (+) означает возможное применение.

Из большого разнообразия смесительных теплообменников рассмотрим насадочные теплообменные аппараты (см. столбцы 6—8 табл. 2.3).

Т а б л и ц а 2.3. Области применения смесительных теплообменников

Область применения	Аппараты									
	полюе	с трубой Вентури	барботажные	погружного горения	тарельчатые	насадочные			с внешним подводом энергии	со встречными потоками
						с нерегулярной неподвижной на- садкой	с регулярной насадкой	с подвижной насадкой		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Нагрев:										
газа	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
жидкостей	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
твердых частиц	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+
Охлаждение:										
газа	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
жидкостей	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
твердых частиц	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+
Выпаривание жидкостей	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Конденсация паров	+	-	+	-	+	+	+	+	-	-

В *насадочных аппаратах* (рис. 2.63) жидкая фаза из жидкостной камеры 1 через патрубки 2 подается на перераспределительную тарелку 3, с помощью которой производится равномерное орошение насадки 4. Паровая (газовая) фаза вводится в аппарат через патрубок 6 и, проходя через распределительную решетку 5, также поступает в насадочную зону. Для отделения газа от жидкости служит отбойник 7. Контакт теплоносителей осуществляется при прохождении их через слой насадок различной формы, размеров, выполненных из различных материалов. При этом возможны несколько режимов. В пленочном режиме поверх-

ность контакта фаз определяется поверхностью насадки с учетом ее смачиваемости.

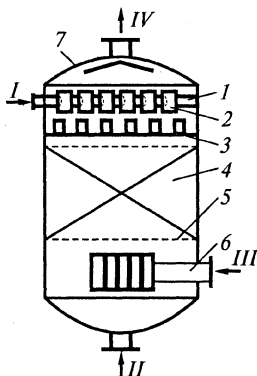


Рис. 2.63. Смесительный теплообменник насадочного типа:
I, II — вход и выход жидкости; III, IV — вход и выход пара (газа)

В промежуточном режиме наблюдается разрушение пленки жидкости, появляются завихрения, брызги и поверхность контакта фаз больше поверхности насадки. Турбулентный режим характеризуется проникновением вихрей в пленку жидкости.

В режиме эмульгирования турбулизация жидкой фазы становится столь значительной, что весь свободный объем насадки заполняется пеной. При дальнейшем увеличении скорости газа движение жидкости прекращается и происходит ее унос из аппарата.

В качестве насадки применяют различные реечные, листовые, пористые и насыпные материалы. Предпочтение следует отдавать насадкам с наибольшей

удельной поверхностью, что позволяет использовать весьма тонкие слои насадки: 30–40 мм вместо 200–400 мм и более для других типов насадок. Это дает возможность выполнять многоярусные конструкции с малым гидравлическим сопротивлением 0,1–0,2 кПа.

Применяя регулярные насадки, можно подобрать оптимальный режим работы орошаемого слоя за счет изменения диаметра, глубины и профиля каналов и достичь относительно высоких значений скорости газа, удельной поверхности и пористости слоя. Наибольшую относительную скорость газа обеспечивают сотоблочные регулярные насадки и пакеты из листового материала.

Широкое распространение для систем газ–жидкость получили аппараты с подвижной насадкой, в качестве которой используются полые подвижные шары из полистирола, полипропилена и других пластических масс.

2.8. Теплообменные аппараты из неметаллических материалов

Обладая высокой теплопроводностью, теплообменники из неметаллических материалов благодаря антикоррозионным свойствам обеспечивают химическую чистоту перерабатываемых продуктов и позволяют экономить дорогие цветные металлы и легированные стали. Они нашли широкое применение в качестве конденсаторов, холодильников, нагревателей и испарителей при обработке высокоагрессивных кислот, щелочей, органических и неорганических растворителей, в частности соляной, серной, фосфорной, уксусной, азотной кислот, бензола, толуола, фенола, хлорэтилбензола и т.д. К недостаткам подобных теплообменных аппаратов следует отнести низкую прочность при растяжении и изгибе материала, из которого их изготовляют, невозможность соединения деталей способами, аналогичными пайке или сварке металлов.

Материалы для теплообменников. В качестве неметаллических конструкционных материалов для изготовления технологической аппаратуры применяются углеграфиты и фторопласты различных марок. Углеграфитовые теплообменники бывают: прямоугольно-блочные, кожухотрубчатые, кожухоблочные, оросительные, погружные, типа «труба в трубе». Трубчатые теплообменные аппараты из фторопласта изготавливают двух модификаций: теплообменные погружные аппараты типа П и теплообменные кожухотрубчатые аппараты типа К.

Для изготовления углеграфитовых теплообменных аппаратов применяют следующие материалы:

- ♦ прессованный и пропитанный синтетическими смолами графит марок МГ, МГ-1, МГ-2, МГ-3, МГЗ-Л, из которого выполняют преимущественно детали теплообменников;
- ♦ графитопласт (антегмит) марок АТМ-1, который представляет собой композицию графита и фенолформальдегидной смолы и отличается от графита марок МГ более высокой прочностью, непроницаемостью для жидкостей и газов, но теплопроводность его несколько ниже; применяется для изготовления трубных пучков теплообменных аппаратов;

- ♦ графитопласт (антегмит) марок АТМ-1Г и АТМ-10, отличающийся от АТМ-1 более высокой теплостойкостью и теплопроводностью, меньшим коэффициентом температурного расширения, но в то же время и меньшей механической прочностью;
- ♦ графитопласты литьевых марок НЛ, 2ФНЛ, 5ЭФНЛ, из которых изготавливают крупногабаритные литые детали — корпуса, крышки и т.д.

Теплообменные аппараты прямоугольно-блочного типа (рис. 2.64) состоят из отдельных прессованных блоков 1, соединенных между собой специальной кислотостойкой замазкой (арзамит-4), уплотненных также прокладками из фторопласта (типа ФУМ) или из кислототермостойкой резины. В блоках (рис. 2.64, б) имеются вертикальные и горизонтальные каналы для прохода теплоносителей. Аппарат имеет распределительные камеры 2, скрепленные с блоками и между собой крышками 10 и стяжками 7. Горизонтальные каналы в блоках сообщаются с боковыми переливными камерами 5, соединенными между собой шпильками 6. Патрубки 3 и 9 служат для ввода и вывода агрессивной, а патрубки 8 и 4 — неагрессивной среды. Аппарат работает следующим образом. Агрессивный теплоноситель, который нужно нагреть или охладить, подается по патрубку 3 через распределительную камеру 2 в вертикальные каналы блоков 1 и движется по этим каналам вниз, выходя из аппарата через нижнюю распределительную камеру 2 и патрубок 9. Нагревающий (или охлаждающий) неагрессивный теплоноситель поступает в аппарат по патрубку 8 и движется по горизонтальным каналам блоков 1; переход теплоносителя от одного блока к другому осуществляется за счет переливных камер 5, в которых имеются перегородки. В результате достигается зигзагообразное (многоходовое) движение неагрессивной среды по высоте аппарата.

Кожухотрубчатый углеграфитовый теплообменник (рис. 2.65) представляет собой вертикальный аппарат, состоящий из металлического кожуха 2 и трубного пучка 3 из графитопласта АТМ-1. В верхней части аппарата, где его кожух сопрягается с подвижной трубной решеткой 1, установлен сальник 4. Такая конструкция допускает свободное перемещение трубного пучка при температурных удлинениях. В качестве сальниковой набивки, как правило, используют графитизированный асбестовый шнур. Уплотнение герметизируют перемещением нажимной втулки 5 с по-

мощью затягивания шпилек 6. Вход и выход агрессивной среды производится через верхнюю и нижнюю крышки 7, выполненные из пропитанного графита. Самым распространенным способом крепления графитопластовых труб является соединение их с труб-

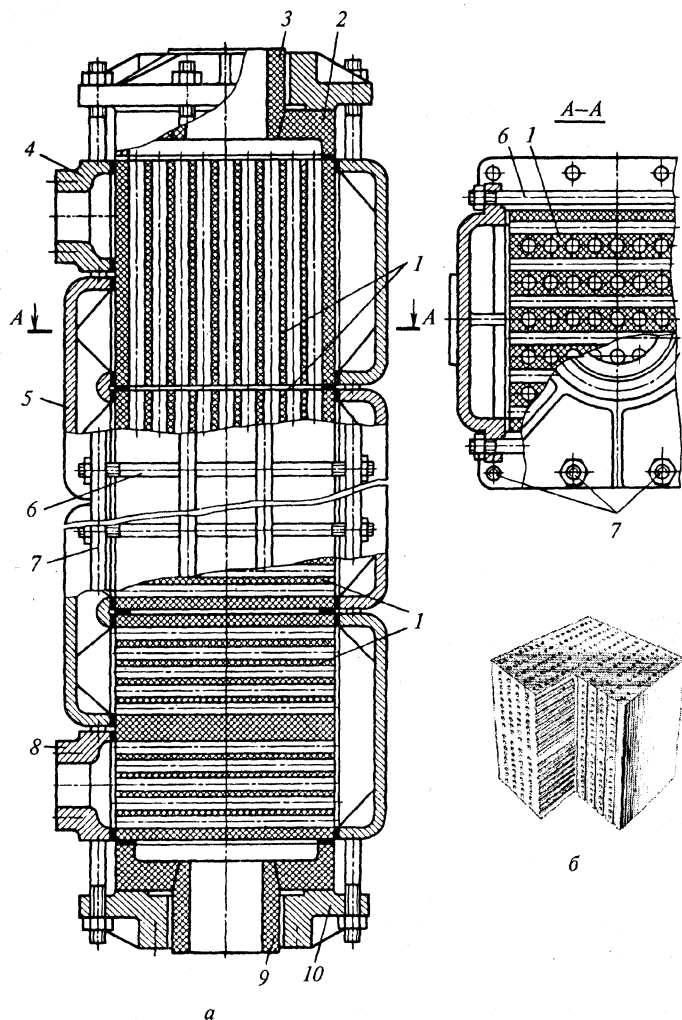


Рис. 2.64. Прямоугольно-блочный вертикальный теплообменник

ными решетками путем склеивания с помощью замазки типа арзамит-4. Для увеличения прочности и плотности соединения отверстий в трубной решетке концы теплообменных трубок вы-

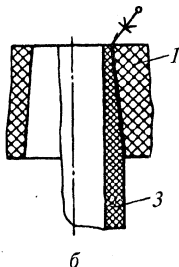
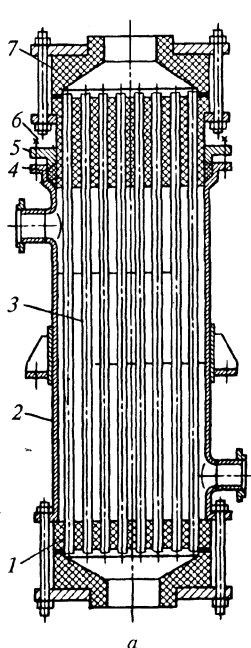


Рис. 2.65. Кожухотрубчатый углеграфитовый теплообменник

полняются конусными (рис. 2.65, б). Агрессивный теплоноситель подается в аппарат сверху через штуцер в крышке 7 и движется по трубкам к выходному штуцеру в нижней крышке. Другой (неагрессивный) теплоноситель движется в межтрубном пространстве, ограниченном кожухом 2 и трубным пучком 3. В межтрубном пространстве установлены поперечные перегородки. Они предназначены для организации движения и увеличения скорости теплоно-

сителя в направлении, перпендикулярном оси труб, что приводит к повышению коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности труб.

Фторопластовые теплообменные аппараты. Изобретение фторопласта (политетрафторэтилена) и освоение его производства отечественной промышленностью позволили сконструировать и наладить производство современного эффективного теплообменного оборудования — трубчатых теплообменных аппаратов из фторопласта погружного (тип П) и кожухотрубчатого (тип К), предназначенных для нагрева, охлаждения или конденсации коррозионных и особо чистых сред. Эти аппараты применяются в химической, фармацевтической и пищевой промышленности, при

проведении процессов химической и электрохимической обработки материалов. Применяемые фторопластовые материалы (марок 4, 4Д, 4МБ) стойки к действию практически всех коррозионно-активных сред (соляной, серной, азотной, фосфорной, уксусной кислот, водных растворов солей, электролитов и т.д.). Гидрофобность (несмачиваемость) фторопластовой поверхности способствует снижению отложений и облегчает их удаление.

В состав теплообменных аппаратов из фторопласта входят трубные пучки из труб диаметром 3 и 5 мм, с толщиной стенки соответственно 0,4 и 0,6 мм. Несмотря на невысокую теплопроводность фторопласта в теплообменных аппаратах, благодаря малой толщине стенок достигается достаточный коэффициент теплопередачи, не изменяющийся в процессе эксплуатации. К недостаткам этих аппаратов можно отнести невысокое условное давление (до 1 МПа в трубном пространстве и до 0,6 МПа в межтрубном пространстве при температуре 20 °С) и его значительную зависимость от температуры (при температуре 150 °С не более 0,25 МПа в трубном пространстве и 0,1 МПа в межтрубном пространстве). Кроме того, вследствие малых внутренних диаметров трубок и эквивалентных диаметров трубного пространства необходимо учитывать степень загрязненности механическими примесями сред, поступающих в аппарат (размер частиц не должен превышать 1/10 внутреннего диаметра трубок для трубного пространства и 1/20 эквивалентного диаметра для межтрубного пространства).

Известны шесть конструктивных исполнений теплообменных аппаратов погружного типа (типа П) и три исполнения кожухотрубчатого типа (типа К). Они различаются конфигурацией трубчатого пучка. Все аппараты состоят из пучка гибких или жестких фторопластовых труб, концы которых соединены сваркой с трубными фторопластовыми решетками, узлов уплотнений трубных решеток и узлов подвода и отвода теплоносителя. Кроме того, у аппаратов типа К имеется металлический или фторопластовый кожух.

Теплообменные аппараты погружного типа предназначены для установки в емкостях открытого и закрытого типов и используются в качестве встроенных холодильников и нагревателей. Один из таких аппаратов представлен на рис. 2.66. Он состоит из 10 объемных дисков 1, образованных переплетенными между собой теплообменными трубами, концы которых собраны и сваре-

ны в две трубные решетки 2. Каждый диск имеет в центре ступенчатое кольцо 3 с вставленными в него скобами 5 из фторопластовых труб. К каждому диску с нижней стороны прикреплены дистанционные кольца 6. Центральная часть аппарата — стакан 4 — используется при монтаже. Охлаждающий (или нагревающий) теплоноситель подается в трубное пространство через одну из трубных решеток (например, штуцер 8); выход теплоносителя осуществляется через штуцер 7.

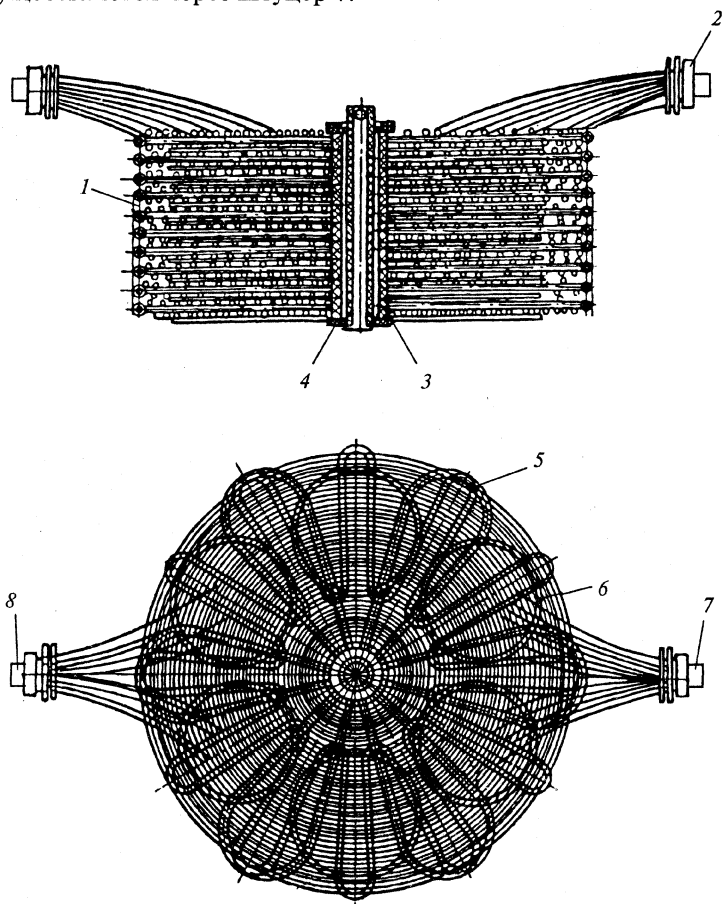


Рис. 2.66. Фторопластовый теплообменник погружного типа (исполнение 1)

На рис. 2.67 показан узел подсоединения трубных решеток погружного теплообменного элемента к корпусу колонны или емкости. Трубная решетка 2 крепится к корпусу аппарата 5 с помощью крышек 7. Уплотнение обеспечивается прокладками 3 и 4 при затягивании гаек болтового соединения 6.

Теплообменные фторопластовые кожухотрубчатые аппараты типа К предназначены

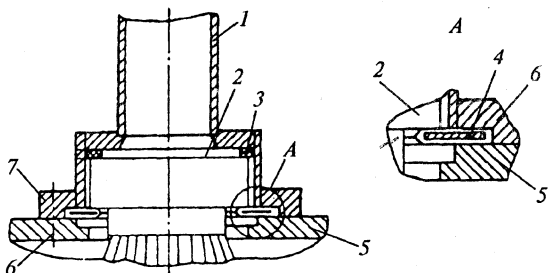


Рис. 2.67. Узел крепления трубных решеток погружного фторопластового теплообменника к корпусу аппарата: 1 — штуцер; 2 — трубная решетка; 3 — резиновое кольцо; 4 — плоская резиновая прокладка во фторопластовом чехле; 5 — корпус аппарата; 6 — болтовое соединение; 7 — крышка аппарата

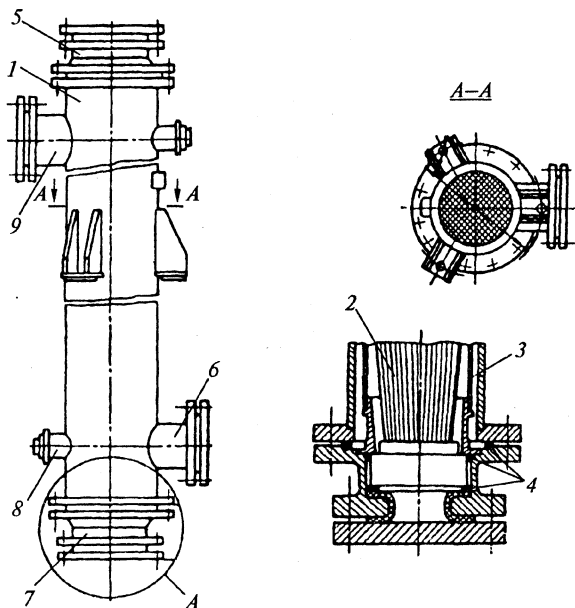


Рис. 2.68. Кожухотрубчатый теплообменный аппарат с фторопластовым трубным пучком (штуцеры заглушены)

для использования в качестве холодильников, нагревателей или конденсаторов. Конструктивные варианты исполнения трубных пучков: исполнение 1 — прямые трубные пучки образованы плетением плоских кос с различным количеством труб; исполнение 2 — U-образные трубные пучки выполнены в виде полых цилиндров, расположенных один в другом; исполнение 3 — в виде плоских кос, между которыми установлены дистанционные приставки.

Один из вариантов кожухотрубчатых аппаратов (исполнение 1) представлен на рис. 2.68. Аппарат состоит из цилиндрического стального корпуса 1, прямого цилиндрического трубного пучка 2, внутреннего кожуха 3, служащего для лучшего распределения потока по межтрубному пространству, и деталей уплотнения 4 трубных решеток в корпусе аппарата. Штуцеры 5 и 7 служат для входа и выхода агрессивного теплоносителя, 6 и 9 — для входа и выхода охлаждающего (нагревающего) агента, 8 — для выхода воздуха.

2.9. Регенеративные теплообменники

Регенеративным теплообменным аппаратом (ТА) называют устройство, в котором передача теплоты от одного теплоносителя к другому происходит с помощью теплоаккумулирующей массы, называемой насадкой. Регенеративные ТА используются, в частности, в высокотемпературных технологических установках для подогрева газообразных компонентов горения, газотурбинных установках, воздухоразделительных установках, низкотемпературных установках разделения газов, холодильно-газовых машинах и др.

Область применения и температурный уровень теплоносителей предопределяют конструкцию регенеративного ТА и тип его насадки. В связи с этим выделяют аппараты, работающие в областях высоких (800—1000°С), средних (250—400°С) и очень низких температур.

Регенеративные ТА классифицируют по виду и форме теплоаккумулирующей насадки, которая может быть подвижной и неподвижной. В последнем случае для получения непрерывного процесса теплопередачи от одного теплоносителя к другому необходимы два аппарата (рис. 2.69): в одном из них происходит ох-

лаждение горячего теплоносителя, в другом — нагревание холодного. Затем аппараты переключаются, после чего в каждом из них процесс теплопередачи протекает в обратном направлении. Переключение производится поворотом клапана (шибера) 4. На рис. 2.69 направление движения теплоносителей показано стрелками. Обычно переключение регенераторов осуществляется автоматически через определенные промежутки времени. При подвижной насадке процесс теплообмена происходит в одном аппарате. По этому признаку регенеративные ТА разделяют на две большие группы: периодически действующие теплообменники, т.е. работающие в нестационарном режиме, и непрерывно действующие теплообменники.

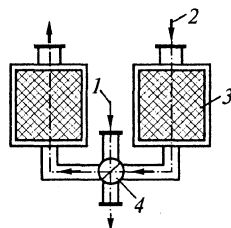


Рис. 2.69. Регенеративный теплообменник:

1 — нагреваемый теплоноситель; 2 — греющий теплоноситель; 3 — насадка; 4 — шибера

Насадка является главным элементом регенераторов, определяющим эффективность их работы. В регенераторах воздухоразделительных установок и холодильно-газовых машинах в основном применяют насадки следующих типов: дисковую из алюминиевой гофрированной ленты; насыпную из базальта или кварцита в виде гранул диаметром 4–14 мм; сетчатую из материалов с высокой теплопроводностью (медь, латунь, бронза).

В области высоких температур (800–1000 °С), например в металлургической и стеклоплавильной промышленности, применяют регенераторы с неподвижной насадкой из огнеупорных кирпичей толщиной 40–50 мм различной формы, которые выкладываются таким образом, чтобы образовались сплошные каналы для прохода газа. Преимуществами аппаратов с кирпичной насадкой являются простота и возможность достижения высоких температур подогрева воздуха, а недостатками — громоздкость, сложность эксплуатации из-за необходимости переключения аппарата, изменение температуры нагреваемого воздуха в течение цикла, смешивание теплоносителей во время переключения шибера.

На рис. 2.70 показан *регенератор периодического действия*, используемый в воздухоразделительных установках.

Регенератор с дисковой алюминиевой насадкой состоит из корпуса, выполненного из стали 12Х18Н10Т, с эллиптическими

днищами. Насадка изготавливается из гофрированной ленты высотой 50 мм, толщиной 0,5 мм с углом наклона рифления 75° (сплав АД-1М). Ленты попарно сворачивают в диски, которые укладывают на нижнюю опорную решетку и сверху поджимают нажимными шпильками. Для уменьшения осевой теплопроводности и повышения эффективности теплообмена в ленте делают сквозные прорезы длиной 89 ± 5 мм; расстояние между ними 10 ± 1 мм. В нижней части регенератора устанавливают насадку с меньшим диаметром, а в верхней части — насадку с большим диаметром для уменьшения гидравлического сопротивления (так как теплый газ в верхней части регенератора имеет больший удельный объем).

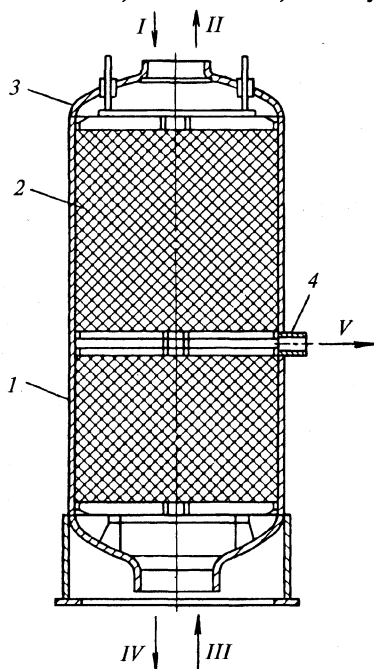


Рис. 2.70. Регенератор с дисковой алюминиевой насадкой:

1 — корпус; 2 — насадка; 3 — верхняя крышка; 4 — патрубок выхода петлевого потока; I, II — вход и выход прямого потока; III, IV — вход и выход обратного потока; V — выход петлевого потока

К аппаратам непрерывного действия относятся горизонтальные и вертикальные вращающиеся регенеративные ТА, они более компактны и характеризуются более интенсивным теплообменом, поэтому они широко используются, в частности, в воздухоподогревателях на электро-

станциях для использования теплоты дымовых газов, выходящих из котлов. Ротор 4 регенеративного подогревателя воздуха в мощных газотурбинных установках (рис. 2.71) с насадкой 3 в виде набора сеток из коррозионно-стойкой проволоки диаметром 0,3–0,4 мм вращается в статоре 5. С помощью радиальных перегородок ротор разделен на секторы, в результате чего осуществляется отделение потоков газа и воздуха. Схема движения воздуха и газа противоточная, хотя каждая среда имеет сначала осевое направление, а затем радиальное и, проходя через насадку ротора,

нагревает ее или воспринимает теплоту, аккумулированную в ней. Благодаря такому удлинению пути потоков увеличивается скорость в каналах насадки, коэффициент теплоотдачи достигает значений 300–400 Вт/(м²·К) при частоте вращения ротора 20–30 об/мин. Во избежание перетечек воздуха и газа в конструкции предусмотрены внутреннее 1 и наружные 2 уплотнения.

Тепловой расчет периодически действующих регенеративных теплообменников существенно отличается от расчетов рекуперативных теплообменников, так как они работают в нестационарных условиях.

Конечной целью расчета регенератора является определение площади поверхности нагрева и объема насадки.

Запишем уравнение теплового баланса (для наиболее распространенной противоточной схемы):

$$Q = W_1 \tau_1 (t'_1 - t''_1) \eta = W_2 \tau_2 (t''_2 - t'_2), \quad (2.17)$$

где Q — количество теплоты, передаваемой в аппарате за цикл;

$$t''_1 = \frac{t'_1 - (t''_{1к} - t''_{1н})}{\ln \frac{t'_1 - t''_{1н}}{t'_1 - t''_{1к}}}; \quad t''_2 = \frac{t''_{2н} - t'_{2к}}{\ln \frac{t''_{2н}}{t'_{2к}}} -$$

средние во времени температуры соответственно греющего и нагреваемого теплоносителей на выходе из регенератора; t'_1 и t'_2 — температуры соответственно греющего и нагреваемого теплоносителей на входе в регенератор; W_1 и W_2 — полные теплоемкости массового расхода; $W = GC_p$, G — массовый расход теплоносителя, C_p — удельная теплоемкость; η — коэффициент аккумуляции на-

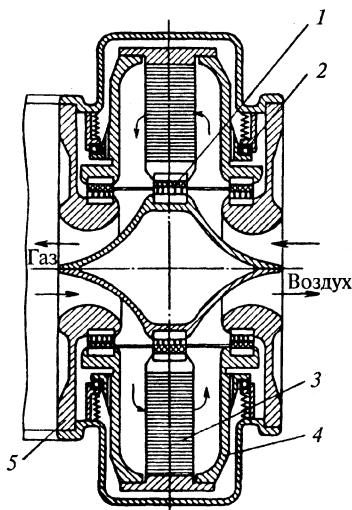


Рис. 2.71. Вращающийся регенеративный подогреватель воздуха газотурбинной установки системы «Юнгстрем»

садки, которым учитывают снижение аккумулирующей способности насадки из-за поперечного изменения ее температуры:

$$t'_1 = \frac{t_{н1}^B - t_{н2}^M}{t_{сг1}^B - t_{сг2}^M};$$

τ_1 — время нагрева насадки; τ_2 — время охлаждения насадки; остальные обозначения ясны из рис. 2.72.

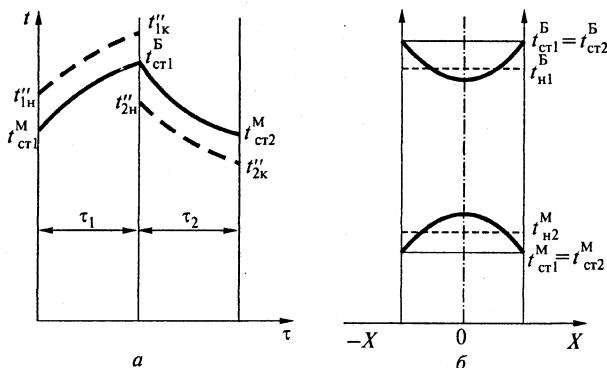


Рис. 2.72. Изменение температуры (t) теплоносителей и насадки в регенеративном теплообменнике во времени (τ):

a — вдоль каналов в насадке; b — поперечное распределение температуры в элементах насадки: $t''_{1н}, t''_{2н}, t''_{1к}, t''_{2к}$ — температуры греющего и нагреваемого теплоносителей в конце регенератора в начале и конце циклов; $t'_{сг1}, t'_{сг2}$ — температура поверхности насадки в начале цикла нагрева и конце цикла охлаждения; $t_{н1}^B, t_{н2}^M$ — средняя температура насадки в период нагрева и охлаждения; X — поперечная координата

Уравнение теплопередачи имеет вид

$$Q = \bar{k} F \Delta t, \quad (2.18)$$

где \bar{k} — средний коэффициент теплопередачи; F — площадь поверхности теплопередачи;

$$\Delta t = \frac{(t'_1 - t''_2) - (t'_2 - t''_1)}{\ln \frac{t'_1 - t''_2}{t'_2 - t''_1}} \quad (2.19)$$

— средний температурный напор за цикл.

Понятия теплопередачи как явления переноса теплоты от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку и коэффициента теплопередачи как меры интенсивности этого процесса применительно к регенеративному ТА не имеют физического смысла, но их используют в моделях аппаратов с сосредоточенными параметрами.

Методы расчета основаны на использовании теории рекуперативных ТА для расчета регенераторов. Средний коэффициент теплопередачи регенеративного ТА рассчитывают по формуле

$$\bar{k} = \left[\frac{1}{\alpha_1 \tau_1} + \frac{1}{\alpha_2 \tau_2} + R \right]^{-1}, \quad (2.20)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи соответственно для греющего и нагреваемого теплоносителей; R — термическое сопротивление насадки. При расчете α_1 следует учитывать не только конвективный, но и радиационный перенос теплоты от газов к насадке, т.е. $\alpha_1 = \alpha_{1к} + \alpha_{1р}$.

Для регенеративных ТА с металлической насадкой, элементы которой имеют малую толщину и высокую теплопроводность, $R \rightarrow 0$ и из уравнения (2.20) получается выражение для коэффициента теплопередачи в так называемых идеальных регенераторах, т.е. таких, в которых средняя температура поверхности насадки в период нагрева и охлаждения ($t_{н1}^B$ и $t_{н2}^M$ на рис. 2.72) остается неизменной:

$$\bar{k}_{ид} = \left[\frac{1}{\alpha_1 \tau_1} + \frac{1}{\alpha_2 \tau_2} \right]^{-1}.$$

Таким образом, о совершенстве регенератора можно судить по отличию коэффициента теплопередачи от идеального.

Тепловой расчет непрерывно действующих регенеративных теплообменников. Рассмотрим расчет на примере регенеративного ТА с вращающейся насадкой (см. рис. 2.71). Процесс переноса теплоты в таком регенераторе осуществляется за один цикл (один оборот) длительностью $\tau_{пер} = 60/n$ (n — частота вращения, мин⁻¹), в течение которого насадка за время τ_1 получает теплоту от горячего теплоносителя и за время τ_2 отдает его холодному теплоносителю.

Если греющая поверхность регенератора F_1 , охлаждаемая F_2 и полная $F = F_1 + F_2$, то время контакта горячего теплоносителя (нагрева насадки) составит $\tau_1 = 60F_1/(nF)$, время контакта холодного теплоносителя (охлаждение насадки) $\tau_2 = 60F_2/(nF)$, время одного оборота (цикла) $\tau_1 + \tau_2 = 60/n$.

Количество теплоты Q , переданное горячим теплоносителем 1 холодному 2, средний температурный напор Δt , поверхность теплообмена рассчитываются по формулам (2.17–2.19).

Отличия заключаются в формуле для коэффициента теплопередачи:

$$\bar{k} = \left[\frac{1}{\alpha_1 x_1} + \frac{1}{\alpha_2 x_2} \right]^{-1},$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи соответственно за периоды нагревания и охлаждения насадки; $x_1 = F_1/F$ и $x_2 = F_2/F$ — доли площади поверхности насадки F , омываемой соответственно греющим и нагреваемым теплоносителями.

2.10. Перспективная теплообменная техника

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

Одним из перспективных направлений является 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 продукта. Это обеспечивает высокую скорость нагрева, безынерционность управления процессами, исключает опасность повреждения поверхностного слоя вещества.

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

Известно, что значительные трудности возникают при нагреве обычными методами вязких веществ в трубах, так как 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 трубы, расположенные по оси цилиндрического СВЧ-резонатора.

Тепловые трубы (ТТ) являются сравнительно новыми современными тепловыми техническими устройствами. Принцип работы ТТ был предложен в 1942 г. Р. Гоглером. Изобретение не было эффективно использовано на практике и оставалось мало известным до 1963 г., когда Д.М. Гровер сконструировал аналогичное устройство и назвал его «тепловая труба». С этого времени внедрение ТТ в различных областях техники осуществляется исследовательскими центрами многих стран.

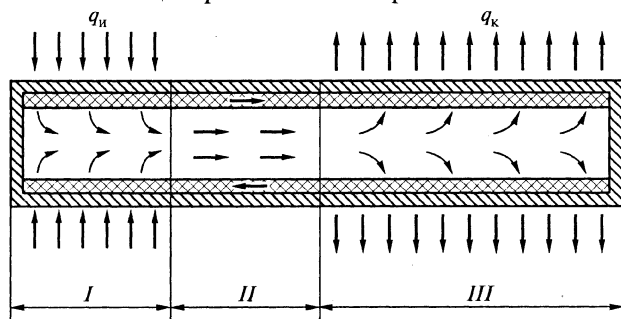


Рис. 2.73. Принципиальная схема цилиндрической тепловой трубы с сетчатым фитилем:

I – зона испарения; *II* – транспортная зона; *III* – зона конденсации; q_n, q_k – плотность теплового потока соответственно в зонах испарения и конденсации

Тепловая труба – испарительно-конденсационная система с двухфазным теплоносителем, в которой для возврата конденсата используются силы поверхностного натяжения. Труба состоит из герметичного корпуса, внутренние стенки которого выложены фитилем капиллярной структуры (рис. 2.73). Фитиль заполнен

жидким теплоносителем, в свободном объеме внутренней полости находится паровая фаза теплоносителя. Тепловой поток передается путем непрерывной циркуляции испаряющегося и конденсирующегося теплоносителя. В результате испарения жидкости в зоне подвода теплоты и конденсации пара в зоне конденсации (отвод теплоты) возникает перепад давлений между концами трубы, пар перемещается вдоль трубы, переносит поглощенную им теплоту. Возврат конденсата происходит по капиллярам фитиля под действием поверхностного натяжения.

Термином «тепловая труба» обозначаются также высокоэффективные теплопередающие устройства, в которых возврат конденсата осуществляется центробежными, электростатическими объемными, магнитными объемными и осмотическими силами.

Теплогидравлические процессы при работе ТТ накладывают ряд ограничений на уровень передаваемого потока теплоты. При низких давлениях пара (удельные объемы пара велики) скорость пара в конце зоны испарения может достигать скорости звука. При этом увеличение мощности становится невозможным, происходит звуковое заклинивание потока — звуковой предел. Передаваемая мощность в этом случае равна $Q = ar_{\text{п}}F$, где a — скорость звука; r — теплота парообразования; $\rho_{\text{п}}$ — плотность пара; F — площадь сечения для прохода пара.

При увеличении мощности, передаваемой ТТ, перепад давления $\Delta P_{\text{кап}}$, создаваемый капиллярными силами, может не обеспечить переноса необходимого количества жидкости из конденсатора в испаритель, тогда наступают так называемые капиллярные ограничения. Они определяются из баланса перепадов давления: $\Delta P_{\text{кап}} \geq \Delta P'' + \Delta P' + \Delta P_{\text{ф}} + \Delta P_{\text{м}}$, где $\Delta P''$, $\Delta P'$, $\Delta P_{\text{ф}}$ — потери давления в паровом канале, в жидкости, при фазовом переходе; $\Delta P_{\text{м}}$ — перепад давлений вследствие действия массовых сил.

Применение ТТ дает существенный экономический эффект. В США только при утилизации теплоты термических печей экономия топлива составляет 12%. В США и Японии разрабатываются керамические теплообменники на ТТ, в которых теплоносителями служат Na, K, Li. Керамики (SiC , Si_3N_4 , MgO , Al_2O_3) используются или как материал корпуса, или как внешнее покрытие, нанесенное на металл и предохраняющее его от коррозии. Для предотвращения взаимодействия керамики со щелочными метал-

лами на внутренние поверхности труб напыляется ниобий. Схема керамического теплообменника на ТТ для нагрева воздуха при утилизации теплоты уходящих газов металлургической печи показана на рис. 2.74 (принцип работы ясен с учетом подрисовочной подписи).

Разработаны различные варианты тепловых труб. По форме они могут быть прямыми, изогнутыми, гибкими, спиральными, прямоугольными и т.д. Тепловые трубы позволяют решать следующие задачи: обеспечивать пространственное разделение источников и стоков теплоты (известны разработки ТТ длиной несколько километров); выравнивать и стабилизировать температуру поверхности; трансформировать плотность теплового потока (подвод теплоты по малой поверхности, отвод по большой и наоборот); регулировать температуру; выполнять функции тепловых диодов и выключателей.

Высокотемпературные тепловые трубы, работающие при температурах до $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, используются в химической промышленности, металлургии и ядерной энергетике, где они применяются в системах отвода теплоты из активной зоны небольших реакторов (например, космического назначения), в системах отвода теплоты при различного рода авариях в устройствах стационарной ядерной энергетике.

Высоко- и среднетемпературные ТТ применяются в котлах-утилизаторах и экономайзерах. Например, фирмой «Кю-дот» (США) разработан котел-утилизатор, состоящий из стальных ТТ, конденсаторная часть которых входит в барабан котла, а испарительная оребренная часть омывается горячими газами металлургической печи. Технические характеристики котла: расход дымовых газов $17\,820\text{ м}^3/\text{ч}$; их температура на входе в котел-утилизатор $482\text{ }^{\circ}\text{C}$, на выходе $259\text{ }^{\circ}\text{C}$; аэродинамическое сопротивление 92 Па ;

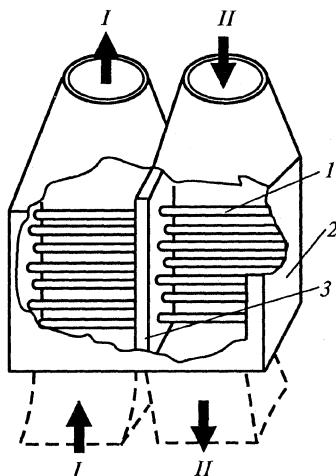


Рис. 2.74. Схема керамического теплообменника:

I — поток горячего газа; *II* — поток нагреваемой среды; 1 — тепловые трубы; 2 — кожух; 3 — трубная доска

расход пара 1900 кг/ч; давление пара 0,103 МПа; утилизируемая теплота 1538,9 кВт; масса 5942 кг; срок окупаемости — около года.

Разработаны теплообменники на ТТ для подогрева воздуха на тепловых электростанциях, передающие тепловые потоки в несколько сотен мегаватт. Японская фирма «Фурукава Электрик Камп» использует теплообменник на ТТ со следующими характеристиками: температура дымовых газов на входе 250 °С, воздуха — 20 °С; температура дымовых газов на выходе 153 °С, воздуха 170 °С; расход дымовых газов 325 000 м³/ч; воздуха 210 000 м³/ч; передаваемый тепловой поток 1,1·10⁵ кВт.

Теплообменник на ТТ установлен на нефтеперерабатывающем заводе в Ланьжоу (КНР) на декомпрессионных печах для нагрева воздуха, подаваемого в горелочные устройства. Он изготовлен из биметаллических труб: сталь (наружная стенка) — медь (внутренняя стенка), теплоноситель — вода. Утилизируемый тепловой поток 350 кВт. Его эксплуатация позволяет экономить 242 т нефти в год.

Центробежные теплообменники на ТТ представляют собой двухфазные термосифоны, в которых конденсат возвращается в испаритель под действием центробежных сил (рис. 2.75). Вращающиеся ТТ также имеют испарительный (подвод теплоты), транспортный и конденсационный (отвод теплоты) участки. Вращение вокруг оси обуславливает появление центробежного ускорения,

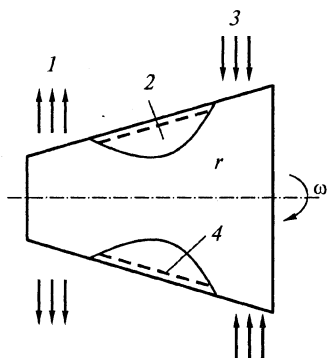


Рис. 2.75. Вращающаяся тепловая труба:

1 — отвод тепла; 2 — паровой поток; 3 — подвод тепла; 4 — возврат конденсата

составляющая которого вдоль стенки трубы перемещает сконденсировавшуюся рабочую жидкость по стенке к испарителю. Термическая проводимость этих ТТ сравнима или выше, чем ТТ с капиллярной структурой.

Центробежные ТТ применяют для утилизации теплоты уходящих газов печей в химической, нефтехимической, металлургической отраслях промышленности, в которых сжигается низкосортное топливо. Продукты его сгорания содержат пыль, коррозионно-опасные и смолистые вещества, которые, оседая,

загрязняют поверхность теплообмена и существенно снижают перенос теплоты, что позволяет избежать применение теплообменников с центробежными ТТ. Подобные ТТ используются для нагрева воздуха, дисперсного материала, получения горячей воды и пара, сушки, термообработки полимерных пленок и волокон, охлаждения роторов электрических машин, вращающихся отрезных резцов, тяжело нагруженных подшипников и валков прессов. Применение вращающихся ТТ для охлаждения двигателей переменного тока (рис. 2.76) позволяет повышать нагрузку двигателя на 15% при сохранении прежней температуры обмотки ротора.

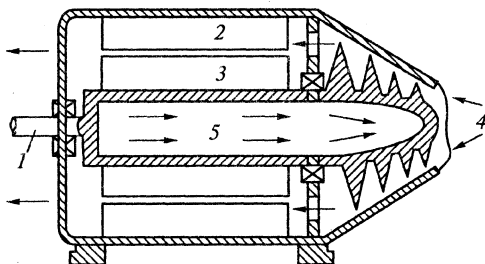


Рис. 2.76. Применение вращающихся тепловых труб для охлаждения роторов двигателей: 1 – вал; 2 – статор; 3 – ротор; 4 – воздух; 5 – пар

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему кожухотрубчатые теплообменники нашли самое широкое применение в промышленности?
2. В теплообменниках жесткой конструкции (в кожухе и трубах) возникают температурные напряжения. По какой причине?
3. При использовании оребренных труб в теплообменниках имеет место повышенный теплообмен. Вследствие каких факторов это происходит?
4. Какое основное преимущество имеют теплообменники с плавающей головкой и U-образными трубами по сравнению с кожухотрубчатыми теплообменниками жесткой конструкции? Чем оно обусловлено?
5. Пластинчатые теплообменники считаются перспективными. Какие достоинства этих теплообменников позволяют сделать такой вывод?
6. Какие достоинства имеют теплообменники воздушного охлаждения? В каких случаях их не следует применять?
7. При работе аппаратов воздушного охлаждения в летний период может возникнуть ситуация, когда температура атмосферного воздуха

недостаточно низкая, чтобы обеспечить необходимый теплообмен. Что на такой случай предусмотрено в этих теплообменниках?

8. Когда целесообразно использовать графитовые теплообменники? Почему их нельзя применять при повышенном давлении?

9. В чем принципиальное отличие рекуперативных теплообменников от регенеративных?

10. В чем преимущества и недостатки смешительных теплообменников?

11. Каково основное достоинство сверхвысокочастотного (СВЧ) нагрева для продуктов различного рода?

12. В чем заключается основной принцип работы тепловых труб?

ГЛАВА 3 МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

3.1. Тарельчатые массообменные аппараты для процессов ректификации и абсорбции

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. Рассмотрим наиболее типичные для процессов ректификации и абсорбции колонные аппараты, а также экстракторы и сушилки.

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 80% аппаратов для абсорбции и ректификации — это тарельчатые колонны, остальные — насадочные колонны, которые 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 рассмотрены.

Тарельчатые колонны (рис. 3.1) 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 способст-

вует 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 штуцеры для жидкости и пара.

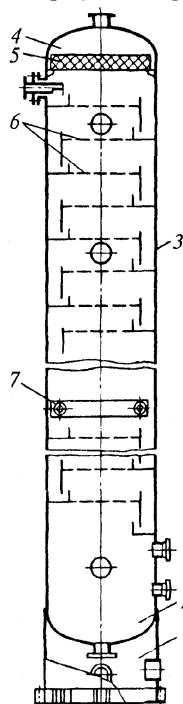


Рис. 3.1. Тарельчатая ректификационная колонна

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 на корпусе колонны, которые рекомендуется располагать через каждые 5–10 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 обычно изготавливают с постоянным по высоте диаметром. Корпус колонны больших размеров в случае, если нагрузка по жидкости и пару (газу) значительно изменяется по ее высоте, может быть выполнен ступенчатым, т.е. состоящим из частей разного диаметра, соединенных конусными переходами.

На корпусе ректификационной колонны предусматривают штуцеры: ввода продукта и вывода пара, ввода флегмы и пара из кипятильника, вывода кубового остатка и циркулирующей кубовой жидкости в кипятильник. 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.

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. 3.2) в виде отбортованных металлических дисков

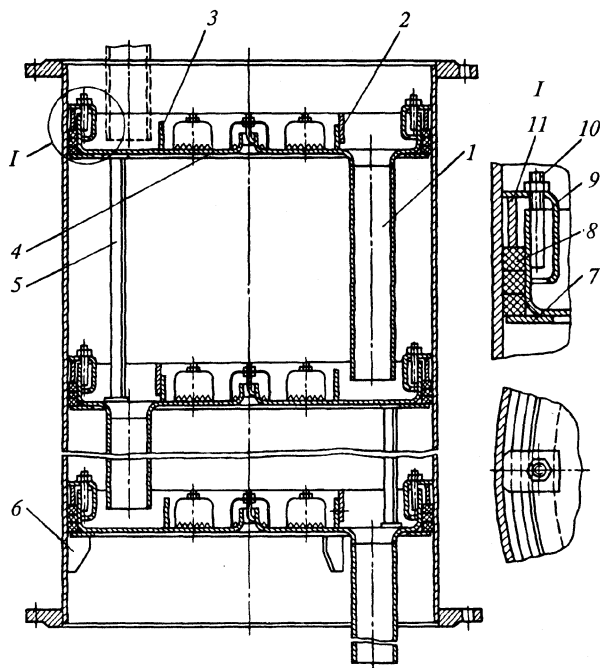


Рис. 3.2. Царга тарельчатой колонны

с устройствами (отверстия, клапаны, колпачки) для ввода пара (газа) на тарелку и слива жидкости. Чтобы создать необходимый уровень жидкости на тарелке 4, установлены сливная перегородка регулируемой высоты 2 и переливная перегородка постоянной высоты 3, образующая так называемый переливной карман, расположенной выше тарелки, в который погружена сливная труба 1.

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 (рис. 3.3). Они состоят из отдельных сек-

ций 4, которые крепятся к приваренной к корпусу колонны опорной раме 1 струбцинами 2, винтами 3 и прижимными планками 5.

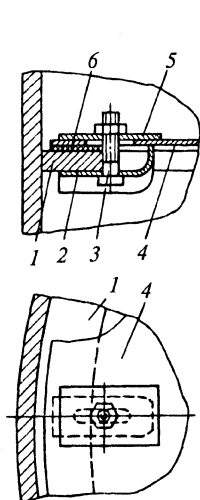


Рис. 3.3. Узел крепления секции тарелки к корпусу аппарата

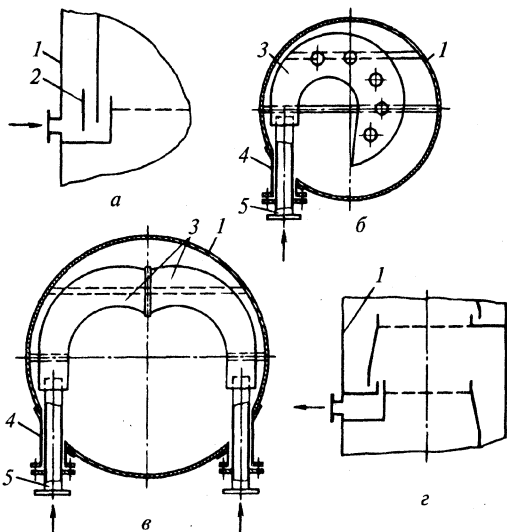


Рис. 3.4. Варианты ввода и вывода продуктов из колонны

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, обычно углубленные ниже тарелки примерно на 300 мм. Иногда для гашения энергии струи в переливном кармане устанавливают отражательную пластину 2 (рис. 3.4, а).

При подаче сырья в парожидкостном состоянии энергия струи может быть весьма большой, что вызывает износ 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. 3.4, б показана конструкция улитки для ввода сырья одним потоком, на рис. 3.4, в – двумя потоками.

В этих конструкциях улита 3 крепится к корпусу колонны 1. Штуцеры 4 ввода сырья в колонну быстро изнашиваются, поэтому их защищают гильзой 5, которую несложно заменить при ремонте колонны.

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. 3.4, з). 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 ВСтЗсп5, 20К, 16ГС, аппаратов для агрессивных сред — из коррозионно-стойких сталей 08Х22Н6Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т или из сталей с плакирующим слоем. Кроме того, аппараты можно выполнять из чугуна, меди, керамики, стекла и других материалов.

3.2. Основные параметры контактных массообменных устройств

В химической и других отраслях промышленности, где применяют массообменную аппаратуру для процессов абсорбции и ректификации, используют контактные устройства (тарелки) различных конструкций.

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.

В отдельных отраслях химии требуются массообменные аппараты для разделения термостойких продуктов в объемах, исчисля-

емых 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; производительность по пару, или F -фактор пара, $(\text{м}/\text{с})(\text{кг}/\text{м}^3)^{-0.5}$

$$F = \frac{\omega'}{\sqrt{\rho_{\text{п}}}},$$

где ω' — 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 и которая определяется как отношение изменения доли паровой y (или жидкой x) фазы на тарелке к изменению долей этих фаз при достижении равновесия:

$$\eta = \frac{y_{\text{к}} - y_{\text{н}}}{y^* - y_{\text{н}}},$$

где $y_{\text{к}}$, $y_{\text{н}}$, y^* — конечная, начальная и равновесная концентрации легколетучего компонента на тарелке в паровой фазе, моль/моль;

- ♦ гидравлическое сопротивление контактных устройств Δp , Па, характеризующее энергетические затраты на проведение процесса. Отношение Δp к КПД контактного устройства характеризует гидравлическое сопротивление теоретической тарелки;
- ♦ диапазон устойчивой работы контактного устройства — отношение максимального и минимального значений производительности по газу (пару), при котором устройство работает без заметного снижения эффективности. Этот показатель весьма важен, если производительность по пару существенно изменяется 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. Уменьшение размеров оборудования достигается при увеличении скоростей по жидкости и пару. При выборе контактного устройства для вакуумных колонн решающее значение имеет гидравлическое сопротивление теоретической тарелки $\Delta p/\eta$.

3.3. 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 (провальные).

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

По характеру взаимодействия газового и жидкостного потоков различают тарелки барботажного типа, на которых сплошной фазой является жидкость, а дисперсной — газ или пар, и тарелка струйного типа, где дисперсной фазой является жидкость, сплошной — газ, а потоки взаимодействуют в прямоточном режиме на поверхности капель и жидкостных струй, взвешенных в газовом потоке.

В зависимости от конструкции устройства 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 в барботажном режиме (колпачковые), другие — только в струйном (язычковые), третьи — и в том, и в другом режимах (клапанные).

В химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей 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. Их можно изготавливать из стали, чугуна, меди, керамики, углеграфита, пластмасс и др.

Основной частью колпачковой тарелки (рис. 3.5) является стальной диск 2 (или полотно тарелки) с отверстиями для паровых патрубков 6, приваренных к диску. Над патрубками установлены

колпачки 5 диаметром 60 или 80 мм, имеющие прорези высотой 15; 20 или 30 мм.

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

Применяют два варианта крепления колпачка к тарелке. В исполнении 2 по-

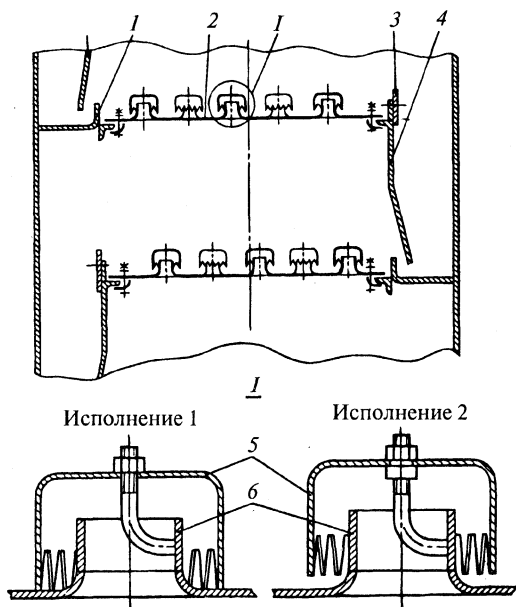


Рис. 3.5. Колпачковая тарелка

ложение колпачка можно регулировать по высоте, в исполнении 1 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.

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 них $F \approx 1 \text{ (м/с)(кг/м}^3\text{)}^{-0,5}$, а гидравлическое сопротивление, зависящее от глубины погружения колпачка, не превышает 1 кПа. К недостаткам этих тарелок следует прежде всего отнести значительные металлоемкость и трудоемкость изготовления.

Тарелки с туннельными колпачками используют в ректификационных аппаратах нефтеперерабатывающих производств (рис. 3.6). 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. Равномерное распределение пара обеспечивается с помощью трапецеидальных прорезей колпачка в нижней части. Колпачки крепят на полотно тарелки шпильками 4. Для равномерного распределения жидкости на тарелке сливную планку 5 также выполняют с прорезями. Основные преимущества этих тарелок — небольшое число колпачков и возможность их очистки. Но остальные показатели достаточно низкие, поэтому в настоящее время их заменяют более современными контактными устройствами.

Тарелки с S-образными элементами (рис. 3.7) в настоящее время используют в нефтеперерабатывающих колоннах. Элементы 1 установлены перпендикулярно направлению движения жидкости на тарелке, а между ними размещены пластины 2, чтобы закрыть каналы с торцов и увеличить жесткость тарелки.

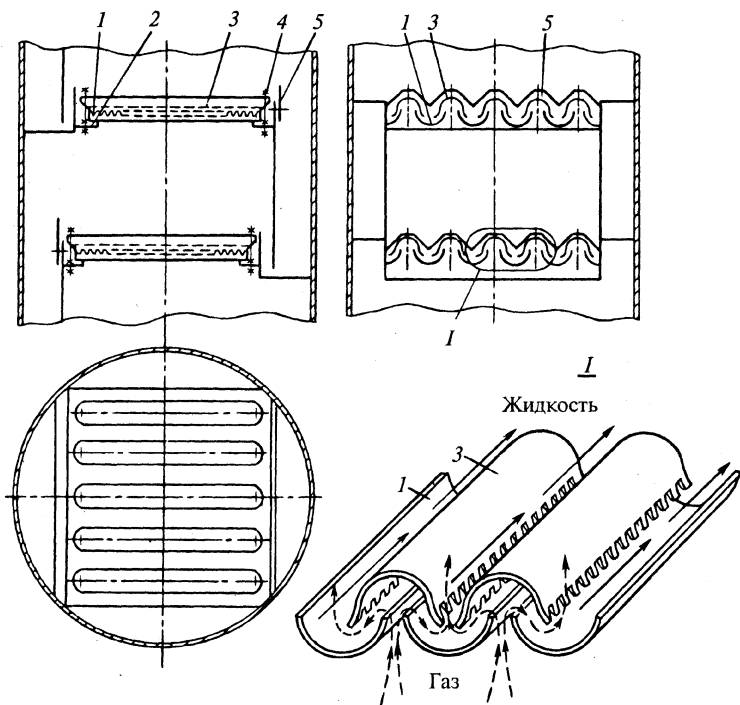
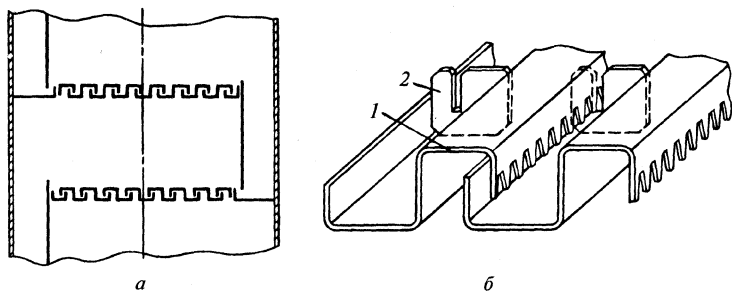


Рис. 3.6. Тарелка с туннельными колпачками

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 направле-

Рис. 3.7. Тарелка с S-образными элементами:
а — общий вид; б — элемент

нии движения жидкости, что 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% выше, чем у тарелок с капсульными колпачками. Эффективности сравниваемых тарелок примерно одинаковы (КПД 0,6–0,8). Оптимальная нагрузка по газу для этой тарелки на 10–25% меньше, чем для колпачковой. Для расширения диапазона устойчивой работы и повы-

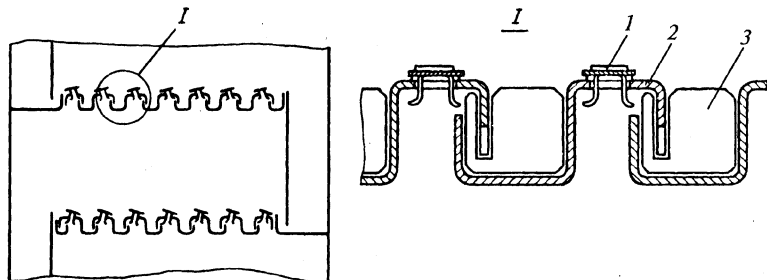


Рис. 3.8. Тарелка с S-образными элементами и клапанами

шения производительности таких тарелок S-образные элементы 2 (рис. 3.8) снабжают прямоточными клапанами 1 прямоугольной формы, размещенными на верхней площадке S-образного элемента. С целью 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 их преимущества — способность обеспечить эффективный массообмен в большом интервале рабочих нагрузок, несложность конструкции, низкая металлоемкость и невысокая стоимость.

Клапанные тарелки изготовляют с дисковыми и прямоугольными клапанами; тарелки работают в режиме прямоточного или перекрестного движения фаз. В отечественной промышленности наиболее распространены клапанные прямоточные тарелки с дисковыми клапанами. На клапанной прямоточной тарелке в шахматном порядке расположены отверстия (рис. 3.9), в которых установлены саморегулирующиеся дисковые клапаны диаметром

50 мм, способные подниматься при движении пара (газа) на высоту до 6–8 мм.

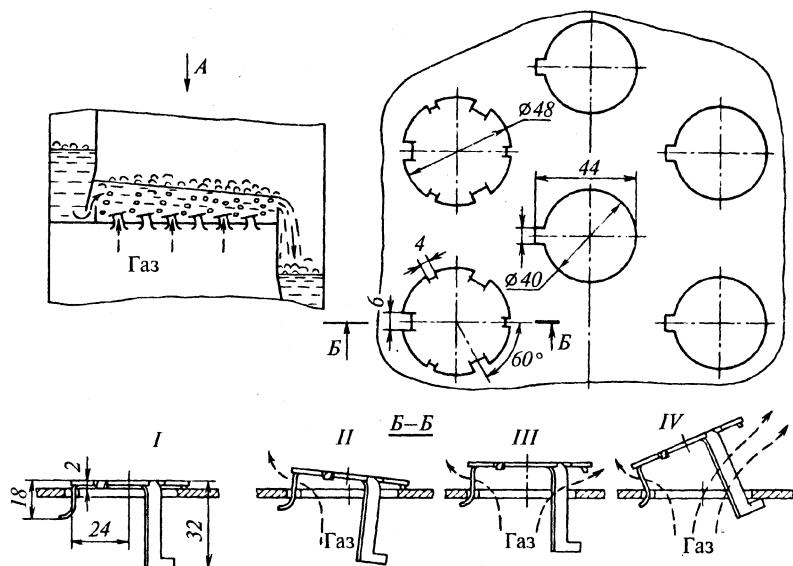


Рис. 3.9. Клапанно-прямоточная тарелка

Дисковый клапан снабжен тремя направляющими, расположенными в плане под углом 45° ; две из этих направляющих имеют большую длину. На диске клапана штамповкой выполнены специальные упоры, обеспечивающие начальный зазор между диском и тарелкой, что исключает возможность прилипания клапана к тарелке (рис. 3.9, положение *I*). При небольшой производительности по пару поднимается легкая часть клапана (рис. 3.9, положение *II*) и пар выходит через щель между клапаном и полотном тарелки в направлении, противоположном направлению движения жидкости по тарелке. С увеличением скорости пара клапан поднимается и заводится над тарелкой (рис. 3.9, положение *III*), а пар барботирует в жидкость через кольцевую щель под клапаном. При дальнейшем росте производительности по пару клапан занимает положение, при котором пар выходит в направлении движения жидкости, уменьшая разность уровней жидкости на тарелке (рис. 3.9, положение *IV*). При этом короткая направляющая фикс-

сируется в специальном вырезе на кромке отверстия, обеспечивая заданное положение клапана при его подъеме.

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

Для повышения производительности и диапазона устойчивой работы клапанные тарелки выполняют балластными (рис. 3.10). Над отверстием тарелки 1 на специальных

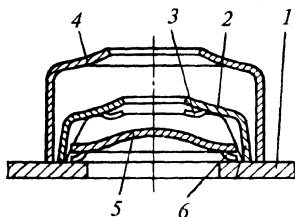


Рис. 3.10. Клапанная балластная тарелка

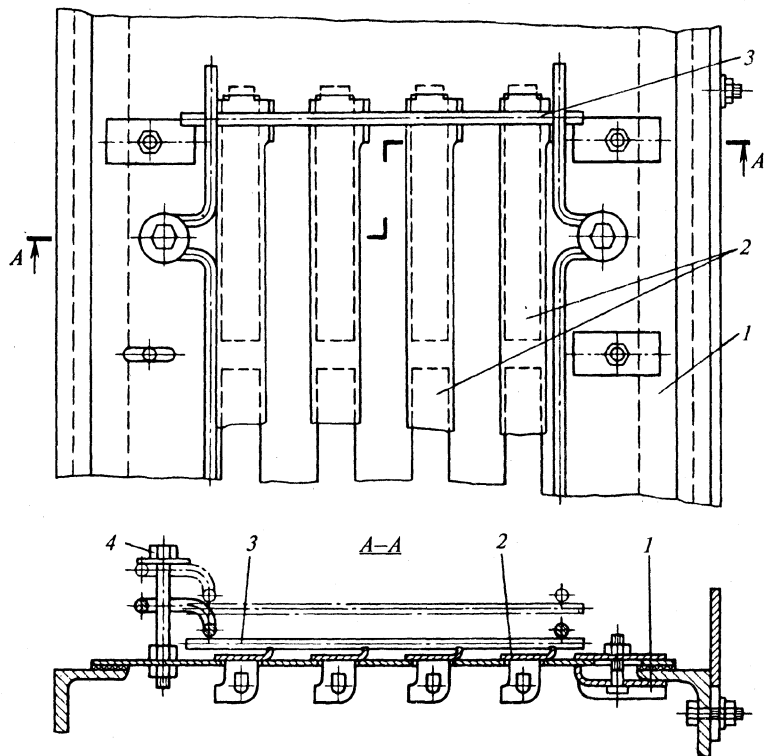


Рис. 3.11. Тарелка с групповым балластом

ножках установлены ограничители подъема 4, а внутри их — на ножках 6 легкий клапан 5 и балласт 2. Для исключения прилипания клапана к балласту служат упоры 3. 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.

Балластные клапанные тарелки можно выполнять как с индивидуальным балластом, так и с групповым. Примером последнего варианта являются балластные тарелки ректификационных колонн (рис. 3.11). Такая тарелка 1 имеет расположенные в несколько рядов прямоугольные вырезы, закрытые клапанами 2 прямоугольной формы. Из-за больших размеров клапанов (154×45 мм) их количество в 2–4 раза меньше, чем у дисковых клапанов. Над клапанами расположен общий подвижный балласт 3, выполненный из прутка диаметром 8 мм. При работе таких тарелок пластина клапана вначале поднимается, 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. 3.12, а. Клапан 1, лежащий на по-

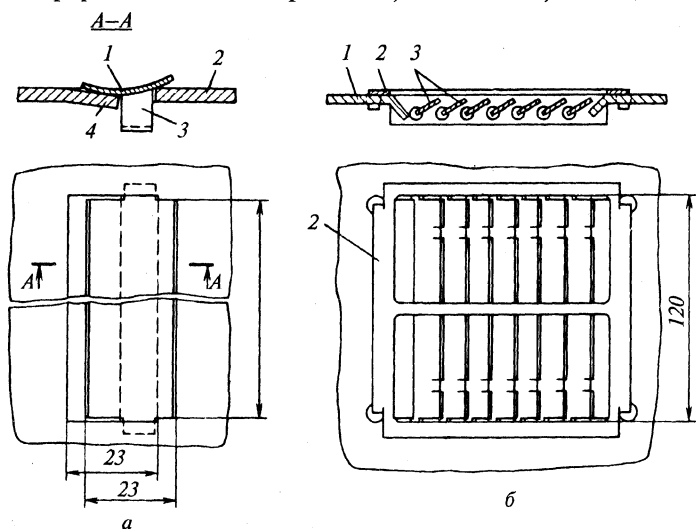


Рис. 3.12. Тарелки клапанные

лотне 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 определенной 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. 3.12, б) щель для входа газа на тарелку 1 образуется при повороте плоских клапанов-жалюзи 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 200 мм и более. Основным элементом таких тарелок — металлический диск с отверстиями диаметром 2–6 мм, расположенными по вершинам равносторонних треугольников (рис. 3.13).

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, следовательно, высокая производительность по пару (газу) — на 30–40% больше, чем у колпачковых, простота изготовления, малая металлоемкость. Недостаток — высокая чувствительность к точности установки. Аппараты с ситчатыми тарелками не рекомендуется использовать для работы на загрязненных средах; это может вызвать забивание отверстий.

Для уменьшения гидравлического сопротивления и расширения диапазона устойчивой работы ситчатых тарелок их комбинируют с клапанными устройствами (рис. 3.14); в результате повышается эффективность работы тарелки при малой и большой про-

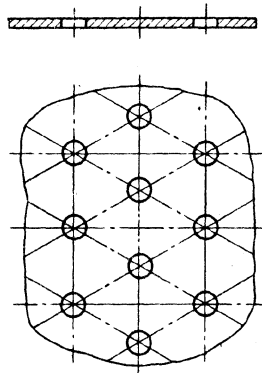


Рис. 3.13. Элемент ситчатой тарелки

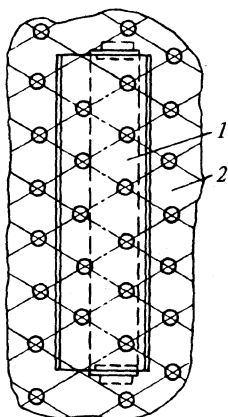
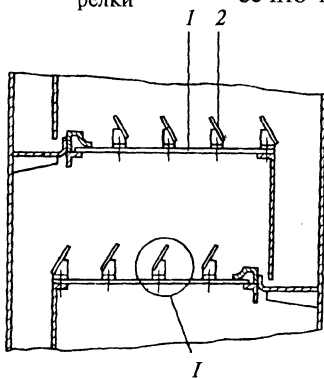


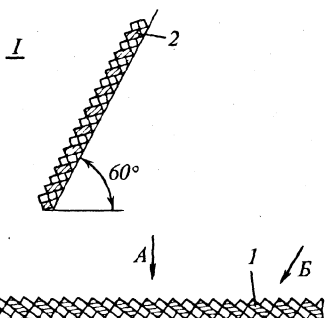
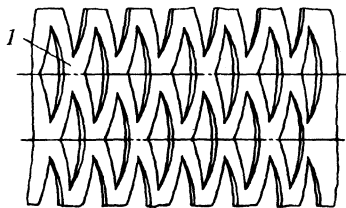
Рис. 3.14. Элемент
ситчато-клапанной та-
релки

изводительности по пару. При малых нагрузках тарелка работает как обычная ситчатая, с увеличением нагрузки открывается клапан 1 и между клапаном и тарелкой 2 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, вследствие чего она пригодна для процессов, протекающих под вакуумом.

В колонных аппаратах диаметром 1200–4000 мм используют ситчатые тарелки с просечно-вытяжными отверстиями (рис. 3.15).



Вид А



Вид Б

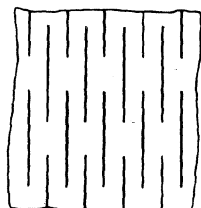


Рис. 3.15. Тарелка с просечно-вытяжными отверстиями

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 над тарелкой под углом 60° устанавливают отбойные элементы 2.

Тарелка будет обладать невысоким гидравлическим сопротивлением, если свободное сечение тарелки, выбираемое из условия отсутствия «провала» жидкости, достаточно велико (не менее 30% сечения колонны). Поэтому такие тарелки используют в вакуумных колоннах. Минимальное расстояние между тарелками в колонне 450 мм.

Ситчатые тарелки наиболее распространены как контактные устройства ректификационных колонн воздухоразделительных установок, работающих при низкой температуре. В аппаратах небольшого диаметра применяют S-образные ситчатые тарелки (рис. 3.16). 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 на рис. 3.16, контактируя с паром, поднимающимся 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. 3.17) 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, большую пропускную способность по жидкости; при достаточной ширине щели они могут быть использованы для обработки загрязненных жидкостей, так как осадок остается на тарелке. По эффективности ре-

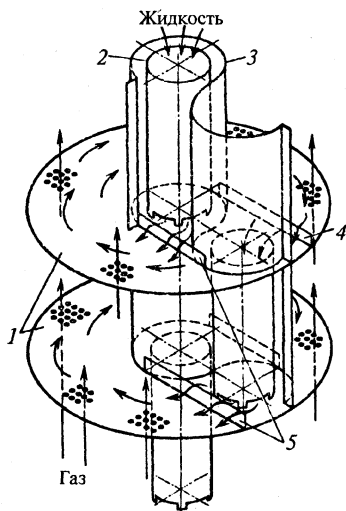


Рис. 3.16. Ситчатая тарелка с S-образной перегородкой

шетчатые провальные тарелки обычно не уступают тарелкам с пелливым. Недостатками их являются узкий диапазон устойчивой

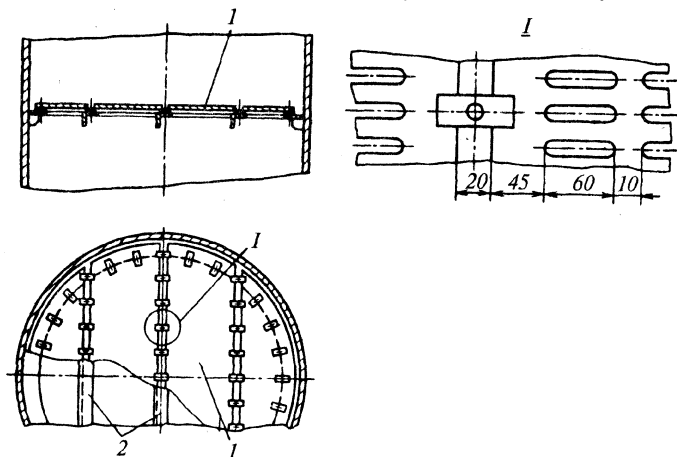


Рис. 3.17. Решетчатая провальная тарелка

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. Прорезы (как правило, размерами 4×60 мм) располагаются на поверхности тарелки с шагом $t = 10\text{--}36$ мм.

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

Секционированные массообменные устройства. Одна из задач в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности — разработка и применение аппаратов большой единичной мощности. До недавнего времени повышение эффективности и производительности колонн обеспечивали увеличени-

ем 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, что 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. Но при прямоточном взаимодействии и большой скорости пара (газа) жидкость смещается в направлении к сливному карману, что затрудняет работу сливных устройств.

Чтобы компенсировать прямоточное движение фаз и исключить его распространение на всю тарелку, можно устанавливать на тарелке продольные и поперечные перегородки, обеспечивающие зигзагообразное движение жидкости на тарелке от перелива к сливу и создающие условия для движения потоков парожидкостной смеси по тарелке в противоположных или пересекающихся направлениях.

Продольно-секционированная тарелка с просечными элементами представлена на рис. 3.18. На полотне тарелки 2 выштампованы просечки 1, отогнутые под углом α . Тарелка секционирована

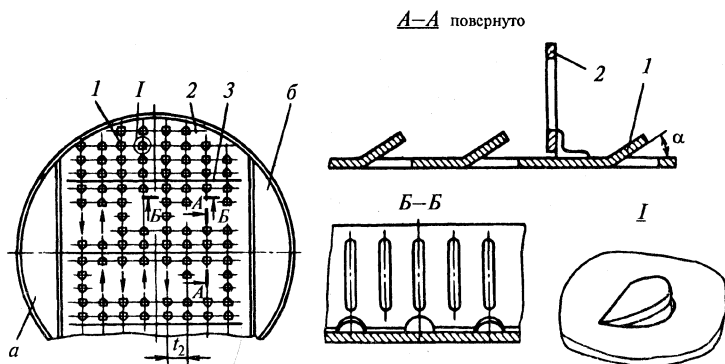


Рис. 3.18. Продольно-секционированная тарелка с просечными элементами

вдоль потока жидкости вертикальными перегородками 3, причем для создания постоянного гидравлического сопротивления по всей тарелке перегородки перфорированы.

При скорости газа до 1,5 м/с тарелки работают, как ситчатая и колпачковая: 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 выходящие из просечек газовые струи 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 кармана *a* к сливному *б*.

Клапанная тарелка с продольными перегородками 3 (рис. 3.19) является вариантом массообменного устройства с продольным секционированием. В отличие от тарелки с просечными элементами здесь 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.

Многосливную продольно-секционированную тарелку, или тарелку с двумя зонами контакта фаз целесообразно применять при высокой плотности орошения, например более 50 м³/(м²·ч), когда работа тарелок лимитируется производительностью переливных устройств. Такая тарелка (рис. 3.20) 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 (одно-, двух- и трехщелевыми), направляющих планок 3 и отбойных дисков 4.

Однощелевой сливной карман, установленный на тарелке 1 (рис. 3.21, *а*), состоит из патрубка 2 и отбойного диска 3, укрепленного так, что между ними образуется кольцевая щель шириной $h_{щ} = 4 \div 12$ мм. Через эту щель вытекает кольцевая струя жидкости, образуя дополнительную зону контакта. При установке двухщелевого сливного кармана (рис. 3.21, *б*) жидкость перелива-

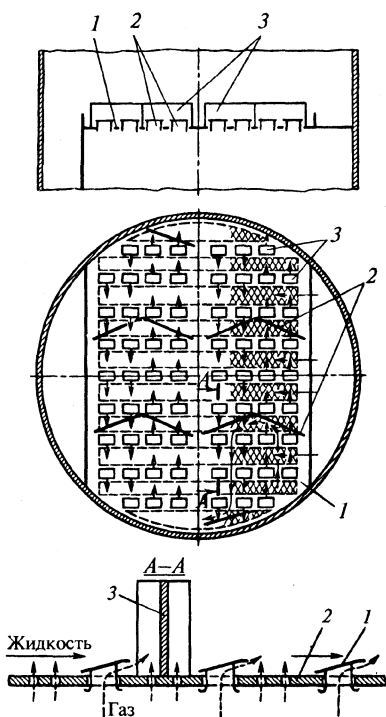


Рис. 3.19. Комбинированная клапанная тарелка

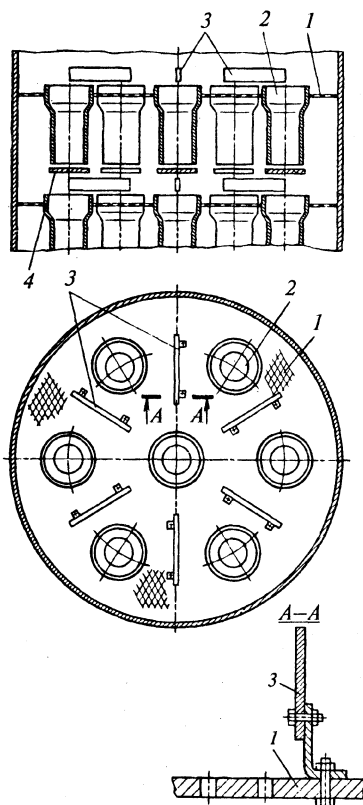


Рис. 3.20. Тарелка с двумя зонами контакта

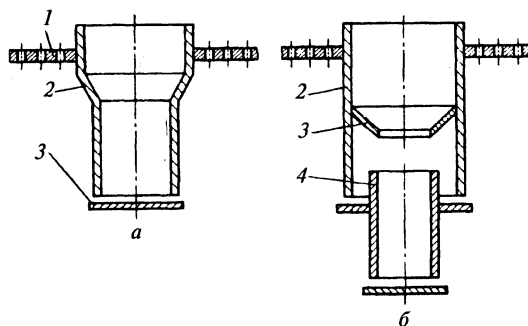


Рис. 3.21. Карманы:
а — однощелевые; б — двухщелевые

ется через сливную перегородку, протекает по внутренней стенке наружного патрубка 2 и конусу 3 во внутренний патрубок 4 и вытекает из нижней щели кольцевой струей, образуя дополнительную зону контакта.

С увеличением производительности по жидкости уровень ее в патрубке 4 повышается, жидкость заполняет пространство в патрубке 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.

3.4. Рекомендации по выбору тарельчатых колонных аппаратов

На основе анализа работы тарельчатых контактных устройств для некоторых тарелок описанных конструкций установлены области применения в зависимости от технологического назначения и параметров работы. На рис. 3.22 и в табл. 3.1 представлены области устойчивой работы и условия применения для тарелок шести типов.

Ситчатые тарелки эффективны в процессах, протекающих при стабильных режимах работы (диапазон устойчивой работы тарелки до 2) и производительности по жидкости L 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 атмосферном давлением, L до $60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и F до $1,5 (\text{м/с})(\text{кг/м}^3)^{-0,5}$. Эти тарелки в меньшей степени подвержены забиванию твердыми включениями, которые сдуваются с поверхности тарелки под действием прямоочной составляющей скорости пара, выходящего из-под клапанов.

Клапанные прямооточные тарелки используют в процессах, протекающих при атмосферном и повышенном давлении, при

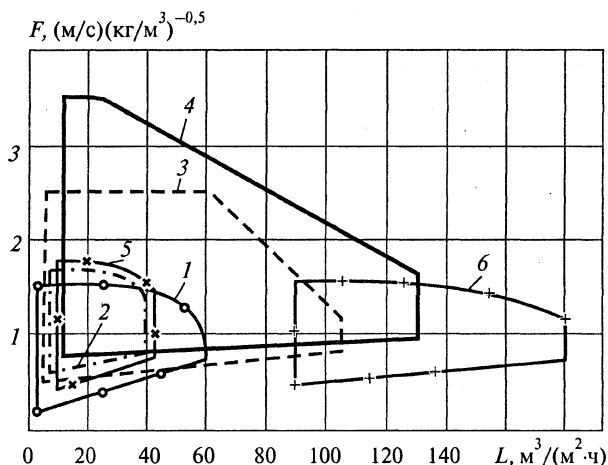


Рис. 3.22. График к определению области устойчивой работы тарелки:

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

$L < 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $F < 2,5 \text{ (м/с)(кг/м}^3)^{-0,5}$. Диапазон устойчивой работы этих тарелок 3,5.

Т а б л и ц а 3.1. Условия 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		Любое давление, нестабильный режим
Жалюзийно-клапанная	1000—4000	Атмосферное и повышенное давление
Ситчатая многосливная	1600—4000	Высокоэффективные процессы, большие удельные нагрузки по жидкости

Жалюзийно-клапанные тарелки, обладающие высокой эффективностью, имеют несколько более высокое гидравлическое

сопротивление по сравнению с ситчато-клапанными и применяются в основном для проведения процессов под давлением, при $L < 130 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $F < 3,75 (\text{м/с})(\text{кг/м}^3)^{-0,5}$. Диапазон устойчивой работы достигает 4,5. Колпачковые тарелки используют в производствах относительно небольшой мощности, а также при небольших нагрузках по жидкости; при этом тарелки обеспечивают поддержание определенного запаса жидкости в контактной зоне.

3.5. 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 потоков, отсепарированных после взаимодействия, которая может быть задана эмпирическим коэффициентом эффективности или вычислена по уравнениям, учитывающим кинетические закономерности процесса массотеплообмена. В любом случае необходимый элемент расчета – определение равновесного состояния парожидкостной системы на тарелке.

Расчет ректификационных аппаратов производят, как правило, в несколько этапов:

- 1) обоснование требований к качеству продуктов разделения и составление ориентировочного материального баланса разделения, обеспечивающего выполнение этих требований;
- 2) расчет основных технологических параметров (давление процесса, число тарелок, их распределение по секциям, флегмовое и паровое числа, тепловые нагрузки на дефлегматор и испаритель и др.), обеспечивающих заданное разделение;
- 3) расчет распределения паровых и жидкостных потоков по испаряющей и укрепляющей секциям аппарата и выбор наиболее нагруженных сечений аппарата;

- 4) обоснование выбора типа контактных устройств, их гидравлический расчет и выбор основных размеров аппарата (диаметр, межтарельчатое расстояние, высота);
- 5) расчет вспомогательного оборудования (кубовый испаритель, дефлегматор, насосы и др.);
- 6) выбор конструкционных материалов и расчет на прочность и устойчивость всех элементов ректификационной колонны, назначение исполнительных размеров элементов проектируемой аппаратуры;
- 7) технико-экономическое обоснование (ТЭО) принятого проектного решения.

Окончательное заключение об эффективности проектного решения можно сделать лишь на основе 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.

Наиболее ответственные и трудоемкие из перечисленных — этапы 2 и 3. Именно на этих этапах наиболее часто получают информацию, требующую корректировки предыдущих результатов, поскольку заданное качество продуктов разделения может быть достигнуто при различных сочетаниях технологических параметров. Так, уменьшение количества 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.

Основные технологические параметры ректификации, обеспечивающие выполнение заданных требований к разделению исходной смеси, относительно просто рассчитать 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

режим минимального орошения (флегмовое число минимально, число тарелок равно бесконечности, т.е. $R = R_{\min}$, $N = \infty$).

При расчете сложных колонн — аппаратов с несколькими вводами питания, несколькими уровнями подвода (отвода) энергии, несколькими уровнями отвода продуктов — математическое описание процесса существенно усложняется. В этом случае решение находят, как правило, методом организованного перебора реализуемых вариантов разделения сырьевых потоков на требуемые продукты.

При определении равновесных температур и составов парожидкостных систем наиболее часто привлекают процедуру расчета процесса однократного испарения (ОИ). Уравнения ОИ получают совместным решением уравнений:

- ♦ общего и покомпонентного материального баланса

$$F = G + L, \quad (3.1)$$

$$F \cdot z_i = G \cdot y_i + L \cdot x_i; \quad (3.2)$$

- ♦ равновесия

$$y_i = K_i \cdot x_i; \quad (3.3)$$

- ♦ условий

$$\sum_{i=1}^n z_i = 1; \sum_{i=1}^n y_i = 1; \sum_{i=1}^n x_i = 1, \quad (3.4)$$

где F , G и L — мольные расходы соответственно питания, паровой и жидкой фаз, кмоль/ч; z_i , y_i , x_i — мольные доли соответствующих фаз; K_i — константы фазового равновесия; n — число компонентов; i — индекс компонента.

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

$$f = \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \frac{z_i (K_i - 1)}{1 + E(K_i - 1)}. \quad (3.5)$$

Константа фазового равновесия K зависит от температуры, давления и состава системы. Во многих случаях зависимостью от состава можно пренебречь; тогда $K_i = \varphi(p, t)$, где p и t — давление и температура системы.

Таким образом, уравнение (3.5) связывает состав питания, долю отгона паровой фазы и константу фазового равновесия. Очевидно, что в соответствии с физическим смыслом функция (3.5) должна тождественно сводиться к нулю, поэтому задача расчета процесса ОИ заключается в нахождении сочетания 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 — находится p ; 2) заданы p и E — находится t ; 3) заданы p и t — находится 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.

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

$$E_{k+1} = E_k - \frac{f_k}{\frac{df_k}{dE_k}}, \quad (3.6)$$

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 считать численно. Например, производная по температуре

$$\frac{df}{dt} = \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}.$$

Алгоритм расчета технологических параметров ректификации, основанный на анализе гипотетических режимов работы колонны и использовании процедуры расчета, приведен на рис. 3.23. Исходные данные в алгоритме: расход питания F , кмоль/ч; его состав z_{Fi} ; температура t_F , °C; состав продуктов разделения (дистил-

лята x_{Di} , остатка x_{wi}); температура конденсации дистиллятных паров t_D ; перепад давлений по высоте аппарата Δp .

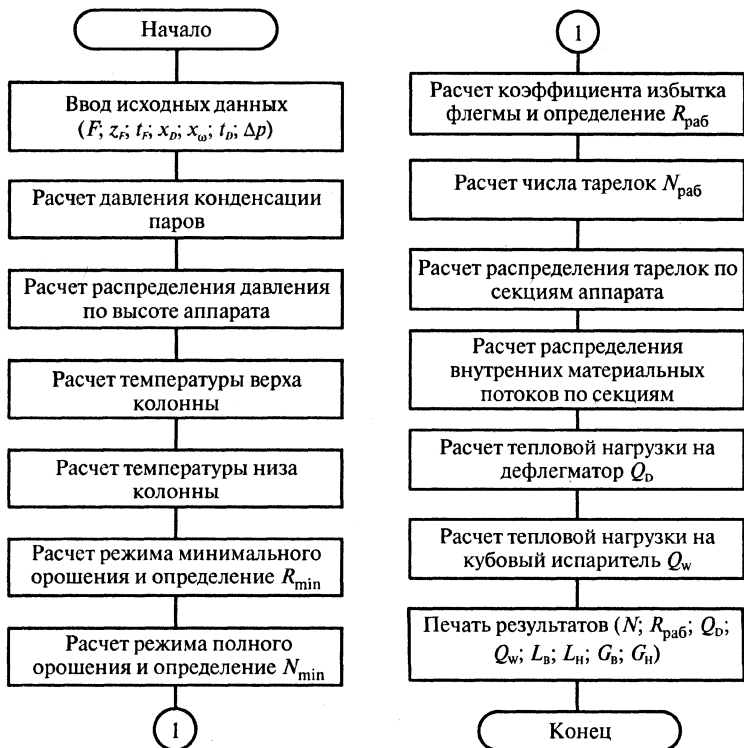


Рис. 3.23. Алгоритм расчета технологических параметров ректификации

От гипотетических режимов работы колонны к рабочему переходят с помощью корреляционных уравнений и находят рабочие значения флегмового числа $R_{\text{раб}}$ и требуемое для разделения при $R_{\text{раб}}$ количество тарелок $N_{\text{раб}}$.

Кроме того, в результате расчета определяют 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 используют различные методы. Наиболее универсален метод встречной релаксации, позволяю-

щий учесть взаимодействие всех внешних и внутренних материальных потоков, поступающих на конкретную тарелку. На рис. 3.24 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 L'_j можно отводить в виде целевого продукта. Рассмотренная модель легко описывает любой вариант разделения в сложной колонне.

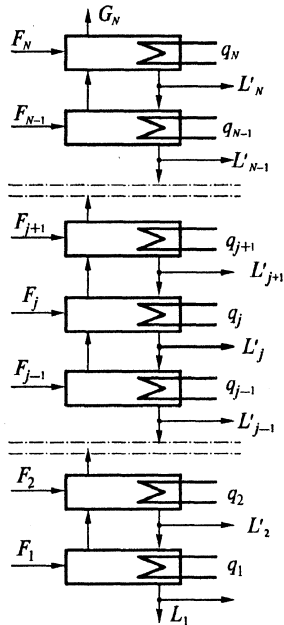


Рис. 3.24. Схема модельного ректификационного аппарата

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

- ♦ уравнение общего материального баланса

$$L_{j+1} + G_{j-1} + F_j = G_j + L_j; \quad (3.7)$$

- ♦ уравнение покомпонентного материального баланса

$$L_{j+1} x_{i,j+1} + G_{j-1} y_{i,j-1} + F_j z_{i,j} = G_j y_{i,j} + L_j x_{i,j}; \quad (3.8)$$

- ♦ уравнение фазового равновесия

$$y_{i,j} = K_{i,j} x_{i,j}; \quad (3.9)$$

- ♦ уравнение теплового баланса

$$L_{j+1} h_{j+1} + G_{j-1} H_{j-1} + F_j H_{F,j} + q_j = G_j H_j + L_j h_j; \quad (3.10)$$

- ♦ ограничения

$$\sum_{i=1}^n y_{i,j} = 1; \quad \sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1. \quad (3.11)$$

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

$$K_{i,j} = \varphi(p_j, t_j^*); \quad t_j^* = t^n = t^*. \quad (3.12)$$

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

Уравнения (3.7)–(3.11) принципиально не отличаются от уравнений (3.1)–(3.4), если под F и z в уравнениях (3.1) и (3.2) понимать суммарный расход материальных потоков в АОИ с номером j и их средний состав, в связи с чем процедуру расчета ОИ можно использовать для расчета АОИ. При этом необходимо обеспечить соблюдение материального и теплового балансов. Таким образом, для расчета процесса разделения помимо итерационного поиска значения E_j , обеспечивающего соблюдение материального баланса, нужно проводить поиск температуры t_j^* , обеспечивающей соблюдение теплового баланса, причем цикл расчета E_j входит в цикл расчета t_j^* .

Метод встречной релаксации позволяет осуществлять поочередные расчеты ректификации и для простых, 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. 3.25. Расчет заключается в применении процедуры ОИ для всех ступеней контакта при последовательном переходе от ступени $j = 1$ до ступени $j = N$ (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, может быть легко приспособлен для создания универсальных ал-

горитмов расчета абсорбции, десорбции, хемосорбции, ректификации многокомпонентных смесей в аппаратах любой сложности и с этой точки зрения незаменим при создании систем автоматизированного проектирования (САПР).

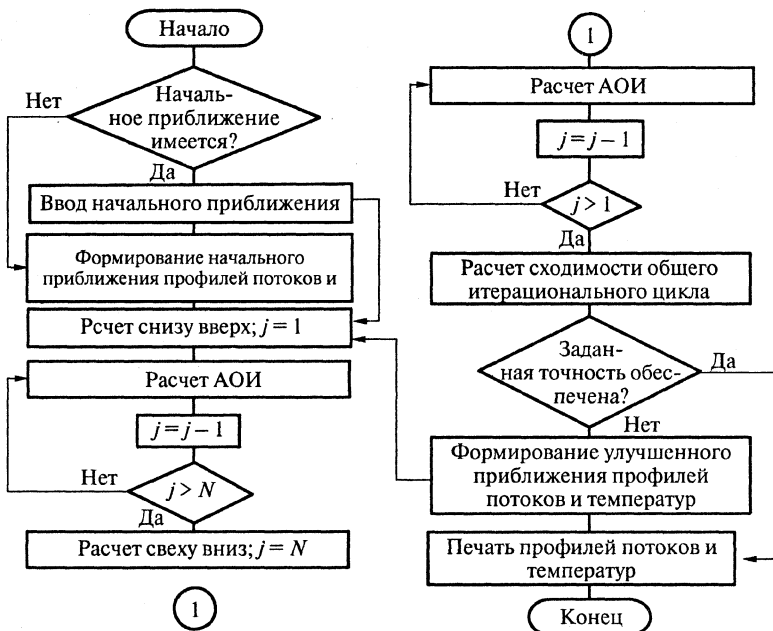


Рис. 3.25. Алгоритм расчета сложного ректификационного аппарата методом встречной релаксации

3.6. Насадочные массообменные аппараты

Диаметр насадочных колонн обычно не превышает 4000 мм. В колоннах большего 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. 3.26) 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 7. 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 колонны размещено отбойное устройство 8. 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 штуцер Г или Д.

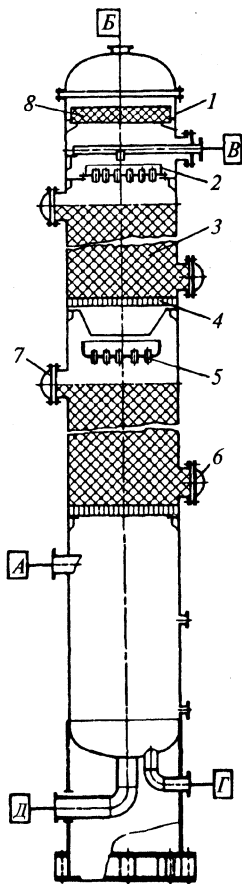


Рис. 3.26. Схема насадочной колонны

При стекании жидкости по насадке происходит ее перераспределение и на некотором расстоянии от распределительной тарелки равномерность орошения может резко уменьшиться: жидкость течет вдоль стенки аппарата, а центральная часть насадки остается неорошенной. Для исключения этого явления насадочное пространство разделяют на слои и устанавливают между ними 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 изготавливают 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: в о - п е р в ы х, практически отсутствует проблема выбора материала — насадку можно изготовить из металлов, полимеров, керамики (для обработки агрессивных сред); в о - в т о р ы х, технология изготовления, транспортирования и монтажа существенно проще регулярной.

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

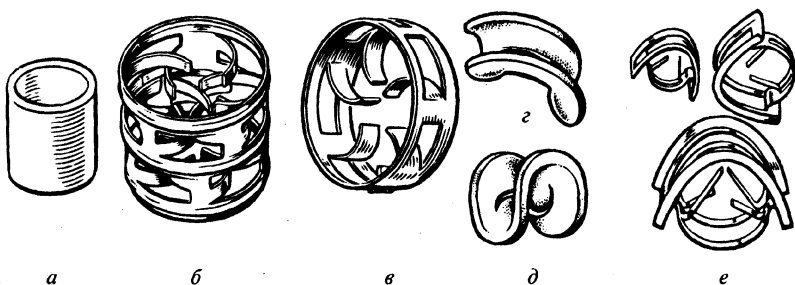


Рис. 3.27. Нерегулярные насадки

В настоящее время в отечественной химической и нефтехимической промышленности наиболее распространена нерегулярная насадка в виде колец Рашига и их модификаций. Насадка Рашига имеет небольшую стоимость, но малоэффективна. Эти кольца из металла, фарфора, керамики, пластмасс изготавливают самых различных размеров (диаметр 5—150 мм); в промышленных колоннах чаще используют кольца диаметром 25 и 50 мм (рис. 3.27, а). Кольца меньшего размера обладают значительным гидравлическим сопротивлением, а большего размера — менее эффективны. Для повышения эффективности массообмена кольцевую насадку выполняют перфорированной и с внутренними перегородками.

В Германии предложены так называемые кольца Палля — кольцевая насадка размером 50 × 50 мм из коррозионно-стойкой стали (рис. 3.27, б). На цилиндрической поверхности насадки выштам-

пованы и отогнуты вовнутрь лепестки шириной 10 мм. Механическую прочность насадки обеспечивают кольцевые гофры, служащие также для перераспределения жидкости.

В США выпускаются: насадка «Хай-пак» — разновидность колец Палля, отличающаяся от рассмотренной числом и расположением лепестков; насадка «Каскад-мини-ринг» — кольцевая насадка с перфорированной цилиндрической частью и внутренними перегородками (рис. 3.27, в).

Отечественная промышленность изготавливает кольцевую нерегулярную насадку в форме колец Рашига, а также кольца Палля из пропиленов 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. 3.27, г) и Берля (рис. 3.27, 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. 3.27, е), обладающая высокой эффективностью и малым гидравлическим сопротивлением, что позволяет использовать ее в процессах, проводимых под вакуумом.

Отечественной промышленностью изготавливается седловидная насадка «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 следует отнести их высокую чувствительность к равномерности орошения.

Простейшая регулярная насадка — *плоскопараллельная* (рис. 3.28) — представляет собой пакеты, набираемые из плоских параллельных, обычно металлических пластин толщиной 0,4–1,2 мм, расположенных вертикально 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 уста-

навливают один над другим взаимно повернутыми на угол $45-90^\circ$. Насадка может устойчиво работать в широком диапазоне производительности по газу $F = 3,5 \dots 8 \text{ (м/с)(кг/м}^3\text{)}^{-0,5}$ и по жидкости $L = 0,3 \dots 50 \text{ м}^3\text{/(м}^2\cdot\text{ч)}$. В зависимости от производительности насадка обеспечивает высоту, эквивалентную одной теоретической ступени, в пределах $0,6-1,5 \text{ м}$ при гидравлическом сопротивлении 1 м насадки $70-300 \text{ Па}$. Недостатки этой насадки — высокая металлоемкость, плохое перераспределение жидкости, сравнительно низкая эффективность.

Для устранения последнего недостатка листы плоскопараллельной насадки выполняют с *рифлением или различными турбулизирующими элементами*. Например, одна из конструкций (рис. 3.29, а) состоит из листов, расположенных вертикально, параллельно и 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. 3.29, б), состоящей из вертикальных металлических листов с рифлением, по сравнению с плоскопараллельной насадкой — меньший брызгоунос вследствие того, что гофрированная насадка беспровальна. Зазоры между листами иногда обеспечивают дистанционными планками (рис. 3.29, в), установленными вертикально на расстоянии 250 мм одна от другой и приваренными к листам точечной сваркой.

Разновидностью гофрированной насадки является *Z-образная насадка* из перфорированного листа (рис. 3.29, г). По основным технологическим параметрам эта насадка на $15-20\%$ превосходит плоскопараллельную.

Щелевая, или сотовая, насадка (рис. 3.29, д) образована из гофрированных вертикальных листов, сдвинутых один относительно

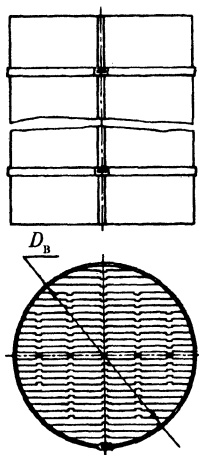


Рис. 3.28. Плоскопараллельная насадка

другого так, что по высоте пакета образуются изолированные вертикальные каналы. Листы соединены в пакеты высотой 400–1000 мм

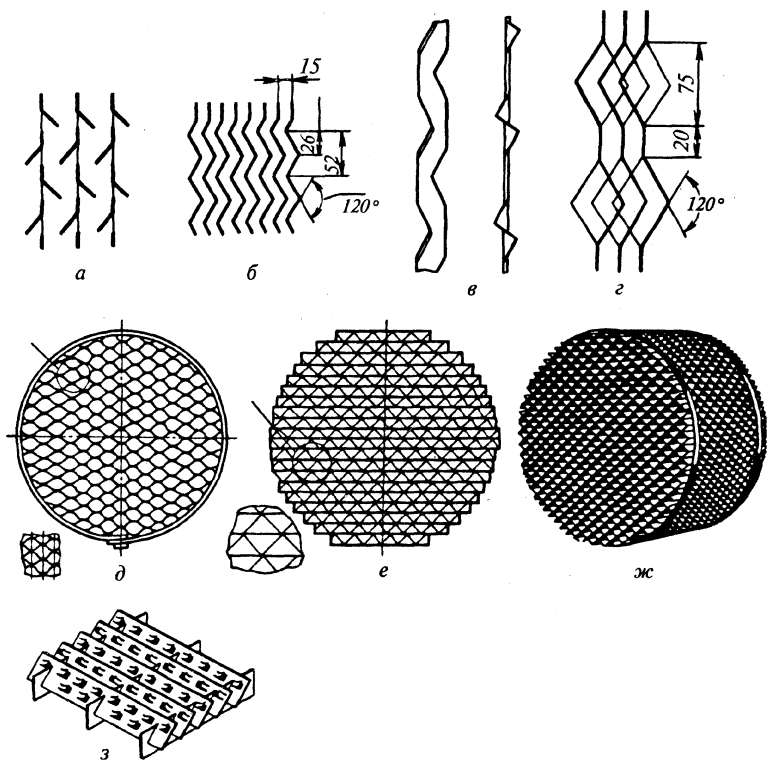


Рис. 3.29. Регулярные насадки

точечной сваркой. Преимущества этой насадки — значительно большая (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.

Хорошие характеристики у насадки из проволочной 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.

Насадка из гофрированной сетки (рис. 3.29, е) рекомендована для процессов ректификации, проводимых под вакуумом. Пакеты такой насадки высотой 150–200 мм изготавливают из тканой проволоочной сетки толщиной 0,2 мм.

За рубежом разработаны различные виды высокоэффективных насадок, способных работать при удельной нагрузке по жидкости $L < 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $F = 5 \dots 8 \text{ (м/с)(кг/м}^3)^{-0,5}$. 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 могут служить насадка «Импульс пакинг» из металла и полимерных материалов, насадка «Зульцер» (рис. 3.29, ж) из гофрированной сетки толщиной 0,16 мм, регулярная насадка «Роли пак», образованная ярусами наклонных листов с прорезями (рис. 3.29, з).

В табл. 3.2 даны сравнительные характеристики насадок различных видов (характеристики колец Рашига условно приняты за единицу).

Т а б л и ц а 3.2. Сравнительные характеристики насадок различных типов

Тип насадки	Производительность	Эффективность	Гидравлическое сопротивление
Кольца Рашига ($d = 25 \text{ мм}$)	1	1	1
Кольца Палля ($d = 25 \text{ мм}$)	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	0,45

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 органических смесей при остаточном давлении рабочей среды 0,25–98 кПа и температуре от 0 до 300 °С. Гидравлическое сопротивление основных типов регулярных насадок указано в табл. 3.3.

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 в аппаратах с регулярной насадкой.

Т а б л и ц а 3.3. Гидравлическое сопротивление регулярных насадок

Процесс	Характеристики процесса	
	Количество теоретических ступеней разделения	Перепад давления на 1 теоретическую ступень разделения, кПа
Ректификация	До 5	До 0,06
	До 15	До 0,05
Ректификация чистых жидкостей	Более 15	До 0,03
Ректификация и абсорбция загрязненных жидкостей	До 15	До 0,05

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. Основные условия эффективной работы насадочного аппарата — смачивание всей насадки и равномерное распределение жидкой и паровой фаз по сечению аппарата.

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

Если по условиям работы невозможно обеспечить минимальную плотность орошения, следует обеспечить рециркуляцию жидкости, т.е. возвращать часть ее в систему.

Однако 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} составляет $(4-6)q'_{\min}$.

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. 3.30, 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

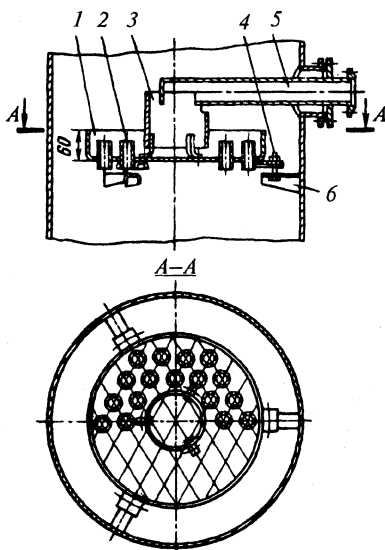


Рис. 3.30. Распределительная тарелка

отбортованный диск 1 (диаметром 0,6–0,7 диаметра колонны) с переливными патрубками 2. Отверстия под переливные патрубки

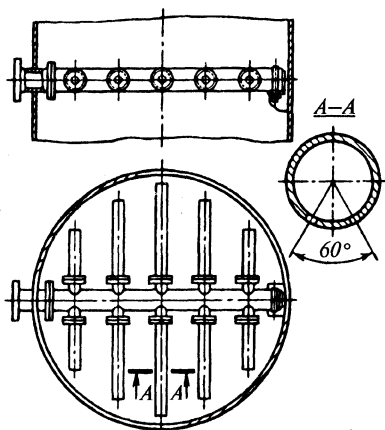


Рис. 3.31. Перфорированный коллектор

располагаются по концентрическим окружностям. Диаметр патрубков зависит от диаметра колонны и колеблется от 32 до 57 мм, а количество патрубков — от 12 (при диаметре колонны 400 мм) до 330 (при ее диаметре 2800 мм). 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. 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. 3.31). Эти устройства обычно применяют для орошения провальных тарелок и нерегулярной насадки.

Для регулярной насадки, в частности плоскопараллельной, разработаны конструкции коллекторных оросителей — коллекторно-пластинчатый (рис. 3.32, а) и с распределительной тканью (рис. 3.32, 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 распределителя имеется пластина жесткости 4. Распределитель устанавли-

ливают непосредственно на пакет насадки. Такой распределитель может работать с загрязненной жидкостью. Жесткость конструкции обеспечивают ребра 6 и балка 5.

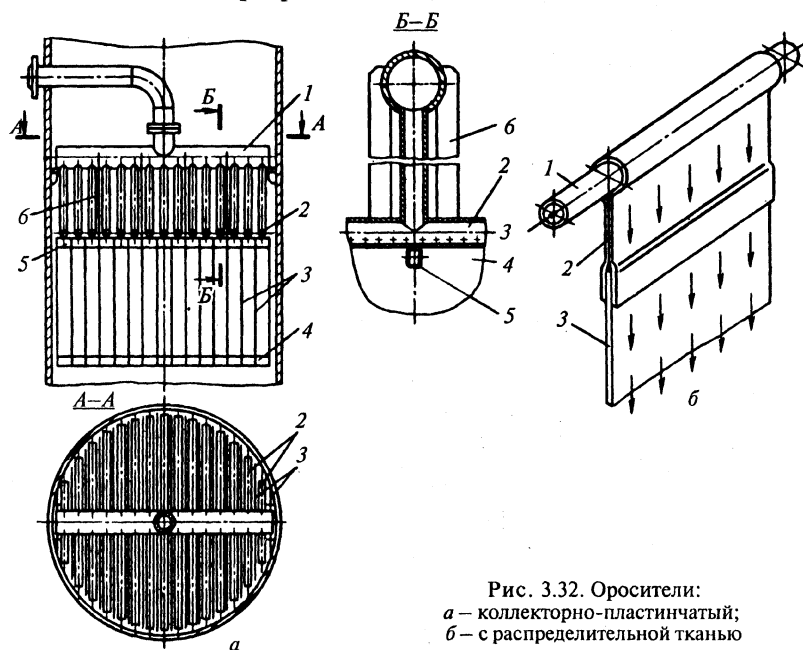


Рис. 3.32. Оросители:
а — коллекторно-пластинчатый;
б — с распределительной тканью

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. Такие оросители используют только для чистых жидкостей.

Желобчатые оросители (рис. 3.33) используют главным образом в колоннах с нерегулярной насадкой. Ороситель, устанавливается на расстоянии 1,2–1,4 м от слоя насадки и 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.

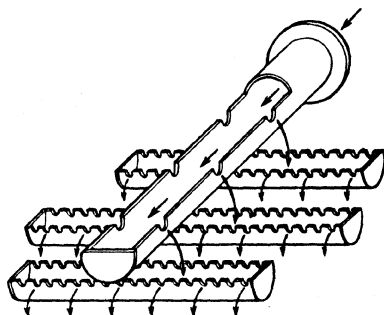


Рис. 3.33. Желобчатый ороситель

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 «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 жидкости по насадке можно оценить по критической высоте $H_{кр}$ насадочного слоя, т.е. такой высоте, при которой появляются признаки минимально допустимой поперечной неравномерности.

Для насадок разных типов 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» $H_{кр} = (5 \dots 8) D$ при $d > 0,06 D$. 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 используют либо 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. 3.34 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, что исключает их попадание под решетку.

Между колосниками 5 решеток (исполнения 2) установлены дистанционные втулки 3, и весь пакет стянут шпильками 2.

Решетки цельносварной конструкции (исполнение 1) укладывают на опорное кольцо 4, которое поддерживается приваренными к корпусу аппарата косынками 1 или опорными балками. Под колосниковой решеткой между слоями насадки устанавливают перераспределительные тарелки.

Типовая перераспределительная тарелка для жидкости (рис. 3.35) представляет собой отбортованный диск 1 (основание 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. 3.36): из центра колонны (слой 1), от стенок

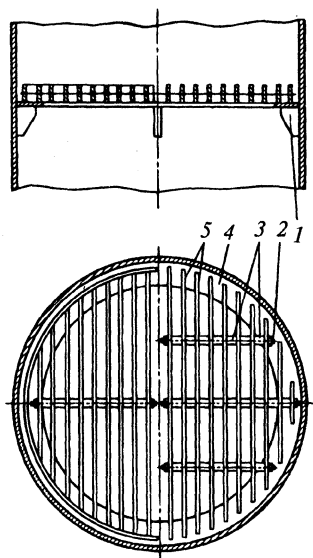


Рис. 3.34. Колосниковая решетка

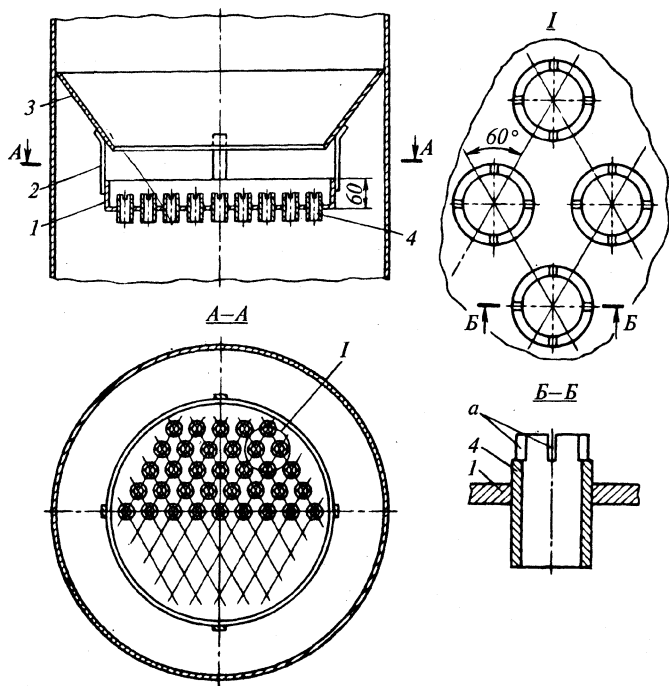


Рис. 3.35. Перераспределительная тарелка

колонны (слой 2), подсыпка до горизонтального уровня (слой 3). При засыпке насадочных тел по варианту, показанному на рис. 3.36, а, плотность укладки их на границе слоев 1 и 3 наименьшая,

что способствует стеканию жидкости к стенкам. Засыпка по способу на рис. 3.36, б, наоборот, способствует стеканию орошающей жидкости к центру колонны. При равномерном начальном орошении хорошие результаты дает вариант, соответствующий рис. 3.36, в, сочетающий два предыдущих способа.

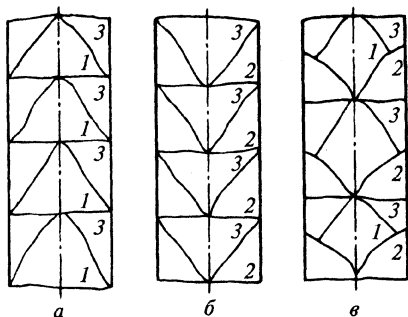


Рис. 3.36. Варианты засыпки насадки

Равномерность распределения жидкости в любой насадке существенно зависит от смачиваемости материала, из которого она изготовлена; поэтому в ряде случаев рекомендуют увеличивать смачиваемость материала путем нанесения гидрофильных покрытий, травления или специальной механической обработки 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.

3.7. 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. Если в установках газоочистки колонна установлена в конце технологической схемы, выброс абсорбента приводит к экологическим проблемам. Кроме того, унос жидкости может вызвать коррозию газоходов и их «зарастание», известны случаи полного «зарастания» газоходов 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. Для выделения капельной взвеси из газового потока чаще используют инерционные сепараторы или насадку, называемую отбойной, а также слои металлической сетки.

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

На рис. 3.37 показаны некоторые конструкции *инерционных отбойников*, используемых в колонных аппаратах. Отбойники из пластин и уголков имеют относительно небольшое свободное сечение, поэтому их не используют в высокопроизводительных

установках. При большой производительности по газу более эффективны *жалюзийные отбойники*. Такой отбойник, выполнен-

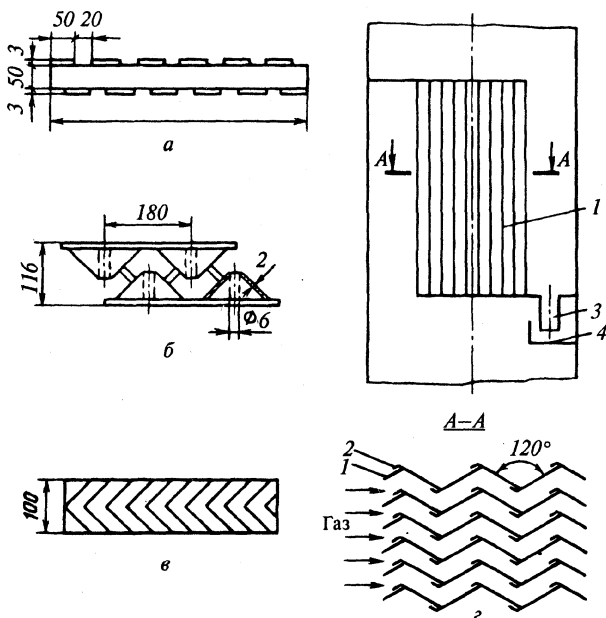


Рис. 3.37. Инерционные отбойники:
а — из пластин; б, в — из уголков; г — жалюзийный

ный из гофрированных листов 1 с карманами 2 для жидкости, снабжен сливной трубой 3, погруженной в жидкость гидрозатвора 4 для исключения проскока газа.

Работа *центробежных сепараторов* основана на выделении жидкой фазы из вращающегося газожидкостного потока под действием центробежных сил. Примером является показанный на рис. 3.38 прямоточно-центробежный сепаратор. Газожидкостная смесь, поступающая через тангенциальные прорези а в нижней части патрубков 1, укрепленных на тарелке 2, получает и осевое, и вращательное движения. В результате жидкость концентрируется на периферии патрубка и отбойником 3 отводится в межпатрубковое пространство, а отсепарированный газ выходит через центральное отверстие патрубков.

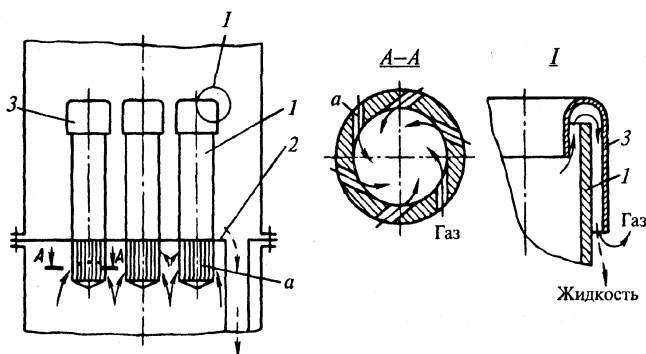


Рис. 3.38. Прямоточно-центробежный сепаратор

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

3.8. Расчет колонных аппаратов на прочность и устойчивость

Наиболее металлоемкие и ответственные элементы колонных аппаратов — 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. 3.39):

- ♦ поперечное сечение корпуса в месте присоединения опорной обечайки (сечение $I-I$), а также для аппарата переменного сечения — поперечные сечения корпуса, переменные по диаметру и/или толщине;
- ♦ поперечное сечение опорной обечайки в месте присоединения к корпусу (сечение $II-II$);
- ♦ поперечное сечение опорной обечайки в местах расположения отверстий (сечение $III-III$);
- ♦ поперечное сечение опорной обечайки в месте присоединения нижнего опорного кольца (сечение $IV-IV$).

Колонный аппарат рассчитывают для трех видов условий работы — рабочих условий, условий испытаний и условий монтажа.

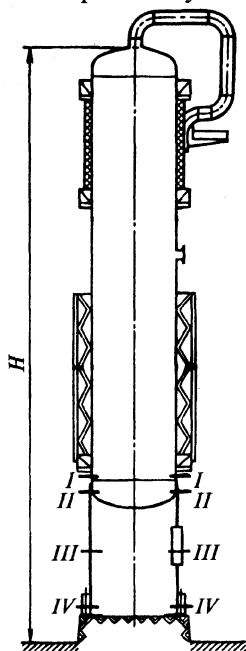


Рис. 3.39. Расчетная схема колонного аппарата

При этом учитывают следующие нагрузки, Н: G_1 — нагрузка от веса колонны в рабочих условиях, включая вес обслуживающих площадок, изоляции, внутренних устройств и рабочей среды; G_2 — нагрузка от веса колонны при гидротests 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, Н·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 и сейсмического воздействия в соответствующем расчетном сечении.

Сочетание нагрузок при трех указанных видах условий работы аппарата дано в табл. 3.4.

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.

Не будем здесь 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.

Толщину стенки s , мм, цилиндрического корпуса аппарата, нагруженного давлением p , рассчитывают из условия прочности по формуле

$$s = \frac{pD_{\text{в}}}{2[\sigma]\varphi - p} + c, \quad (3.13)$$

Таблица 3.4. Сочетание нагрузок при различных видах условий работы аппарата

Индекс условий работы	Условия	Давление, МПа	Осевое сжимающее усилие, Н	Расчетный изгибающий момент, Н·м
1	Рабочие	p_1	$Q_1 = G_1$	$M_1 = M_{G1} + M_{v1}$ Для районов с сейсмичностью 7 баллов и более принимают большее из двух значений: $M_1 = M_{G1} + M_{v1}$ и $M_1 = M_{G1} + M_{R1}$
2	Испытания	$p_2; p_n$	$Q_2 = G_2$	$M_2 = M_{G2} + 0,6 M_{v2}$
3	Монтаж	0	$Q_3 = G_3$ $Q_4 = G_4$	Большее из двух значений: $M_3 = M_{G3} + M_{v3}$ и $M_3 = M_{G3} + 0,8 M_{v4}$. Для районов с сейсмичностью 7 баллов и более принимают большее из трех значений: $M_3 = M_{G3} + M_{v3}$; $M_3 = M_{G3} + 0,8 M_{v4}$ и $M_3 = M_{G3} + M_{R3}$

где $D_{\text{в}}$ — 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 уравнения (3.13) легко определить допускаемое давление при заданной толщине стенки корпуса

$$[p]_p = \frac{2[\sigma]\varphi(s - c)}{D_{\text{в}} + (s - c)}. \quad (3.14)$$

Если помимо внутреннего или внешнего давления аппарат подвержен воздействию осевой сжимающей силы и изгибающего момента, необходимо выполнить проверку на прочность с учетом всех силовых факторов. При расчете корпусов колонн на проч-

ность 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:

$$\sigma_1 = \frac{p(D_n + s)}{2(s - c)}; \sigma_2 = \frac{p(D_n + s)}{4(s - c)} - \frac{Q}{\pi D_n(s - c)} \pm \frac{4M}{\pi D_n^2(s - c)},$$

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

Согласно энергетической теории прочности, эквивалентные напряжения при двухосном напряженном состоянии материала 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 $\sigma_{\text{экв}} \leq [\sigma]_k$ или, если за основу принять третью теорию прочности, то

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

где $[\sigma]_k$ — допускаемое напряжение для материала корпуса колонны, МПа; φ — коэффициент сварного шва.

Проверку на устойчивость корпусов колонн выполняют также для каждого из расчетных сечений при рабочих условиях, условиях испытаний и монтажа. Если не учитывать поперечные силы, которые редко имеют место на практике, то:

- ♦ для аппаратов, работающих под наружным давлением,

$$\frac{p}{[p]} + \frac{Q}{[Q]} + \frac{M}{[M]} \leq 1; \quad (3.15)$$

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

$$\frac{Q}{[Q]} + \frac{M}{[M]} \leq 1,$$

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

$$p_{кр} = 0,92k \frac{RE}{l} \frac{[(s-c)R^{-1}]^{2,5}}{1-0,95\theta}, \quad (3.16)$$

где $k = f(\theta)$; $R = 0,5 D_b$ – 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 экстремум, но для наиболее часто встречающихся на практике случаев ($\theta = 0,036 \dots 0,10$) k можно считать постоянным и равным 0,65.

Из этого уравнения получена расчетная формула для допускаемого наружного давления обечаек

$$[p]_E = \frac{p_{кр}}{n} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} E}{nB} \frac{D_b}{l} \left[\frac{100(s-c)}{D_b} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s-c)}{D_b}}, \quad (3.17)$$

где n – коэффициент запаса устойчивости; коэффициент 100 введен для удобства вычислений;

$$B = \min\{1,0; 9,45\} \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s-c)}}. \quad (3.18)$$

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 оболочки. Определение устойчивости оболочек за пределами упругости представляет собой достаточно сложную задачу. В инженерных расчетах используют приближенный подход: полагают, что за пределами упругости в качестве критического напряжения принимают предел текучести

материала, т.е. $\sigma_{кр} = \frac{p_{кр} R}{s-c} = \sigma'_0$, откуда

$$p_{\text{кр}}^* = \frac{\sigma'_T (s - c)}{R}. \quad (3.19)$$

Допускаемое давление

$$[p] = \frac{p_{\text{кр}}^*}{n^*}. \quad (3.20)$$

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

$$\lambda = \left(\frac{l}{D_B} \right) \left[\frac{0,5 D_B}{s - c} \right]^{1,5}. \quad (3.21)$$

Коэффициент запаса

$$n^* = 1,5 + 12,2 \left(\frac{\sigma'_T}{E} \right)^2 \lambda^2 \quad (3.22)$$

Тогда допускаемое давление находится из условия устойчивости за пределами упругости материала с учетом (3.19), (3.22)

$$[p] = \frac{p_{\text{кр}}^*}{n^*} = \frac{2 \sigma'_T (s - c)}{D_B \left[1,5 + 12,2 \left(\frac{\sigma'_T}{E} \right)^2 \lambda^2 \right]}. \quad (3.23)$$

Уравнение применимо только при $0 \leq \lambda < \lambda_{\text{пр}}$, где $\lambda_{\text{пр}} = 0,3 \frac{E}{\sigma'_T}$.

При $\lambda > \lambda_{\text{пр}}$ допускаемое давление следует определять по формуле (3.17). Допускаемую внешнюю нагрузку можно выбирать из условия $[p] = \min \left\{ \frac{p_{\text{кр}}}{n}; \frac{p_{\text{кр}}^*}{n^*} \right\}$.

На рис. 3.40 приведены зависимости критического давления в области упругих и пластических деформаций, допускаемого дав-

ления и коэффициента запаса устойчивости от λ . Как видно из графиков, можно подобрать общее уравнение, связывающее допускаемые внешние давления для области упругих и пластических деформаций материала корпуса аппарата. Простейшая аппроксимация такой зависимости

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + [p]_p^2 / [p]_E^2}}, \quad (3.24)$$

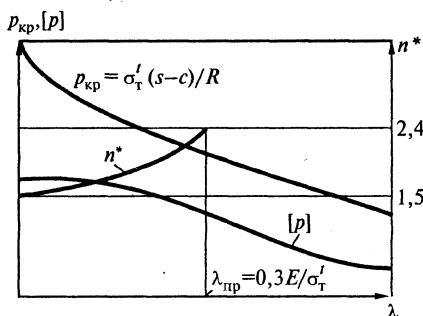


Рис. 3.40. Зависимость критического, допускаемого давлений и коэффициента запаса устойчивости корпуса аппарата от параметра λ

где $[p]_p$ — допускаемое давление, определяемое из условия прочности по (3.14); $[p]_E$ — допускаемое давление, определяемое из условия устойчивости по (3.17).

Аналогичные формулы имеются для определения допускаемых осевой силы сжатия $[Q]$ и изгибающего момента $[M]$. Так, допускаемая осевая сжимающая сила

$$[Q] = \frac{[Q]_p}{\sqrt{1 + [Q]_p^2 / [Q]_E^2}}, \quad (3.25)$$

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:

$$[Q]_E = \min \{ [Q]_{E1}; [Q]_{E2} \}. \quad (3.26)$$

В (3.26) допускаемую осевую сжимающую силу $[Q]_{E1}$ определяют из условия местной устойчивости в пределах упругости по полуэмпирической формуле

$$[Q]_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} D_b^2 E}{n} \left[\frac{100(s-c)}{D_b} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s-c)}{D_b}}. \quad (3.27)$$

Допускаемую осевую сжимающую силу $[Q]_{E2}$ определяют из условия общей устойчивости, как для стержней, нагруженных осевым сжимающим усилием:

$$[Q]_{E2} = \frac{\pi(D_b + s - c)(s - c)E\left(\frac{\pi}{\lambda^*}\right)^2}{n}, \quad (3.28)$$

где λ^* — гибкость; для корпусов колонных аппаратов можно принять $\lambda^* = \frac{2,83l}{D_b + s - c}$.

При $l/D_b < 10$ формула (3.26) принимает вид $[Q]_E = [Q]_{E1}$.
Допускаемый изгибающий момент

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

где допускаемый изгибающий момент:

из условия прочности

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

из условия устойчивости

$$[M]_E = \frac{89 \cdot 10^{-6} ED_b^3}{n} \left[\frac{100(s - c)}{D_b} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s - c)}{D_b}} = \frac{D_b}{3,5} [Q]_{E1}. \quad (3.29)$$

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 (3.15) проверить оболочку на устойчивость в условиях комбинированного нагружения.

3.9. Экстракционные аппараты для систем жидкость – жидкость

Жидкостную экстракцию — 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 генерируются силами гравитации, называют 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 потоком, а другая — в виде капель. Эти аппараты просты по конструкции, но малоэффективны.

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. 3.41) имеет вертикальный цилиндрический корпус 1 и перфорированные (ситчатые) тарелки 2, снабженные переливными устройствами 3. Колонна работает следующим образом. Тяжелая фаза $T\Phi$ через штуцер 4 подается непрерывно в колонну, опускается сплошным потоком по колонне и удаляется через штуцер 7. Легкая фаза $Л\Phi$ непрерывно поступает через штуцер 6 в колонну под нижнюю тарелку 2, диспергируется, проходя через отверстия тарелки и в виде капель поднимается под следующую тарелку.

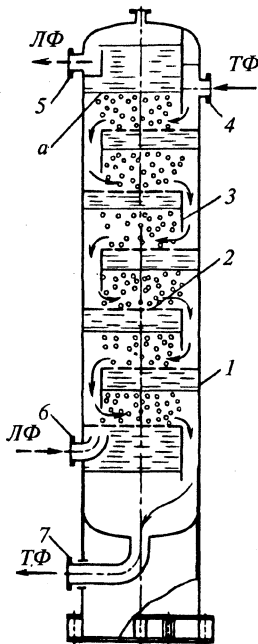


Рис. 3.41. Ситчатая экстракционная колонна

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.

Из аппаратов, работающих с подводом энергии, выделим прежде всего *роторные экстракторы*.

Колонна Шайбеля (рис. 3.42), одна из первых конструкций роторных экстракторов, состоит 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. 3.43, *a*, смесительная секция 1 изолирована от отстойной секции 2 горизонтальными статорными кольцами 3. В более поздних конструкциях колонн Шайбеля (рис. 3.43, *б*) перемешивание фаз осуществляется турбинными мешалками 1 в зоне между неподвижными кольцевыми перегородками 2 и слоем проволоочной сетки 3. Роторно-дисковый экстрактор (рис. 3.44) представляет собой колонну, по оси которой установлен ротор в виде вертикального вала 1 с круглыми горизонтальными дисками 2. Диски вращаются в полости секции, 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 движения 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. 3.45 показан роторно-дисковый экстрактор с асимметричным расположением вала. В корпусе 1 аппарата смесительные секции разделены статорными кольцами 3. Из одной секции в другую фазы перемещаются через отстойные зоны *a*, отделенные от смесительных зон вертикальным экраном 2.

В *пульсационных экстракторах* интенсификацию массообмена между контактирующими фазами обеспечивают, сообщая им колебательное движение определенных амплитуды и частоты.

В этом случае независимо от типа насадки экстракционную колонну снабжают генератором пульсаций (пневматическим, меха-

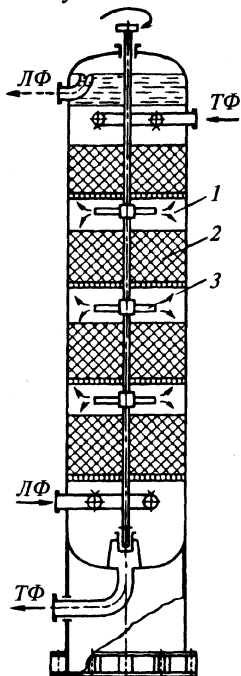


Рис. 3.42. Экстракционная колонна Шайбеля

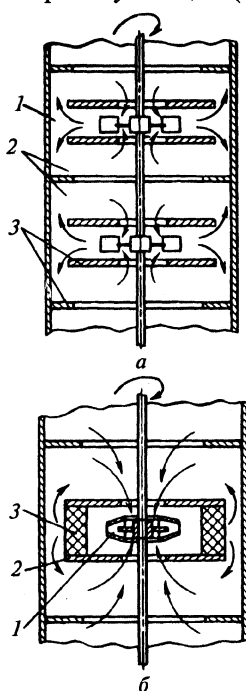


Рис. 3.43. Экстракционные колонны с мешалками

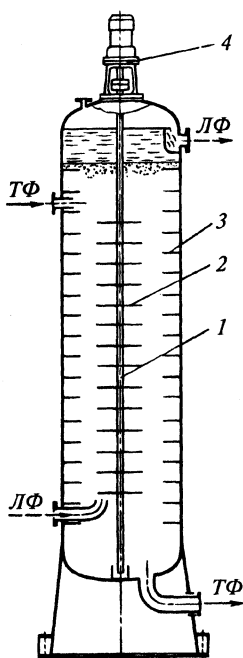


Рис. 3.44. Роторно-дисковый экстрактор

ническим и др.). Так, в установке с пневматической системой пульсаций (рис. 3.46) 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 этого типа не нужно 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.

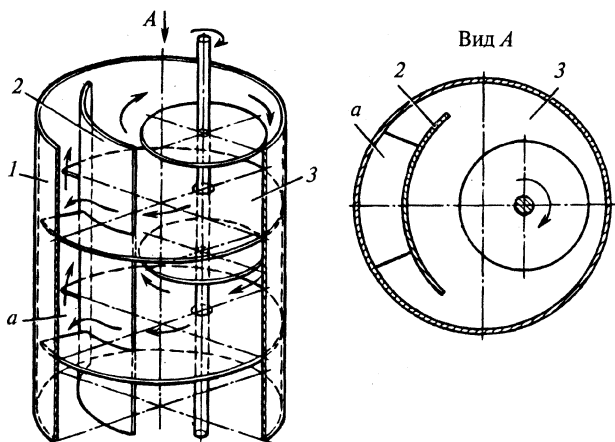


Рис. 3.45. Роторно-дисковый экстрактор с асимметрично расположенным валом

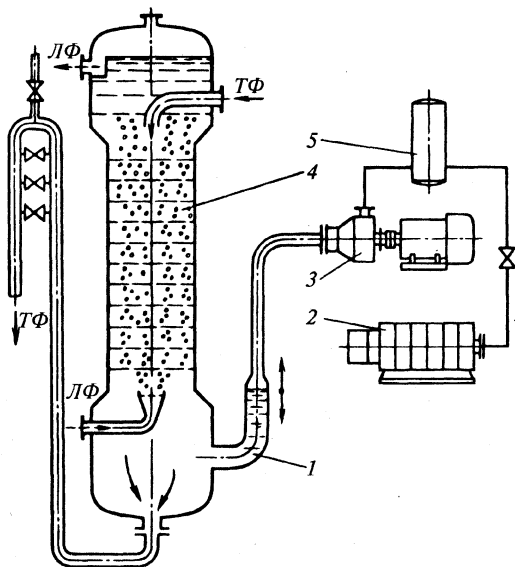


Рис. 3.46. Экстракционная установка с пневматической системой пульсации

В пульсационных экстракторах обычно используют ситчатые тарелки, а также более эффективную тарелку типа КРИМЗ. По-

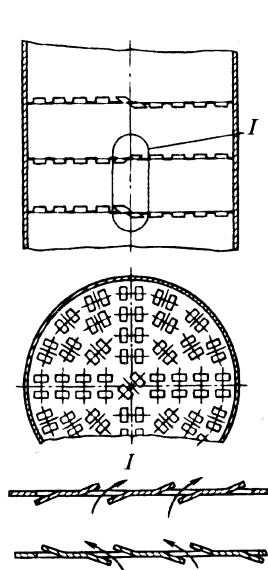


Рис. 3.47. Тарелка типа КРИМЗ

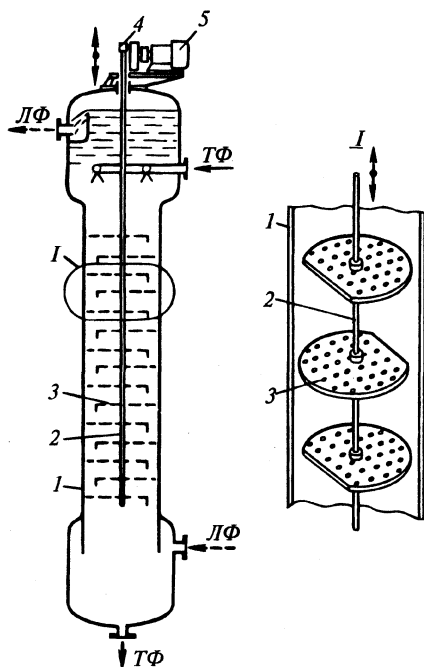


Рис. 3.48. Вибрационный экстрактор

следняя представляет собой плоский диск (рис. 3.47), 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. 3.48 показан вибрационный экстрактор. Как и в пульсационных аппаратах, тяжелая $ТФ$ и легкая $ЛФ$ фазы движутся противоточно. В верхней части колонны I размещен электро-

привод 5 с эксцентриком 4. При вращении вала эксцентрик передает возвратно-поступательное движение штоку 2, с которым жестко соединены перфорированные тарелки 3.

В отечественной промышленности применяют вибрационные экстракторы конструкции ГИАП с фасонными тарелками, напоминающими тарелки типа КРИМЗ.

Центробежные экстракторы — перспективное оборудование для проведения процессов жидкостной экстракции. В этих экстракторах ускорение генерируемого центробежного поля превышает ускорение свободного падения в 10^3 – 10^4 раз, вследствие чего достигаются большие скорости взаимодействия обрабатываемых жидкостей, высокая эффективность массообмена и четкая сепарация выходных потоков. Поэтому такие аппараты компактны, в них невелики объемы участвующих в массообмене жидкостей, минимальна пожаро- и взрывоопасность установок. Поскольку время контакта в этих аппаратах невелико, они незаменимы при обработке нестойких продуктов, легкоэмульгируемых жидкостей и смесей компонентов с мало различающимися плотностями. Центробежные экстракторы успешно используются при обработке вязких жидкостей, например при селективной очистке смазочных масел.

Центробежные экстракторы можно разделить на две основные группы:

1) камерные, или дискретно-ступенчатые, состоящие из отдельных ступеней (камер), в каждой из которых происходят последовательно смешение и разделение противоточно движущихся фаз;

2) дифференциально-контактные, в которых процесс протекает при непрерывном контактировании противоточно движущихся фаз.

Примером *камерных аппаратов* является экстрактор немецкой фирмы «Лувеста» (рис. 3.49). Он работает следующим образом. Тяжелая фаза *ТФ* подается в установленный на валу 2 ротор 1 экстрактора по каналу б узда 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 разделяются (пакет сепарационных тарелок 7 показан условно лишь в ступени 11). Легкая фаза *ЛФ* под действием центробежных сил выводится из ступени 1 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 это-

му 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 про-

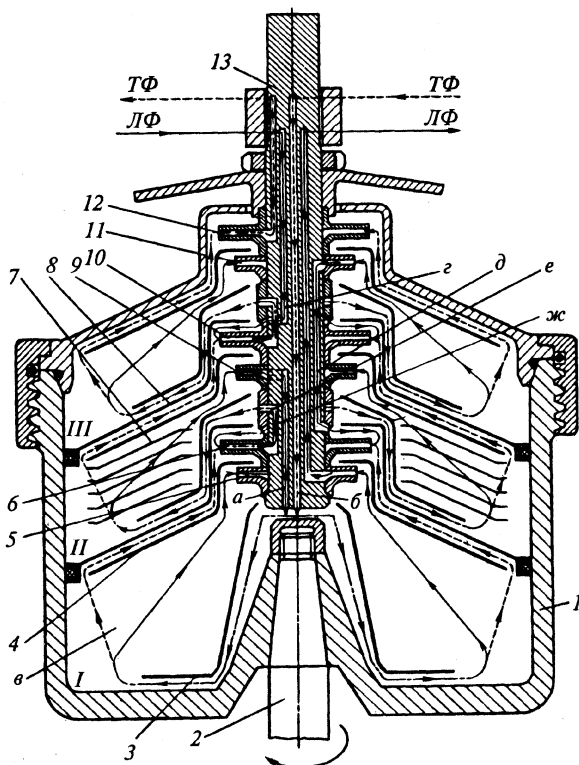


Рис. 3.49. Трехступенчатый ротор типа «Лувеста»

странство ступени *III*, причем к напорному диску *10* по каналу *г* 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 прямоточное смешение фаз, в то время как в целом по аппарату обеспечивается их противоток. В каждой ступени достигается равно-

весие, примерно соответствующее по эффективности одной теоретической ступени разделения.

Для достижения большой эффективности разделения и особенно высокой 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. 3.50, а). Экстрактор имеет цилиндрический ротор 2, жестко закрепленный на полном 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 торцевыми уплотнениями 1. Вал получает вращение от электро-

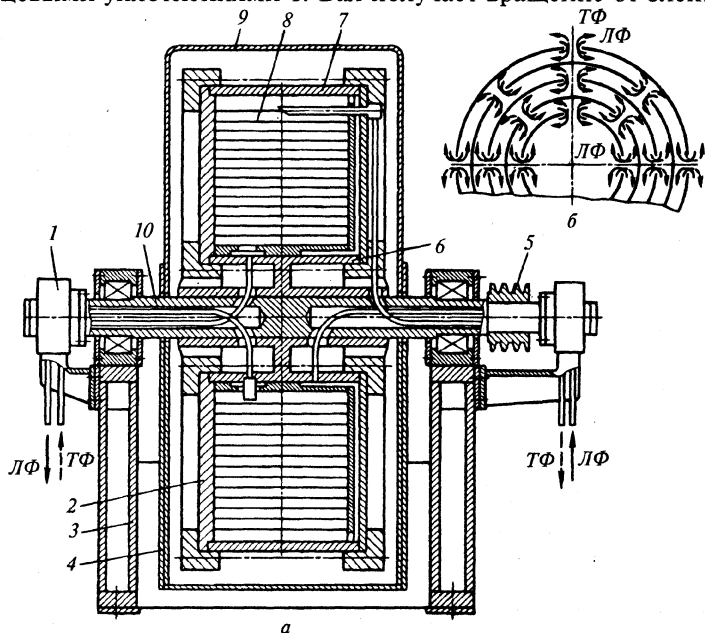


Рис. 3.50. Центробежный экстрактор Подбильняка:
а — общий вид; б — схема насадки в виде концентрических цилиндров

двигателя через клиноременную передачу 5. Корпус ротора состоит из внутренней 6 и наружной 7 концентрических обечайек, 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 внутренней обечайки 6, а легкая — через сопла у наружной обечайки 7. Через контактные элементы (перфорированные цилиндры, рис. 3.50, б) жидкости движутся противотоком, многократно смешиваясь и разделяясь в каналах между цилиндрами. Проконтактировавшие фазы удаляются через каналы в полом валу 10. Уровень раздела фаз 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. 3.51). Ап-

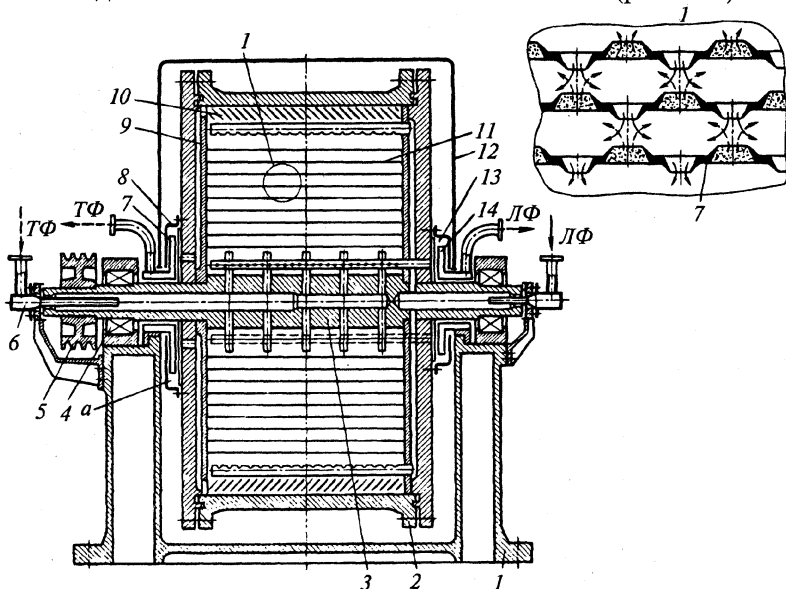


Рис. 3.51. Безнапорный центробежный экстрактор

парат 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 жидкости. Внутри ротора, закрытого кожухом 12, с переменным шагом размещены контактные цилиндры 11.

Тяжелая *ТФ* и легкая *ЛФ* фазы жидкости самотеком через устройства 6 поступают в полый вал 3, откуда под действием центробежных сил перемещаются: легкая фаза *ЛФ* — по радиальным каналам в диске 9 к периферии ротора, а тяжелая *ТФ* — 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 *а* (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 *а*.

3.10. Аппараты для сушки материалов

Сушка — это процесс удаления 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 тыс. видов материалов) используют множество 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).

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 числе применяемых сушильных аппаратов составляет около 80%. Процесс сушки в таких аппаратах происходит при прямоточном или противоточном движении теплоносителя и материала, а также при перекрестном их движении. По теплотратам наиболее экономичны 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 их 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 (удельная доля 25%) и аппараты для сушки в режиме пневмотранспорта (примерно 7%), где 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 при сушке продуктов, для которых недопустим контакт материалов с теплоносителем, например чтобы исключить загрязнение. 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 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 толстостенных 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 бывают непрерывного (барабанные, туннельные, ленточные, петлевые, шахтные) и периодического (камерные, полочные) действия.

Аппараты непрерывного действия представляют собой теплоизолированную камеру, по которой транспортирующим устройством 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 производствах, когда необходимо с большой точностью регулировать режим сушки. *Полочная сушилка* (рис. 3.52) 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 подо-

гревом (центробежным вентилятором 4 и паровым калорифером 5). Воздух поступает в камеру и проходит в горизонтальном направлении между полками. Шибер 6 предназначен для регули-

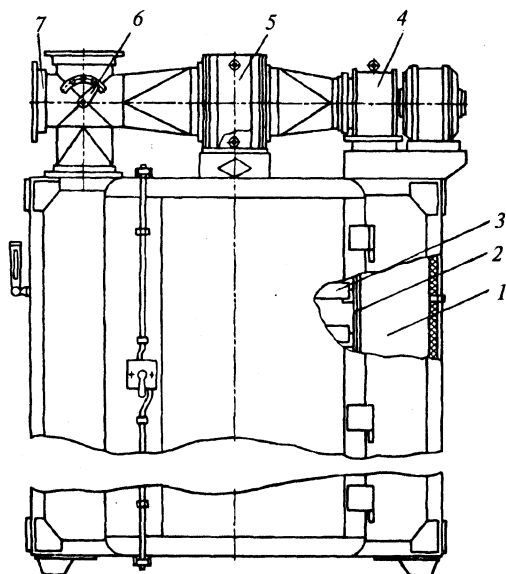


Рис. 3.52. Полочная сушилка

рования 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 или перпендикулярно оси туннеля циркулирует сушильный агент (нагретый воздух, топочные газы, перегретый пар).

На рис. 3.53 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.

Нагреваемый в калориферах 2 воздух вентиляторами 3, снабженными приводом 4, по газоходу 9 подается в секции сушилки.

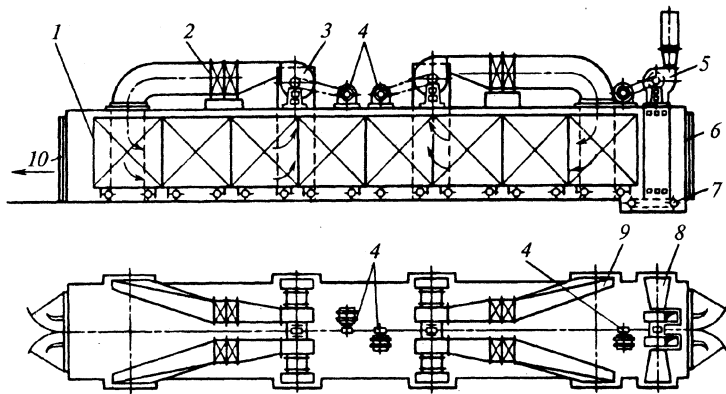


Рис. 3.53. Туннельная сушилка

Отработанный воздух через газоходы 8 удаляется из туннеля вентилятором 5. Вагонетки 1 установлены вплотную одна к другой по всей длине туннеля, снабженного дверями на загрузочном 6 и разгрузочном 10 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, за исключением тонкодисперсных пылевидных материалов, 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, белитинг).

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. 3.54) материал транспортируется ленточным конвейером 1. Воздух, нагреваемый в паровом калорифере 4, центробежным вентилятором 5 подается в распределительный канал 6, проходит через слой материала 3

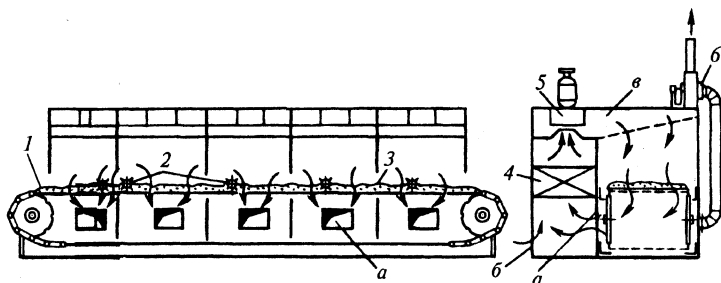


Рис. 3.54. Одноярусная ленточная сушилка

сверху вниз и через окна *а* возвращается на рециркуляцию. Часть отработанного воздуха отводится вентилятором 6, а свежий воздух в необходимом количестве подсасывается через окна 6. Для выравнивания влажности материала по высоте слоя установлены ворошители 2 (валки с пальцами).

Вальцеленточные сушилки (рис. 3.55) применяют для сушки пастообразных материалов. Сушилка состоит из ленточного кон-

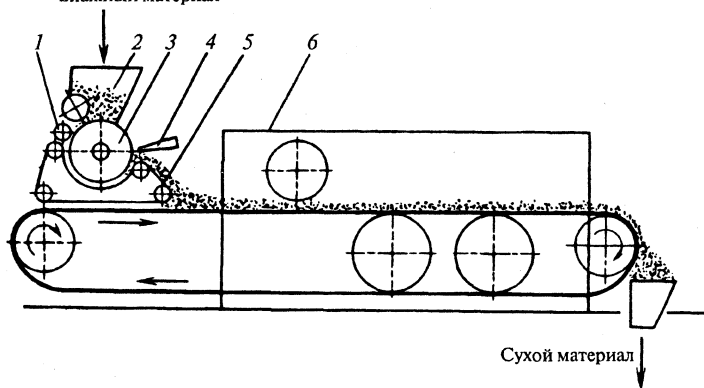


Рис. 3.55. Схема вальцеленточной сушилки

вейера и формовочно-сушильного вальца, предназначенного для предварительного формования и подсушки материала. На поверхности вальца 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 в форме 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 сушильный 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. 3.56. Внутри сушильной камеры проходит стальная лента 4 из металлической сетки с глубиной ячеек 10–15 мм. Паста из бункера-питателя 2 подается на

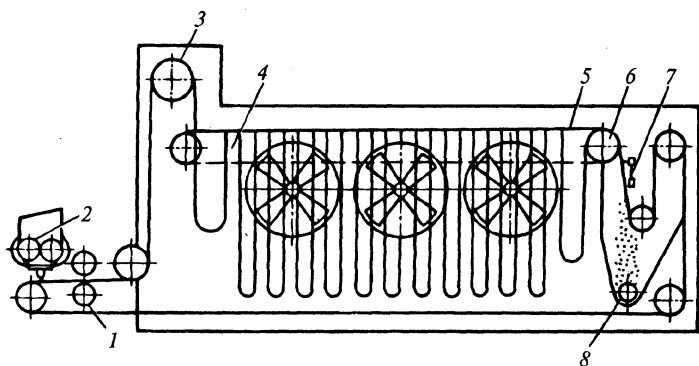


Рис. 3.56. Схема петлевой сушилки

обогреваемые паром вальцы 1, 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. 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 большой экономичностью благодаря возможности применения высокотемпературных теплоносителей, значительной производительностью, надежны в работе (работая по 6000—8000 ч без капитального ремонта).

Барабанная конвективная сушилка (рис. 3.57) представляет собой установленный под углом (около 4°) к горизонтали враща-

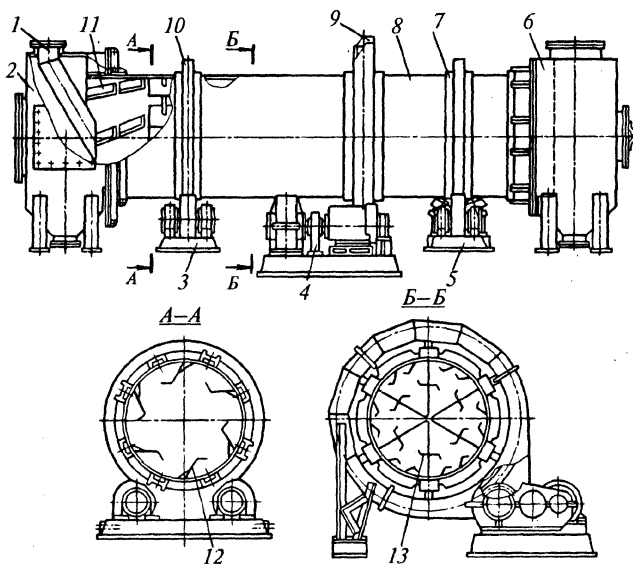


Рис. 3.57. Барабанная сушилка

ющийся барабан 8, на который надеты два бандаж 10 и зубчатый венец 9 привода. Аппарат опирается бандажками 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 с частотой 2–12 об/мин от моторно-редукторной группы 4 через зубчатый венец 9. 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 ссыпание материала в барабан.

Между камерами и барабаном устанавливают уплотнения для исключения подсоса наружного воздуха, что особенно нежелательно 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 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. Обычно объем барабана заполняют материалом на 20%. Материал движется вдоль вращающегося барабана, так как он наклонен к горизонтали, а также под действием прохо-

дящих через сушилку газов. Чтобы исключить значительный унос высушиваемого материала, относительную скорость газа поддерживают на уровне 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 может 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 изготовляют как единое толстое кольцо, свариваемое кольцевым швом с пролетной обечайкой барабана.

Бандажи обычно изготовляют 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 СЧ21. Неравнопрочность роликов и бандажей приводит к ускоренному износу роликов, изготовить которые дешевле и проще, чем бандаж. Бандажи 1 (рис. 3.58) обычно закрепляют на барабане 6 башмаками 3, которые присоединяют к кольцевым накладкам 5 сваркой или болтами 4. Выступы двух соседних башмаков повернуты в разные

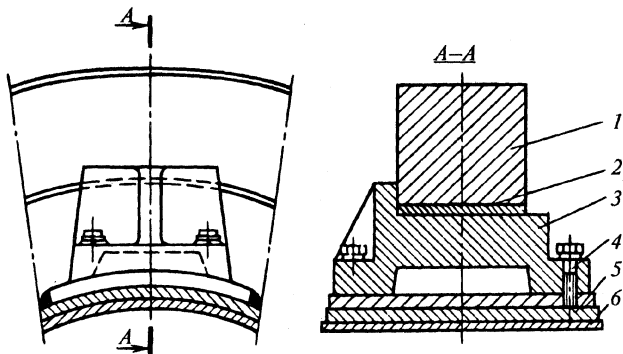


Рис. 3.58. Узел крепления бандажа к барабану

стороны, что предотвращает осевое смещение банджа вдоль барабана. Зазор между башмаком 3 и банджом 1 регулируют подкладками 2.

Опорно-упорная станция (рис. 3.59) состоит из основной плиты 4, на которой укреплены четыре подшипниковых узла 3 для

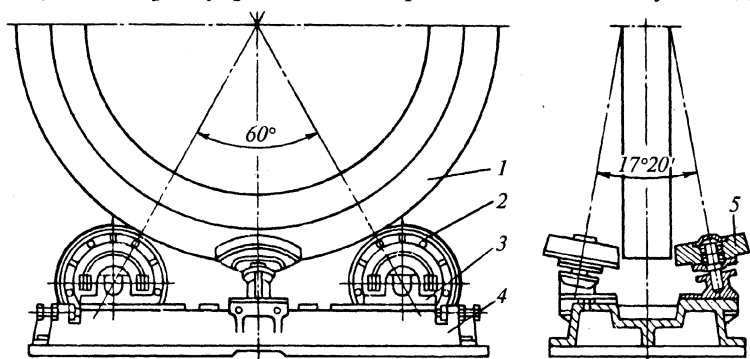


Рис. 3.59. Опорно-упорная станция

опорных роликов 2, а также упорные ролики 5, расположенные под углом к вертикали. Бандж 1 упирается в ролики 5 своими торцовыми поверхностями.

Для исключения выхода в цех запыленных топочных газов 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. 3.60), при более высокой температуре — сальниковое, а в аппаратах большего диаметра — секторное уплотнение (рис. 3.61).

В ленточном уплотнении один конец многослойной ленты 2 (см. рис. 3.60) закреплен на неподвижном кольце 5 камеры, а другой — заведен на кольцо 1, укрепленное на барабане. Лента прижата к подвижному кольцу проволоочным кольцом 3 через накладки 4. Секторное уплотнение (см. рис. 3.61) состоит из подвижного кольца 2, вращающего-

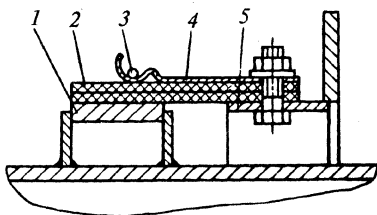


Рис. 3.60. Ленточное уплотнение

ся вместе с барабаном, и неподвижного кольца 1. К подвижному кольцу 2 пружинами 4 прижимаются 10 секторов 3. Упорами для пружин служат стаканы 5.

Аппараты для сушки материала в псевдоожигенном (кипящем) слое. Проведение процесса сушки в кипящем слое позволяет интенсифицировать удаление влаги из материала благодаря увеличению поверхности контакта между частицами материала и сушильным агентом, выравниванию температуры и влажности материала в объеме слоя. 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 конструктивно и в эксплуатации. Их используют главным образом для удаления несвязанной влаги из сыпучих материалов. Многосекционные аппараты 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.

В отсутствие теплоносителя или при очень малой его скорости зернистый материал лежит на решетке неподвижным плотным слоем. С увеличением скорости подачи теплоносителя в узкой области скоростей слой сначала разбухает, но остается неподвижным, а при достижении теплоносителем критической скорости, называемой скоростью псевдоожигения, слой приходит в состояние кипения, или псевдоожигения. С дальнейшим увеличением скорости теплоносителя псевдоожигение переходит в пневмотранспорт, начало которого характеризуется скоростью газового потока, называемой скоростью уноса.

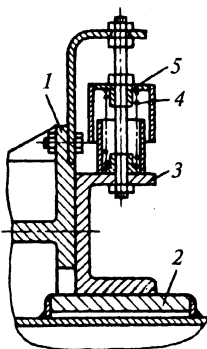


Рис. 3.61. Секторное уплотнение

На рис. 3.62 показана установка для сушки сульфата аммония горячим воздухом в псевдоожиженном слое. Влажный материал

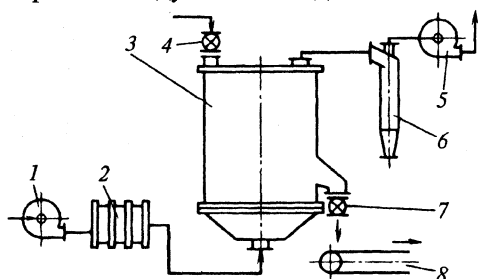


Рис. 3.62. Схема однокамерной установки для сушки сульфата аммония в псевдоожиженном слое

секторным питателем 4 загружается в сушильную камеру 3, куда из калорифера 2 вентилятором 1 нагнетается воздух, нагретый до 120°C . 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. 3.63) 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. 3.64 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).

Процесс сушки паст на гранулах высушиваемого материала можно приблизительно представить следующим образом. Жидкий или пастообразный материал подается через форсунки на поверхность псевдоожиженных гранул высу-

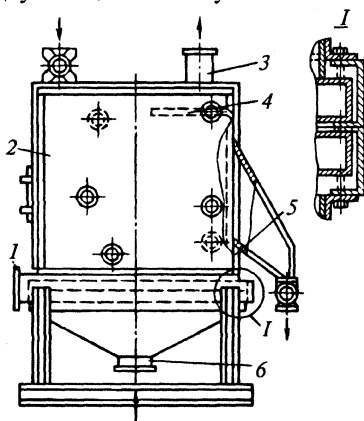


Рис. 3.63. Сушилка с псевдоожиженным слоем

шиваемого продукта, вследствие чего происходит увеличение их размера. Влага из материала удаляется, и в кипящем слое за счет ис-

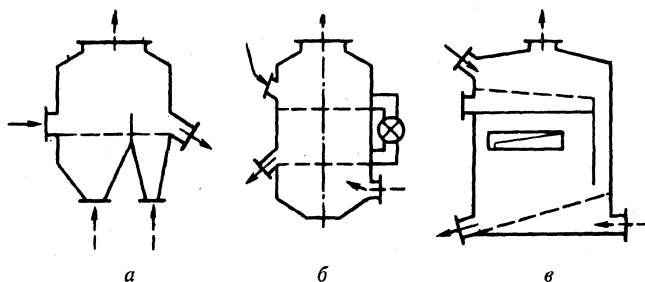


Рис. 3.64. Схемы двухсекционных сушилок с псевдооживленным слоем: *а* – горизонтальной; *б* – вертикальной с выносным переточным устройством; *в* – вертикальной с внутренним переточным устройством; сплошные и штриховые стрелки соответствуют материалу и теплоносителю

тирования и раскалывания сухих гранул образуются новые частицы, которые являются центрами формирования 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 соответствующим 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 газораспределительного устройства используют провальные решетки – перфорированные плиты с диаметром отверстий 2–3 мм (иногда до 5 мм) и свободным сечением 3–10% и беспровальные решетки.

На рис. 3.65 приведены схемы беспровальных газораспределительных решеток. Плоская решетка (рис. 3.65, *а*), состоящая из ряда перекрывающих одна другую пластин, обеспечивает перемешивание материала вблизи решетки, т.е. в зоне наиболее высоких температур. Теплота отводится от решетки интенсивно, застой-

ные зоны отсутствуют, практически исключено попадание материала под решетку. Опыт эксплуатации этих решеток в аппаратах

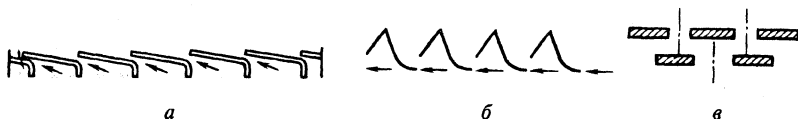


Рис. 3.65. Схемы беспровальных газораспределительных решеток:
а – плоская; б – желобчатая; в – щелевая

с площадью поперечного сечения до 10 м^2 показал их высокую надежность. Такие решетки рекомендуется использовать для комкующихся материалов.

Для сушки волокнистых продуктов предпочтительны желобчатые решетки (рис. 3.65, б). Газ подается в решетку тангенциально; при этом достигается интенсивное перемешивание частиц высушиваемого материала.

Беспровальная решетка щелевого типа (рис. 3.65, в) представляет собой два ряда колосников. Оси щелей верхнего и нижнего рядов колосников взаимно смещены. Недостатки этой конструкции те же, что и у перфорированных плит.

При температуре поступающего теплоносителя до 400°C решетка может быть цельной. При более высоких температурах целесообразнее решетка в виде отдельных колосников, чтобы компенсировать их температурные деформации.

Для выгрузки материала из аппаратов кипящего слоя и удаления пыли из циклонов применяют затворы лопастные, шнековые и затворы-мигалки (рис. 3.66). Чтобы улучшить герметизацию аппарата, иногда ставят по два затвора-мигалки на одном вертикальном участке. Надежность их работы возрастает с увеличением расстояния между ними. С целью повышения надежности можно установить лопастной затвор и шнек.

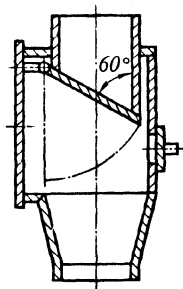


Рис. 3.66.
Затвор-мигалка

Для загрузки сушилок кипящего слоя сыпучими материалами обычно используют лопастные и шнековые питатели, а для подачи растворов, суспензий и паст – форсунки.

Аэрофонтанные сушилки применяют для удаления слабосвязанной 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. Такие сушилки 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 либо 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. 3.67) 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.

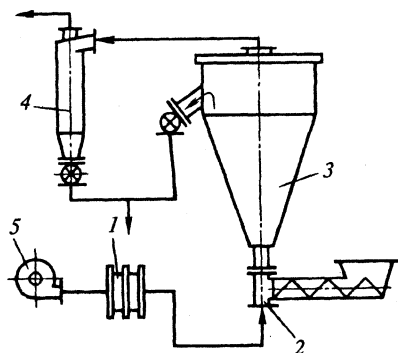


Рис 3.67. Схема установки с аэрофонтанной сушилкой

Аэрофонтанные сушилки можно выполнять с газораспределительной решеткой и без нее; в последнем случае скорость газа в узкой части аппарата принимают равной устойчивой скорости пневмотранспорта $\omega_{\text{п}} = (1,5 \div 2,0) \omega_{\text{в}}$, где $\omega_{\text{в}}$ — скорость витания частиц. В широкой части аппарата в обоих случаях скорость близка к скорости псевдоожижения.

Аппараты для сушки материалов в режиме пневмотранспорта широко используют для сушки сыпучих материалов, из которых в процессе сушки удаляется свободная или слабосвязанная влага. Эти аппараты непригодны для сушки материала с крупными части-

цами (более 8–10 мм) и для удаления из материала связанной влаги. Сушку в режиме пневмотранспорта реализуют главным образом в трубах-сушилках (пневмотрубах), а также в вихревых и циклонных сушилках.

В химической промышленности наиболее широко используют трубы-сушилки. Диаметр этих сушилок иногда достигает 1 м, длина 25 м. Скорость теплоносителя 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. 3.68 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; 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%)

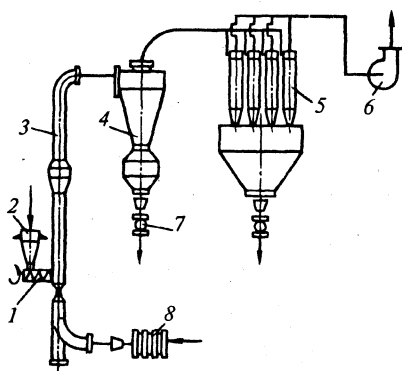


Рис. 3.68. Схема установки для сушки в режиме пневмотранспорта

часть влаги. Чтобы интенсифицировать сушку, создают нестационарные условия движения газовой взвеси по длине пневмотрубы, для чего ее снабжают расширителями, внутренними винтовыми вставками и пр. Так, труба 3 (рис. 3.68) имеет посередине расширитель, за которым происходит резкое увеличение относительной скорости материала и теплоносителя.

Трубы-сушилки особенно эффективны при рециркуля-

ции 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.

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 для обезвоживания полимерных материалов. Влажный материал (рис. 3.69) 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.

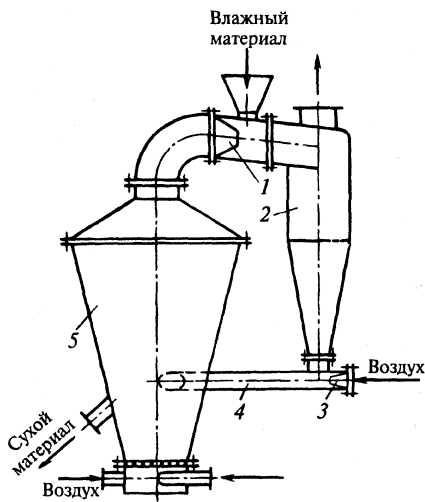


Рис. 3.69. Схема сушилки типа циклон — кипящий слой

Разработана комбинированная сушильная установка (рис. 3.70) 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

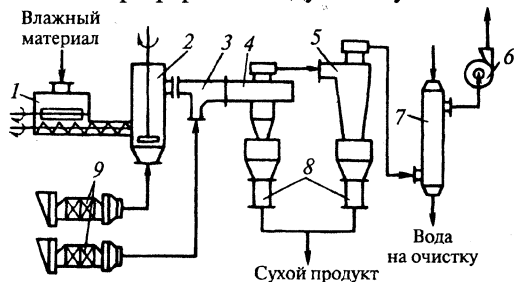


Рис. 3.70. Схема комбинированной сушильной установки

потоками — основным и вспомогательным. Вспомогательный поток воздуха поступает в дезагрегатор-подсушиватель 2, в который через питатель-дозатор 1 подается влажный материал. Образующаяся 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 5 и выводится через затвор 8. Для дополнительной очистки отработанного воздуха используют скруббер 7, откуда воздух отсасывается вентилиратором 6.

Распылительные сушилки предназначены для сушки растворов и суспензий; готовый продукт имеет вид порошка 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 даже при высокой температуре 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. 3.71. Воздух вентилиратором 1 через калорифер 2 подается в распылительную сушилку 3. Сушилка представляет собой цилин-

дрическую камеру, в верхней части которой установлено распылительное устройство 4 в виде центробежно-распылительного

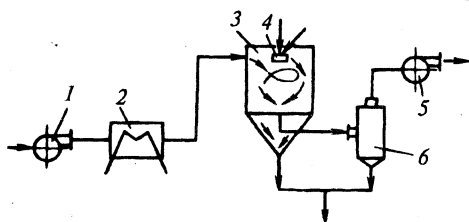


Рис. 3.71. Схема установки с распылительной сушилкой

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 и форсуночно-распылительные.

Центробежно-распылительные сушилки имеют специальные центробежные распылительные механизмы, состоящие из электродвигателя, повышающего редуктора и вертикального вала с установленным на нем распыливающим диском. В некоторых конструкциях диск приводится во вращение паровой или газовой турбинкой. Жидкость распыливается при подаче ее на быстро вращающийся распыливающий диск. Выбор конструкции диска зависит от свойств обрабатываемого материала и производительности аппарата.

Диск для распыления эрозионных материалов (рис. 3.72) состоит из стального корпуса 1, сменных сопел 2 и защитной сменной пластины 4, прижимаемой гайкой 3 к основанию диска. 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. 3.73) обычно используют для распыления суспензий, не обладающих заметными эрозионными свойствами.

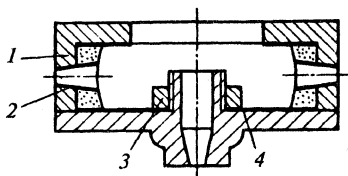


Рис. 3.72. Диск для распыления эрозионных материалов

Форсуночно-распылительные сушилки оснащают пневматическими или механическими форсунками.

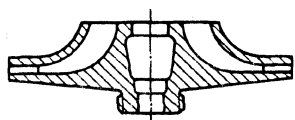


Рис. 3.73. Лопастной распылительный диск

Механические форсунки работают при давлении 3–20 МПа. Они отличаются высокой экономичностью, компактностью и бесшумностью, обеспечивают тонкое и равномерное распыление. Расход энергии при распылении механическими форсунками невелик,

однако их производительность трудно регулировать. Выходные отверстия механических форсунок часто засоряются, поэтому они непригодны для распыления суспензий и паст.

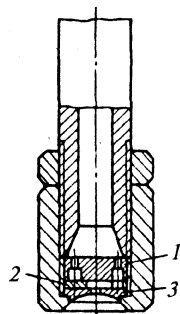


Рис. 3.74. Механическая форсунка

Такая форсунка (рис. 3.74) 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 его тангенциальным каналам 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 изменения 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 их недостаткам следует отнести неоднородность распыления и повышенный расход электроэнергии.

В пневматической форсунке (рис. 3.75) сжатый воздух подается через патрубок 1, распыливаемый раствор — через пат-

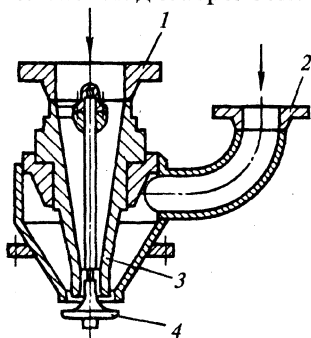


Рис. 3.75. Пневматическая форсунка

рубок 2. На выходе из форсунки раствор подхватывается воздухом, истекающим из кольцевой щели между корпусом 3 и тарелкой 4.

Более полная конструкция распылительной центробежной сушилки показана на рис. 3.76. В верхней части сушильной камеры 1 размещено центробежно-распылительное устройство 2. Горячий сушильный агент по газоподводу 3 подается к факелу распыла высу-

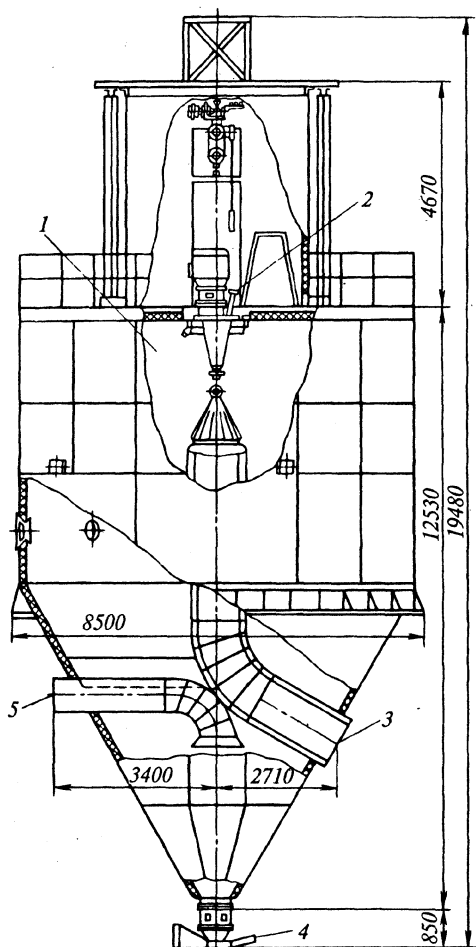


Рис. 3.76. Центробежно-распылительная сушилка

шиваемой 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 камеры к ее диаметру для форсуночных камер обычно составляет 1,5–2,5, а в специальных случаях (например, при получении готового продукта в виде гранул грубым распылением) может достигать 5, а для сушилок с дисковым распылом 0,8–1,0. Обычно сушильная камера этих аппаратов представляет собой вертикальную цилиндрическую обечайку с плоской крышкой и коническим, как на рис. 3.76, или плоским днищем, в котором находится разгрузочное устройство.

Кондуктивные сушилки отличаются от конвективных тем, что в них вся теплота передается высушиваемому материалу теплопроводностью от нагретой поверхности, а воздух или другие газы предназначены только для удаления испарившейся влаги из рабочего объема аппарата. В качестве источника теплоты в этих аппаратах используют водяной пар, высококипящие органические растворители, расплавы солей и металлов.

Процесс сушки в кондуктивных сушильных аппаратах может происходить при атмосферном давлении или при вакууме. Последний вариант используют при сушке легко окисляющихся материалов (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.

В барабанных вращающихся сушильных аппаратах сушка материала в вакууме протекает более интенсивно. Преимущества этих аппаратов — перемешивание материала медленно вращающимися мешалками; механизация загрузки и выгрузки материала. Серийно выпускают барабанные вакуумные сушилки с плавающим барабаном и роторные.

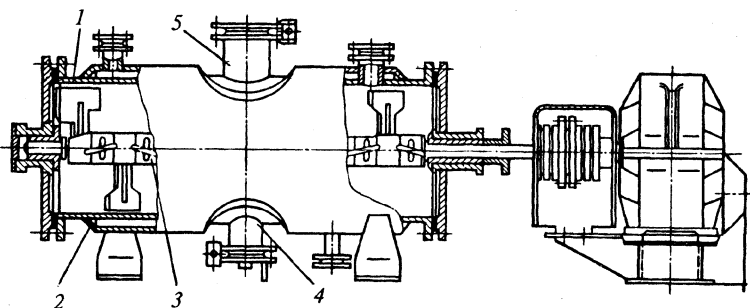


Рис. 3.77. Барабанная роторная сушилка

Роторная барабанная вакуумная сушилка (рис. 3.77) 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, перемещается к концам барабана, а при вращении ротора в другую сторону — к разгрузочному люку 4, расположенному в середине барабана.

Вальцевые сушильные аппараты — аппараты непрерывного действия — предназначены для сушки вязких и пастообразных продуктов при атмосферном давлении или вакууме. 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, в результате чего материал высушивается равномерно и исключается возможность его повреждения.

В одновальцовой сушилке (рис. 3.78) вращается полый гладкий обогреваемый валец 2, нижняя часть которого погружена в

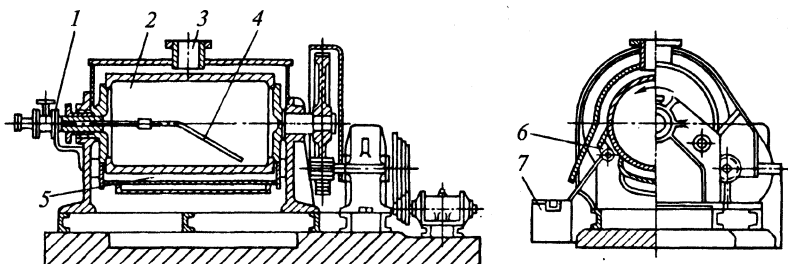


Рис. 3.78. Одновальцовая сушилка

корыто 5 с высушиваемым материалом. Внутри вальца через цапфу 1 подается греющий пар, а через трубку 4 выводится конденсат. Валец получает вращение через шестерни, установленные на цапфах. Частоту вращения вальца выбирают в зависимости от продолжительности сушки. При вращении вальца материал тонкой пленкой налипает на горячую поверхность и высыхает за один его оборот. Высушенный материал 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 представляют те свойства продукта, от которых зависит 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 — условиями подвода теплоты и отвода паров влаги с поверхности материала, что принято называть первым периодом сушки, либо внутренней диффузией — условиями вывода влаги из глубинных слоев материала к его поверхности, что называют вторым периодом сушки.

Если высушиваемый материал — 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): пористые и широкопористые сыпучие материалы с порами размером более 10 нм; материалы с порами размером от 10 до 6 нм; тонкопористые и микропористые материалы с порами размером от 6 до 2 нм; ультрамикропористые материалы (размер микропор менее 2 нм). Реальный, подлежащий высушиванию материал может содержать поры всех четырех групп.

Характер процесса сушки зависит от начальной влажности материала u_n . Если u_n больше критической влажности $u_{кр}$, 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 они 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 эмпи-

рическим данным сушки в конкретном аппарате модельного материала, для которого известно количество пор каждой из указанных четырех групп. В качестве такого модельного материала предложена катионовая схема 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 $N_I = 6\beta\Delta t_{\text{ср}} / d_{\text{экв}} \rho_m q_0$ — скорость сушки в первом периоде, с^{-1} ; β — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\Delta t_{\text{ср}}$ — средняя разность температур поверхности материала и теплоносителя, $^{\circ}\text{C}$; $d_{\text{экв}}$ — эквивалентный диаметр частиц материала, м; ρ_m — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; q_0 — удельный расход теплоты на 1 кг испаряемой влаги, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Если коэффициент теплоотдачи неизвестен, то скорость сушки можно определить по кинетической кривой сушки модельного материала в аппарате

$$N_{\text{ис}} = N_{\text{им}} (d_{\text{экв.м}} / d_{\text{экв.ис}})^{1,5} (\rho_{\text{м.м}} / \rho_{\text{м.ис}}) (\Delta t_{\text{ср.ис}} / \Delta t_{\text{ср.м}}),$$

где индексы «м» и «ис» относятся соответственно к модельному и исследуемому материалу.

Время сушки материала во втором периоде сушки

$$\tau_{II} = \left(\sum_{i=1}^4 t_{II}^i k^i \right) \frac{d_{\text{экв.м}}}{d_{\text{экв.ис}}},$$

где t_{II}^i — экспериментальное время удаления влаги из пор i -й 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 можно предварительно выбрать типовую сушилку (табл. 3.5). Оптимальный вариант соответствует типу аппарата, для которого сумма баллов по горизонтали максимальна. Если для заданных условий эксплуата-

ции 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, поскольку для таких материалов пригодны сушилки всех типов.

При выборе типа сушилки необходимо учитывать следующие обстоятельства. Малотоннажные (производительность до 250 кг/ч) и среднетоннажные (до 3500 кг/ч) производства целесообразно укомплектовать 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; полученный 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 из-за налипания пастообразного материала на рабочие поверхности аппаратов, что резко снижает интенсивность процесса и вызывает перегревание материала. В связи с этим используют, в частности, такие приемы: формование; смешивание с мелким сухим продуктом (ретуром) для увеличения сыпучести; разбавление жидкостью до жидкотекучего состояния.

Сыпучие материалы, содержащие 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.

Т а б л и ц а 3.5. Данные к выбору сушильного аппарата

Материал, параметры сушики	Оценка (число баллов) для сушилки											
	полочной	полочной вакуумной	распылительной с центробежным распылом	распылительной с форсуночным распылом	вальцовой	барабанной вращающейся	барабанной вращающейся вакуумной	ленточной одноярусной секционной	валыцеленточной	псевдоожиженного слоя	фонтанирующего слоя	трубной пневматической
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Кусковой (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												
пожароопасный	3	5	5	5	5	3	3	3	5	3	0	3
Взрывоопасный	0	5	5	5	0	3	5	0	0	3	3	5
Смоченный органическими растворителями	0	5	3	3	0	0	5	0	0	5	5	5
Токсичный	0	5	3	3	0	0	5	3	3	3	3	3
Объем производства по исходному продукту, т/ч:												
до 0,25	5	5	5	5	5	0	5	5	5	5	5	0
до 3,5	0	0	5	5	3	3	5	5	5	5	5	5
более 3,5	0	0	5	3	3	5	0	3	3	5	0	5

Окончание табл. 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Продолжительность сушки в интенсивном режиме, с:												
0,5–3	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	5
3–30	0	0	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0
30–60	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0
60–600	3	3	0	0	0	3	3	3	3	5	3	0
3600	5	5	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0
¹ Сушилка с ретуром. ² Сушилка прямоточная. ³ Сушилка противоточная. ⁴ Сушилка с дроблением.												

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.

3.11. Расчет барабанной сушилки на прочность

Расчет на прочность элементов сушильных аппаратов с вращающимися барабанами сводятся к расчету 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

$l_{пр} = l_1 + l_2 - l_3$ части корпуса к его общей длине (рис. 3.79). Кроме того, если зазор между бандажом и корпусом недостаточен для

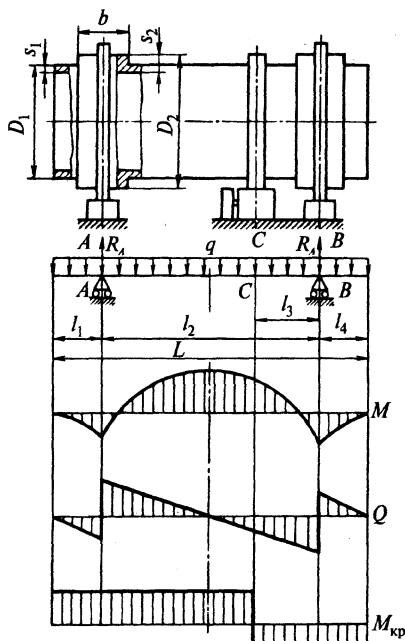


Рис. 3.79. К расчету корпуса барабана

свободного температурного расширения последнего, в подбандажной обечайке 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 $s_1 = (0,007 \dots 0,01) D_1$ и $s_2 = (1,5 \div 2,0) s_1$ 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 $q = (G_1 + G_2)/L$.

Анализ влияния сил, возникающих в зацеплении венцов шестерни, показывает, что при работе аппарата результирующая этих

сил направлена вверх и частично компенсирует действие сил тяжести; поэтому при расчете корпуса сушилки с допущением в пользу запаса прочности можно пренебречь усилиями в зацеплении.

Эпюры изгибающих моментов M , крутящих моментов $M_{кр}$, а также перерезывающих сил Q , возникающих в корпусе аппарата, приведены на рис. 3.79.

Определим расчетные моменты:

- ♦ максимальные изгибающие моменты M_1 , M_2 , Н·м, действующие соответственно в середине пролетной обечайки и в левой подбандажной обечайке:

$$M_1 = \frac{G_1 + G_2}{8}(l_2 - 2l_1); \quad M_2 = \frac{G_1 + G_2}{2L}l_1^2;$$

- ♦ изгибающие моменты, Н·м, действующие в месте стыка пролетной и подбандажной обечайек соответственно при $L > 4l_1$ и $L < 4l_1$:

$$M_3 = \frac{G_1 + G_2}{8L}(4l_1^2 + b - 4l_1b); \quad M_3 = \frac{G_1 + G_2}{8L}(4l_1^2 + b^2 - 2l_2b),$$

где b — ширина подбандажной обечайки, мм;

- ♦ крутящий момент $M_{кр1}$, Н·м, действующий на левую от венца (большей длины) часть корпуса аппарата:

$$M_{кр1} = 9,55 \cdot 10^6 \frac{N\eta}{n_\sigma L}(l_1 + l_2 - l_3),$$

где N — мощность электродвигателя, кВт; η — КПД привода; n_σ — 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

$$Q_2 = 0,5(G_1 + G_2)(l_2 - b)/L.$$

Определим расчетные напряжения:

- ♦ в пролетной части обечайки

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{W_{x1}};$$

♦ в подбандажной части

$$\sigma_2 = \frac{\sqrt{M_2^2 + M_{\text{кр1}}^2}}{W_{x2}}; \tau_1 = \frac{Q_1 S_{x2}}{[2l_{x2}(s_2 - c)]};$$

♦ в месте стыка пролетной и подбандажной частей обечайки

$$\sigma_3 = \frac{\sqrt{M_3^2 + M_{\text{кр1}}^2}}{\phi W_{x1}}; \tau_2 = \frac{Q_2 S_{x1}}{2l_{x1}(s_1 - c)\phi}.$$

$$\text{Здесь } l_{x1} = \frac{\pi D_1^3 (s_1 - c)}{8} \text{ и } l_{x2} = \frac{\pi D_2^3 (s_2 - c)}{8} \quad - \text{ моменты инерции}$$

площади поперечных сечений соответственно пролетной и подбандажной частей обечайки, мм⁴; D_2 — наружный диаметр подбандажной обечайки, мм; $W_{x1} = 2l_{x1}/D_1$ и $W_{x2} = 2l_{x2}/D_2$ — моменты сопротивления поперечных сечений соответственно пролетной и подбандажной обечайки, 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

$$\sigma_1 \leq [\sigma]_k; \sigma_2 \leq [\sigma]_k; \sigma_3 \leq [\sigma]_k; \tau_1 \leq [\tau]_k; \tau_2 = [\tau]_k,$$

где $[\sigma]_k$ — допускаемое напряжение для материала корпуса при расчетной температуре, МПа; $[\tau]_k$ — допускаемое касательное напряжение материала корпуса при расчетной температуре, МПа.

Если расчетные напряжения заметно меньше допускаемых, то принимают меньшие значения s_1 , s_2 и повторяют расчет.

Если зазор Δ между корпусом и бандажом недостаточен, т.е. при $0,5 \alpha_k D_1 (t_k - t_0) \geq \Delta$ возникают температурные напряжения в местах посадки бандаж на корпусе (α_k — температурный коэффициент линейного расширения материала корпуса, °C⁻¹; t_k — температура корпуса аппарата в рабочих условиях, °C; $t_0 = 20$ °C — температура, при которой выполняют сборку аппарата).

При расчете температурных напряжений будем рассматривать корпус I как бесконечно длинный цилиндр радиусом r_k со сплошной накладкой радиусом r_n , на которую установлен без зазора или с

недостаточным для свободного температурного расширения корпуса зазором бандаж радиусом r_6 (рис. 3.80).

Обозначим температурные коэффициенты линейного расширения накладки и бандажа через α_n и α_6 , толщину накладки и бандажа — через s_n и s_6 .

Мысленно рассечем 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, бандажа и корпуса:

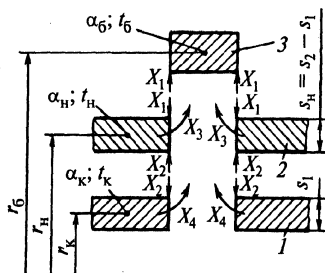


Рис. 3.80. Схема к расчету внутренних факторов в системе корпус — накладка — бандаж

$$\omega_n = -X_1 \delta_{11}^n + X_2 \delta_{12}^n + X_3 \delta_{13}^n + \alpha_n r_n (t_n - t_0);$$

$$\omega_6 = \alpha_6 r_6 (t_6 - t_0) + 2X_1 \delta_{11}^6;$$

$$\omega_k = -X_2 \delta_{22}^k + X_4 \delta_{24}^k + \alpha_k r_k (t_k - t_0),$$

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, °С; индексы «н», «б», «к» соответствуют накладке, бандажу, корпусу.

В условиях совместной деформации бандажа и накладки $\omega_n - \omega_6 = 0$, т.е.

$$X_1 \delta_{11}^n - X_2 \delta_{12}^n - X_3 \delta_{13}^n - \alpha_n r_n (t_n - t_0) + \alpha_6 r_6 (t_6 - t_0) + 2X_1 \delta_{11}^6 = 0. \quad (3.30)$$

Аналогично запишем равенства:

- ♦ радиальных перемещений по линии сопряжения накладки и корпуса

$$-X_1 \delta_{21}^n + X_2 \delta_{22}^n + X_3 \delta_{23}^n + X_4 \delta_{24}^n - X_4 \delta_{24}^k + \alpha_n r_n (t_n - t_0) - \alpha_k r_k (t_k - t_0) = 0; \quad (3.31)$$

- ♦ углов поворота по линии сопряжения между накладкой и бандажом

$$-X_1 \delta_{31}^H + X_2 \delta_{32}^H + X_3 \delta_{33}^H = 0; \quad (3.32)$$

♦ углов поворота по линии сопряжения между накладкой и корпусом

$$-X_2 \delta_{42}^K + X_4 \delta_{44}^K = 0. \quad (3.33)$$

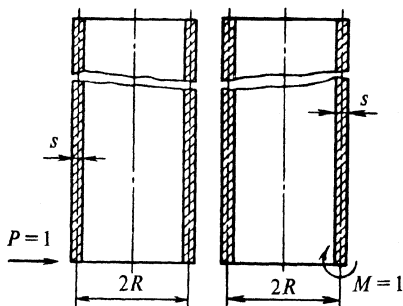


Рис. 3.81. Схема нагружения края цилиндра единичной силой

Рис. 3.82. Схема нагружения края цилиндра единичным моментом

При нагружении полубесконечного длинного цилиндра диаметром $2R$ и толщиной s по краю единичной перерезывающей силой (рис. 3.81) радиальное, мм/Н, и угловое, $1/\text{Н}$, перемещения края цилиндра определяются как

$$|\delta_R^P| = (2\beta^3 D)^{-1}; |\delta_\varphi^P| = (2\beta^2 D)^{-1}.$$

При нагружении такого цилиндра по краю единичным изгибающим моментом (рис. 3.82) радиальное и угловое перемещения края цилиндра соответственно:

$$|\delta_R^M| = (2\beta^2 D)^{-1}; |\delta_\varphi^M| = (\beta D)^{-1};$$

здесь $\beta = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{Rs}}$, мм^{-1} ; $D = \frac{Es^3}{12(1-\mu^2)}$, $\text{Н}\cdot\text{мм}$.

Выше было условлено рассматривать корпус и накладку как полубесконечный цилиндр, поэтому канонический коэффициент

$$\delta_{11}^H = (2\beta_n^3 D_n)^{-1}, \text{ где для накладки } \beta_n = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{r_n s_n}}; D_n = \frac{E_n s_n^3}{12(1-\mu^2)};$$

$$\text{для корпуса } \beta_k = \frac{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}}{\sqrt{r_k s_1}}; D_k = \frac{E_k s_1^3}{12(1-\mu^2)}; E_n \text{ и } E_k - \text{модули}$$

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, $\text{мм}^2/\text{Н}$,

$$\delta_{11}^6 = \frac{r_6^2}{E_6 F_6},$$

где E_6 — модуль упругости материала бандажа, МПа; F_6 — площадь поперечного сечения бандажа, мм^2 .

Таким образом, систему уравнений (3.30)–(3.33), называемую канонической системой метода сил, можно представить в виде

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\beta_n^3 D_n} X_1 - \frac{1}{2\beta_n^3 D_n} X_2 - \frac{1}{2\beta_n^3 D_n} X_3 - \alpha_n r_n (t_n - t_0) + \alpha_6 r_6 (t_6 - t_0) + \\ & + \frac{2r_6^2}{E_6 F_6} X_1 = 0; \\ & - \frac{1}{2\beta_n^3 D_n} X_1 + \left(\frac{1}{2\beta_n^3 D_n} + \frac{1}{2\beta_k^3 D_k} \right) X_2 + \frac{1}{2\beta_n^3 D_n} X_3 - \frac{1}{2\beta_k^2 D_k} X_4 + \\ & + \alpha_n r_n (t_n - t_0) - \alpha_k r_k (t_k - t_0) = 0; \\ & - \frac{1}{2\beta_n^2 D_n} X_1 + \frac{1}{2\beta_n^2 D_n} X_2 + \frac{1}{2\beta_n D_n} X_3 = 0; \\ & - \frac{1}{2\beta_k^2 D_k} X_2 + \frac{1}{2\beta_k D_k} X_4 = 0 \end{aligned} \quad (3.34)$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2\beta_n^3 D_n} + \frac{2r_6^2}{E_6 F_6}; & -\frac{1}{2\beta_n^3 D_n}; & -\frac{1}{2\beta_n^3 D_n}; & 0 \\ -\frac{1}{2\beta_n^3 D_n}; & \frac{1}{2\beta_n^3 D_n} + \frac{1}{2\beta_k^3 D_k}; & \frac{1}{2\beta_n^2 D_n}; & -\frac{1}{2\beta_k^2 D_k} \\ -\frac{1}{2\beta_n^2 D_n}; & \frac{1}{2\beta_n^2 D_n}; & \frac{1}{2\beta_n D_n}; & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2\beta_k^2 D_k}; & 0 & \frac{1}{\beta_k D_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \alpha_n r_n (t_n - t_0) - \alpha_6 r_6 (t_6 - t_0) \\ \alpha_n r_n (t_n - t_0) + \alpha_k r_k (t_k - t_0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Решение системы (3.34) 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).

Температурные окружные напряжения, вызываемые силовыми факторами $X_2 = Q_T$ и $X_4 = M_T$ в корпусе аппарата, описываются так:

$$\sigma_t = \pm \frac{6\mu_k M_T}{s_2^2} - \frac{2\gamma_k \rho_k Q_T}{s_2} - \frac{2\gamma_k^2 M_T}{s_2^2},$$

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. 3.83). 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. 3.84), 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.

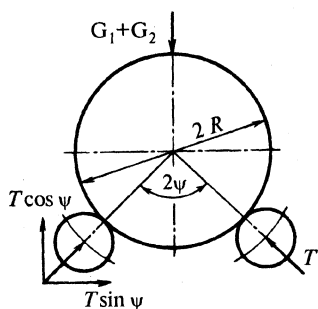


Рис. 3.83. Схема действия сил на ролик

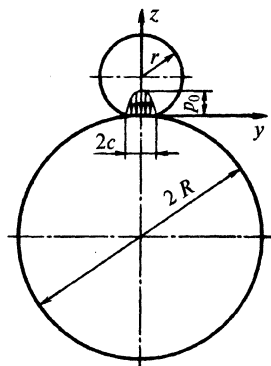


Рис. 3.84. Схема распределения контактного давления в ролике

Давление p , МПа, на площади контакта распределяется по ширине полоски по эллиптическому закону

$$\frac{p^2}{p_0^2} + \frac{y^2}{c^2} = 1,$$

$$p_0 = \sqrt{\frac{T}{\pi(1-\mu^2)b_1} \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \frac{R+r}{Rr}} \text{ — максимальное давление при } y=0.$$

Максимальное эквивалентное напряжение в зоне контакта $\sigma_{\text{экр}} = 0,6 p_0$, поэтому условие прочности при расчете бандажей и роликов имеет вид

$$0,6 p_0 \leq [\sigma]_6,$$

где $[\sigma]_6$ — допускаемое напряжение для материала бандажа.

В РД 26-01-158-86 условие прочности записано в форме

$$\sigma_{\text{экр}} = 0,42 \sqrt{\frac{G_1 + G_2}{\pi b(1-\mu^2)\cos\varphi} \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \frac{D_6 + d}{D_6 d}} \leq [\sigma]_a,$$

где D_6 и d — наружные диаметры соответственно бандажа и опорного ролика, мм.

Расчет бандажа на прочность при изгибе. Согласно РД 26-01-158-86, при определении изгибающего момента в бандаже рассматривают два случая: 1) температурный зазор между бандажом и корпусом позволяет последнему свободно расширяться;

2) этот зазор недостаточен для компенсации температурных деформаций. В первом случае считают, что сила тяжести корпуса с

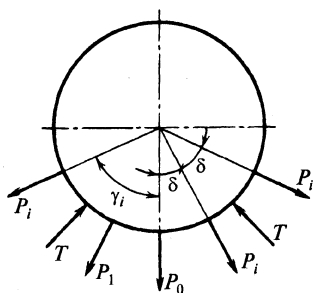


Рис. 3.85. Схема нагружения бандажа при его свободном расширении

материалом воспринимается только башмаками, расположенными в двух нижних квадрантах (рис. 3.85), в виде сосредоточенных сил в местах установки этих башмаков. Предполагают также, что реакция P_1 на башмак пропорциональна косинусу угла между осью башмака и вертикалью, т.е.

$$P_1 = P_0 \cos \gamma_i,$$

где P_0 — искомая сила.

Из условия равновесия

$$P_0 + 2P_1 \cos \delta + 2P_2 \cos 2\delta + \dots + 2P_n \cos (k\delta) = G_1 + G_2$$

$$\text{найдем } P_0 = \frac{G_1 + G_2}{1 + 2 \sum_{i=1}^k \cos^2 (i\delta)},$$

где k — число пар башмаков; δ — угол между двумя соседними башмаками, град.

В этом случае изгибающий момент максимален в сечении под опорным роликом:

$$M_{61} = \frac{(G_1 + G_2)(D_3 + D_4)}{4\pi k} \left[\frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2} + \frac{2k}{\cos \beta} - \frac{2k}{8} (\pi - \beta) \operatorname{tg} \beta - \frac{\pi}{8} \operatorname{ctg} \beta \right],$$

где D_3 и D_4 — внутренний и наружный диаметры бандажа, мм; $\beta = 2\pi (180 - \varphi) / 360$; 2φ — угол между опорными роликами, град.

При расчете бандажей перерезывающими силами обычно пренебрегают, и изгибные напряжения в бандаже

$$\sigma_{61} = M_{61} / W_6,$$

где $W_6 = b_1 h^2 / 6$ — момент сопротивления поперечного сечения бандажа, мм³; h — высота бандажа, мм.

Определяя изгибающий момент в бандаже при отсутствии температурного зазора или недостаточном зазоре, принимают,

что усилие контакта между корпусом и бандажом распределено равномерно и передается на бандаж в виде равных сосредоточенных сил P , приложенных в местах установки башмаков (рис. 3.86). Эти силы рассчитывают из условия совместности радиальных перемещений бандажа и корпуса при воздействии температуры:

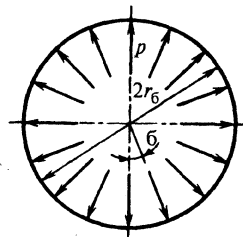


Рис. 3.86. Схема нагружения бандажа при отсутствии температурного зазора

$$\Delta_t - \Delta_p = \omega, \quad (3.35)$$

$$\Delta_t = \alpha_k r_k (t_k - t_0) \quad (3.36)$$

где Δ_t — изменение среднего радиуса корпуса под действием температуры, мм;

$$\Delta_p = \frac{Pk}{\pi r_k} \frac{r_k^2 \beta_k}{2 E_k s_k} - \quad (3.37)$$

уменьшение среднего радиуса корпуса аппарата под действием силы P , мм;

$$\omega = \frac{Pr_6^3}{E_6 I_6} \frac{1}{2 \sin^2 \frac{\beta}{2}} \left(\frac{\delta}{4} + \frac{\sin \delta}{4} - \frac{2}{\delta} \sin^2 \frac{\delta}{2} \right) - \quad (3.38)$$

радиальное перемещение бандажа относительно его оси, мм, в точках приложения силы; $I_6 = b_1 h^3 / 12$ — 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.

Можно считать $T = 0$ (упрощением в сторону запаса) и рассматривать поведение бандажа под действием только сил P . С учетом (3.35)–(3.38) найдем

$$P = \frac{2\pi E_6 I_6 F_k s_k \sin^2 \frac{\delta}{2} \alpha_k r_k (t_k - t_0)}{\pi r_6^2 E_k s_k \left[\frac{\delta}{4} + \sin \frac{\delta}{4} - \frac{2 \sin^2 \frac{\delta}{2}}{\delta} \right] + k r_k \beta_k E_6 I_6 \sin^2 \frac{\delta}{2}}.$$

Изгибающий момент, Н·мм, обусловленный этой силой, максимален в точке ее приложения:

$$M_{62} = Pr_6 \left(\frac{k}{\pi} - 0,5 \operatorname{ctg} \frac{\pi}{2k} \right),$$

откуда напряжение изгиба, МПа, $\sigma_{62} = M_{62} / W_6$ и условие прочности при изгибе

$$\max \{ \sigma_{61}; \sigma_{62} \} \leq [\sigma]_6.$$

3.12. Перспективные массообменные процессы и техника

После 1970-х гг. в передовых странах стало быстро развиваться научно-технологическое направление, связанное с использованием сверхкритических флюидов в качестве экстрагентов и растворителей. Применение таких экстрагентов в экстракционных процессах можно рассматривать как один из путей решения проблем энергосбережения и удовлетворения все возрастающих требований к экологичности продуктов питания, материалов и технологических процессов в целом.

Сверхкритические флюиды — это, как правило, газы [$T = (1,0 \dots 1,2) T_{кр}$; $P = (1 \dots 5) P_{кр}$], которые в окрестностях критической точки жидкость—пар характеризуются аномальным ростом восприимчивости всей системы к внешним воздействиям. Вследствие этого значительно возрастает экстракционная способность, проявляющаяся в большей селективности и более полном извлечении, нежели это имеет место в традиционных жидкостных экст-

рационных процессах. Критические параметры некоторых веществ, используемых в качестве сверхкритических экстрагентов, приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Критические параметры некоторых веществ, используемых в качестве сверхкритических экстрагентов

Вещество	Критическая температура $T_{кр}$, К	Критическое давление $P_{кр}$, МПа	Критическая плотность ρ , кг/м ³
Метан	190,55	4,595	162,7
Ксенон	289,74	5,84	1110
Этилен	282,35	5,0404	214
Хлортрифторэтан	302	3,87	578
Диоксид углерода	304,14	7,378	467,8
Этан	305,33	4,872	206,5
Шестифтористая сера	318,69	3,761	734
Бромтрифторметан	340	3,98	745
Хлортрифторэтан	353	3,16	613
Пропилен	365	4,5	233
Пропан	369,82	4,247	221
Аммиак	405,4	11,1	235
н-Бутан	425,16	3,796	227,85
Диэтиловый спирт	467	3,64	265
н-Пентан	470	3,37	237
н-Гексан	507	2,9	233
Ацетон	509	4,70	278
Метанол	513	8,04	272
Бензол	562	4,84	302
Толуол	592	4,05	319
Вода	647,1	32,06	322,2
Этанол	516	6,3	276

Наиболее широко применяемым в сверхкритическом состоянии экстрагентом является диоксид углерода CO_2 (на рис. 3.87 показана P – T -фазовая диаграмма чистого CO_2). Это прежде всего обусловлено его нетоксичностью, пожаровзрывобезопасностью, дешевизной и удобными критическими параметрами, позволяю-

щими проводить экстракционные процессы при температурах, близких к температуре окружающей среды.

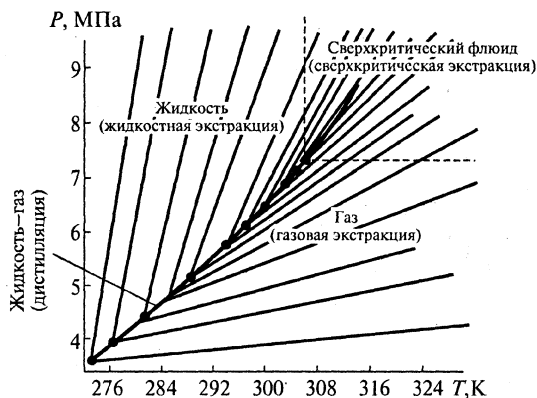


Рис. 3.87. P – T -фазовая диаграмма чистого диоксида углерода для различных изохор (штриховыми линиями ограничена сверхкритическая область)

Значительное преимущество использования сверхкритических флюидов в качестве экстрагентов — минимизация или даже отсутствие энергозатрат на этапе регенерации растворителя, которое в традиционных процессах чаще всего реализуется в виде процесса дистилляции. Кроме того, сверхкритические экстракционные процессы отличаются большей глубиной и чистотой получаемых продуктов.

В большинстве случаев регенерация экстрагента и выделение экстракта осуществляются на принципе снижения растворяющей способности экстрагента через понижение давления (изотермический цикл) или изменение температуры (изобарический цикл) на этапе сепарации, что очевидным образом влечет за собой выпадение экстракта в виде жидкости или мелкодисперсной твердой фазы и возврат экстрагента в рецикл. В некоторых случаях для повышения экономичности на этапе сепарации при извлечении экстракта используют адсорбенты, мембранные элементы и даже дистилляцию. Сверхкритический экстракционный процесс, реализующий регенерацию на основе снижения давления, продемонстрируем на примере схемы пилотной установки

для переработки пальмового масла (рис. 3.88) с целью выделения жирных кислот.

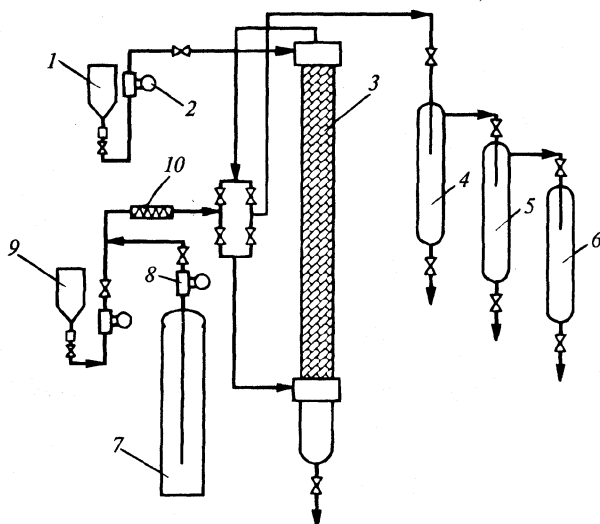


Рис. 3.88. Схема пилотной установки для переработки пальмового масла

Пальмовое масло из емкости 1 подается жидкостным насосом высокого давления 2 в верхнюю часть экстрактора 3. Жидкий диоксид углерода из баллона 7 питательным насосом 8 прокачивается через подогреватель 10, в котором переводится в сверхкритическое состояние, а затем подается в нижнюю часть экстрактора 3. Перед подогревателем в поток чистого CO_2 добавляется этанол из сосуда 9 для повышения растворяющей способности сверхкритического диоксида углерода. При противоточном движении масла и диоксида углерода в экстракторе 3 происходит процесс массообмена.

Рафинат собирается в донной части экстрактора, а экстракт выделяется с верхней части и поступает в последовательно расположенные сепараторы 4–6. Пошаговое снижение давления в этих сепараторах обеспечивает фракционирование экстракта.

Поскольку жирные кислоты представляют собой полярные вещества, то наиболее эффективным средством интенсификации

их извлечения из пальмового масла является добавление в диоксид углерода полярного этанола для увеличения полярности экстрагента в целом, что и сделано в рассмотренной установке.

Исследования показали, что наиболее экономичен процесс очистки при следующих параметрах: температура 50 °С, давление 17,1 МПа, добавление этанола в CO₂ в количестве 63% мольн., массовое соотношение экстрагента и исходного продукта 40. При таком сочетании содержание жирных кислот в рафинате снижено до 0,04%.

Несмотря на то что использование сверхкритических флюидов в экстракционных процессах требует повышенных температур и давления, обеспечивается энергосберегающий характер сверхкритических экстракционных процессов, о чем свидетельствуют показатели реальных технологических процессов. В промышленном масштабе был реализован процесс деасфальтизации тяжелой нефти путем экстрагирования асфальтенов и смол сверхкритическим пропаном (процесс ROSE). В табл. 3.7 представлено сравнение энергозатрат, имеющих место в обычном (жидкостном) и сверхкритическом вариантах реализации процесса деасфальтизации тяжелой нефти [6].

Т а б л и ц а 3.7. Сравнение энергозатрат в процессах жидкостной и сверхкритической экстракций

Параметр	Энергозатраты, приходящиеся на 1 м ³ загрузки	Удельная стоимость энергоносителя, у.е.	Стоимость переработки 1 м ³ загрузки, у.е.
<i>Процесс жидкостной экстракции</i>			
Электроэнергия	17,6 кВт	0,050	0,88
Водяной пар	610,0 кг	0,018	10,98
Топливо	910,0 МДж	0,006	5,46
Охлаждающая вода	37,0 м ³	0,013	0,48
Итого			17,80
<i>Процесс сверхкритической экстракции</i>			
Электроэнергия	17,6 кВт	0,050	0,88
Водяной пар	34,0 кг	0,018	0,61
Топливо	640,0 МДж	0,006	3,84
Итого			5,33

Энергозатраты для данного процесса сверхкритической экстракции в 3 раза ниже, чем в системе жидкость—жидкость. В процессе концентрирования водно-этанольной смеси с использованием в качестве экстрагента сверхкритического пропана (бутана) можно получить 100%-ную концентрацию целевого компонента, расходуя при этом около 3400 кДж/кг, тогда как в тех же целях на осуществление процесса азеотропной дистилляции затрачивается около 10 000 кДж/кг.

Конечно, применение флюидов как экстрагентов требует несколько другого оборудования по сравнению с традиционной жидкостной экстракцией. В частности, возникает необходимость разработки и использования аппаратов повышенной прочности, т.е. аппаратов и арматуры высокого давления, что влечет за собой повышенные капитальные затраты. И хотя ведется усиленный поиск более экономичных вариантов реализации сверхкритических экстракционных процессов, но пока эти процессы весьма дорогие. Поэтому на сегодняшний день сверхкритические флюиды как растворители следует использовать в тех случаях, когда традиционные подходы не позволяют выполнить предъявляемые требования.

В последнее десятилетие в промышленности многих стран внедряются новые насадки (регулярные и нерегулярные) взамен тарельчатых контактных устройств.

Успешные промышленные испытания прошла нерегулярная насадка «Инжехим-2000» (рис. 3.89), выпуск которой освоен ОАО «Казаньоргсинтез». Она выполнена в виде тела вращения, поверхность которой образована полосами с симметричными выступами. За счет изогнутой формы поверхности достигается более равномерное распределение насадки по объему слоя, что в свою очередь благоприятно сказывается на равномерности распределения фаз внутри слоя насадки и способствует улучшению гидродинамических условий работы колонны.

Достаточно несложная конструкция насадки позволяет изготавливать ее методом листовой штамповки, что снижает себестоимость. По аналогии с табл. 3.2 сравнительная оценка насадки представлена в табл. 3.8.

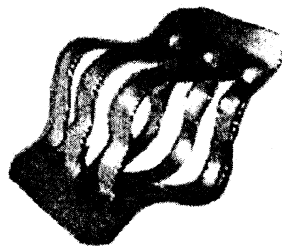


Рис. 3.89. Нерегулярная насадка «Инжехим 2000»

Таблица 3.8. Сравнительная характеристика насадки «Инжехим-2000» и колец Рашига

Тип насадки	Производительность	Эффективность	Гидравлическое сопротивление
Кольца Рашига	1	1	1
Инжехим-2000	2	1,6	0,2

Характерной особенностью этих насадок является способность обеспечивать высокую разделяющую способность в широком диапазоне нагрузок по газовой и по жидкой фазе. Насадки пригодны для колонн, работающих как под разрежением, так и при атмосферном и избыточном давлениях.

На ОАО «Нижнекамскнефтехим» разработана и используется рулонно-регулярная насадка ИРМ (рис. 3.90). Насадка представляет собой чередующиеся гофрированные металлические ленты, на боковых поверхностях которых выполнены лепестки в виде круговых сегментов. Характеристика насадки: свободный объем $0,87 \text{ м}^3/\text{м}^3$; удельная поверхность $244,7 \text{ м}^2/\text{м}^3$; ВЭТС — высота, эквивалентная теоретической ступени, — $0,4\text{--}0,5 \text{ м}$.

В ЦКБН ОАО «Газпром» разработана регулярная насадка с наклонным движением потоков (рис. 3.91) и налажено ее производство. Техническая характеристика насадки: свободный объем $0,78\text{--}0,96 \text{ м}^3/\text{м}^3$; удельная поверхность $135\text{--}264 \text{ м}^2/\text{м}^3$; удельное сопротивление $50\text{--}80 \text{ мм вод. ст.}$

В некоторых случаях при понижении концентрации какого-либо компонента в газе процесс абсорбции переходит из диф-

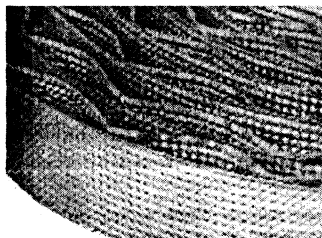


Рис. 3.90. Рулонно-регулярная насадка «ИРМ»

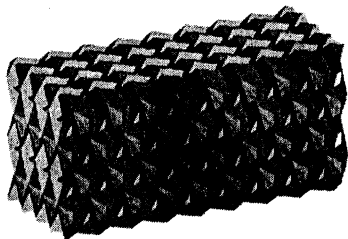


Рис. 3.91. Регулярная насадка ЦКБН ОАО «Газпром»

фузионной области в область, близкую к кинетической, например, процесс абсорбции диоксида азота низкой концентрации. Для его интенсификации необходимо увеличить реакционный объем жидкой фазы, где протекает реакция гидролиза N_2O_4 . Поэтому при использовании для абсорбции тарельчатых колонн необходимо иметь повышенную удерживающую способность контактного устройства по жидкости. В этом случае может быть полезно вихревое контактное устройство, разработанное для абсорбции оксидов азота и представленное на рис. 3.92.

Газовая фаза поступает в тангенциальный завихритель 2, где получает вращательное движение и вовлекает в это движение жидкость, поступающую из тарелки 3 через щели 4 в контактный патрубок 1. Для сепарации жидкости от газа предусмотрен отбойник 5. За счет выпуклой формы контактного патрубка 1 и центробежных сил достигается повышенная удерживающая способность по сравнению с другими известными контактными устройствами.

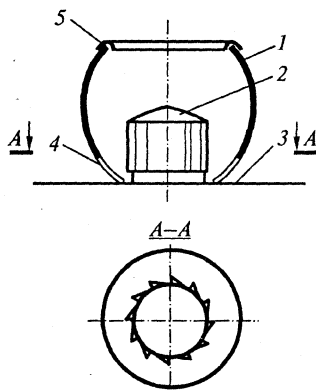


Рис. 3.92. Контактный элемент выпуклой формы

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему массообменные машины и аппараты имеют такое название?
2. Чем различаются крепление и уплотнение тарелок в корпусе цельносварных колонн и колонн в царговом исполнении?
3. Какие технологические параметры характеризуют работу массообменных аппаратов? Дайте определение этих параметров.
4. Чем принципиально отличается конструкция клапанной тарелки от конструкций остальных барботажных тарелок?
5. Чем отличается работа тарелок с переливными устройствами и провальных?

6. В чем преимущество и недостатки насадочных колонн по сравнению с тарельчатыми?
7. Что такое регулярная насадка? Нерегулярная?
8. Зачем устанавливаются перераспределительные тарелки в колоннах с нерегулярной насадкой?
9. Почему при монтаже предъявляются повышенные требования к горизонтальности ситчатых тарелок?
10. Почему барабанные сушилки нашли наиболее широкое использование несмотря на свою громоздкость?
11. В чем заключается принцип сушки материала в аэрофонтанной сушилке?
12. Какие распыливающие устройства используются в распылительных сушилках?
13. В каких случаях необходимо использовать вакуумные сушилки? Какие вакуумные сушилки вы знаете?
14. Какие преимущества и недостатки имеют сверхкритические флюиды как экстрагенты в сравнении с традиционными жидкостными экстрагентами?

ГЛАВА 4 МАШИНЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

4.1. Фильтры для жидкостей

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, не смешивающейся с первой (эмульсии). *Газовые неоднородные системы*, называемые чаще аэрозолями, состоят из газовой сплошной фазы и твердых или жидких взвешенных в ней частиц (пыли, дымы, 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.

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 и тонкие суспензии (более 100 мкм и 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 применяют различные ткани, проволочные и полимерные сетки,

бумагу, металлические, стеклянные, керамические плоские пористые пластины и полые цилиндры и др. Довольно широко распространены также слои зернистого материала — песка, гравия, угля, древесных опилок, диатомита, который используют 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, чтобы получался по возможности чистый фильтрат. 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, 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.

В подавляющем большинстве случаев фильтры непрерывного действия работают под вакуумом. К ним относятся вакуум-фильтры барабанные, дисковые, тарельчатые, карусельные и ленточные.

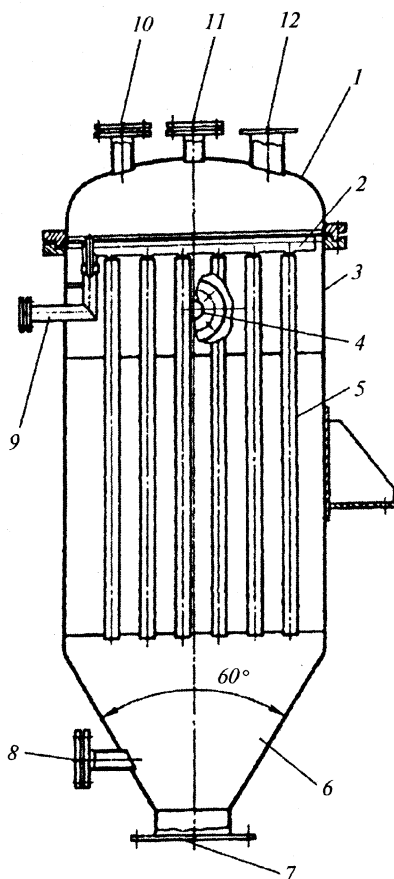


Рис. 4.1. Фильтр под давлением ПТЖ5-3К

Патронные фильтры под давлением предназначены для осветительного фильтрования суспензий с малым содержанием твердой фазы, разделения суспензий с содержанием до 5% твердой фазы с последующей промывкой осадка, для сгущения суспензий, для

разделения труднофильтруемых, вязких, легколетучих, окисляемых, токсичных, воспламеняющихся и взрывоопасных суспензий.

Патронный фильтр состоит из вертикального цилиндрического корпуса, откидной или съемной крышки и, как правило, конического днища. Внутри корпуса установлена решетка или коллектор с секциями, на которых закреплены полые вертикальные фильтровальные элементы — патроны.

Фильтры изготовляют с патронами нескольких типов: металлическими (из перфорированной трубы или пружинного каркаса), обтянутыми тканью; металлокерамическими (из полых цилиндров с пористой стенкой из металлокерамики). Фильтры комплектуются системой автоматики, которая предусматривает автоматическое и полуавтоматическое управление работой фильтра.

На рис. 4.1 представлен фильтр ПТЖ5-3К — патронный, с тканевой экипировкой, жидкостный, с поверхностью фильтрования 5 м^2 , герметизированный, выполненный из коррозионно-стойкой стали. Фильтр предназначен для фильтрования суспензии циркуляционного электролита, может применяться и в других производствах.

Фильтр представляет собой цилиндрический корпус 3 с коническим днищем 6 и эллиптической съемной крышкой 1. Внутри корпуса установлен коллектор 2 с секциями, на которых закреплены фильтровальные элементы — патроны 5. Фильтровальный патрон состоит из перфорированного цилиндра и надетого на него рукава из фильтровальной ткани, поверх которого наматывается проволока.

Подача суспензии происходит через штуцер 4. За счет давления в аппарате (не более $0,3 \text{ МПа}$) фильтрат через ткань проникает в патрон, откуда через коллектор 2 удаляется через штуцер 9.

Сброс осадка с патронов осуществляется пневмогидравлическим ударом с помощью подачи воздуха под давлением около 1 МПа в патроны через штуцер 9; выгрузка осадка — через шиберную задвижку 7. Штуцеры 10, 11, 12, 8 предусмотрены соответственно для контроля давления, отвода воздуха, датчика уровня, подачи воздуха для барботажа суспензии.

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 *плиточно-рамный фильтр-пресс* показан на рис. 4.2. Фильтровальными перегородками в нем служат прямоугольные

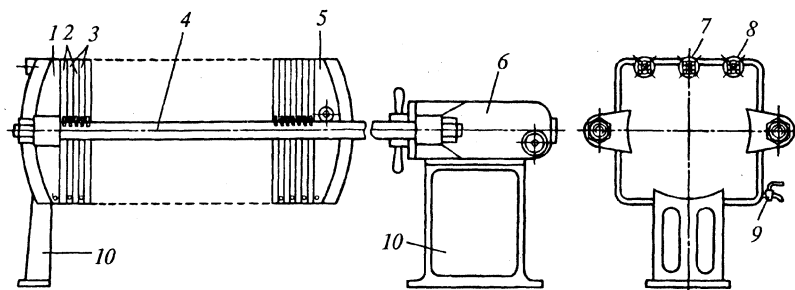


Рис. 4.2. Плиточно-рамный фильтр-пресс

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 10 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 в

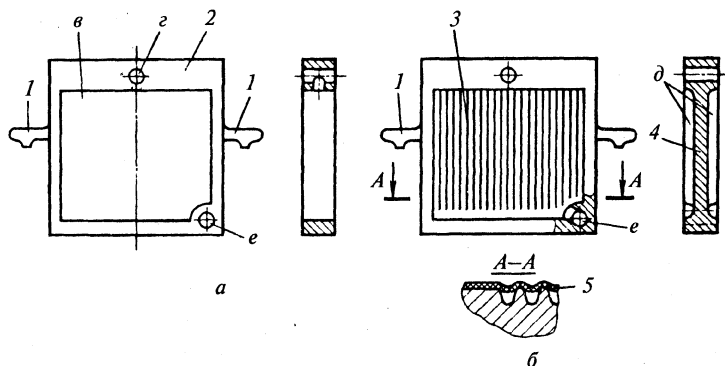


Рис. 4.3. Фильтр-пресс:
а — рама; б — плита

опорной плите 1 предусмотрены штуцеры 7 и 8. Плиты фильтров с раздельным отводом фильтрата снабжены кранами 9.

Рама (рис. 4.3) имеет сквозную полость *в* и гладко отбортованные 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 5. Плиты и рамы опираются приливами (ручками) 1 на опорные брусья. В краях плит и рам есть 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.

В фильтр-прессах с раздельным отводом фильтрата из каждой плиты сквозные отверстия *е* отсутствуют, 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. Это позволяет отключить закрытием кранов те плиты, из которых выходит загрязненный фильтрат (например, из-за повреждения фильтровальной ткани).

По окончании фильтрации осадок промывается жидкостью, после чего происходит осушка осадка сжатым воздухом, подаваемым по каналу для суспензии или промывной жидкости. Затем зажим освобождают, плиты и рамы поочередно отодвигают по опорным брусьям 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 на единицу 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 ограничивают его применимость, и он в основном пригоден для мало-концентрированных суспензий. Фильтр не герметичен, поэтому недопустимо его использование, если жидкая фаза суспензии или

промывная жидкость является легколетучей, ядовитой или пожароопасной.

Камерный фильтр-пресс по устройству аналогичен плиточно-рамному. Основное отличие состоит в том, что чередующиеся плиты и рамы заменены плитами 1 (рис. 4.4), по конструкции несколько отличающимися от плит рамного фильтр-пресса. Гладкая поверхность по краям каждой плиты приподнята над краями ребер 2 во впадинах, образуя борт. Между соседними

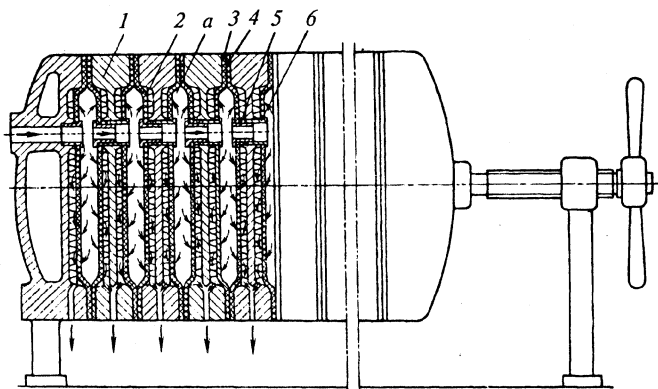


Рис. 4.4. Камерный фильтр-пресс

плитами зажаты два листа фильтровальной ткани (две салфетки) 3 и 4. После сжатия 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. Сусpendingия распределяется по камерам через отверстия в бобышках плит. 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 сусpendingия. Фильтрат отводится так же, как в рамном фильтр-прессе; возможен и общий, и отдельный отвод фильтрата из плит.

Из-за отсутствия рам камерный фильтр-пресс имеет меньшие размеры, чем рамный с той же поверхностью фильтрации. При обработке малоцентрированных труднофильтруемых сусpendingий, вследствие значительных допускаемых давлений, камерные

фильтры-прессы предпочтительнее рамных, хотя имеют малый объем пространства для осадка.

Автоматизированные камерные фильтр-прессы. Существенный недостаток, затрудняющий использование обычных плиточно-рамных и камерных фильтр-прессов, — длительность и трудоемкость выгрузки осадка, проводимой обычно вручную. Поэтому несмотря на простоту конструкции, компактность и низкую удельную металлоемкость их заменяют фильтр-прессами с механической выгрузкой осадка.

В качестве примера рассмотрим автоматизированный камерный фильтр-пресс ФПАКМ (рис. 4.5). Фильтр состоит из пакета

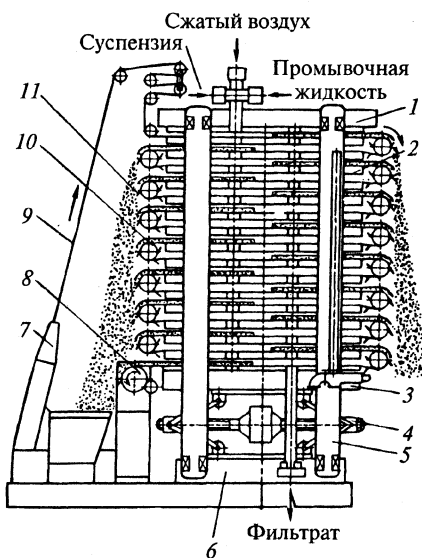


Рис. 4.5. Схема автоматизированного фильтр-пресса ФПАКМ

горизонтальных фильтровальных плит 2, закрепленных на раме, имеющей возможность 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 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 фильтрации 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 очищается 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 с 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 резиноканальными шлангами с соответствующими патрубками плит, служит для привода отжимных диафрагм водой, подаваемой под давлением в специальные полости плит.

Устройство плит схематически показано на рис. 4.6. Каждая плита (кроме верхней и нижней) состоит из двух частей 1 и 2, между которыми зажата по краям резиновая отжимная диафрагма 4.

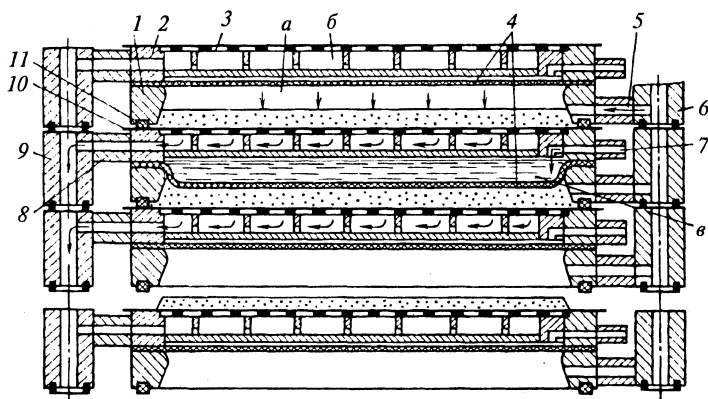


Рис. 4.6. Устройство плит фильтр-пресса ФПАКМ

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 а и патрубками 5 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 6, и через патрубки 5 в нижние части плит подается суспензия. Проходя через фильтровальную ткань, она разделяется на осадок, остающийся на ткани, и фильтрат, отводимый из верхних полостей 6 через патрубки 8 в патрубки 9, образующие отводной коллектор. После накопления осадка определенной толщины он подвергается осушке сжатым воздухом, подаваемым также через приемный коллектор. Воздух вытесняет жидкость из полостей а и пор осадка. При этом осадок дополнительно отжимается упругими диафрагмами 4, давящими на осадок. Частицы осадка сближаются, и из его пор вытесняется жидкость. К диафрагмам из специального коллектора через патрубки 7 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 такого 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, например серия фильтров ФПАВ с поверхностями фильтрации от 50 до 600 м², предназначенных для установок очистки сточных вод (для обезвоживания шлама отстойника).

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. Осадок снимается с барабана при его вращении ножом или другим заменяющим его устройством.

Барабанный ячейковый вакуум-фильтр с наружной фильтрующей поверхностью — наиболее распространенный фильтр непрерывного действия. Основной рабочий элемент машины — барабан 4 (рис. 4.7), пространство между стенками которого разделено

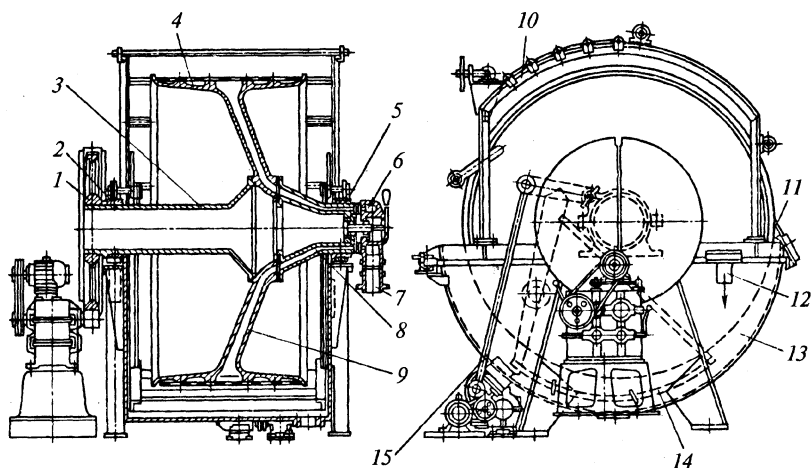


Рис. 4.7. Барабанный ячейковый вакуум-фильтр с наружной фильтрующей поверхностью

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. Одновременно трубки служат 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, и приводится во вращение с частотой вращения $10\text{--}50\text{ ч}^{-1}$ через зубчатое колесо 1, закрепленное на цапфе 3. Нижняя часть барабана погружена в суспензию, подаваемую в корыто 13, которое 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, натянутой 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. На распределительной шайбе, закрепленной на неподвижном корпусе распределительного устройства, предусмотрены 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. 4.8), 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.

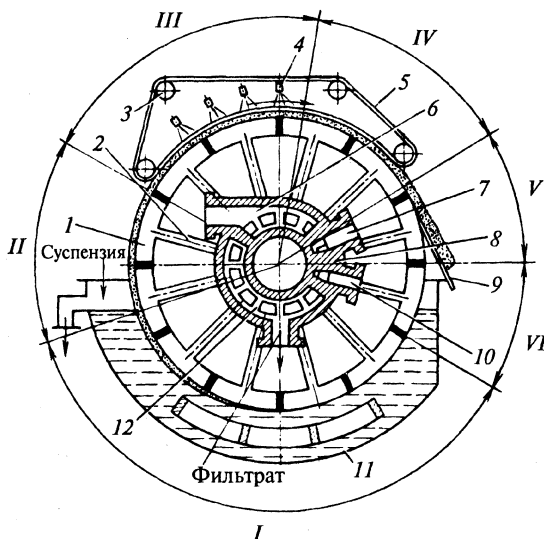


Рис. 4.8. Схема работы барабанного ячеякового вакуум-фильтра с наружной фильтрующей поверхностью

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 фильтро-

вальной ткани осадок от нее отделяется и падает на нож 9, с которого соскальзывает в бункер — сборник осадка.

В зоне VI происходит регенерация (очистка) ткани. Здесь ячейка погружена в суспензию, и в нее через штуцер 10 подается сжатый воздух. При барботаже воздуха через суспензию ткань отмывается от частиц, застрявших в ее порах.

Барабаны бывают закрытые с торцов и открытого типа (см. рис. 4.7) — без торцовых стенок. Открытые барабаны проще по конструкции и легче, но их стенки и отводные трубки 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. Во втором случае в качестве нижнего слоя 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.

Возможно также посекционное крепление ткани без оббивки барабана проволокой. Для уплотнения ткани в пазах используют резиновый шнур, хлопчатобумажный или пеньковый канат, деревянные рейки. При посекционном креплении можно использовать отдельные отрезки ткани на несколько или даже на одну ячейку и быстро заменять ее на поврежденных участках.

Для снятия осадка с барабана служат различные устройства. Неподвижный нож в сочетании с пульсационной отдувкой применяют для снятия сравнительно толстых осадков (толщиной более 8–10 мм), т.е. при обработке легкофильтрующихся суспензий. Чтобы увеличить производительность 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.

Более тонкие осадки (1,5–8 мм) снимают с помощью подвижного ножа, следующего за поверхностью ткани. Нож поворачивается в опорах, легко прижатый 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, предусмотрены ножи с микрометрической подачей. В этом случае на барабан фильтрованием вспомогательной суспензии предварительно наносят толстый слой (50–75 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 изготавливают с различными углами погружения барабана в суспензию. Фильтры малого погружения (угол погружения 80–100°) 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°. Наибольший угол погружения (210–270°) у фильтров для низкоконцентрированных суспензий с волокнистой твердой фазой.

Реже используются барабанные вакуум-фильтры других конструкций: со сходящей фильтровальной тканью, ячейковые без распределительного устройства, безъячейковые, барабанные фильтры-сгустители, с внутренней фильтрующей поверхностью.

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. 4.9) насажены на полый ячейковый вал 4, опирающийся на подшипники 3 и 6. Диски почти до уровня вала погружены в корыто 11 для суспензии, сварен-

ное из листовой стали и закрепленное 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 переливным патрубком, а для опорожнения корыта при ремонте в нижней час-

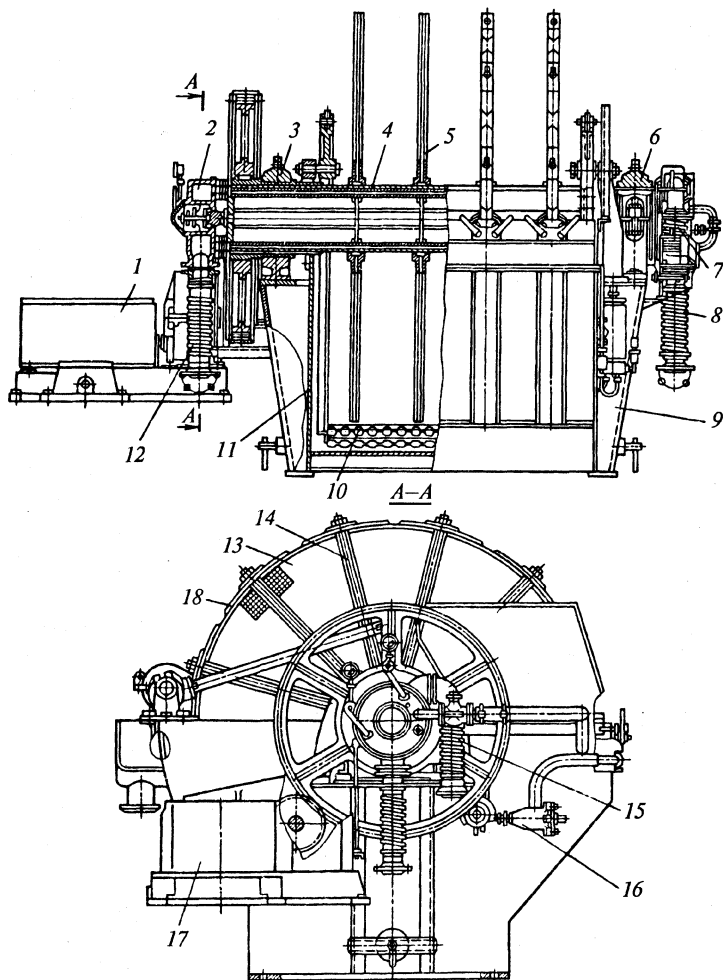


Рис. 4.9. Дисконный вакуум-фильтр ДУ-34-2,5

ти торцовых стенок имеются люки. Отстаивание суспензии предотвращается маятниковой мешалкой 10. Отвод фильтрата и подача сжатого воздуха в ячейки дисков происходят через штуцеры 8, 12 и 15 распределительных головок 2 и 7 и через 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, 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 трапециевидального мешка, сшитого с боков и натянутого на сектор; узкий конец мешка туго завязывают шпагатом на штуцере, а края широкого конца загибают на цилиндрическую поверхность сектора и зажимают накладками 18. Замена фильтрующего элемента возможна для каждого сектора диска самостоятельно.

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-насоса. На непогруженных секторах осуществляется 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. Сжатый воздух также подается 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 использу-

ют, когда промывка осадка не нужна или осуществляется в других аппаратах.

Кроме того, согласно 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 при этом обеспечивать возможность в условиях фильтрования под вакуумом получить осадок толщиной не менее 8 мм за время, не превышающее 3 мин.

Преимущественная область применения — крупнотоннажные производства (обогащительные фабрики) горнорудной, угольной и металлургической отраслей промышленности.

Тарельчатые вакуум-фильтры. В отличие от барабанных и дисковых тарельчатые ячейковые вакуум-фильтры хорошо приспособлены 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. 4.10) — круглая полая вращающаяся тарель 4, впадина которой разделена радиальными перегородками на ячейки (обычно их 16), перекрытые сверху опорной решеткой и перфорированным диском 5. Тарель

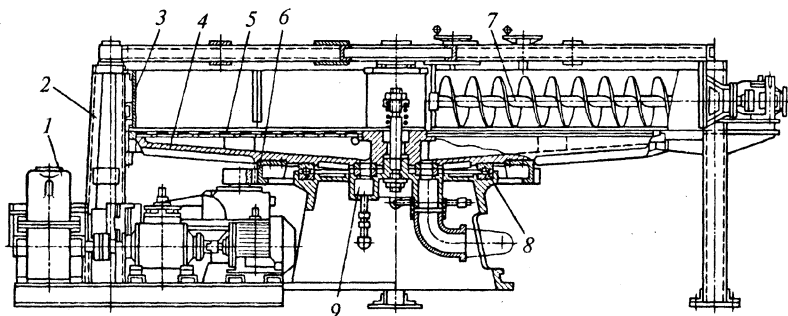


Рис. 4.10. Тарельчатый вакуум-фильтр

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 шарико-

вом 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 тарели. 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 получает вращение от индивидуального электропривода. 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. Отвод основного и промывного фильтратов отдельный. Предусмотрена зона регенерации ткани (сетки) продувкой ее пор сжатым 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. Недостатки тарельчатых фильтров — неравномерная промывка осадка вследствие разных линейных скоростей его движения в центральной и периферийной частях

зоны промывки, а также большие размеры. Для уменьшения занимаемой площади их иногда выполняют двухъярусными.

Ленточные вакуум-фильтры. В этих фильтрах, как и в тарельчатых, направления фильтрации и отстаивания суспензии совпадают, поэтому они также хорошо приспособлены для фильтрования крупнозернистых быстроосаждающихся суспензий. В ленточных фильтрах легче, чем в тарельчатых, достигается равномерная промывка осадка.

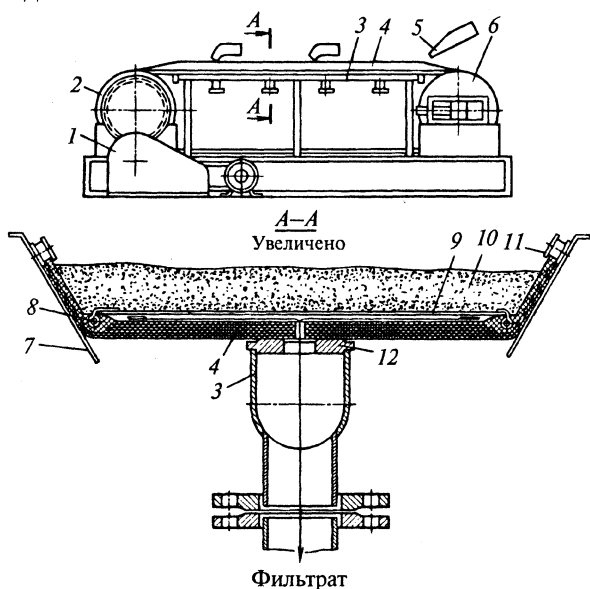


Рис. 4.11. Ленточный вакуум-фильтр:

- 1 — привод; 2 — приводной барабан; 3 — вакуумная камера; 4 — резиноканевая лента;
5 — лоток; 6 — натяжной барабан; 7 — борта корпуса; 8 — резиновые шнуры;
9 — фильтровальная ткань; 10 — осадок; 11 — направляющие ролики;
12 — золотниковая решетка

Фильтровальная резиноканевая лента (рис. 4.11) надета на приводной и натяжной барабаны. Верхняя ветвь ленты краями опирается на стол фильтра, а средней частью — на вакуумную камеру, 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, отогнутые вверх,

образуют желоб; при переходе на барабаны лента выпрямляется. Нижняя ветвь ленты опирается на поддерживающие ролики. Привод 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. Фильтр смонтирован на сварной раме.

Обрабатываемая суспензия по питающему лотку самотеком поступает на движущуюся фильтровальную ленту и фильтруется под действием вакуума. Осадок остается на ткани, а фильтрат по каналам на рифленой поверхности и сквозным отверстиям ленты поступает в вакуумную камеру, откуда отводится в сборник фильтрата. Двигаясь вместе с лентой, осадок поступает последовательно в зону двух- или 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.

На нижней ветви ленты осуществляется регенерация фильтровальной ткани путем обмывки 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 в основном для разделения полидисперсных быстроосаждающихся суспензий. При этом возможна тщательная промывка осадка, но количество промывной жидкости не должно превышать пятикратную массу осадка. Суспензия по концентрации и разделяемости должна допускать получение осадка толщиной не менее 4 мм за время, не превышающее 4 мин.

У ленточных вакуум-фильтров производительность единицы фильтрующей поверхности примерно вдвое большее, чем у барабанных. Их применяют преимущественно в химической промышленности, а также в черной и цветной металлургии.

Барабанный фильтр, работающий под давлением. Из фильтров непрерывного действия наиболее широко применяются в промыш-

ленности вакуум-фильтры, но они работают при малой движущей силе ($\Delta p \leq 0,08$ МПа). Проблема создания непрерывно действующих фильтров с большей движущей силой, т.е. работающих при повышенном давлении, решена, в частности, фирмой «Хюттен-верк Зонтгофен» (Германия). Барабанный фильтр (рис. 4.12) име-

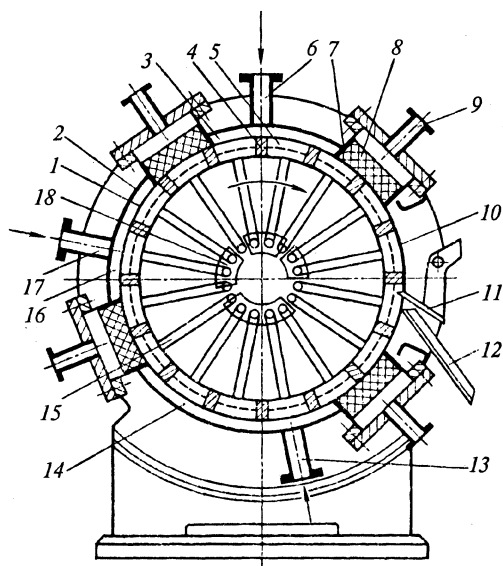


Рис. 4.12. Барабанный фильтр, работающий под давлением

ет 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 (возможно 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 штуцеры 9, и обеспечивают уплотнение между камерами.

Опорные подшипники барабана встроены в торцовые крышки кожуха. Гладкие нерабочие края барабана уплотнены в торцовых крышках кольцевыми уплотнителями 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 незакрытом кожухом участке 10 ножом 11, который заходит под действием пружины во впадины ячеек и автоматически выталкивается из них при приближении к ножу межъячеевых 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 перенесет 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, которое 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, а направление вращения барабана обратное. Соответствующ-

щим образом меняются также направления движения и наклон 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 ниже в 1,2–1,8 раза, расход промывной жидкости в 1,2–2,0 раза меньше при том же качестве промывки, а полная герметичность аппарата обеспечивает улавливание паров легкокипящих и ядовитых растворителей.

Недостатки фильтра — большая поверхность трения в уплотнениях (сальниках), а также ограниченная возможность увеличения поверхности фильтрации.

Фильтрующие перегородки (ФП) являются существенной частью промышленного фильтра, и от их правильного выбора во многом зависят все процессы, осуществляемые на фильтре. Они должны обладать следующими основными свойствами: требуемой задерживающей способностью; небольшим гидравлическим сопротивлением; химической стойкостью к разделяемым продуктам и промывным жидкостям; механической прочностью; теплостойкостью при температуре проводимых на фильтре процессов; легко регенерироваться и сохранять проницаемость при многократном фильтровании; легко отделяться от осадка при его удалении с фильтрующей поверхности.

По структуре ФП обычно разделяют на гибкие и негибкие.

Гибкие ФП могут быть ткаными и неткаными.

Гибкие тканые ФП получили наибольшее распространение в различных отраслях промышленности и изготавливаются из натуральных (хлопок, шерсть, шелк), синтетических (капрон, лавсан, полипропилен и др.), искусственных (вискоза, ацетаты целлюлозы), силикатных (асбест, стекло), металлических волокон и нитей.

Одним из главных параметров строения ткани является переплетение нитей, т.е. взаимное расположение их относительно друг друга. Из весьма значительного числа видов переплетений для фильтрования в основном применяют три вида — полотняное, саржевое и атласное (сатиновое).

Полотняные ткани благодаря равномерному сечению пор и их расположению по поверхности имеют высокую задерживающую

способность и механическую прочность и обычно применяются на фильтрах со сходящим полотном.

Ткани саржевого плетения могут обладать более высокой проницаемостью и грязеемкостью, однако механическая прочность их меньше, чем у полотняных. При атласно-сатиновых переплетениях связи нитей оказываются меньше, чем у предыдущих переплетений, но благодаря повышенной плотности достигаются высокая прочность этих тканей и объемность структуры.

Трикотажные ткани, характеризуемые свойствами к растяжению, находят применение при создании регенерируемых фильтрующих перегородок. Разработаны многослойные трикотажные перегородки с высокой задерживающей способностью, бесшовные рукава для патронных фильтров.

Фильтровые сетки изготовляют из полимерных мононитей или металлической проволоки, аналогично полотняным и саржевым тканям и используют непосредственно для фильтрования или в качестве дренажной основы для более плотных фильтрующих перегородок и материалов.

Нетканые фильтрующие перегородки изготовляют из синтетических и натуральных волокон в чистом виде или в виде смеси с различным содержанием того или иного волокна. Нетканые материалы, получаемые иглопробивным способом, клеевым методом или формированием из расплавов, имеют большую удельную производительность и высокую задерживающую способность, однако уступают фильтровальным тканям по механической прочности и регенерируемости. К нетканым фильтрующим материалам по свойствам близки фильтровальная бумага и картон.

Негибкие ФП разделяются на жесткие и нежесткие.

Жесткие ФП изготовляются из пористой керамики, металло-керамики и пористых пластмасс, а также из металлических волокон (металлический войлок). Фильтрующие элементы из этих материалов выпускаются в виде цилиндров (патронов, свечей), плит, листов и секторов. Такие материалы сохраняют пористую структуру при больших перепадах давления и высоких температурах, отличаются химической стойкостью в агрессивных средах. В последние годы широкое применение находят мембранные керамические элементы.

Нежесткие ФП могут быть насыпными или намывными.

Насыпные ФП образуются из слоев песка, гравия, кокса, полимерных материалов. В ряде случаев используются слои из этих материалов с переменной пористостью или их смеси.

Намывные ФП образуются из вспомогательных фильтрующих веществ, характеризующихся тонкодисперсностью, проницаемостью для жидкости, способностью задерживать тонкодисперсные твердые частицы суспензии. Эти вещества наносят в виде слоя на фильтрующую перегородку, что предотвращает быструю забивку последней, или добавляют в обрабатываемую суспензию перед ее разделением, в результате чего улучшается структура образующегося осадка, снижается его удельное сопротивление и повышается производительность. В ряде случаев сочетают оба этих способа.

В качестве вспомогательных веществ применяют разнообразные предварительно обработанные материалы: диатомит, перлит, асбест, целлюлозу, древесную муку, древесный уголь, селикагель, бентонит, отходы производств волокнистых материалов.

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 обычно приводят в каталогах или других документах — паспортах, инструкциях по эксплуатации, технических описаниях. Обычно выбор основан на сравнении данных, указанных в каталогах, с условиями технологического процесса, в котором предполагается использовать выбираемый аппарат. Оптимальный выбор связан с рассмотрением и оценкой большого количества сведений об аппаратах, сравнением их с требованиями технологического процесса. Эта сложная и длительная процедура реализуется по специально разработанным программам.

Так, в НИИХИММАШе для выбора фильтровального оборудования используется автоматизированная система, информационная база которой содержит данные примерно о 400 фильтрах и представлена в виде таблицы, включающей их типоразмеры, модификации, признаки, а именно: 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) — на группы качественных подпризнаков (например, зернистый, липкий и др.).

В информационной системе и опросных листах все признаки 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 играют столь большой роли, как для барабанных вакуум-фильтров, поэтому каждому признаку применительно к каждому фильтру присвоена своя степень соответствия по четырехбалльной системе оценки.

При выборе аппарата имеет значение число несовпадений признаков различного уровня. Например, полностью исключает возможность применения данного фильтра несовпадение по одному признаку первого уровня или несовпадения по трем признакам второго уровня, а при несовпадении признаков четвертого уровня достаточно замечаний 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 по

стандартной методике. Эти данные заказчик также включает в опросный лист.

Первым этапом является ввод в память компьютера сведений опросного листа с числовыми значениями экспериментальных данных. В зависимости от поставленной задачи и полноты исходных данных выбирается один из трех возможных режимов поиска: 1) поиск специального фильтра для данного продукта; 2) поиск фильтра из числа типовых; 3) 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 таких признаков пары продукт—фильтр, 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 положительному заключению.

Во втором режиме производится просмотр фильтров всех типоразмеров по каждому признаку, причем на каждом этапе просматриваемые фильтры сравниваются с лучшим на момент поиска. Критерием служит меньшее число несовпадений признаков второго и третьего уровней. Проверка совпадений происходит в порядке значимости, т.е. сначала анализируются признаки первого уровня важности. Проводятся 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 положительное заключение и подбирается вспомогательное оборудование. В противном случае дается отрицательное заключение с изложением причин невозможности выбора фильтра для заданных условий.

В третьем режиме система функционирует, как во втором, 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).

4.2. Расчет на прочность обечайки 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 теория оболочек В.З. Власова. В этом случае реальную оболочку представляют совокупностью отдельных нерастяжимых колец, которые связаны между собой шарнирами, исключаящими 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 и в нижней его части) определяют по следующим формулам:

осевое и окружное напряжения от гидростатического давления

$$\begin{aligned}\sigma_{s1} &= \sqrt{3} \rho_c g \frac{R^3}{\pi s^2} \sum_{k=2}^6 \frac{B_k \Phi_k}{k^2 - 1}; \\ \sigma_{i1} &= \pm 6 \rho_c g \frac{R^3}{\pi s^2} \left\{ \left[\sum_{k=2}^6 \frac{(A_k + 1) \Phi_k}{k^2 - 1} \right] \pm 0,0005 \right\};\end{aligned}\quad (4.1)$$

напряжения от усилий отжима и съема осадка

$$\begin{aligned}\sigma_{s2} &= \sqrt{3} q \frac{R}{\pi s^2} \sum_{k=2}^6 \frac{B_k}{k^2 - 1}; \\ \sigma_{i2} &= \pm 6 q \frac{R}{\pi s^2} \left\{ \left[\sum_{k=2}^6 \frac{A_k + 1}{k^2 - 1} \right] + 0,155 \right\};\end{aligned}$$

напряжения от веса барабана

$$\sigma_{s3} = \pm \frac{M_\sigma}{\pi R^2 s}; \quad \sigma_{i3} = \mu \sigma_{s3}.$$

В этих уравнениях: ρ_c — плотность суспензии, кг/м^3 ; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; 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_σ — изгибающий момент от веса барабана, $\text{Н}\cdot\text{м}$; μ — коэффициент Пуассона.

Момент M_σ определяют в предположении, что вес барабана представляет собой приложенную в середине сосредоточенную силу. Усилие отжима и среза q можно ориентировочно принять равным 4–5 кН/м . Функция Φ_k зависит от угла погружения барабана φ_0 :

$$\Phi_k = \frac{\sin[(k+1)\varphi_0]}{k+1} + \frac{\sin[(k-1)\varphi_0]}{k-1} - \frac{2\cos\varphi_0 \sin(k\varphi_0)}{k}.$$

Функции A_k и B_k выражают через функции Крылова:

$$A_k = -\frac{F_1}{F_1^2 + 4F_3^2}; B_k = -\frac{4F_3}{F_1 + 4F_3^2},$$

где $F_1 = \operatorname{ch} x \cos x$; $F_3 = 0,5(\operatorname{sh} x \sin x)$, причем $x = 0,5\beta_k L$;

$$\beta_k = \frac{1}{R} k \sqrt{k^2 - 1} \sqrt[4]{\frac{s^2}{48R^2}}; L - \text{длина обечайки, м.}$$

В формуле (4.1) знак перед слагаемым 0,0005 выбирают так, чтобы выражение в фигурных скобках было максимально по абсолютной величине. Затем определяют суммарное осевое и окружное напряжения:

$$\sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s3}; \sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2} + \sigma_{t3}.$$

Проверку на прочность выполняют по эквивалентному напряжению, определяемому на основании 4-й (энергетической) теории прочности:

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_t^2 - \sigma_s \sigma_t}.$$

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 $K_\sigma = 2,5$). Тогда

$$\sigma_3 \leq [\sigma]/K_\sigma. \quad (4.2)$$

Проверку обечайки на устойчивость от действия изгибающего момента, обусловленного собственным весом барабана, выполняют по ГОСТ 14249–80.

4.3. Микро- и ультрафильтрационные аппараты

В последние годы при разделении жидких смесей все шире используются полупроницаемые мембраны (мембранные методы). Они обладают замечательным свойством – пропускать одни вещества и задерживать другие. В крупных промышлен-

ных установках применены четыре основных типа аппаратов для мембранного разделения: с трубчатыми мембранными элементами; типа фильтр-пресса с плоскокамерными мембранными элементами; с мембранами в виде

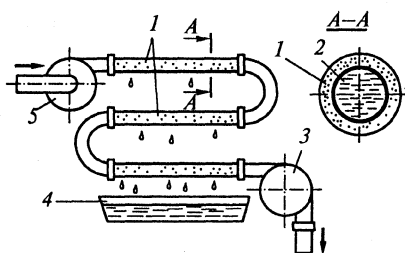


Рис. 4.15. Установка с трубчатым креплением мембран

полых волокон; с рулонными или спиральными мембранными элементами.

Один из наиболее простых аппаратов с *трубчатыми мембранными элементами* показан на рис. 4.15. Основные узлы аппарата — пористые трубы 1 (металлические, керамические или пластмассовые), на внут-

реннюю (или внешнюю) поверхность которых нанесена полупроницаемая мембрана 2. Исходный раствор насосом 5 подается в трубы 1, где из раствора через мембрану 2 профильтровывается один или несколько компонентов смеси, образуя фильтрат, попадающий в приемник 4. Сгущенный исходный раствор (концентрат) удаляется из аппарата насосом 3.

Промышленностью освоен выпуск большого числа различных аппаратов с трубчатыми элементами. При сравнительно невысокой плотности укладки мембран ($60\text{--}200\text{ м}^2/\text{м}^3$) аппараты с элементами трубчатого типа имеют ряд преимуществ; они характеризуются относительно низкой материалоемкостью, простотой конструкции, легкостью турбулизации разделяемой суспензии и небольшим гидравлическим сопротивлением при движении суспензии в прямолинейных каналах.

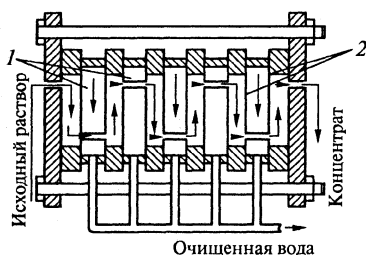


Рис. 4.16. Схема многокамерного аппарата типа фильтр-пресса

Примером аппаратов с плоскокамерными мембранными элементами являются аппараты типа фильтр-пресса (рис. 4.16). Основой этих аппаратов являются фильтрующие элементы из плоского пористого материала — дренажа 1, по обе стороны которого уложена мембрана 2. Пакет фильтрующих элементов зажимается между двумя фланцами. Разделяемый рас-

твор последовательно проходит вдоль всех фильтрующих элементов, концентрируется и удаляется из аппарата. Аппараты этого типа отличаются простотой изготовления, удобством монтажа и эксплуатации; они работают в проточном режиме разделения, что позволяет существенно уменьшить толщину образующегося на мембране осадка и ослабить влияние концентрационной поляризации. К недостаткам таких аппаратов можно отнести относительно невысокую удельную поверхность мембран в объеме аппарата 60–300 м²/м³.

Аппарат с *полыми мембранными волокнами* (рис. 4.17) 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 фильтрата выходит через штуцеры 7. Концентрированный раствор удаляется из аппарата через штуцер 3. Основным недостатком аппаратов на основе полых волокон — трудность их замены при повреждении.

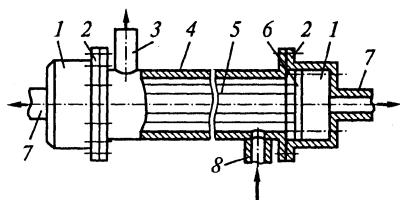


Рис. 4.17. Аппарат с мембранами в виде полых волокон

Разновидностью аппаратов с полыми мембранными волокнами являются аппараты с *половолоконными* элементами, которые представляют собой корпуса с блоком ультратонких волокон, имеющих внутренний диаметр около 40–80 мкм, а внешний 80–225 мкм. Плотность укладки мембран в аппаратах с половолоконными элементами достигает 20–30 тыс. м²/м³. Конструкции этих аппаратов предусматривают возможность подачи разделяемого раствора как с наружной поверхности волокон, так и внутрь полого волокна.

В аппаратах с *мембранными элементами рулонного типа* плотность упаковки мембран составляет 300–800 м²/м³. Аппараты данного типа (рис. 4.18) выполнены в виде трубы, в которую вставлен один или несколько последовательно соединенных рулонных элементов.

Рулонный элемент представляет собой полотно из двух листов мембраны с проложенным между ними слоем дренажного материала, которое накручено на центральную перфорированную трубку для отвода фильтрата.

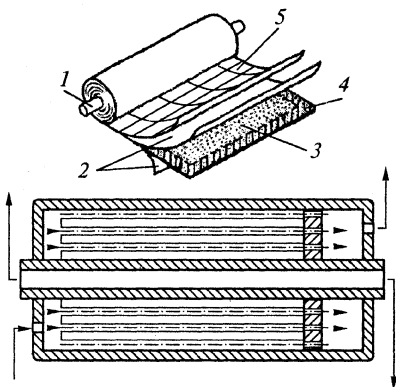


Рис. 4.18. Схема рулонной укладки полупроницаемых мембран

1 — фильтроотводящая трубка; 2 — мембрана; 3 — дренажный слой; 4 — область склейки; 5 — сетка-турбулизатор

Каждый из 4 основных типов аппаратов, классифицированных по конструкции мембранного элемента, имеет свои преимущества и недостатки в отношении капитальных и эксплуатационных затрат, компактности, легкости очистки мембраны, требований к подготовке исходной разделяемой смеси перед осуществлением процесса и др. С учетом всех особенностей в каждом конкретном случае производят выбор необходимой конструкции аппарата.

4.4. Центрифуги

Один из распространенных способов разделения жидких неоднородных систем в процессах химической технологии — *центрифугирование* — 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 (их не вполне правильно иногда называют отстойными) имеют отличительную конструктивную особенность — барабан со сплошной (неперфорированной) стенкой. Разделение суспензии или эмульсии в такой центрифуге происходит путем осаждения (или всплывания) 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 используются только для разделения суспензий и 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. Такие центрифуги бывают как периодического, так и непрерывного действия.

По способу выгрузки осадка центрифуги подразделяются на центрифуги с ручной выгрузкой, контейнерной, пульсирующей, вибрационной, инерционной, шнековой, гравитационной и выгрузкой ножом.

По уровню движущей силы центрифуги превосходят фильтпрессы; если в последних рабочая разность давлений обычно не превышает 0,3–0,5 МПа, то в центрифугах она составляет 1–2 МПа. В центрифугах значительно проще 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 электроэнергии на привод и ограниченная поверхность фильтрования или осаждения.

Основные параметры центрифугирования. *Фактор разделения* 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:

$$F_{ц} = m \cdot \omega^2 r - m_1 \cdot \omega^2 r,$$

где ω — угловая скорость; r — радиус вращения частицы.

Фактор разделения

$$K_p = \frac{F_{ц}}{F_0} = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (4.3)$$

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 (4.3) не является постоянной величиной, в разных зонах барабана центрифуги фактор разделения имеет неодинаковые значения, поэтому различают номинальный и эффективный факторы разделения. В качестве характеристики конкретной конструкции центрифуги используют номинальный фактор разделения (максимально возможное его значение)

$$K_{p,n} = 2 n^2 D,$$

где n — частота вращения ротора центрифуги, c^{-1} ; D — наибольший внутренний диаметр барабана, м.

По фактору разделения различают центрифуги тихоходные ($K_{p,n} < 1000$), нормальные ($1000 < K_{p,n} < 3500$) и скоростные, или сверхцентрифуги ($K_{p,n} > 3500$).

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_o равна произведению его площади S_o на скорость гравитационного осаждения v_o частиц заданного граничного размера (более мелкие частицы уносятся с осветленной жидкостью), т.е. $Q_o = S_o v_o$. Аналогично производительность центрифуги $Q_{ц}$ равна произведению площади поверхности жидкости в 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 $Q_{ц} = Q_o$ следует:

$$\Sigma = S_o = S_{ц} v_r / v_o.$$

Если и в центрифуге, и в отстойнике сохраняется ламинарный режим обтекания осаждающихся частиц, то отношение скоростей осаждения равно эффективному фактору разделения: $v_r / v_o = \omega^2 r_{ж} / g = K_p$; следовательно, $\Sigma = S_{ц} K_p$.

Характеризуя центрифугу конкретной конструкции, принимают $r_{ж} = 0,5D$ и номинальный индекс производительности вычисляют по формуле

$$\Sigma_n = 2\pi n^2 D^2 L. \quad (4.4)$$

При известных индексе производительности Σ и скорости v_o гравитационного осаждения теоретическая производительность центрифуги определяется как производительность эквивалентного отстойника

$$Q_T = \Sigma v_o.$$

Здесь не учтен ряд факторов, снижающих производительность центрифуги: отставание во вращении жидкости от барабана, неравномерность ее течения в продольном направлении, неоднородность формы частиц, вихри в местах подачи и слива жидкости, перемешивающее действие шнека и других устройств для выгрузки осадка, вибрацию ротора. В связи с этим действительная производительность Q_d обычно меньше теоретической, что учитывают опытным коэффициентом $\zeta_{ц}$:

$$Q_d = \zeta_{ц} Q_T.$$

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 (4.4). 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 с объемной концентрацией более 20%, содержащих крупно- и среднезернистую твердую фазу с частицами размером более 0,1 мм. В химической промышленности пульсирующие центрифуги используют для разделения суспензий с кристаллической твердой фазой. Они эффективны также при обработке волокнистых материалов, когда не допускается разрушения волокон или волокна обладают способностью прилипать к рабочим деталям.

Центрифуги этого типа обеспечивают эффективную промывку осадка и отдельный 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, высокая степень обезвоживания осадка и его эффективная 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 двухсторонней выгрузкой осадка (сдвоенные). Центрифуги с ротором, имеющим больше двух каскадов, являются специализированными конструкциями.

Однокаскадные центрифуги просты и дешевы, но менее эффективны, чем двухкаскадные. Диаметр ротора 160–1400 мм.

Центрифуга ФГП (рис. 4.17) имеет барабан 10, который укреплен на конце полого вала 7, приводимого во вращение электродвигателем 1 через клиноременную передачу со шкивом 3. В обе-

чайку ротора запрессовано щелевое сито. Внутри барабана расположен поршень-толкатель 8, который кроме вращения совершает

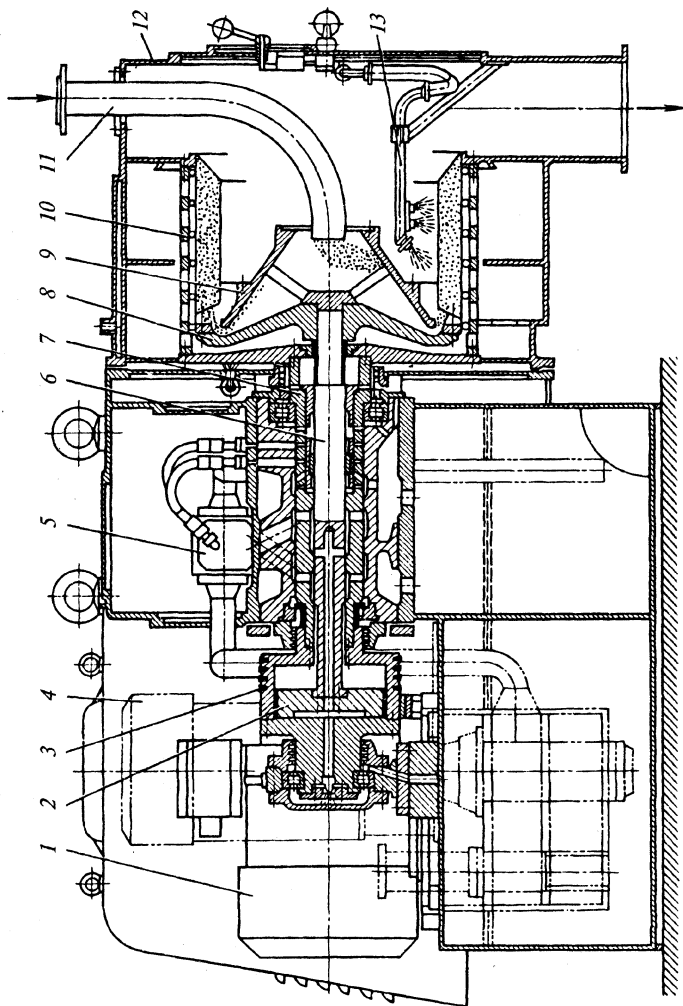


Рис. 4.17. Однокаскадная центрифуга с пульсирующей выгрузкой осадка
возвратно-поступательное движение для перемещения осадка по щелевому сити барабана под давлением масла на поршень 2, сое-

диненный 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 промывочной 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.

Характерная особенность работы пульсирующих центрифуг — поступление суспензии при обратном ходе поршня-толкателя на небольшой участок сита, очищаемый толкателем от ранее образовавшегося осадка. При этом ходе поршня скорость фильтрования 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. На центрифугах этого типа нельзя обрабатывать металлокристаллические суспензии, а также аморфные высокодисперсные (красители, гидроксиды металлов).

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, и из-за неравномерного распределения осадка по окружности барабана возникает вибрация центрифуги. Таким образом, для каждой обрабатываемой суспензии существуют 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 ма-

териала существует определенное допускаемое отношение L/h , которое соответствует условию отсутствия вспучивания осадка:

$$\frac{L}{h} \leq \frac{\alpha \operatorname{tg}^2(\pi/2 + \varphi/2)}{f},$$

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.

Увеличение рабочей зоны фильтрующего барабана для обеспечения хорошей осушки осадка без его вспучивания достигается в двухкаскадных центрифугах с пульсирующей выгрузкой. По общему устройству и принципу действия (рис. 4.18) они аналогичны однокаскадным; отличие относится лишь к ротору. Последний состоит из двух фильтрующих барабанов, вставленных один в другой и имеющих возможность продольного относительного перемещения. Барабан второго каскада (большой по диаметру) и поршень-толкатель закреплены 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.

При одинаковом с однокаскадными машинами факторе разделения на двухкаскадных центрифугах производительность может быть повышена на 10–25%. При уменьшении длины отдельного каскада соответственно сокращается и длина слоя осадка, что позволяет интенсифицировать процесс его отжима путем уменьшения толщины слоя или увеличения 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. По принципу

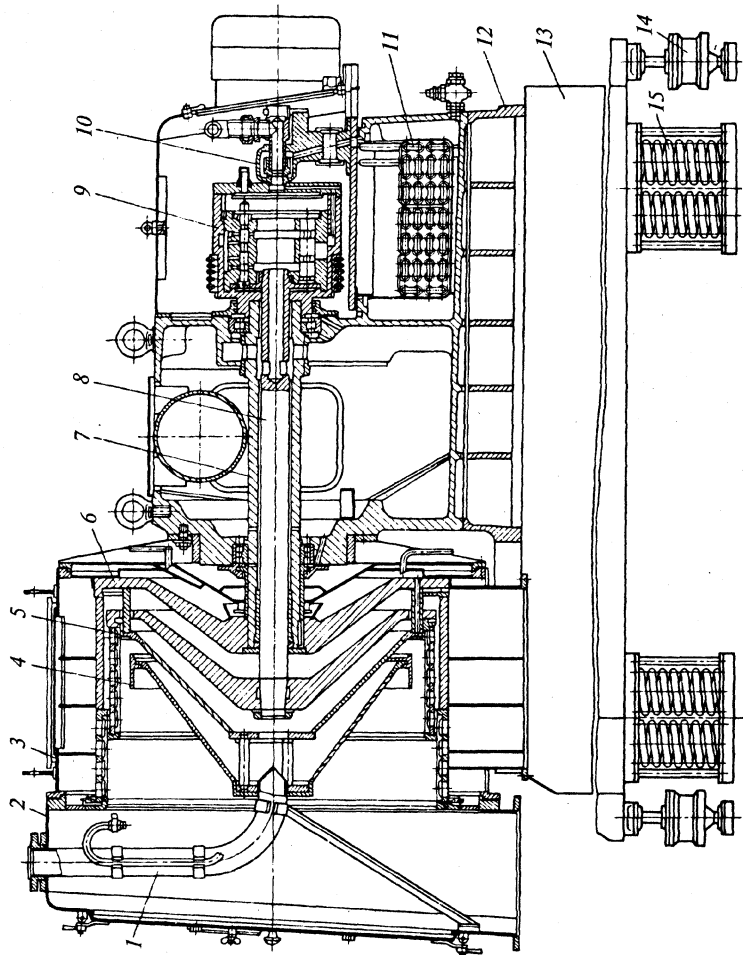


Рис. 4.18. Двухкаскадная центрифуга типа ФГП:

- 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 — станина; 13 — основание; 14 — демпфер; 15 — виброизолятор

действия многокаскадные центрифуги аналогичны двухкаскадным.

Центрифуги со шнековой выгрузкой осадка. Современные центрифуги непрерывного действия со шнековой выгрузкой осадка имеют ротор конической или цилиндроконической формы. Внутри ротора расположен цилиндрический, конический или ступенчатый барабан, несущий спиральную ленту (шнек). Выгрузку осадка с помощью шнека используют в осадительных, фильтрующих и 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. Горизонтальные центрифуги изготавливают преимущественно с ротором, помещенным между опорами, реже — с консольным ротором; вертикальные центрифуги имеют, как правило, верхнюю подвеску ротора.

Горизонтальные противоточные центрифуги с цилиндроконическим ротором наиболее широко распространены. Такую конструктивную схему машины считают стандартной для центрифуг этой группы. Центрифуга (рис. 4.19) состоит из цилиндроконического 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 шнекового барабана 7, где вращается с частотой, близкой к частоте вращения ротора, и через отверстия в шнековом барабане поступает в рабочий барабан 8. Далее суспензия 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

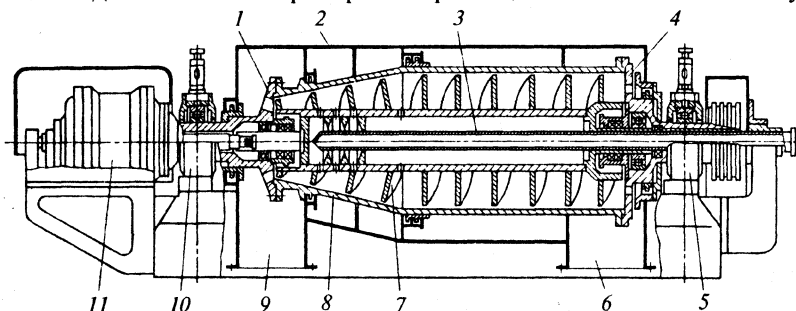


Рис. 4.19. Горизонтальная противоточная осадительная центрифуга со шнековой выгрузкой осадка

осушки осадка, где он уплотняется, освобождаясь от части жидкости, находящейся в его порах. В конце зоны осушки осадок выбирается 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 шнекового барабана, 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 подразделяют 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 конструкциях только обезвоживающих центрифуг.

Универсальные осадительные центрифуги используют 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 применяют 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.

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%.

Такие центрифуги 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 промышленности, второй — в угледобывающей.

Из фильтрующих центрифуг со шнековой выгрузкой осадка наиболее распространены *центрифуги с вертикальным расположением оси ротора* (типа ФВШ), так как они освоены значительно раньше горизонтальных машин. Конструктивная схема центрифуги, приведенная на рис. 4.20, 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

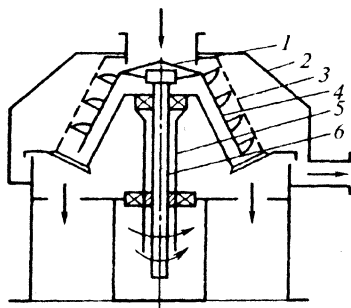


Рис. 4.20. Схема вертикальной шнековой фильтрующей центрифуги

шнека 4, который закреплен на сплошном валу 6, получающем 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* (типа ФГШ) объясняется их высокой эксплуатационной надежностью по сравнению с вертикальными машинами в связи с тем, что редуктор вынесен из рабочей зоны и облегчен доступ к основным узлам центрифуги. Горизонтальные центрифуги более перспективны, чем вертикальные, хотя они занимают большую площадь и имеют худшие динамические характеристики (центр тяжести ротора находится за опорами).

Центрифуга типа ФГШ (рис. 4.21) состоит из корпуса 1, в подшипниковых опорах которого установлен вал. На консольном

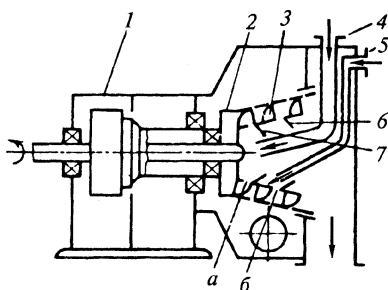


Рис. 4.21. Схема горизонтальной фильтрующей центрифуги со шнековой выгрузкой осадка

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 промывочной жидкости. Внутри барабана закреплены приемные воронки 6 и 7. Суспензия и промывочная жидкость подаются по трубам соответственно 4 и 5.

Центрифуги с инерционной выгрузкой осадка. Основное преимущество центрифуг непрерывного действия с инерционной выгрузкой осадка — отсутствие каких-либо выгружающих устройств. Здесь осадок выгружается под действием составляющих инерционных центробежных и вибрационных сил. В связи с этим инерционные центрифуги подразделяют на два класса: с выгрузкой осадка под действием центробежных сил инерции; 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 была 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 тому как скатывается груз по наклонной плоскости. Анализ сил, действующих на частицу осадка (при условии $\omega^2 r \geq g$), позволил вывести формулу для угла α наклона образующей барабана к оси, необходимого для движения осадка:

$$\operatorname{tg} \alpha \geq f,$$

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 обезвоживается.

Три опытные центрифуги, сконструированные упомянутыми изобретателями, были испытаны на сахарных заводах, но из-за отсутствия налаженного производства сит не нашли должного распространения в России. С 1956 г. они выпускаются зарубежными фирмами. Фактор разделения этих центрифуг доведен на наибольшем диаметре до 2000. Успешная работа центрифуг в высокой 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 Германии, имеет примерно ту же область применения, что и скоростные фильтрующие центрифуги со шнековой выгрузкой осадка.

В кожухе 4 (рис. 4.22) 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 главным образом отличает данную центрифугу от центрифуг со шне-

ковой выгрузкой осадка. Угол наклона образующей барабана к оси вращения $30\text{--}35^\circ$, т.е. больше угла трения осадка о сито. Пре-

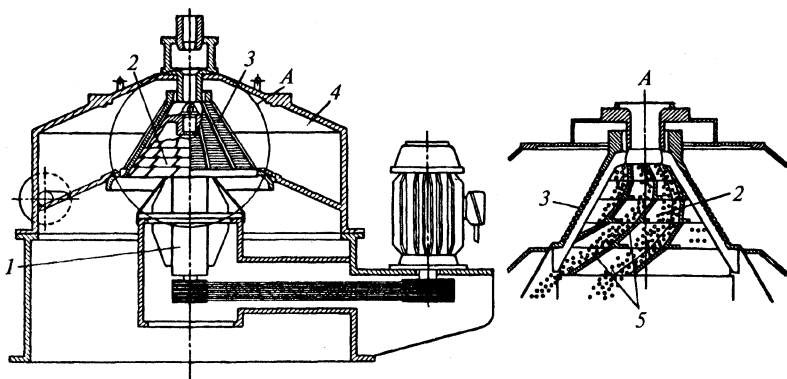


Рис. 4.22. Центрифуга с центробежной выгрузкой осадка и винтообразным направляющим устройством

дусмотрена 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.

Отечественной промышленностью выпускаются центрифуги с инерционной (центробежной) выгрузкой осадка типа ФВИ-711К-04 для переработки яблок, ФВИ- 1001К-02 для обезвоживания антрацита класса 0–13 мм, ФПИ- 1321К-01 для обработки сахарных утфелей.

Существенный недостаток центрифуг с центробежной выгрузкой осадка — трудность регулирования времени пребывания суспензии в барабане. От этого недостатка свободна центрифуга с вибрационной 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 способствуют продольная составляющая центробежной силы, а также 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

узмому. В моменты противоположного движения осадок относительно барабана не перемещается, т.е. движется вместе с барабаном.

Частица осадка движется при условии, что сумма действующих на нее продольной составляющей центробежной силы и средней силы инерции за соответствующий полупериод не меньше силы трения. На основании этого условия выведена формула для расчета необходимого угла α между образующей барабана и его осью:

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \frac{(f \omega^2 r - 0,64 a \Omega^2)}{(\omega^2 r + 0,64 f a \Omega^2)},$$

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 тихоходные вибрационные центрифуги применяют в основном для обезвоживания шламов с частицами размером не менее 0,2 мм.

Ротор центрифуги с фильтрующим барабаном 13 (рис. 4.23) получает вращение через клиновые ремни 12 от электродвигателя, 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

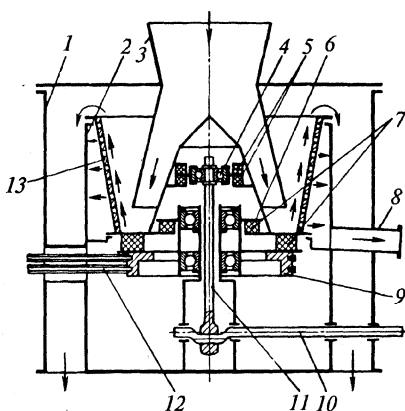


Рис. 4.23. Схема центрифуги с вибрационной выгрузкой осадка

ника 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.

Центрифуги с трубчатым ротором (сверхцентрифуги) предназначены для осветления суспензий, содержащих незначительное количество твердых высокодисперсных примесей, или для разделения стойких эмульсий. Их выпускают с разделяющим или осветляющим ротором. Центрифуги с осветляющим ротором применяют для осветления суспензий с высокодисперсной твердой фазой, содержание которой не превышает 1%. Центрифуги с разделяющим ротором применяют для разделения стойких эмульсий.

При разделении эмульсий центрифуги работают непрерывно, при разделении суспензий — периодически, поскольку необходимо периодически вручную выгружать накопившийся в роторе осадок. В таких центрифугах вращение ротора достигает 15 000 об/мин, а фактор разделения 13 200, поэтому их иногда называют сверхцентрифугами.

Общим конструктивным элементом таких центрифуг (рис. 4.24) является трубчатый ротор 6, подвешенный на валу 3 с вертикальной осью вращения и плавающей нижней опорой скольжения. Трехлопастная крыльчатка 1 сообщает разделяемой жидкости угловую скорость ротора. Станина 7 представляет собой чугунный литой корпус; она одновременно служит защитным кожухом. Привод центрифуги осуществляется от индивидуального электродвигателя 2, расположенно-

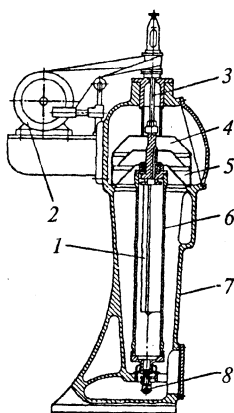


Рис. 4.24. Конструктивная схема центрифуги

го в верхней части корпуса, посредством клиноременной передачи с натяжным устройством.

При работе центрифуги суспензия через сопло питающей трубы 8 подается в нижнюю часть ротора и, вращаясь вместе с ротором, протекает вдоль его стенок в осевом направлении. Твердые частицы осаждаются на стенках ротора, а фугат через выходное отверстие в головке ротора выводится в сливную камеру, откуда по трубопроводам сливается в сборник. Осадок периодически удаляют вручную при остановке центрифуги и разборке ротора.

В случае разделения эмульсий она поступает по питающей трубе в нижнюю часть ротора и по мере продвижения вверх разделяется на тяжелый и легкий компоненты. Тяжелый (легкий) компонент проходит через отверстия в головке, расположенные у стенки (ближе к оси) ротора, поступает в нижнюю (верхнюю) сливную тарелку 5 (4) и через патрубок выводится из центрифуги.

Положение поверхности раздела слоев тяжелого и легкого компонентов регулируют сменным кольцом на выходе тяжелого компонента.

4.5. Сепараторы

Сепараторами называют осадительные скоростные центрифуги, предназначенные для разделения стойких эмульсий и осветления весьма тонких низкоконтентрированных суспензий с частицами размером от 0,1 мкм. Для этих целей используют и трубчатые сверхцентрифуги.

В отличие от трубчатых центрифуг сепараторы имеют сравнительно короткие барабаны, обычно цилиндроконической формы, и несколько меньший фактор разделения K_p : для сепараторов $K_p = 6000 \dots 10000$, для трубчатых центрифуг $K_p \geq 12000$.

Для оценки разделяющей способности жидкостных центробежных сепараторов с пакетом конических тарелок пользуются понятием «индекс производительности»:

$$\Sigma = \frac{2\pi}{3g} z \omega^2 \operatorname{tg} \alpha (R_{\max}^3 - R_{\min}^3),$$

где z — количество тарелок в пакете; ω — угловая скорость вращения ротора, рад/с; α — угол наклона образующей тарелки к горизонтали, град; R_{\max} — наружный радиус тарелки, м; R_{\min} — внутренний радиус тарелки, м.

Барабан сепаратора обычно устанавливается на верхний консольный конец вала и приводится во вращение от 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 XIX в. шведским инженером Лавалем.

Современные сепараторы обычно имеют гибкие валы, опирающиеся на упругие опоры. Вследствие этого их роторы самобалансируются, что позволяет увеличить частоту вращения и достичь более качественного разделения жидких смесей.

В зависимости от назначения различают сепараторы *разделяющие*, предназначенные для разделения стойких эмульсий и имеющие устройства для раздельного отвода легкой и тяжелой жидкостей после сепарации, и *осветляющие*, используемые для осветления суспензий, причем осадок накапливается в барабане, он либо удаляется из сепаратора после остановки и разборки ротора (сепараторы с ручной выгрузкой), либо 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. 4.25) 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

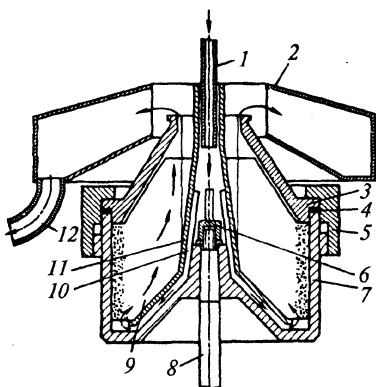


Рис. 4.25. Однокамерный осветляющий сепаратор

резьбовым затяжным кольцом 5 (накидная гайка большого диаметра), соединенным 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 жидкости и барабана достигаются установлением в рабочей полости барабана трех или четырех радиальных перегородок 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 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 допустимого объема осадка подачу жидкости прекращают, сепаратор останавливают, барабан разбирают (не снимая вала) и удаляют из него осадок (обычно промывкой).

Однокамерный разделяющий сепаратор (рис. 4.26) в основном аналогичен осветляющему; конструктивные отличия связаны с необходимостью отдельного 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

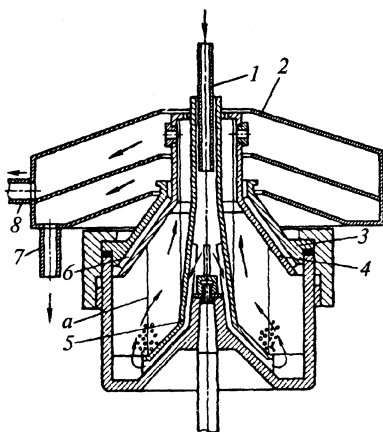


Рис. 4.26. Однокамерный разделяющий сепаратор

стенок барабана с горловиной крышки и служащий для отвода тяжелой жидкости.

Подаваемая по трубе 1 в загрузочную воронку 5 эмульсия через канал между воронкой и дном основания поступает в среднюю часть сепарационного пространства в барабане. В результате сепарации в барабане образуются два слоя жидкости с поверхностью раздела a между ними. У стенок 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 распределительной 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, учитывая, что поверхность a раздела фаз должна располагаться в средней части сепарационного пространства.

Отсепарированные жидкости отводятся из разделяющего сепаратора непрерывно. Однако поступающая на разделение эмульсия обычно содержит кроме двух жидких фаз некоторое количество (часто очень малое) взвешенных твердых частиц, т.е. является, строго говоря, трехфазной системой. Твердая фаза постепенно оседает на стенке барабана, образуя осадок, поэтому разделяющие барабаны конструируют быстроразборными для упрощения периодической очистки от осадка.

В 1889 г. Бехтольсгейм предложил вставку для молочного сепаратора, что позволяет значительно повысить эффективность разделения или производительность сепаратора при сохранении качества разделения. Вставка представляет собой пакет тонкостенных тарелок в виде усеченных конусов с углом $40\text{--}60^\circ$ между образующей и радиусом. Ось тарелок совпадает с осью барабана. Тарелки наложены одна на другую с зазором $0,4\text{--}2,0$ мм между ними. 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 (шипы) или ребра (6 или 8 на каждой тарелке), направленные по образующим (высота ребер равна зазору).

Пакет тарелок делит поток суспензии (эмульсии) в барабане сепаратора на ряд тонких слоев. При этом во много раз уменьшается путь осаждения частиц суспензии (капель эмульсии) и увеличивается поверхность осаждения. В зазорах между тарелками обеспечивается ламинарный режим течения жидкости, т.е. исключается возникновение вихрей, размывающих образовавшийся осадок. Расположение тарелдок 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.

Конструктивно *тарельчатые сепараторы* (рис. 4.27) аналогичны однокамерным. Пакет тарелок 10 надет на горловину загрузочной воронки и зажат в осевом направлении между раструбом воронки и конической крышкой барабана (в осветляющих сепара-

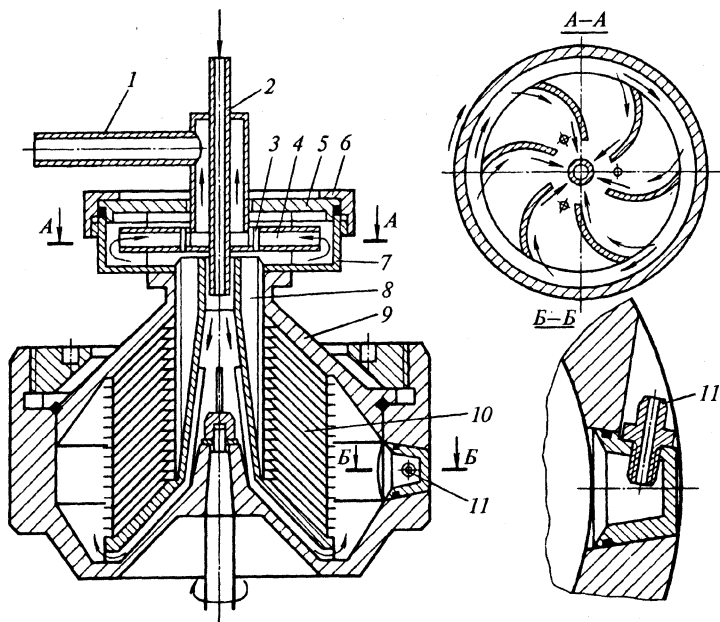


Рис. 4.27. Осветляющий тарельчатый сепаратор с напорным диском и выгрузкой шлама через сопла

раторах) 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 оборудован 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 концентрированных суспензий используются сепараторы с выгрузкой осадка из шламового пространства на ходу. Осадок удаляется с некоторым количеством жидкости (в виде шлама) под действием центробеж-

ных сил либо непрерывно через постоянно открытые сопла 11 (см. рис. 4.27), либо через периодически открываемые отверстия или щели. Тем не менее эти 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.

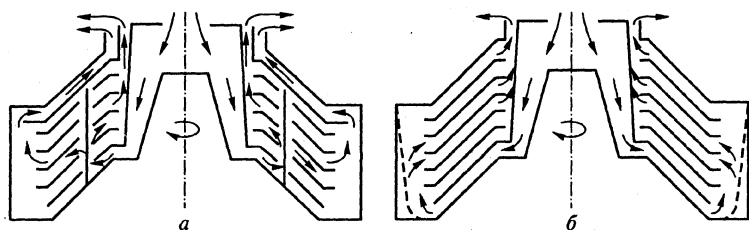


Рис. 4.28. Схема работы ротора сепаратора-разделителя (а) и сепаратора-очистителя (б)

В *разделяющих сепараторах* эмульсия подводится в среднюю часть пакета тарелок (рис. 4.28, а) (в осветляющих сепараторах, рис. 4.28, б, суспензия подается к периферийной части 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 или как в однокамерном сепараторе (см. рис. 4.26), или двумя напорными дисками.

Многокамерные сепараторы используют для осветления низкоконцентрированных суспензий. В них возможна классификация твердой фазы по крупности частиц.

Показанный на рис. 4.29 многокамерный сепаратор 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 ка-

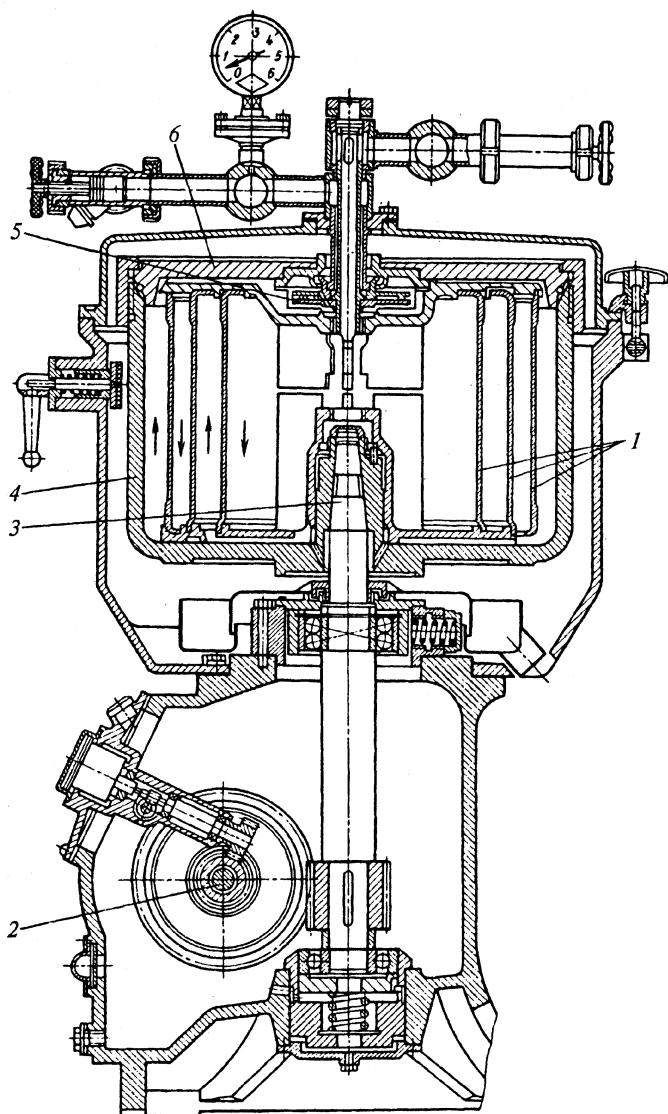


Рис. 4.29. Четырехкамерный сепаратор

мерах осевые скорости 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.

4.6. Расчет на прочность барабанов центрифуг и сепараторов

В большинстве случаев барабан центрифуги и сепараторов состоит из цилиндрической (или конической) обечайки 2 (рис. 4.30), плоского дна 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 дном, а также дна со ступицей действуют напряжения от краевых сил и моментов, возникающих в сопряжениях.

В стенке цилиндрической обечайки в общем случае возникают напряжения окружные σ_θ , осевые σ_z и радиальные σ_r . Наименьшее из них — отрицательное (сжимающее) радиальное напряжение σ_r , которое на внутренней поверхности стенки равно по абсолютной величине давлению $p_{ц}$ от центробежных сил. Хотя в некоторых случаях σ_r достигает 5 МПа, им обычно пренебрегают, т.е. принимают $\sigma_r = 0$. Наибольшие значения имеют кольцевые напряжения σ_θ . Осевое напряжение σ_z , обусловленное действием давления $p_{ц}$ на дно и борт барабана, имеет некоторое среднее значение. Расчеты обычно выполняют по 3-й теории прочности (теории наибольших касательных напряжений). В этом случае эквивалентное напряжение

$$\sigma_3 = \sigma_1 - \sigma_3,$$

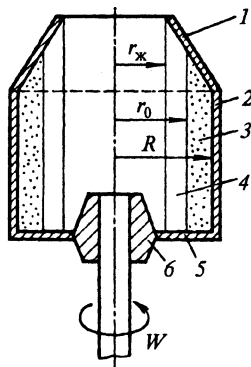


Рис. 4.30. Схема к расчету барабана центрифуги

где σ_1 и σ_3 — наибольшее и наименьшее главные напряжения, МПа.

В рассматриваемом случае $\sigma_1 = \sigma_r$, $\sigma_3 = \sigma_r = 0$, $\sigma_2 = \sigma_t$ и условие прочности принимает вид

$$\sigma_t \leq [\sigma], \quad (4.5)$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение для материала барабана.

Давление на стенку барабана (т.е. давление на радиусе R)

$$p_u = 0,5\omega^2 [\rho_{\text{ж}}(r_o^2 - r_{\text{ж}}^2) + \rho_o(R^2 - r_o^2)],$$

где ω — угловая скорость ротора, рад/с; $\rho_{\text{ж}}$ и ρ_o — плотности соответственно жидкости и влажного осадка, кг/м³; $r_{\text{ж}}$ 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

$$p_u = 0,5\rho_c \omega^2 (R^2 - r_{\text{ж}}^2).$$

Введя в рассмотрение условный коэффициент заполнения барабана $\psi = 1 - (r_{\text{ж}}/R)^2$, получим

$$p_u = 0,5\rho_c \omega^2 R^2 \psi.$$

Распределенная центробежная сила от собственной массы обечайки

$$q = \rho_m s \omega^2 R_c,$$

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:

$$\frac{\sigma_s s}{R_1} + \frac{\sigma_t s}{R_2} = -Z, \quad (4.6)$$

где R_1 и R_2 — первый и второй главные радиусы кривизны срединной поверхности оболочки, м; Z — проекция внешней распреде-

ленной нагрузки на ось, нормальную срединной поверхности барабана и направленную в сторону центров кривизны.

Для цилиндра радиус кривизны образующей $R_1 = \infty$, $R_2 = R_c \approx R$; в рассматриваемом случае проекция внешней нагрузки

$$Z = -(p_{\text{ц}} + q).$$

Тогда (4.6) принимает вид

$$\frac{\sigma_r s}{R} = p_{\text{ц}} + q,$$

откуда

$$\sigma_r = \frac{0,5\rho_c \omega^2 R^3 \psi}{s} + \rho_m \omega^2 R^2. \quad (4.7)$$

Первое слагаемое в правой части (4.7) представляет собой напряжение от давления $p_{\text{ц}}$ среды, второе — напряжение от распределенной центробежной силы, которое обусловлено массой стенки, и, как видим, не зависит от ее толщины.

Используя записанное выше условие прочности (4.5), найдем необходимую толщину стенки

$$s = \frac{0,5\rho_c v^2 R \psi}{[\sigma] - \rho_m v^2} = \frac{0,5R\lambda\psi}{[\sigma]/\sigma_0 - 1}$$

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:

$$\frac{[\sigma] s^3}{\rho_m s^3 v^3} = \frac{fl}{mv^2} = Ne,$$

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 должно превышать допускаемое. Необходимая толщина стенки частично заполненного барабана

$$s = \frac{0,5 R \lambda \psi}{Ne - 1}.$$

В случае $Ne \leq 1$ условие прочности не удовлетворяется ни при какой толщине стенки.

Т а б л и ц а 4.1. Характеристика некоторых металлов

Металл	σ_T , МПа	ρ_m , кг/м ³	$\frac{\sigma_T}{\rho_m g} 10^3$
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

Определим 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 (4.7) найдем

$$K_{пр} = \sigma_T \left[\rho_m g R \left(\frac{0,5 \lambda \psi R}{s} + 1 \right) \right]^{-1},$$

откуда следует, что при заданных характеристиках материала высокие значения фактора разделения достигаются при малом радиусе R барабана, т.е. наибольший фактор разделения достигается в трубчатых центрифугах с барабанами малого диаметра (обычно не более 200 мм).

Увеличение фактора разделения достигается также при изготовлении барабанов из материалов с высокой удельной прочно-

стью, т.е. с возможно большим отношением $\sigma_T/(\rho_m g)$, значения которого для некоторых металлов приведены в табл. 4.1. Как видно из таблицы, наибольшую удельную прочность имеют алюминиевые и титановые сплавы.

В конической обечайке или в борте центрифуги наибольшим из трех действующих также является 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 такое же, что и в цилиндрической части барабана. В данном случае проекция на ось z распределенной центробежной силы $q_2 = s_k \rho_m \omega^2 R \cos \alpha$, первый главный радиус кривизны $R = \infty$, второй главный радиус $R_2 = R/\cos \alpha$ и уравнение Лапласа принимает вид

$$\frac{\sigma_t s_k \cos \alpha}{R} = 0,5 \rho_c \omega^2 R^2 \psi + s_k \rho_m \omega^2 R \cos \alpha, \quad (4.8)$$

где s_k — толщина стенки конической обечайки, м.

Из (4.8) получаем окружное напряжение

$$\sigma_t = \frac{0,5 \rho_c \omega^2 R^2 \psi}{s_k \cos \alpha} + \rho_m \omega^2 R^2$$

или

$$\sigma_t = \frac{0,5 \sigma_o R \lambda \psi}{s_k \cos \alpha} + \sigma_o.$$

Из условия прочности находится расчетная толщина стенки конической обечайки

$$s_k = \frac{0,5 R \lambda \psi}{\left(\frac{[\sigma]}{\sigma_o} - 1 \right) \cos \alpha} = \frac{0,5 R \lambda \psi}{(Ne - 1) \cos \alpha}.$$

Толщину плоского борта или днища рекомендуется определять из соотношения

$$s_n = 1,5 s,$$

где s — расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки.

При расчете перфорированных обечаек учитывают: 1) ослабление обечайки отверстиями; 2) уменьшение ее массы, приводя-

щее к снижению центробежной силы. Первый фактор учитывают, вводя коэффициент 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

$$s = \frac{0,5R\lambda\psi}{\frac{\varphi_0[\sigma]}{\sigma_0} - 1 + k_n}; \quad s_k = \frac{0,5R\lambda\psi}{\left(\frac{\varphi_0[\sigma]}{\sigma_0} - 1 + k_n \right) \cos \alpha}.$$

Приведенные выше формулы, основанные на теории тонкостенных оболочек, рекомендуется использовать при критерии Ньютона $Ne > 2,6$. При меньших значениях Ne следует обратиться к формулам теории толстостенных цилиндров. Однако при этом барабан получается чрезмерно тяжелым из-за большой толщины стенки.

Увеличения критерия Ne и лучшего использования материала можно добиться либо снижением частоты вращения (но это 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 безмоментной теории. Для обеспечения прочности достаточно на 10–15% усилить толщину стенки в местах сопряжений, о чем свидетельствуют приведенные в литературе примеры расчетов. Методика уточненного расчета с учетом краевых нагрузок довольно сложна и приводится в специальной литературе.

4.7. Динамика центрифуг и сепараторов

Роторы центрифуг, как и других машин с вращающимися валами, совершают колебания или вибрацию, обусловленные наличием неуравновешенных масс. Чтобы устранить вибрацию, производят статическую и динамическую балансировку роторов. Однако даже после балансировки роторы испытывают значительную вибрацию и действие инерционных сил, которые при определенных частотах вращения могут вызвать резонанс и, как следствие, критическое значение скорости вращения. Для устранения вибрации и обеспечения спокойной работы машины кроме балансировки необходимо выбирать рабочую частоту вращения, не совпадающую с критической и не близкую к ней.

У центрифуг с жесткими валами рабочая частота вращения меньше критической, а центрифуги с гибкими валами работают в закритической области. Выбор жесткого или гибкого вала, а также конструкции опор определяются типом центрифуги, характером обрабатываемого продукта и образующегося осадка.

Если осадок представляет собой полужидкую массу, как часто бывает в осадительных центрифугах, то он распределяется ровным слоем по окружности барабана и центр масс барабана, заполненного осадком, находится на оси вращения, поэтому можно не опасаться возникновения значительных неуравновешенных центробежных сил и вызываемой ими вибрации. В таком случае машина может работать достаточно спокойно с жестким валом, т.е. при $\omega_p/\omega_{кр} \leq 1$, причем тем лучше, чем меньше данное 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, вследствие чего увеличится жесткость вала, уменьшатся напряжения в нем и коэффициент нарастания амплитуд. Конструктивно этого достигают, придавая днищу барабана вогнутую форму.

По-другому 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 и тогда целесообразно использовать гибкие валы или упругие опоры, позволяющие работать в закритической области и использовать эффект самоцентрирования ротора. Так как этот эффект возрастает с увеличением отношения $\omega_p/\omega_{кр}$, то $\omega_{кр}$ целесообразно уменьшать, для чего валы следует выполнять по возможности тоньше и длиннее, что, однако, противоречит требованиям прочности и компактности машин. В этом случае увеличивают вылет центра вращающихся масс относительно точки крепления барабана, используя барабан с плоским днищем и установив упругий подшипник.

При конструировании центрифуг необходимо рассчитывать критическую скорость. Метод расчета зависит от схемы компоновки машины. Так, 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 ним гироскопический момент значительны и их следует учитывать при расчетах.

Рассмотрим ротор центрифуги или сепаратора с барабаном, закрепленным на консоли вала с жесткими опорами (рис. 4.31). Пренебрегая массой вала по сравнению с массой барабана, будем считать вал невесомым. Представим ротор идеально уравновешенным; в этом случае центр масс барабана (вместе с жид-

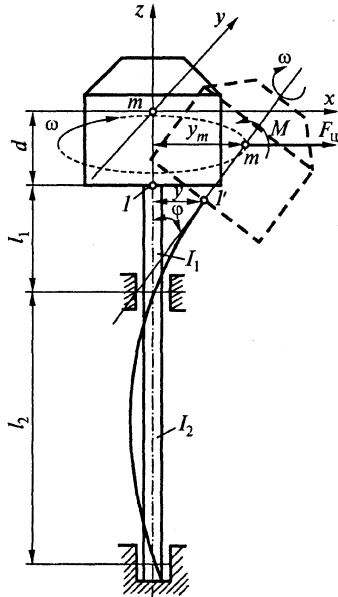


Рис. 4.31. К расчету центрифуги с гибким валом

костью 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 случаи обратной синхронной и прямой несинхронной прецессии, имеющие свои особенности.

При вращении на ротор действуют центробежная сила $F_{\text{ц}} = m\omega^2 y_m$, приложенная в центре масс барабана, и гироскопический момент $M = (J_o - J_{\text{з}}) \omega^2 \varphi$, где m — масса барабана; y_m — отклонение центра масс вследствие изгиба вала; J_o и $J_{\text{з}}$ — 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

$$y = a_{1c} F_{\text{ц}} - \alpha_{1c} M; \quad \varphi = b_{1c} F_{\text{ц}} - \beta_{1c} M.$$

Подставив сюда $F_{\text{ц}}$ и M , получим

$$y = a_{1c} m \omega^2 y_m - \alpha_{1c} (J_o - J_{\text{з}}) \omega^2 \varphi;$$

$$\varphi = b_{1c} m \omega^2 y_m - \beta_{1c} (J_o - J_{\text{з}}) \omega^2 \varphi.$$

Учитывая, что $y_m = y + \varphi d$ (d — расстояние от точки крепления до центра масс барабана), получаем:

$$y = a_{1c} m \omega^2 y + [a_{1c} m d - \alpha_{1c} (J_o - J_{\text{з}})] \omega^2 \varphi;$$

$$\varphi = b_{1c} m \omega^2 y + [b_{1c} m d - \beta_{1c} (J_o - J_{\text{з}})] \omega^2 \varphi$$

или

$$\begin{aligned} (a_{1c} m \omega^2 - 1) y + [a_{1c} m d - \alpha_{1c} (J_o - J_s)] \omega^2 \varphi &= 0; \\ b_{1c} m \omega^2 y + \{[b_{1c} m d - \beta_{1c} (J_o - J_s)] \omega^2 - 1\} \varphi &= 0. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Получена система двух однородных линейных уравнений с двумя неизвестными y и φ . Критическое значение ω должно допускать отличные от нуля ее решения. Для этого необходимо, чтобы определитель системы был равен нулю:

$$\begin{vmatrix} a_{1c} m \omega^2 - 1 & [a_{1c} m d - \alpha_{1c} (J_o - J_s)] \omega^2 \\ b_{1c} m \omega^2 & [b_{1c} m d - \beta_{1c} (J_o - J_s)] \omega^2 - 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрыв определитель, получим

$$A \omega^4 - B \omega^2 - 1 = 0,$$

где

$$\begin{aligned} A &= m (J_o - J_s) (a_{1c} \beta_{1c} - \alpha_{1c} b_{1c}); \\ B &= \beta_{1c} (J_o - J_s) - m (a_{1c} + b_{1c} d). \end{aligned} \quad (4.10)$$

Критическая угловая скорость

$$\omega = \sqrt{\frac{B + \sqrt{B^2 + 4A}}{2A}}. \quad (4.11)$$

Из четырех корней системы (4.9) физический смысл имеет только один, поэтому ротор имеет одну критическую скорость.

Коэффициенты влияния, входящие в (4.10), 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

$$a_{11} = \frac{l_1^0 (l_2 J_1 + l_1 J_2)}{3 E J_1 J_2}; b_{11} = \alpha_{11} = \frac{l_1 (3 l_1 J_2 + 2 l_2 J_1)}{6 E J_1 J_2}; \beta_{11} = \frac{l_2 J_1 + 3 l_1 J_2}{3 E J_1 J_2},$$

где l_1 — длина консоли вала; l_2 — расстояние между подшипниками; J_1, J_2 — моменты инерции сечения вала на участках l_1 и l_2 .

Динамические моменты инерции J_0 и J_3 загруженного барабана

$$J_0 = \int_0^m r^2 dm; J_3 = \int_0^m l^2 dm,$$

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_3 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 различаются. В этом случае смещение конца вала в значительно большей мере определяется податливостью опоры, чем изгибом самого вала и часто вал можно считать недеформирующимся. Тогда все коэффициенты влияния определяются 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 всех направлениях и в 1,5 раза больше жесткости одной пружины.

При определении коэффициентов влияния допустим, что к ротору приложена в центре масс барабана сначала сила $Q = 1$, а затем момент $M = 1$. Определим реакции R_1 и R_2 верхней опоры из уравнения равновесия моментов относительно точки O и выразим их через жесткость опоры k (рис. 4.32):

$$R_1 = \frac{Il}{l_2} = a'_{2c} k; R_2 = \frac{I}{l_2} = \alpha'_{2c} k,$$

откуда $a'_{2c} = \frac{l}{kl_2}$; $\alpha'_{2c} = \frac{1}{kl_2}$. Здесь

a'_{2c} и α'_{2c} — перемещения упругой опоры, вызванные соответственно единичной силой и моментом; $l = l_1 + l_2 + d$. С учетом геометрических соотношений найдем коэффициенты влияния:

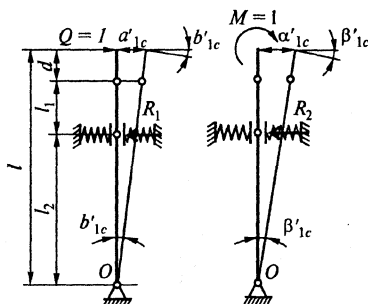


Рис. 4.32. К расчету коэффициентов влияния для вала с упругой опорой

$$-a'_{1c} = \frac{l^2}{kl_2^2}; b'_{1c} = \alpha'_{1c} = \frac{l}{kl_2^2}; \beta'_{1c} = \frac{I}{kl_2^2}.$$

Если податливостью вала пренебречь нельзя, то коэффициенты влияния $a''_{1c} = a_{1c} + a'_{1c}$; $b''_{1c} = b_{1c} + b'_{1c}$; $\alpha''_{1c} = b''_{1c}$; $\beta''_{1c} = \beta_{1c} + \beta'_{1c}$.

Найденные коэффициенты влияния подставим в (4.10) для A и B и по формуле (4.11) 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 различных типов. 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.

4.8. 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.

Эти аппараты 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. Они весьма несложны по конструкции, компактны, высокопроизводительны, дешевы в изготовлении и просты в эксплуатации.

Показанный на рис. 4.33 гидроциклон представляет собой сосуд, состоящий из конической 4 и цилиндрической 3 частей, закрытый сверху крышкой. Угол α между образующими конической части называют углом конуса гидроциклона. Суспензия подается

под давлением через питающий патрубок 2, установленный тангенциально цилиндрической части непосредственно под крышкой. Осветленная жидкость отводится через сливной патрубок 1 в центре крышки по оси гидроциклона, 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.

При простоте 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. Таким образом, 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 (с диаметром, примерно равным диаметру сливного патрубка) и направлен вверх, выводя из гидроциклона тонкодисперсные частицы, не успевшие отделиться во время движения из внешнего потока под действием центробежных сил.

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

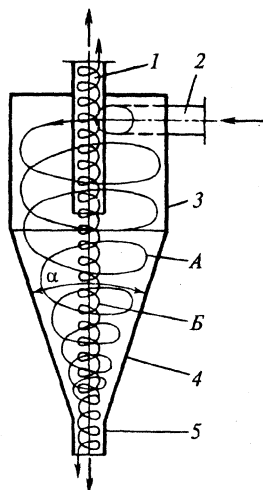


Рис. 4.33. Схема гидроциклона

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 имеет форму цилиндра или усеченного конуса) составляет примерно 55–65% диаметра сливного патрубка.

Обычно гидроциклон характеризуют диаметром его цилиндрической части, который связан определенными соотношениями с диаметрами питающего, сливного и разгрузочного патрубков. Нормальная работа гидроциклона достигается при соотношении диаметров верхнего сливного d_c и нижнего разгрузочного патрубка d_p , равном 1,66–3,33; изменяя это соотношение, 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 $\alpha = 10\text{--}20^\circ$. Для увеличения срока службы аппаратов их внутреннюю поверхность футеруют износостойкими материалами.

В настоящее время известно несколько десятков типов гидроциклонов. По назначению их 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 ростом диаметра гидроциклона повышается его производительность, однако качественные пока-

затели работы ухудшаются, поэтому тонкие суспензии разделяют в гидроциклонах малых диаметров.

Для увеличения производительности применяют одно- и двухступенчатые батарейные гидроциклоны. Элементы одноступенчатого 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).

4.9. Пылеочистное оборудование

В химической промышленности часто требуется 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 составляют 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 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 — 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.

Наиболее универсальным является циклон типа ЦН-15. Он предназначен для сухой очистки газов, выделяющихся при некоторых технологических процессах (сушке, обжиге, агломерации, сжигании топлива и т.д.), а также аспирационного воздуха в различных отраслях промышленности. Конструкция циклона ЦН-15 представлена на рис. 4.34. Эти циклоны выпускают и во взрывобезопасном исполнении, и тогда устанавливают предохранительные клапаны на входном патрубке 5 и на крышке, а камеры очищенного газа 4 и бункеры 7 делают минимального размера во избежание накопления взрывоопасной пыли.

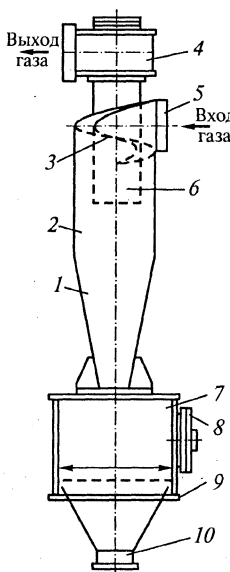


Рис. 4.34. Циклон типа ЦН-15П:

1 — коническая часть; 2 — цилиндрическая часть; 3 — винтообразная крышка; 4 — камера очищенного газа; 5 — патрубок входа запыленного газа; 6 — выхлопная труба; 7 — бункер; 8 — люк; 9 — опорный пояс; 10 — пылевывпускное отверстие

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. 4.35, а) с общим числом циклонов 2—8 или круговую (рис. 4.35, б), располагая 10—14 циклонов вокруг вертикального подводящего газохода.

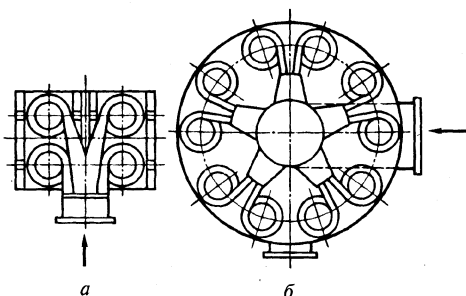


Рис. 4.35. Варианты компоновки циклонов

Степень очистки в группе циклонов примерно такая же, как в одном циклоне, входящем в 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 устанавливается до 792 циклонных элемента при расходе газа до 650 000 м³/ч.

Батарейный циклон (рис. 4.36) представляет собой тонкостенный корпус (обычно прямоугольного сечения), снабженный шту-

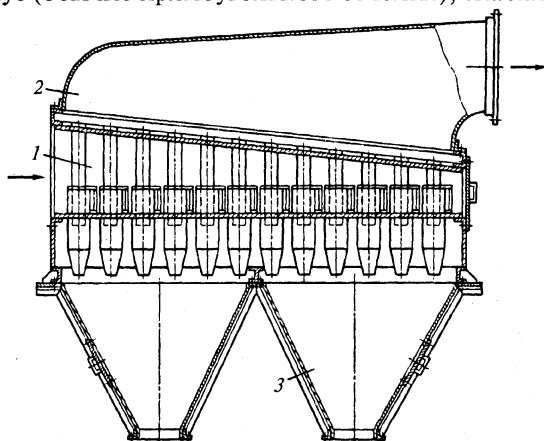


Рис. 4.36. Батарейный циклон БЦ

церами 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 завихрители — короткие сужающиеся патрубки (рис. 4.37, а) и входные улитки (рис. 4.37, б) — осевые завихрители; в последнем случае циклонные элементы не имеют крышек

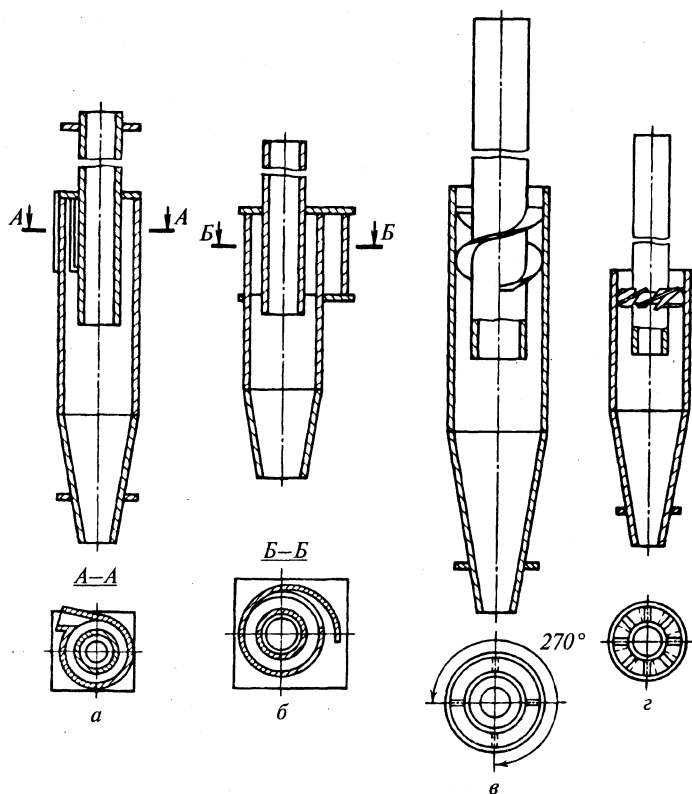


Рис. 4.37. Элементы батарейных циклонов

и газ поступает в зазор между отводной трубой и корпусом, где установлен завихритель типа «винт» (рис. 4.37, в) или «розетка» (рис. 4.37, г).

Возвратно-поточные циклонные элементы обладают значительным гидравлическим сопротивлением из-за поворота потока газа на 180° . Поворот приводит также к турбулизации потока, усиливающей вынос мелких фракций пыли восходящим потоком в отводную трубу, т.е. к снижению степени очистки газа. Исключены эти недостатки в батарейных циклонах с прямоточными контактными элементами. Такой элемент (рис. 4.38) 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.

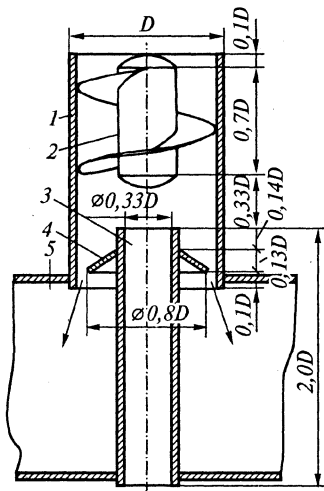


Рис. 4.38. Элементы прямоточного батарейного циклона

Таким образом, прямоточный циклон является пылеконцентратором и не позволяет полностью отделить твердую фазу от газа. Для окончательного отделения твердой фазы установки с прямоточными батарейными циклонами дополнительно снабжают обычными циклонами, тканевыми фильтрами или другими аппаратами для разделения небольшого количества запыленного газа с высокой концентрацией твердых частиц.

Вихревые пылеуловители отличаются от циклонов в первую очередь наличием вспомогательного закручивающего газового пото-

ка. Две основные разновидности вихревых пылеуловителей показаны на рис. 4.39.

В *вихревом аппарате соплового типа* (рис. 4.39, а) запыленный поток закручивается лопаточным завихрителем и движется вверх, подвергаясь при этом воздействию вытекающих из тангенциаль-

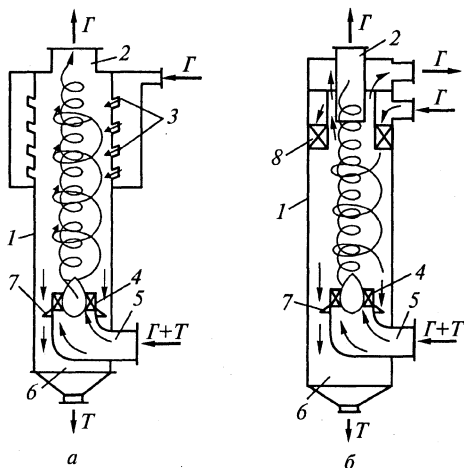


Рис. 4.39. Вихревые пылеуловители соплового (а) и лопаточного (б) типа: 1 — камера; 2 — выходной патрубок; 3 — сопла; 4 — лопаточный завихритель типа «розетка»; 5 — входной патрубок; 6 — пылевой бункер; 7 — подпорная шайба; 8 — кольцевой лопаточный завихритель; Г — газ; Т — твердые частицы

но расположенных сопел 3 струй вторичного газового потока. Под действием центробежных сил взвешенные в потоке частицы отбрасываются к периферии, а оттуда — в возбуждаемый струями вихревой поток вторичного газа, направляющий их вниз в кольцевое межтрубное пространство. Вторичный газовый поток в ходе обтекания потока очищаемого газа постепенно полностью проникает в него. Кольцевое пространство вокруг входного патрубка оснащено подпорной шайбой 7, обеспечивающей безвозвратный спуск пыли в бункер 6. Наилучшие результаты по эффективности улавливания достигаются при установке сопел, распыливающих вторичный газ, не менее чем в четыре ряда и под углом 30° . Оптимальной является установка лопаток завихрителя под углом $30\text{--}40^\circ$ при отношении диаметра завихрителя к диаметру аппарата, равном $0,8\text{--}0,9$.

Вихревой пылеуловитель лопаточного типа (рис. 4.39, б) отличается тем, что вторичный поток вводится в верхней части аппарата через завихритель, а отбирается с периферии очищенного потока газа. В качестве вторичного потока здесь могут быть использованы воздух из окружающей среды, периферийная часть потока очищенных газов и запыленные газы. Экономически наиболее выгодным является применение в качестве вторичного потока запыленных газов. В этом случае производительность аппарата повышается на 40–65% без заметного снижения эффективности очистки. Степень очистки в вихревых пылеуловителях значительно выше, чем в сухих циклонах, и может достигать значений, характерных для мокрых циклонов.

Электрофилътры. В электрофилътрах для отделения твердых частиц из газа используют осаждение их в электростатическом поле, поэтому такие аппараты вернее было бы назвать электростатическими осадителями. Электрофилътрами их называют по аналогии с рукавными и другими тканевыми филътрами, применяемыми для той же цели. Прообраз современных электрофилътров – 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 электрофилътры имеют множество труб круглого или шестигранного сечения, установленных в корпусе филътра. 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. Принципиальная схема электрофильтра сухого типа показана на рис. 4.40.

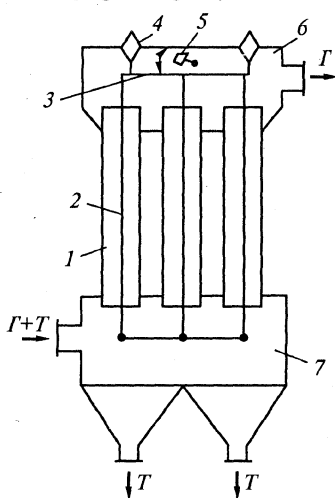


Рис. 4.40. Сухой электрофильтр: 1 — осадительный электрод; 2 — коронирующий электрод; 3 — рама; 4 — высоковольтный изолятор; 5 — встряхивающее устройство; 6 — верхняя камера; 7 — сборник пыли

В электрофильтрах мокрого типа, 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 электрофильтрах сухого типа. 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 для 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. 4.41). Стальной цилиндрический корпус 7 электрофильтра

футерован изнутри кислотоупорным кирпичом по подслою из полиизобутилена. Крышка аппарата защищена листовым свинцом.

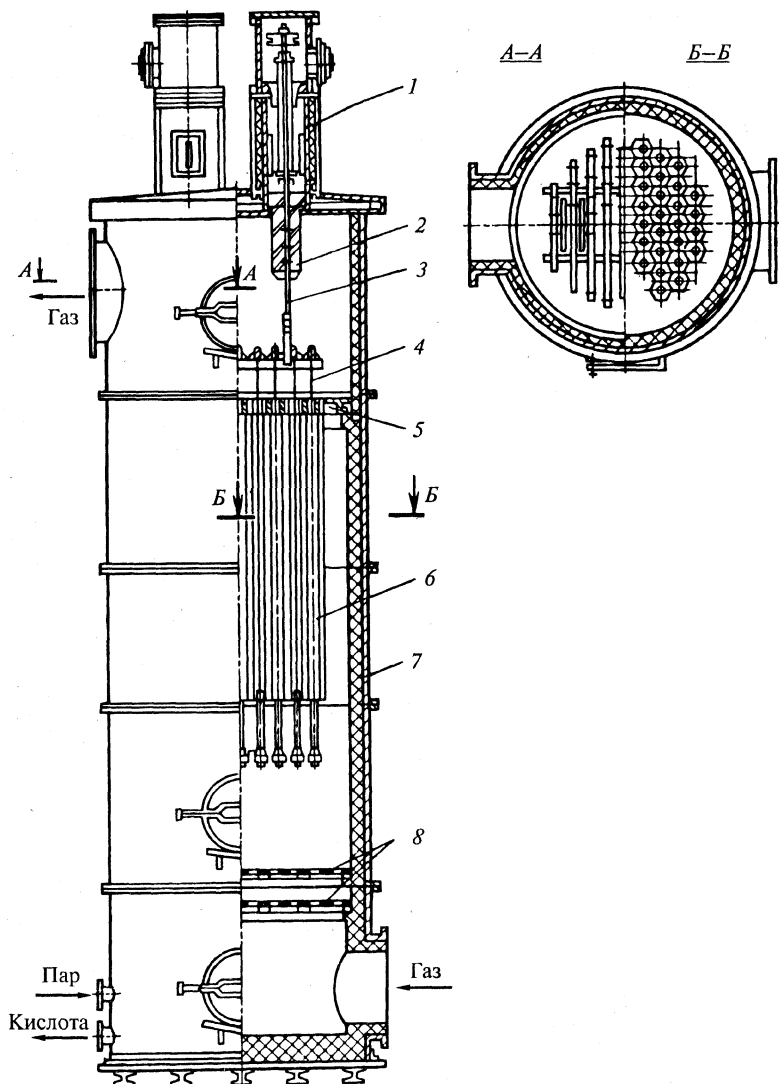


Рис. 4.41. Мокрый трубчатый электрофильтр ШМК

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 оборудован 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 винипластовыми трубами диаметром 250 мм, опирающимися на решетку из титанового листа, а освинцованные коронирующие электроды звездчатого 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 влияющих на осаждение и режим работы электрофильтра факторов: дисперсного состава пыли, диэлектрической проницаемости ее частиц, свойств газа и пыли. 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.

Рукавные и другие фильтры для газов. Газовые неоднородные системы, как и жидкие, можно разделять фильтрованием через пористые перегородки, задерживающие взвешенные частицы и про-

пускающие сплошную фазу. Для промышленной пылеочистки используют те же фильтрующие материалы, которые применяют для разделения суспензий, — 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 которых 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. 4.42. 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 фильтрования и регенерации фильтровальной ткани. Запыленный газ из трубопровода 16 под некоторым давлением через бункер 13 и патрубки перегородки 12 поступает внутрь ру-

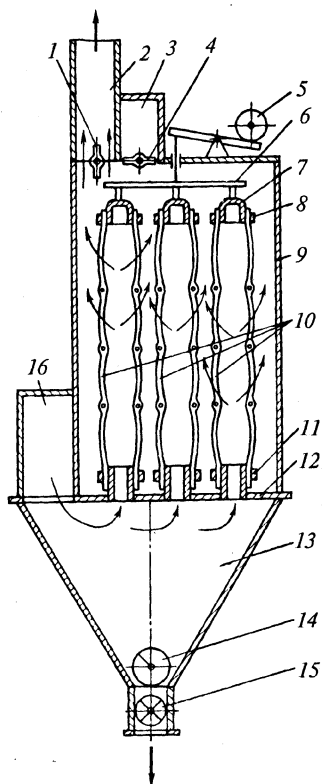


Рис. 4.42. Схема рукавного фильтра

кавов 10 и фильтруется сквозь их стенки. Твердые частицы (пыль) остаются на внутренней поверхности и в порах стенок рукавов, а очищенный газ из корпуса фильтра поступает в трубопровод 2. Через некоторое время слой пыли в рукавах утолщается, и гидравлическое сопротивление фильтра увеличивается. Когда сопротивление становится 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) — 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 шиловую затвор 15.

Для лучшего отделения пыли часто используют импульсную подачу продувочного воздуха. Чтобы предотвратить чрезмерное раздувание ткани 1 (рис. 4.43, а) рукавов при работе и смятие их при обратной продувке, в стенки рукавов вшивают проволоочные кольца 2. В других конструкциях внутрь рукавов помещают гибкие каркасы (рис. 4.43, б), состо-

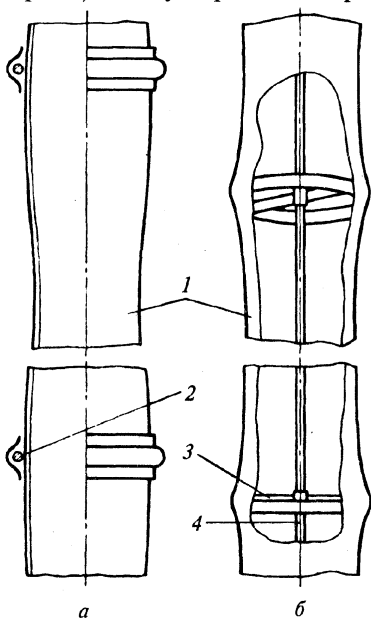


Рис. 4.43. Армированные фильтрующие элементы:

а — с вшитыми кольцами; б — с гибким каркасом

ящие из ряда распорных колец 3, которые укреплены на проходящих по осям рукавов проволочных 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 с 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 обычно называют 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 благодаря прилипанию твердых частиц 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 более 0,1 мкм) конкурируют с электрофильтрами. Однако улавливаемый твердый продукт в них выделяется в виде суспензии или шлама, что вызывает необходимость обработки сточных вод и, следовательно, удорожание очистки; поэтому мокрый способ целесообразно использовать для разделения низкоконтентрированных мелкозернистых пылей. При обработке высококонцентрированной пыли (например, в системах пневмотранспорта) мокрые фильтры можно использовать в сочетании с сухими пылеуло-

вителями в качестве второй ступени (перед выбросом газа в атмосферу).

Конструкции аппаратов мокрой пылеочистки отличаются большим разнообразием. По принципу действия их разделяют на полые форсуночные скрубберы; насадочные скрубберы; барботажные и пенные аппараты; аппараты ударно-инерционного действия; орошаемые циклоны; механические скрубберы; скоростные промыватели.

Схема пылеуловителя с псевдоожиженной насадкой приведена на рис. 4.44.

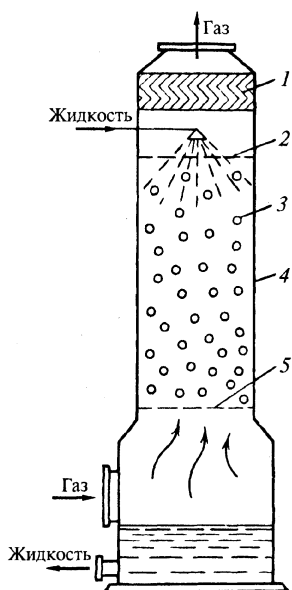


Рис. 4.44. Пылеуловитель с псевдоожиженной шаровой насадкой

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, а диаметр промышленных аппаратов этого типа достигает 6,5 м.

Аппарат работает в условиях полного псевдоожижения насадки, орошаемой сверху жидкостью из распылителя при скорости газа 4–6 м/с. Хороший контакт газа и жидкости обеспечивается благодаря турбулизации газового потока псевдоожиженной насадкой, циркулирующей в рабочем объеме, при многократном обновлении межфазной поверхности.

Эффективность пылеулавливания, а также гидравлическое сопротивление (в рабочем режиме 0,8–2,0 кПа) аппарата возрастают по мере увеличения динамической высоты трехфазного слоя в аппарате.

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, 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. 4.45).

Труба 1 имеет сужающуюся часть (конфузор), короткий цилиндрический участок (горловина) и расширяющийся участок (диффузор). 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

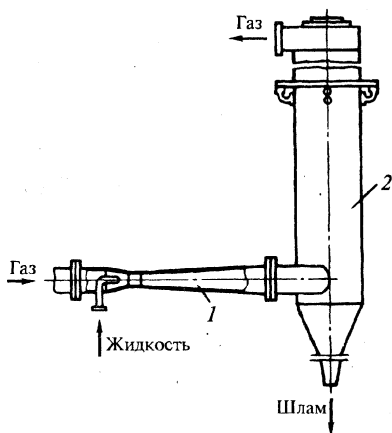


Рис. 4.45. Схема скруббера Вентури

диаметра трубопровода. Для снижения потерь давления внутреннюю поверхность трубы-распылителя подвергают механической обработке.

На 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 — осуществляется в циклоне-каплеуловителе 2.

Выбор пылеочистительного оборудования. Основные факторы, определяющие целесообразный выбор типа аппарата для пылеочистки, — размер частиц пыли, их концентрация в очищаемом газе, необходимая степень улавливания и энергозатраты. В первом приближении аппарат можно выбрать по данным, приведен-

ным на рис. 4.46–4.48. Для окончательного выбора аппарата необходимо выполнить более полный анализ с учетом и других факторов. Для высококонцентрированных пылей, а также в случае, когда твердая фаза является ценным продуктом, следует предпочесть сухую очистку.

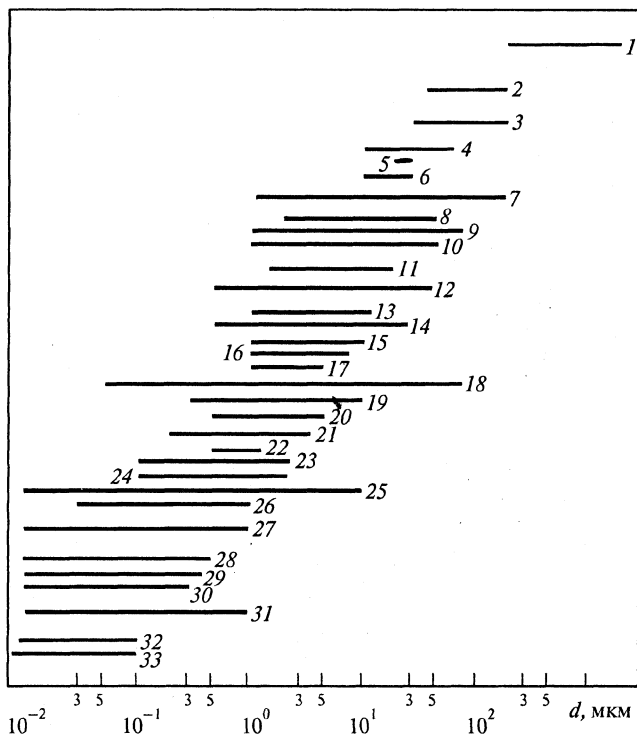


Рис. 4.46. Типичные размеры частиц различных аэрозолей:

1 – литейный песок; 2 – пылевидный каменный уголь; 3 – пыль флотационных выбросов; 4 – летучая зола при сжигании угля в топках с колосниковой решеткой; 5 – ликоподий; 6 – споры; 7 – пыли от вагранок с дутьем, цементная пыль; 8 – летучая зола при сжигании пылевидного угля; 9 – летучая зола при сжигании дров; 10 – пыль в угольных шахтах; 11 – цинковая пыль; 12 – колошниковая пыль; 13 – бактерии; 14 – возгоны оксида цинка; 15 – туман H_2SO_4 ; 16 – пыль красителей; 17 – щелочные туманы; 18 – металлургические пыль и возгоны; 19 – силикозные пыли; 20 – возгоны железа; 21 – аэрозоли в химической промышленности; 22 – обычная сажа; 23 – дымы аммонийных солей; 24 – смоляной туман; 25 – конверторные возгоны; 26 – масляный туман; 27 – сажи из спецмасел, сублимационные возгоны; 28 – возгоны от мартеновских печей; 29 – дым оксида магния; 30 – возгоны оксида свинца; 31 – обычная атмосферная пыль; 32 – табачный дым; 33 – вирусы

Требования к полноте улавливания определяются либо санитарно-гигиеническими условиями чистоты атмосферного воздуха

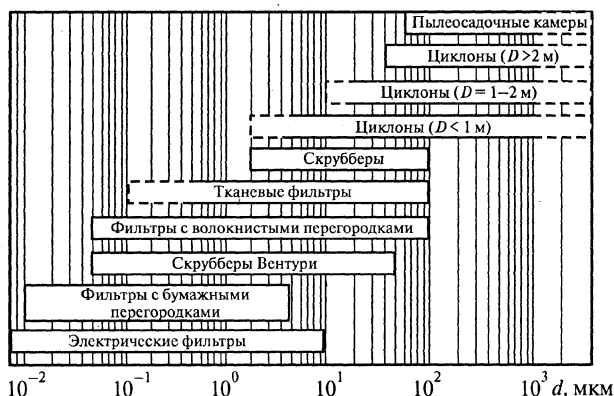


Рис. 4.47. К определению области применения аппаратов для улавливания аэрозольных частиц

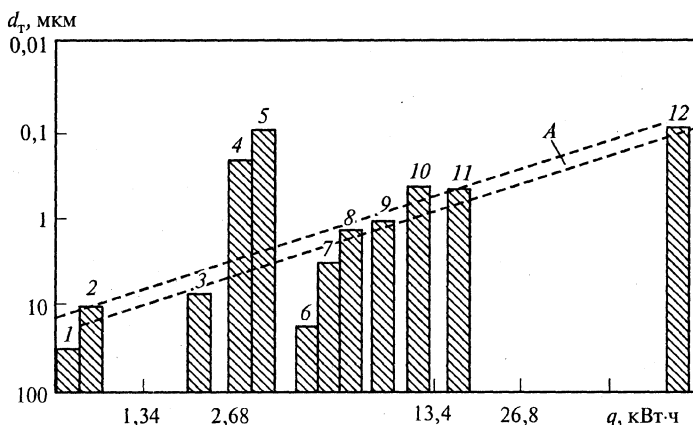


Рис. 4.48. Зависимость минимального размера частиц, улавливаемых в пылеуловителях, от энергозатрат q :

1 – осадительная камера; 2 – инерционные пылеуловители; 3 – оросительная камера; 4 – электрофильтр; 5 – рукавный фильтр; 6 – циклон; 7 – мокрый циклон; 8 – полный форсуночный скруббер; 9 – газопромыватель ударно-инерционного действия; 10 – дисковый скруббер; 11 – низконапорный скруббер Вентури; 12 – высоконапорный скруббер Вентури (A – энергозатраты при инерционном механизме осаждения частиц)

ха, либо условиями работы технологического оборудования, например очистка газов предотвращает чрезмерный износ компрессоров и вентиляторов из-за эрозии их рабочих органов, а также засорение пылью контактной массы в реакторах. 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, которые обычно более экономически эффективны, чем установки 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 с целью предварительной очистки перед вентиляторами для защиты лопаток роторов от эрозии, устанавливают перед электрофильтрами или

рукавными фильтрами (например, в системах пневмотранспорта), а также в случаях, когда требуется разделить уловленную пыль на фракции по крупности частиц.

Большинство мокрых пылеуловителей, улавливающих частицы размером 2–5 мкм, целесообразно использовать главным образом, когда газ нужно 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 осуществлять последующую переработку суспензий (пульп, шламов), а также противокоррозионную защиту аппаратуры.

Рукавные (тканевые) фильтры и электрофильтры обеспечивают высокую степень 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 электрической проводимости пыли, ее слипаемости, дисперсности и химического состава газа. По сравнению с другими аппаратами тонкой очистки электрофильтры 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.

4.10. Перспективная техника разделения неоднородных систем

Известно, что процесс разделения суспензий более интенсивно проходит при использовании избыточного давле-

ния, однако при этом сложно обеспечить непрерывное удаление осадка из аппарата. Поэтому фильтры, работающие под избыточным давлением, как правило, периодического действия, что отрицательно сказывается на их производительности.

В последние годы создан динамический фильтр — аппарат непрерывного действия, работающий под давлением (рис. 4.49) и используемый для разделения или сгущения труднофильтруемых

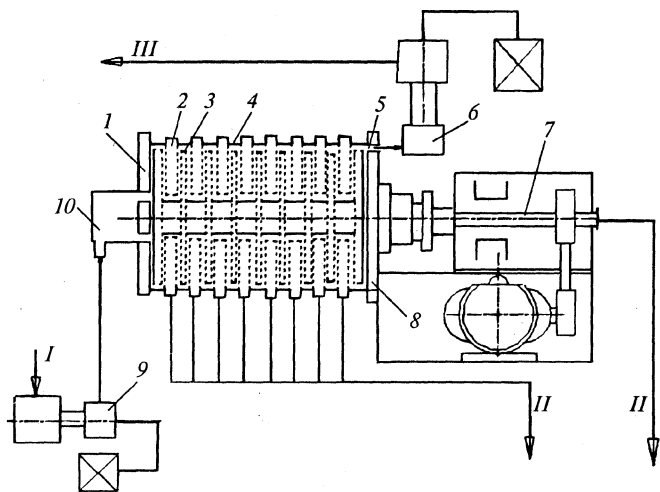


Рис. 4.49. Динамический фильтр:

1 — крышка; 2 — неподвижные диски; 3 — вращающиеся диски; 4 — кольца; 5 — вал; 6, 10 — штуцеры; 7, 9 — насосы; 8 — днище; I — вход суспензии, II — выход фильтрата; III — выход концентрата

суспензий. На этих аппаратах реализуется процесс фильтрования в потоке. Фильтры работают под давлением в режиме непрерывного смыва образующегося осадка с фильтрующей поверхности путем турбулизации суспензии, движущейся в корпусе фильтра между неподвижными 2 и вращающимися 3 дисками. С целью обеспечения необходимого пространства для подвижных дисков между неподвижными дисками устанавливаются кольца 4. Суспензия подается под давлением через штуцер 10 и по мере движения ее по зигзагообразной траектории (на рис. штриховые линии) фильтрат отводится через фильтрующие перегородки во внутренние полости вращающихся и неподвижных дисков. Из вращаю-

щихся дисков фильтрат отводится из аппарата через полый вал 7, а из неподвижных — в отверстия, расположенные по их периферии, и затем в общий коллектор. При движении суспензии к выходному штуцеру 5 концентрация твердой фазы в ней возрастает и благодаря определенному градиенту скорости между дисками поддерживается в текучем состоянии до момента выгрузки. Конечное влагосодержание получаемых сгущенных осадков зависит от их реологических свойств.

Рассмотренные в § 4.5 центробежные сепараторы тарельчатого типа имеют большую разделительную способность, но требуют значительных окружных скоростей, т.е. большого числа оборотов в минуту.

М.Г. Виноградовой разработаны основы новой разновидности процесса разделения тонкодисперсных систем — тонкоканальное сепарирование. Его главное преимущество — достижение идеального разделения при более низкой, чем у тарельчатых сепараторов, частоте вращения ротора, что существенно экономит потребляемую мощность.

Конструктивно эти сепараторы выполнены так же, как тарельчатые, но вместо пакета тарелок устанавливают пакет тонкоканальных вставок. Примером может служить *центробежный жидкостный сепаратор тонкоканального разделения* в полах волокон (рис. 4.50). Устройство состоит из ротора 1 на вертикальном валу, который содержит днище 13, полый распределитель потока 8, перфорированный цилиндрический сборник слива-пермеата 5 с натянутой на нем сеткой 4, закрывающей перфорацию, нижнюю тарелку 12, надетую на распределитель потока 8, и разделительную верхнюю тарелку 10, закрепленную на сборнике 5 сверху, с зазором по отношению к крышке 9, пакеты полых волокон 3, уложенных параллельно нижней и верхней тарелкам между ними и между съёмными сек-

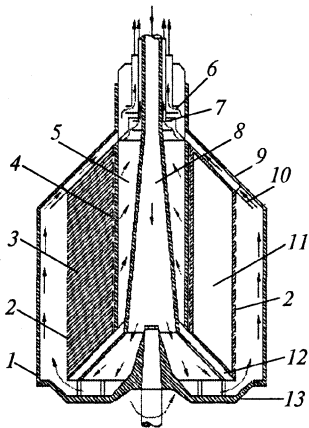


Рис. 4.50. Центробежный жидкостный сепаратор тонкоканального разделения в полах волокон

торными вкладышами 11 и стянутых с периферии наружной сеткой 2, и крышку 9.

Исходная жидкость подается в разделитель сверху под небольшим напором и поступает в распределитель потока 8, сначала в его центральную трубку, а затем через его радиальные каналы — в полость под нижней тарелкой 12. Кольцевой поток огибает кромку нижней тарелки 12 и устремляется наверх, омывая с периферии цилиндрическую поверхность, образованную входными сечениями пакетов 3 полых волокон, чередующихся с секторными вкладышами 11 и стянутых сеткой 2. Попадая в полые каналы волокон, поток разделяется на множество капиллярных течений, меридионально направленных от периферии пакета волокон. Под действием центробежных сил более плотные включения, растворенные в жидкости или находящиеся в ней в коллоидном состоянии, оттесняются в точки каналов, наиболее удаленные от оси вращения. Составляющая центробежной силы, направленная вдоль стенки канала, заставляет эти выделившиеся включения образовать встречную пленку более плотной, чем исходная, жидкости, движущуюся к периферии пакета волокон 3. Стекающие из волокон капли концентрата собираются в периферийной части ротора 1, наиболее удаленной от оси вращения. Концентрат по мере накопления вытесняется порциями к кольцевому зазору между крышкой 9 ротора и разделительной тарелкой 10 и выводится отдельно от пермеата самостоятельным напорным диском 7. Расход концентрата регулируется изменением уровня установки разделительной тарелки 10. Вытекающий из верхних отверстий волокон пермеат через сетку 4 и перфорацию в сборнике 5 проникает в зазор между сборником 5 и распределителем потока 8, движется по нему вверх и выводится через напорный диск 6.

Такие сепараторы позволяют осуществлять процесс сепарирования плохо фильтрующих суспензий, в частности дисперсию неустойчивых систем и высоковязких жидкостей, например осветление и очистку дизельных топлив, минеральных масел, рабочих жидкостей для двигателей внутреннего сгорания и авиационных топлив.

Наряду с совершенствованием традиционных пылеуловителей (циклонов, жалюзийных решеток, пылеосадительных камер) в последнее время создан ряд новых инерционных пылеуловителей, в частности конфузорно-диффузорный пылеуловитель, на-

зываемый в ряде отечественных и зарубежных работ баллистическим. Первыми разработали и испытали для двигателей внутреннего сгорания армейских транспортных средств такой пылеуловитель в США Дю Роше и Джаннотти.

Конфузорно-диффузорный пылеуловитель (КДП) действует следующим образом (рис. 4.51). В конфузорной части КДП пылегазовый поток ускоряется, при этом искривляется линия тока газа, в связи с чем вектор скорости приобретает направление к оси канала. В диффузорной части, где газ расширяется, частицы пыли, вследствие инерции сохраняя приданное конфузором направление, концентрируются около оси диффузора и удаляются через пылеприемник. Перегородка служит для удержания частиц пыли в центральной зоне КДП.

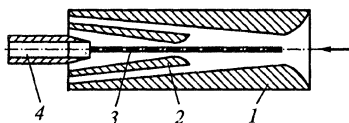


Рис. 4.51. Двухступенчатый диффузорно-инерционный пылеотделитель (авторы изобретения Г.Ю. Степанов, И.М. Зицер, М.С. Корнев):
1 — корпус первой ступени; 2 — корпус второй ступени; 3 — перегородка; 4 — пылеприемник

Результаты испытаний КДП при улавливании кварцевой пыли: степень очистки воздуха 84%, гидравлическое сопротивление 1300 Па при скорости воздуха на входе 15 м/с, коэффициент отсоса 30%.

Разработаны многоступенчатые пылеуловители такого принципа действия. Результаты экспериментальных исследований близки к полученным на двухступенчатом пылеуловителе. Так, при наличии 8 пар лопаток степень очистки воздуха от кварцевой пыли 78–80%, гидравлическое сопротивление 1500 Па.

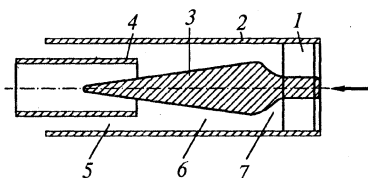


Рис. 4.52. Схема кольцевого КДП с периферийным отводом пыли:
1 — завихритель; 2 — корпус; 3 — обтекатель; 4 — трубка для выхода очищенного воздуха; 5 — периферийный пылеприемник; 6 — кольцевой диффузор; 7 — кольцевой конфузор

На рис. 4.52 показан кольцевой КДП с периферийным отводом пыли, который дал следующие результаты испытаний: степень очистки воздуха 95%, гидравлическое сопротивление около 1900 Па.

Разработано большое число конфузорно-диффузорных пылеуловителей, но они, как правило, характеризуется низким гидравлическим сопротивлением и невысокой степенью очистки и пока

не нашли применения в химической промышленности, но, безусловно, их использование экономически оправдано при первичной очистке газового потока и при концентрировании аэрозолей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие аппараты наиболее широко используются в промышленности для разделения эмульсий, для разделения суспензий, аэрозолей?
2. Почему патронные фильтры предназначены для осветления и разделения суспензий с малым содержанием твердой фазы (до 5%)?
3. В чем основные достоинства автоматизированных камерных фильтр-прессов?
4. В барабанных вакуум-фильтрах процессы фильтрования, обезвоживание осадка, его промывка, регенерация ткани проводятся непрерывно. Каким образом это оказалось возможным?
5. В чем основное преимущество дисковых вакуум-фильтров по сравнению с барабанными?
6. У барабанных фильтров, работающих под давлением, производительность в 1,5–2,5 раза выше при меньшей конечной влажности осадка, чем у барабанных вакуум-фильтров такого же размера. За счет чего это достигается?
7. В чем принципиальное отличие осадительных и фильтрующих центрифуг?
8. Почему двух- и более каскадные пульсирующие центрифуги были быстро внедрены в промышленность несмотря на сложность конструкции?
9. В вибрационных фильтрующих центрифугах можно регулировать скорость движения осадка и время его пребывания в барабане. Каким образом это осуществляется?
10. Центробежные сепараторы различают по назначению на разделяющие и осветляющие. В чем принципиальное различие этих сепараторов?
11. Идея Бехгольстейма использовать вставку в виде пакета тонкостенных конусных тарелок для молочного центробежного сепаратора стала быстро использоваться при создании тарельчатых сепараторов, которые более 100 лет применяются в различных производствах. В чем преимущества такого сепарирования по сравнению с использованием полых роторов?
12. Из условий прочности считается, что для достижения высоких значений фактора разделения в сепараторах нужно использовать роторы малого диаметра. Почему?
13. Для центробежных сепараторов рекомендуется выбирать рабочую скорость вращения ротора в 5–6 раз больше критической. Почему?
14. В чем принцип осаждения частиц в электрофильтрах?
15. В чем преимущества и недостатки сухих и мокрых пылеуловителей?

ГЛАВА 5 РЕАКЦИОННЫЕ АППАРАТЫ

5.1. Назначение и классификация реакционных аппаратов

Химическими реакторами или реакционными аппаратами называют устройства для проведения химических реакций с целью получения определенных веществ.

Промышленные химические реакторы отличаются большим конструктивным разнообразием. Конструкция химического реактора и связанного с ним оборудования для физических процессов решающим образом зависит от характера проводимой в нем реакции. Приведем примеры: 1) реакция протекает с достаточной скоростью лишь при высоких температуре и давлении — реактор выполняется в виде цилиндра с толстыми стенками, в технологическую схему включаются машины и аппараты для сжатия и нагревания газовой реакционной смеси; 2) реакция протекает на катализаторе — применяются аппараты для тщательной очистки реакционной смеси от веществ, отравляющих катализатор; 3) реакция обратима и, следовательно, протекает не полностью — применяется 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 благодаря применению нового более совершенного реактора (например, при создании более высокого давления, лучшего температурного или гидравлического режима в аппарате) реакция протекает быстрее, с большим выходом целевого продукта и меньшим выходом побочных продуктов. Это в свою очередь отражается на работе и конструк-

тивных 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, которые в существенной степени определяют течение реакции.

Используют два типа проточных, т.е. непрерывного действия, реакторов с существенно различными гидравлическими условиями — кубовый (реактор смешения) и трубчатый (реактор вытеснения). *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 применяют 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. Концентрация веществ, участвующих в реакции, плавно изменяется по длине аппарата, и это изменение обусловлено только реакцией. В таком аппарате не происходит разбавления поступающих в него исходных веществ продуктами реакции.

Конструкция реактора зависит еще от многих других факторов, таких как агрегатное состояние реагирующих и образующих веществ, теплового эффекта и интенсивности теплообмена, химических свойств перерабатываемых веществ, наличия катализатора и его состояния. Поскольку один и тот же реактор может попасть в разные классификационные группы, нет четкой классификации реакторов. Поэтому часто используют классификацию реакторов по смешанным признакам. Так, при рассмотрении

конструкций реакторов удобна классификация по двум признакам — агрегатному состоянию реагентов и наличию катализатора. При таком подходе все химические реакторы можно подразделить на следующие большие группы: аппараты для жидкостных реакций; газожидкостные реакторы; аппараты для проведения реакций между газом и твердым телом; аппараты для проведения газовых реакций на твердом катализаторе; технологические печи.

5.2. Аппараты для жидкостных реакций

Реакторы, в которых реакционная среда является жидкостью, довольно распространены в химической промышленности. В качестве примеров можно привести процессы органического синтеза, получения каучука, персульфата калия, полимеризацию бутадиена. Реакции в жидкой среде могут протекать как в однофазной (гомогенной) системе, так и в двухфазной, т.е. в эмульсии.

При *гомогенных процессах* для обеспечения равномерного протекания реакции в объеме необходимо перемешивание; 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.

В *эмульсионных процессах* исходные вещества растворены в двух несмешивающихся жидкостях. Для течения реакции необходим контакт фаз. При этом одна из жидкостей обычно в виде капель взвешена в другой (дисперсионной среде). В большинстве случаев для этого применяют вращающиеся мешалки. Иногда эмульсии стабилизируют поверхностно-активными веществами, что позволяет уменьшить интенсивность перемешивания (следовательно, снизить необходимую мощность), но это затрудняет последующее отстаивание эмульсии.

Течения эмульсионных жидкостных реакций возможны в кинетической или диффузионной области. Это определенным образом влияет на выбор конструкции реактора. В **д и ф ф у з и о н н о й** области (быстрые реакции) необходимо обеспечить возможно большую поверхность контакта фаз, а в **к и н е т и ч е с к о й** области (медленные реакции) 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.

Перемешивающие устройства. На рис. 5.1 показаны конструкции различных перемешивающих устройств. Перемешивание можно осуществлять с использованием мешалок разных конструктивных

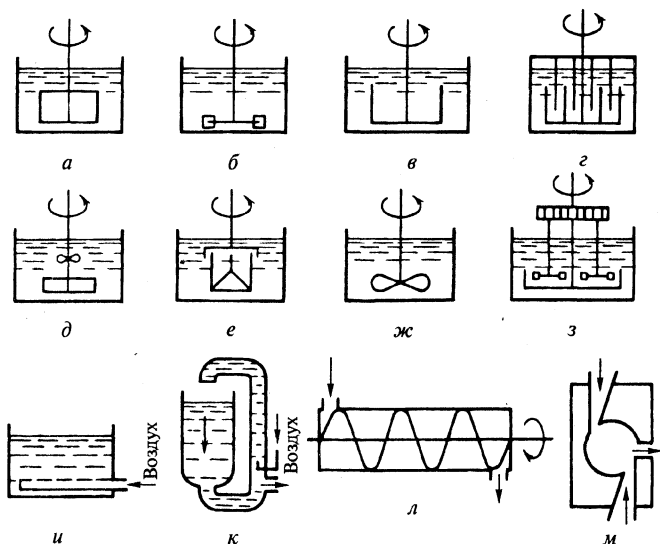


Рис. 5.1. Перемешивающие устройства для жидкости:

а–з – мешалки (*а* – лопастная, *б* – турбинная, *в* – якорная, *з* – рамная, *д* – комбинированная лопастно-винтовая, *е* – барабанная, *ж* – винтовая, *з* – планетарная);
и – пневматическое устройство; *к* – воздушный подъемник (газлифт); *л* – шнек;
м – струйный смеситель

форм, пневматических, центробежных и шнековых устройств, сопл, различного типа тарелок и насадок, реализацией турбулентного течения реагентов. Применение того или иного способа перемешивания определяется необходимым гидродинамическим режимом течения реагентов в аппарате.

Режим *идеального смешения* можно реализовать применением мешалок, конструкции которых показаны на рис. 5.1, *а–з*.

В реакторах *идеального вытеснения* перемешивание допускается лишь в поперечном сечении аппарата, что при обработке высо-

ковязких жидкостей может быть достигнуто применением шнека (рис. 5.1, л). Среды с небольшой вязкостью перемешивают путем турбулизации потока реакционной смеси в трубчатом реакторе. Для предварительного смешения реагентов перед подачей в реактор применяют струйный смеситель (рис. 5.1, м).

Для поддержания оптимального температурного режима в реакторах используют различные теплообменные устройства, обеспечивающие нагрев или охлаждение реакционной массы. Выбор 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

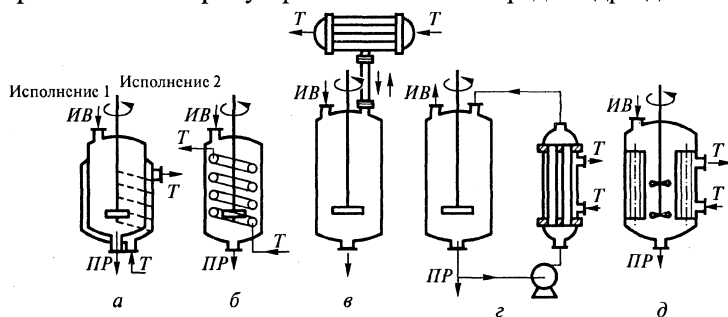


Рис. 5.2. Схемы теплообменных устройств реакторов:

а – рубашка; б – встроенный внутренний змеевик; в – выносной конденсатор;
г – выносной теплообменник; д – встроенный внутренний теплообменник;
ИВ – исходные вещества; ПР – продукты реакции; Т – теплоноситель

наружные (греющая рубашка, рис. 5.2, а) и внутренние (погруженный внутрь аппарата змеевик, рис. 5.2, б).

В качестве примеров на рис. 5.2 показаны наиболее распространенные способы организации теплообмена и теплообменные устройства, применяемые в реакторах.

Остановимся на *встроенных теплообменных устройствах* (выносные теплообменные аппараты рассмотрены в гл. 2).

Выбор и конструктивное оформление встроенного теплообменного устройства зависят от характера технологического про-

цесса и количества передаваемой в единицу времени теплоты, а также от физических свойств, температуры и давления теплоносителя, агрегатного состояния, агрессивных и физических свойств нагреваемой среды.

Наружные теплообменные устройства отличаются удобством контроля состояния реактора и теплообменного устройства, а также простотой конструкции и обеспечения более мягкого и равномерного нагрева реакционной массы. Гладкая рубашка (рис. 5.2, а, исполнение 1) эффективна, когда скорость движения теплоносителя мало влияет на теплопередачу, например при обогреве паром. При использовании жидких теплоносителей для увеличения ско-

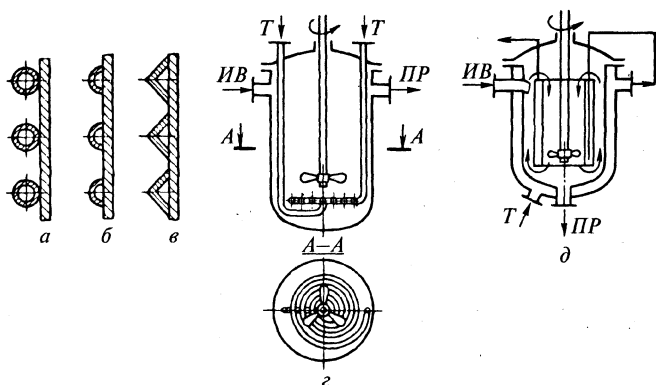


Рис. 5.3. Наружные и внутренние теплообменные элементы реакторов:
ИВ, ПР и T — соответственно исходные вещества, продукты реакции
и теплоноситель

рости их движения к рубашке приваривают спираль (рис. 5.2, 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, применяют приваренные снаружи к стенке реактора змеевики, выполненные из целой трубы (рис. 5.3, а), полутрубы (рис. 5.3, б) или профильного проката (рис. 5.3, в). К недостаткам приварных змеевиков следует отнести большую длину сварных швов, трудность обеспечения герметичности, повышенное гидравлическое сопротивление, что особенно важно при естественной циркуляции теплоносителя.

На наружных стенках реактора не всегда удается разместить теплообменный элемент с необходимой поверхностью нагрева или охлаждения. Следовательно, наружными теплообменными устройствами можно снабжать реакторы небольшого объема или с умеренными тепловыми нагрузками.

Внутренние теплообменные элементы дополнительно устанавливают, если поверхность наружных теплообменных устройств недостаточна и не обеспечивает теплообмена. Их выполняют в виде трубчатой спирали (рис. 5.2, б), установленной около стенки, или плоской (рис. 5.3, з), установленной 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. 5.3, д) или пучки прямых труб (рис. 5.2, д). Иногда применяют выносные конденсаторы или теплообменники (см. рис. 5.2, в, з).

Внутренние тепловые устройства имеют большую поверхность теплообмена, выдерживают достаточно высокие давления, просты в изготовлении и монтаже. К их недостаткам можно отнести усложнение конструкции реактора, трудность очистки аппарата, наружной поверхности змеевика и удаления воздуха из спирали.

Конструкции реакторов. Рассмотрим конструкцию реакторов для эмульсионной полимеризации, которую проводят как непрерывный процесс. Для этого используют агрегаты, состоящие из ряда последовательно соединенных полимеризаторов, каждый из которых работает в близких к идеальному смешению условиях.

Реактор для полимеризации дивинила со стиролом при температуре 50 °С (рис. 5.4) представляет собой вертикальный цилиндрический аппа-

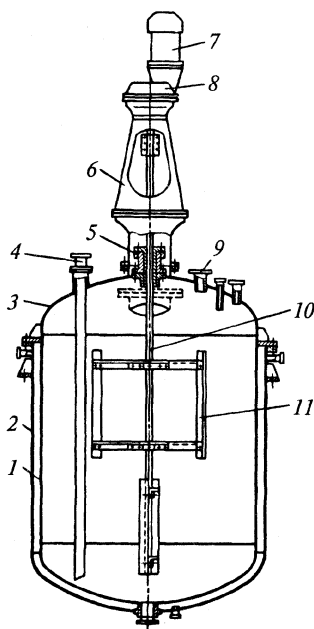


Рис. 5.4. Реактор для полимеризации дивинила со стиролом

рат (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 полимер, что ухудшает теплопередачу; поэтому реактор периодически (2 раза в год) чистят.

Реактор типа многосекционной колонны для полимеризации или поликонденсации (рис. 5.5) применяют в процессах получения полистирола и фенолформальдегидных 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. Чтобы исключить утечку реагирующих веществ через отверстия для вала из секции в секцию, в днищах секций предусмотрены 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 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 выгру-

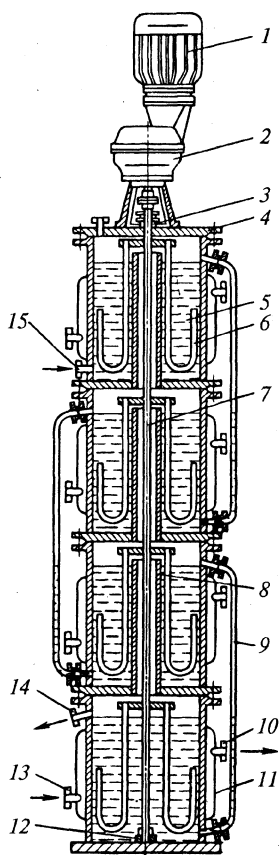


Рис. 5.5. Многосекционный реактор для полимеризации или поликонденсации

жается через штуцер 14. Таким образом, реактор является непрерывно действующим, и его 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.

Аппараты с *внутренними теплообменными элементами* большой поверхности используют для проведения реакций с большим тепловым эффектом. Примером может служить реактор с пучком двойных теплообменных труб для алкилирования углеводородов, в частности для получения изооктана из изобутана и бутилена. В реакторе циркулирует эмульсия смеси углеводородов с серной кислотой. Вертикальный цилиндрический корпус 6 реактора (рис. 5.6) рассчитан на давление 1 МПа. Внутри корпуса для отвода теплоты реакции расположен пучок 8 двойных теплообменных труб (трубок Фильда), окруженный кожухом 7, который играет 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 реб-

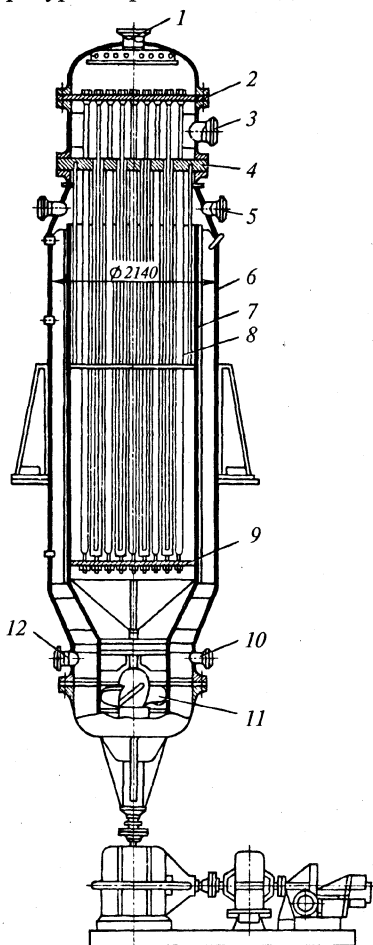


Рис. 5.6. Реактор с пучком двойных теплообменных труб

рами. 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 2. Нижняя решетка 9 служит для крепления шпильками нижних концов теплообменных труб, чтобы обеспечить жесткость трубного пучка. Концы внутренних труб снабжены продольными ребрами.

Хладагент (жидкий 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 по штуцеру 3 из приемной камеры, расположенной между трубными решетками 2 и 4. Исходные вещества вводятся в нижнюю часть корпуса через штуцеры 10 и 12, продукт отводится сверху через штуцер 5.

Аналогично сконструированы горизонтальные реакторы с пучком U-образных теплообменных труб.

Реакционный агрегат (рис. 5.7) с выносным теплообменником состоит из реактора 1, выносного перемешивающего устройства 3

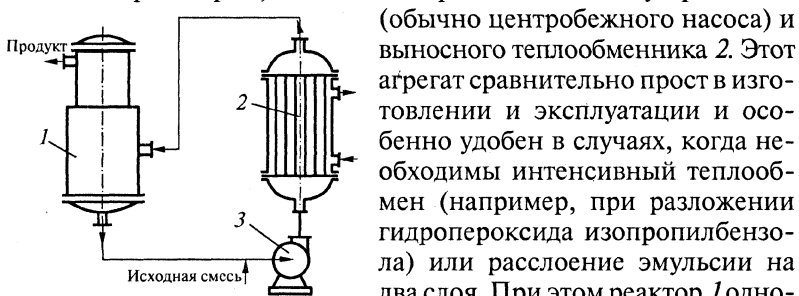


Рис. 5.7. Схема агрегата с выносным теплообменником

(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 гидропероксида 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, потребовали создания непрерывно действующих реакторов, работающих по принципу идеального вытеснения. Этот принцип может быть реализован, если выполнить аппарат в виде трубы достаточ-

ной длины. Теплообмен в такой трубе можно осуществить достаточно просто, если снабдить ее рубашкой. Сложность применения этих аппаратов определяется небольшими скоростями реакций в жидкой фазе, вследствие чего необходима реакционная зона очень большой длины для достижения необходимой конверсии. Достаточно сказать, что непрерывно действующий проточный реактор для гидролиза дихлорэтана имеет трубы длиной около 1 км. Для увеличения эффективности процесса нужно обеспечить достаточную скорость 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 применяя трубы большого диаметра. Вследствие этого длина реактора получается сравнительно небольшой. Рециркуляцию обеспечивают специальными циркуляционными насосами. Кратность циркуляции выбирают так, чтобы обеспечить турбулентный режим течения жидкости.

Уплотнения валов реакторов. В качестве уплотнений валов наиболее широко применяют *натяжные сальники*. При высокой температуре в аппарате или интенсивном трении сальники делают охлаждаемыми (рис. 5.8). Такой сальник состоит из сальниковой коробки с рубашкой 2, нажимной крышки 1, сальниковой набивки 3, грунд-буксы 4.

В аппаратах повышенного давления применяют сальники с большой высотой набивки и принудительной подачей масла под давлением, которое подводится в кольцо, расположенное между двумя слоями набивки, и не только обеспечивает смазку сальника, но и служит гидравлическим затвором.

В качестве набивок широко используют промасленные асбестовые или хлопчатобумажные шнуры круглого или квадратного сечения. Хорошими антифрикционными свойствами обладают материалы на основе фторопласта (типа ФУМ), которые выпускаются в виде ленты или круглого шнура. При больших частотах вращения, высоких давлениях и температурах применяют сальники с

твердой набивкой, выполненной из разрезных колец из цветных металлов, твердых пластических масс или прессованных графитов.

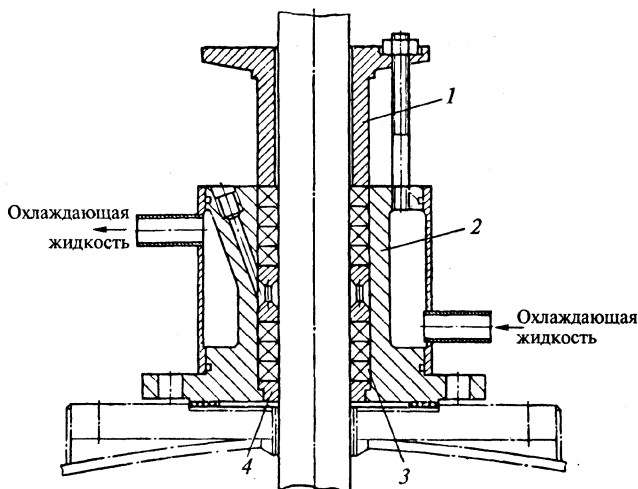


Рис. 5.8. Сальник с охлаждением

Толщина сальниковой набивки определяется по эмпирической формуле:

$$S = (1,5 \dots 2,5) \sqrt{d},$$

где d — диаметр вала, мм.

Высоту сальниковой коробки принимают равной $(5-8)S$, а для высоких давлений $(10-12)S$.

В промышленности, в частности в реакторах с мешалками, нашли широкое применение *торцовые уплотнения*. В отличие от натяжных сальников, в которых уплотнение осуществляется на цилиндрической поверхности вала, в торцовом уплотнении герметичность обеспечивается путем контакта двух кольцевых поверхностей: подвижное кольцо связывается с валом, неподвижное — с корпусом аппарата.

Торцовые уплотнения имеют значительные преимущества: они работают с небольшой утечкой газа; в период нормальной работы не требуют обслуживания; правильно подобранные торцовые уплотнения отличаются большой устойчивостью и долговеч-

ностью. Самый ответственный элемент торцового уплотнения — пара трения. Надежность работы уплотнения зависит в основном от материала и качества обработки трущихся колец. Обычно одно кольцо изготавливают из более твердого материала. Наиболее распространены следующие материалы в различных комбинациях: кислотостойкая сталь, бронза, керамика, графит, фторопласт и твердая резина.

Материалы на основе графита характеризуются высокой кислотостойкостью и не требуют специальной смазки. Керамические кольца, применяемые в парах трения, имеют исключительную химическую стойкость, высокую твердость и износоустойчивость, но отличаются пористостью и склонностью к растрескиванию.

Трущиеся поверхности должны быть отшлифованы и тщательно притерты. Одинарное торцовое уплотнение (рис. 5.9) состоит из следующих основных деталей: сильфона 1, приварен-

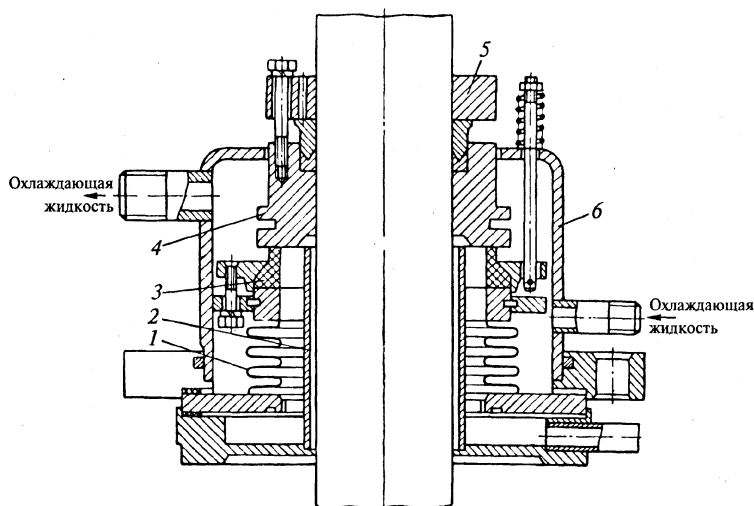


Рис. 5.9. Одинарное торцовое уплотнение

ного к стакану 2 и неподвижному кольцу, вращающегося кольца 3 и водила 5. Трущиеся кольца закрыты кожухом 6, связанным с фланцем. Водило крепится на валу аппарата и связано винтами с подвижной втулкой 4. В корпус уплотнения подается охлаждающая жидкость, которая служит также смазкой трущейся пары.

Используются и двойные торцовые уплотнения, более сложные по конструкции, но обеспечивающие более высокую герметичность.

Бессальниковый привод мешалки используют при высоких давлениях и температурах, когда тщательное уплотнение сальника становится затруднительным. В аппаратах с бессальниковым приводом энергия передается на вал мешалки посредством вращающегося магнитного поля, развиваемого статором асинхронного электродвигателя.

Бессальниковый привод мешалки состоит из асинхронного электродвигателя, статор 1 которого отделен от ротора 2 неподвижной экранирующей гильзой 3, вала 5 мешалки 7, на конце которого смонтирован ротор, герметичного корпуса 4 и переходного стакана 6 (рис. 5.10).

Вращающееся магнитное поле, создаваемое статором 1, заставляет вращаться ротор 2, а вместе с ним и вал 5 мешалки. Экранирующая гильза 3 изготовлена из металла с высокой магнитной проницаемостью (медь) толщиной 0,5–1 мм и запрессована в статоре. Она может выдерживать высокие давления, так как опирается на статор. Сверху экранирующая гильза закрыта крышкой 10. Герметичный корпус 4, в котором смонтирован статор с экранирующей гильзой, присоединяется к переходному стакану 6, закрепленному на корпусе реактора.

Таким образом, внутренние полости реактора, переходного стакана и экранирующей гильзы составляют единую полость, которая надежно герметизируется с помощью алюминиевых прокладок 8.

Если рабочая среда в реакторе оказывает корродирующее действие на ротор, то во внутреннюю полость экранирующей гильзы подводят инертный газ с давлением выше давления

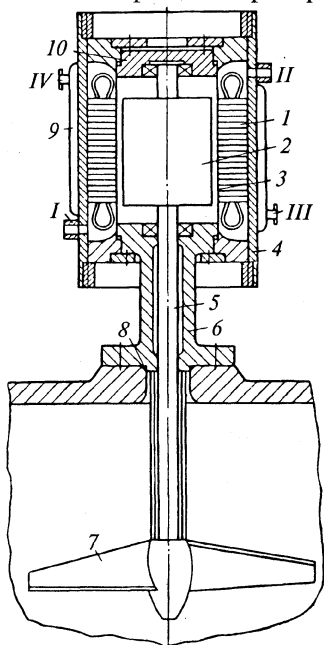


Рис. 5.10. Бессальниковый привод мешалки

рабочей среды внутри реактора. Статор охлаждается трансформаторным маслом, прокачиваемым через корпус 4 и охлаждающим также экранирующую гильзу, а через нее и ротор. Масло поступает в корпус через нижний штуцер I, а выходит через штуцер II; его можно частично охлаждать водой, поступающей в рубашку 9 через штуцер III и выходящей из нее через штуцер IV. При больших тепловыделениях электродвигателя окончательное охлаждение масла производится в отдельном теплообменнике.

Другой вариант бессальникового привода мешалки получил название «узел вращения магнитный герметичный». Схема магнитной муфты узла вращения привода мешалки показана на рис. 5.11. Магнитная муфта состоит из концентрично расположенных наружной (ведущей) и внутренней (ведомой) полумуфт с полюсными зубцами, разделенными герметизирующим магнитным экраном (гильзой). В наружной полумуфте размещена система цилиндрических параллельно замкнутых магнитов, создающих осевой магнитный поток, который замыкается сквозь экран и воздушный зазор между полюсными зубцами полумуфт. Наружная полумуфта приводится во вращение от самостоятельного электродвигателя через клиноременную передачу. При этом зубцы наружной полумуфты взаимодействуют с аналогичными зубцами внутренней полумуфты, обеспечивая тем самым синхронное вращение последней. Ведомый вал установлен на опорах качения, выполненных из коррозионно-стойкой стали.

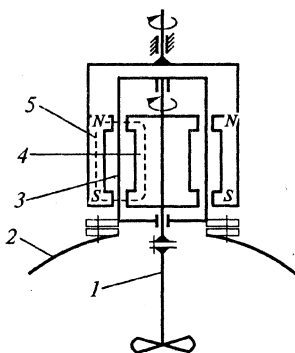


Рис. 5.11. Схема магнитной муфты узла вращения:
1 — мешалка; 2 — крышка аппарата; 3 — магнитный экран;
4 — внутренняя полумуфта;
5 — наружная полумуфта

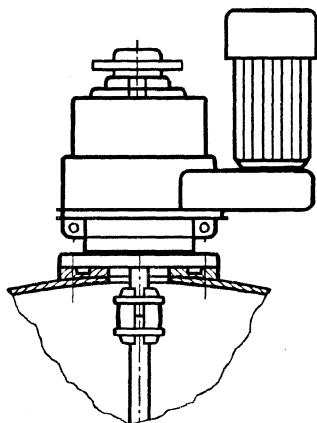


Рис. 5.12. Общий вид узла вращения

тов, создающих осевой магнитный поток, который замыкается сквозь экран и воздушный зазор между полюсными зубцами полумуфт. Наружная полумуфта приводится во вращение от самостоятельного электродвигателя через клиноременную передачу. При этом зубцы наружной полумуфты взаимодействуют с аналогичными зубцами внутренней полумуфты, обеспечивая тем самым синхронное вращение последней. Ведомый вал установлен на опорах качения, выполненных из коррозионно-стойкой стали.

Общий вид узла вращения схематично показан на рис. 5.12.

Узел вращения магнитный герметичный используется для давления до 1,6 МПа и температуры рабочей среды от -20 до $+300$ °С. Он может устанавливаться во взрывоопасных помещениях класса В-1а.

5.3. Сосуды с рубашкой. Расчет на прочность

На практике используют сосуды с рубашками различных конструкций (рис. 5.13–5.16).

Для соединения сосуда с рубашкой можно использовать сопряжения (см. рис. 5.13) конические с отбортовкой (или без отбортовки) и кольцевые.

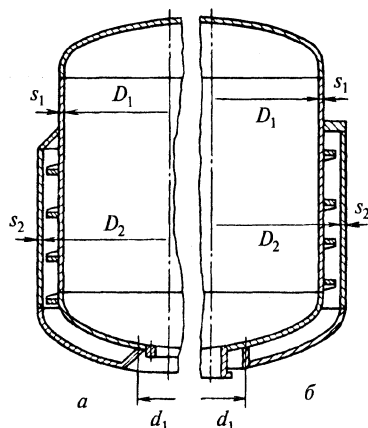


Рис. 5.13. Варианты сопряжения сосуда с U-образной рубашкой:
а – коническое; б – кольцевое

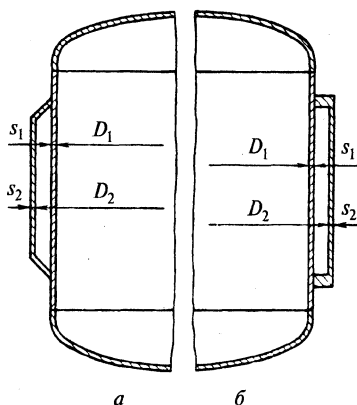


Рис. 5.14. Варианты сопряжения сосуда с цилиндрической рубашкой:
а – коническое; б – кольцевое

Угол конуса α (рис. 5.17) принимают равным 30 или 45° . Значения α более 45° не рекомендуется из соображений технологии изготовления и прочности.

Внешними нагрузками, обуславливающими напряженное состояние конструкции, для сосудов с рубашками являются давле-

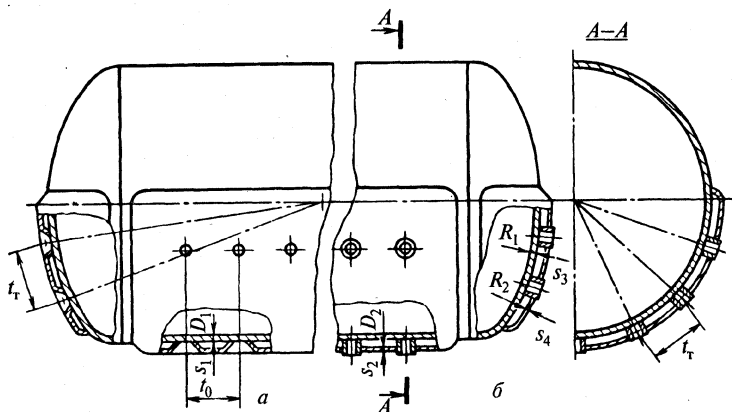


Рис. 5.15. Сосуды с рубашками, сопряженными с корпусом сосуда:
а — отбортовкой; б — анкерными трубами

ние p_2 в рубашке и разность температурных удлинений ϵ , корпуса и рубашки.

Сосуды с U-образными рубашками. В такой конструкции действующее на днище рубашки давление p_2 вызывает 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. С допуском в сторону запаса действием давления на днище сосуда можно пренебречь (см. рис. 5.17). Тогда

$$Q_2 = 0,25\pi(D_2^2 - d_1^2)p_2,$$

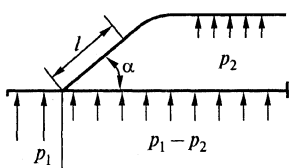


Рис. 5.17. Схема нагружения конического сопряжения

где D_2 — внутренний диаметр рубашки, м;
 d_1 — диаметр сопряжения рубашки с днищем, м.

На коническое или кольцевое сопряжение (см. рис. 5.13) в результате совместного действия осевой неуравновешенной силы Q_2 и внутреннего давления p_2 действует изгибающий момент

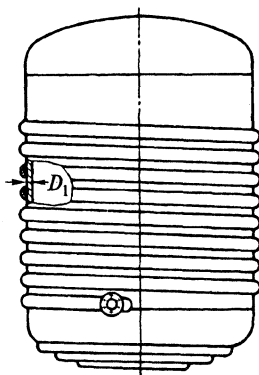


Рис. 5.16. Сосуд с приваренным змеевиком

$$M = Q_2 l_0 - p_2 \int_{0,5 D_1}^{0,5 D_2} 2\pi r (r - 0,5 D_1) dr \approx 0,25 \pi p_2 l_0 (D_1 D_2 - d_1^2),$$

где $l_0 = 0,5 [(D_2 + s_2) - (D_1 + 2s_2)]$ — расстояние от середины стенки рубашки до наружной стороны стенки сосуда, м; D_1 — внутренний диаметр сосуда, м; r — текущий радиус, м.

Отсюда находим эффективную (приведенную) осевую силу

$$Q_1 = \frac{M}{l_0} = 0,25 \pi p_2 D_2^2 A,$$

где $A = \frac{D_1 D_2 - d_1^2}{D_2^2}$ — 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 сосуда, то на соединение действует вес рубашки G_2 и $Q_1 = 0,25 \pi p_2 D_2^2 A + G_2$.

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. 5.18, а);

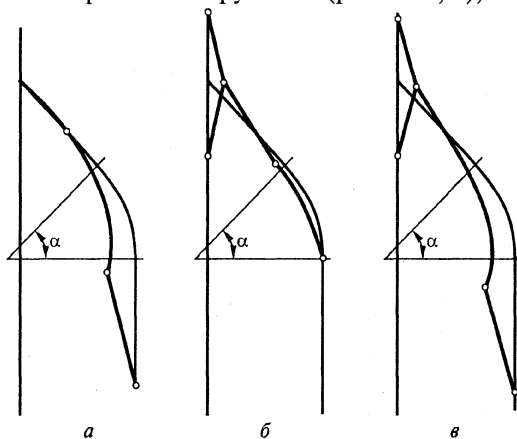


Рис. 5.18. Схемы деформаций сопряжения в стадии предельного равновесия

- ♦ стенка рубашки не имеет пластического шарнира (поперечное сечение рубашки не деформируется); шарниры возникают в стенке сосуда и в коническом сопряжении (рис. 5.18, б);
- ♦ коническое сопряжение не имеет пластического шарнира; шарниры возникают в сосуде и рубашке (рис. 5.18, в).

Уравнения для определения допускаемого давления $[p_2]$ в каждом из рассматриваемых случаев деформации меридионального сечения аппарата можно представить в виде

$$[p_2] = \frac{2[\sigma_2]\varphi_2(s_2 - c)B}{D_2 + (s_2 - c)A},$$

где $[\sigma_2]$ — допускаемое напряжение для материала рубашки, МПа; φ_2 — коэффициент прочности продольных сварных швов рубашки; s_2 — толщина стенки рубашки, мм; c — конструктивная прибавка к толщине стенки, мм; $B = 2\sqrt{\frac{s_2}{D_2}} \min\{X_1; X_2; X_3\}$ (X_i — вспомо-

гательная величина, характеризующая условия деформации в стадии предельного равновесия); X_1 , X_2 и X_3 соответствуют потере несущей способности по рис. 5.18, в, а и б).

Потеря несущей способности по варианту рис. 5.18, а может происходить с образованием пластического шарнира либо в конусе, либо в зоне сопряжения с сосудом. В обоих случаях

$$X_2 = f_2 \sqrt{1 + \varphi_{R2}},$$

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; $\rho = \frac{r_0 + 0,5s_2}{\sqrt{D(s-c)}}$; $\varepsilon = \frac{l_0}{\sqrt{D_2(s_2c)}}$; r_0 — внутренний

радиус отбортовки конического сопряжения.

Поскольку, как указано, для схемы, соответствующей рис. 5.13, а, пластический шарнир может образоваться либо в конусе, 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. 5.18, в стадия предельного равновесия характеризуется величиной

$$X_1 = \frac{\cos \alpha}{\varepsilon} \left(\frac{\varphi_{R1} + \varphi_{R2}}{4 \cos \alpha} + \lambda f_1 \right),$$

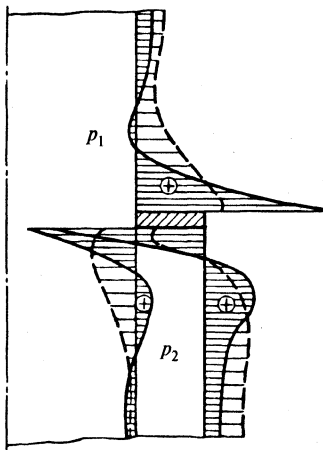


Рис. 5.19. Эпюры напряжений, возникающих вблизи сопряжения при $p_2 > p_1$: сплошные линии — осевые напряжения, штриховые — кольцевые напряжения; p_1, p_2 — давления в корпусе и рубашке

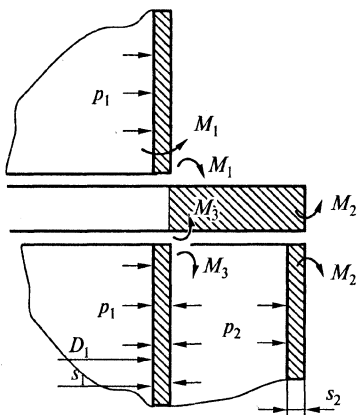


Рис. 5.20. Схема нагружения кольцевого сопряжения

где $\varphi_{p1} = \varphi_{T1}$ — 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, приведенной на рис. 5.18, б, характеризуется величиной

$$X_3 = x f_3 + \left(\frac{\varphi_{R1} + \varphi_{R2}}{4\mu \cos \alpha} + \mu \right) f_4,$$

где x — коэффициент отношения пределов прочности материалов сосуда и рубашки; μ — относительная эффективная несущая длина конуса (значения x, μ, f_3, f_4 приводятся в ГОСТ 25867–83).

Несущую способность кольцевого сопряжения рассчитывают на основании следующих соображений. При соединении сосуда и рубашки кольцами образование пластических шарниров (рис. 5.19) 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. 5.20).

Из условия прочности зоны примыкания рубашки к кольцу допускаемое избыточное давление в рубашке

$$[p_2] = \frac{(H^2 + M_2 + M_3)[\sigma_0]\varphi_{R0}}{M_0},$$

где $H = \frac{h_0 - c}{\sqrt{D_1(s_1 - c)}}$ — относительная толщина кольца; h_0 — испол-

нительная толщина кольца; $[\sigma_0]$ — допускаемое напряжение для материала кольца; φ_{R0} — коэффициент прочности радиального сварного шва кольца; M_0 — относительный момент нагружения;

$$M_1 = \frac{[\sigma_1](s_1 - c)}{2[\sigma_0]\varphi_{R0}b_0} \left[2 - \frac{1}{2} \left(\frac{p_1 D_1}{2[\sigma_1](s_1 - c)} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{(p_1 - p_2) D_1}{2[\sigma_1](s_1 - c)} \right)^2 \right];$$

$$M_2 = \frac{[\sigma_2](s_2 - c)\varphi_{R2}}{2[\sigma_0]\varphi_{R0}b_0} \frac{D_2(s_2 - c)}{D_1(s_1 - c)};$$

$$M_3 = \min \left\{ \frac{D_1\varphi_{R1}}{2b_0\varphi_{R0}} H^2; (1 - 2H)M_1 \right\};$$

$$M_0 = \frac{l_0}{b_0} \frac{D_2^2}{2D_1(s_1 - c)} \frac{D_1 D_2 - d_1^2}{D_2^2} = \frac{l_0}{b_0} \frac{D_1 D_2 - d_1^2}{2D_1(s_1 - c)};$$

где b_0 — ширина кольца.

Для проверки сопротивления усталости аппаратов с U-образными рубашками сравнивают возникающий при эксплуатации размах напряжений $\Delta\sigma$ с допускаемой амплитудой напряжения $[\sigma_a]$ при рабочем числе циклов нагружения. При этом условие прочности имеет вид

$$\Delta\sigma \leq 2 [\sigma_a].$$

Размах напряжений, возникающих в процессе эксплуатации

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta Q_1}{[Q_1]} [\sigma_2] K_\sigma. \quad (5.1)$$

Здесь ΔQ_1 — изменение осевой силы в рабочем цикле; $[Q_1] = 0,25 [p_2] \pi D_2^2 A$ — допускаемая осевая сила в рубашке; $[\sigma_2]$ — допу-

скаемое 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 деформаций ϵ_t корпуса и рубашки:

$$\Delta Q_1 = 0,25\pi p_2 D_2^2 A + \Delta Q_T. \quad (5.2)$$

В свою очередь разность температурных деформаций корпуса и рубашки $\epsilon_t = \alpha_1 \Delta t_1 - \alpha_2 \Delta t_2$, где α_1 и α_2 — температурные коэффициенты линейного расширения материалов соответственно сосуда и рубашки, $^\circ\text{C}$; Δt_1 и Δt_2 — разности температур в начале и 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. 5.21), в которой днища являются упругими основаниями. Обозначим упругости днища сосуда и днища рубашки соответственно через C_1 и C_2 , тогда можно записать $k\epsilon_t = \Delta Q_T (C_1 + C_2)$, откуда

$$\Delta Q_T = \frac{k\epsilon_t}{C_1 + C_2}; \quad (5.3)$$

$$C_1 = \frac{1}{E_1 d_1} \frac{41}{\pi 5} \sqrt{\left(\frac{D_1}{2s_3}\right)^3}; \quad (5.4)$$

$$C_2 = \frac{1}{E_2 d_1} \frac{41}{\pi 5} \sqrt{\left(\frac{D_2}{2s_4}\right)^3};$$

здесь E_1 и E_2 — модули упругости материалов соответственно сосуда и рубашки, МПа; s_3 и s_4 — толщины эллиптического днища соответственно сосуда и рубашки, мм.

Подставляя соотношения (5.2)–(5.4) в уравнение (5.1), принимая, что $E_1/E_2 = 1$ и

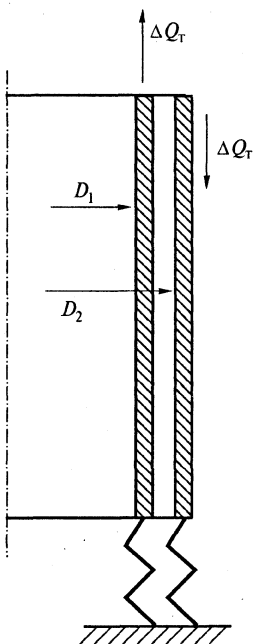


Рис. 5.21. Схема нагружения сопряжения температурными усилиями

$A = 1$, получаем зависимость для размаха напряжений (ГОСТ 25867–83)

$$\Delta\sigma = \frac{[\sigma_2]K_\sigma}{[p_2]} \left[p_2 + E_2 \varepsilon_t \frac{l d_E}{D_2^2} \frac{5}{(R_1/s_1)^{2/3} + (R_2/s_2)^{2/3}} \right],$$

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 14249–89, либо выбирают по толщине конического сопряжения. В последнем случае допускаемое избыточное давление

$$[p_2] = \left(\frac{2[\sigma_2]s_2}{D_2} \right) \cos\alpha + \frac{\sin^2\alpha [\sigma_2]s_2^2 (1 + 0,5\sqrt{2})}{l_0^2}.$$

Первое слагаемое в правой части этой формулы соответствует безмоментному решению, второе — обусловлено краевыми эффектами в местах сопряжения.

Допускаемое давление будет одинаковым для конического сопряжения и цилиндрической обечайки, т.е. $[p_2] = 2[\sigma_2] \frac{s_2}{D_2}$, если выполняется условие

$$l_0 \leq \sqrt{D_2(s_2 - c)} \sqrt{\frac{2,91 \sin^2\alpha}{2(1 - \cos\alpha)}} \approx 1,8 \sqrt{D_2(s_2 - c)}.$$

Кольцевое сопряжение рассчитывают как плоскую шарнирно закрепленную кольцевую пластину под действием распределенной нагрузки. В этом случае допускаемое давление

$$[p_2] = 2[\sigma_k] (h_0/l_0)^2,$$

где $[\sigma_k]$ — допускаемое напряжение для материала кольца; h_0 — дополнительная 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:

$$\omega_1 = l\alpha_1 \Delta t_1 - \frac{Q_2 l}{E_1 \pi D_3 s_1}; \quad \omega_2 = l\alpha_2 \Delta t_2 - \frac{Q_2 l}{E_2 \pi D_4 s_2},$$

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 $\omega_0 = C_0 Q_2$, где C_0 — упругость кольцевого или конического сопряжения.

Очевидно, что $\omega_1 - \omega_2 = 2 \omega_0$, откуда

$$Q_2 = \frac{\pi E_2 s_2 D_4 \varepsilon_1}{1 + \frac{D_4 s_2}{D_3 s_1} + 2\pi C_0 E_2 \frac{D_4 s_2}{l}}.$$

Размах напряжений цикла

$$\Delta \sigma = [\sigma] \frac{Q_2}{[Q]} K_\sigma = [\sigma] \frac{4Q_2 K_\sigma}{[p_2] D_2^2 A \pi} \leq 2[\sigma_a].$$

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 недостаточна либо устойчивость сосуда, либо несущая способность рубашки.

Очевидно, что анкерной трубой воспринимается сила

$$Q_a = p_2 t_0 t_\tau \left(1 - \frac{\pi d_0^2}{4 t_0 t_\tau} \right),$$

где t_0 и t_τ — шаг анкерных труб соответственно вдоль оси и по окружности аппарата; d_0 — наружный диаметр анкерной трубы (см. рис. 5.15).

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 $t_0 \times t_\tau$ выдерживает давление p_2 . В этом случае цилиндрическую обечайку рассчитывают с допущением в сторону запаса прочности как плоскую кольцевую пластину площадью $\pi r_s^2 = t_0 t_\tau$ (рис. 5.22), 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:

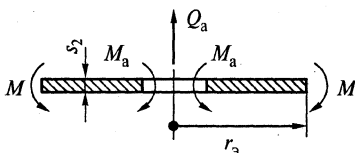


Рис. 5.22. Схема нагружения плоской кольцевой пластины

$$[p_1] = [\sigma_1] \frac{(s_1 - c)^2}{t_0 t_\tau} f_5 \left[1 - \left(\frac{p_1 D_1}{2[\sigma_1](s_1 - c)} \right)^2 \right],$$

$$[p_2] = [\sigma_2] \frac{(s_2 - c)^2}{t_0 t_\tau} f_6,$$

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. 5.23) в зависимости от отношения d_0/t'_0 и относительного реактивного момента m . Здесь $t'_0 = \sqrt{t_0 t_\tau}$; $m = 1$ — для сопряжений отбортовкой; $m = \min \left\{ 1; (d/s_2)^2; (s_0/s_2)^2 \right\}$ — 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 ан-

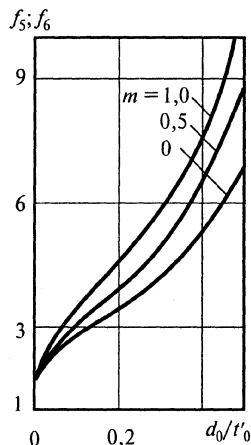


Рис. 5.23. Зависимость коэффициентов прочности f_5 и f_6 от d_0/t'_0

керной 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 Δt_1 и действия силы Q_T

$$\omega_{1t} = \frac{D_3}{2} \left(\alpha_1 \Delta t_1 + \frac{Q_T}{2\pi t_0 t_\tau s_2 E_2} \right) \approx \frac{D_3}{2} \left(\alpha_1 \Delta t_1 + \frac{\sigma_{k1}}{\pi E_1} \right);$$

аналогично для стенки рубашки

$$\omega_{2t} = \frac{D_4}{2} \left(\alpha_2 \Delta t_2 - \frac{Q_T}{2\pi t_0 t_\tau s_2 E_2} \right) \approx \frac{D_4}{2} \left(\alpha_2 \Delta t_2 - \frac{\sigma_{k2}}{\pi E_2} \right).$$

Здесь σ_{k1} и σ_{k2} — окружные напряжения в корпусе и рубашке под действием давления $Q_T/(t_0 t_\tau)$.

Радиальное перемещение сосуда, рассчитываемое как прогиб плоской пластины под действием силы Q_T

$$\omega_{1F} = \frac{Q_T}{E_1 s_1} \sqrt{\frac{D_3}{s_1}} 0,4 \left(\frac{65}{\delta_\tau} + \frac{D_3}{s_1} \frac{\delta_\tau}{360} \right);$$

аналогично для рубашки

$$\omega_{2F} = \frac{Q_T}{E_2 s_2} \sqrt{\frac{D_4}{s_2}} 0,4 \left(\frac{65}{\delta_\tau} + \frac{D_4}{s_2} \frac{\delta_\tau}{360} \right),$$

где δ_τ — угол шага анкерных труб (или отбортовок) по окружности цилиндрических обечаек сосуда и рубашки.

Для радиальных деформаций сосуда и рубашки, пренебрегая деформациями анкерных труб, запишем $\omega_{2t} - \omega_{2F} = \omega_{1F} + \omega_{1t}$.

Отсюда с учетом приведенных выражений имеем

$$Q_T = \frac{\varepsilon_t E t_0 t_\tau}{\frac{D_3}{4s_1} K_3 + \frac{D_4}{4s_2} K_4},$$

где

$$K_3 = 1 + 3,2 \frac{t_0 t_\tau}{D_3 \sqrt{D_3 s_1}} \left(\frac{65}{\delta_\tau} + \frac{D_3}{s_1} \frac{\delta_\tau}{360} \right);$$

$$K_4 = 1 + 3,2 \frac{t_0 t_\tau}{D_4 \sqrt{D_4 s_2}} \left(\frac{65}{\delta_\tau} + \frac{D_4}{s_2} \frac{\delta_\tau}{360} \right).$$

По найденному значению Q_τ и допускаемой нагрузке $[Q_\tau] = [p_2] t_0 t_\tau \left(1 - \frac{d_0^2}{t_0 t_\tau} \right)$ выполняют проверку сопротивления усталости:

$$\Delta \sigma = \frac{Q_\tau}{[Q_\tau]} [\sigma_2] K_\sigma \leq 2 [\sigma_a].$$

5.4. Газожидкостные реакторы

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, причем окисление монооксида азота происходит в газовой фазе, а остальные реакции — в жидкой; необходимыми стадиями процесса являются также абсорбция и десорбция. Все эти процессы проводят одновременно в одном аппарате.

Газожидкостные реакторы конструктивно сходны с абсорберами в связи с необходимостью межфазного массопереноса. Как и при абсорбции, применяют, например, насадочные колонны и аппараты с барботажными тарелками. Однако реакции сопровождаются значительно большим тепловым эффектом, чем физическая абсорбция, поэтому в отличие от абсорберов реакторы всегда снабжают теплообменными элементами. Кроме того, при малой

скорости реакции объем жидкости, находящейся в аппарате, должен быть значительно больше, чем для абсорбции, когда важна лишь площадь межфазной поверхности. Объем аппарата должен обеспечивать достаточное время протекания реакции, необходимое для достижения заданной степени превращения.

Для интенсификации быстрых и медленных реакций используют различные методы. При проведении *быстрых реакций*, течение которых лимитирует массообменная стадия, производительность аппарата можно увеличить, обеспечив хорошие условия массопередачи: увеличение межфазной поверхности, интенсивности перемешивания или относительной скорости фаз. При проведении *медленных реакций*, лимитируемых реакционной способностью веществ, достаточно ускорить воздействием на кинетические факторы, например увеличить концентрацию реагирующих веществ, повысить температуру или применить более активный катализатор. Концентрации веществ в газовой фазе можно увеличить, например, повышением давления в аппарате.

Примерами газожидкостных реакций могут служить 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 их скорость зависит от температуры.

Реакторы с мешалками обычного типа для проведения процессов с участием газа и жидкости применяют довольно редко, поскольку при их использовании в таких аппаратах не достигается достаточный контакт газа с жидкостью, затрудняются условия для теплообмена, а также организация непрерывного процесса. Следует отметить, что весьма нежелательно наличие движущихся частей в аппаратах, работающих с газом или агрессивными жидкостями.

Реакторы с механической мешалкой используют главным образом для процессов получения аэрозолей или абсорбции отходящих промышленных газов с очень небольшой концентрацией абсорбируемого вещества (например, монооксида азота).

В качестве примера можно привести весьма оригинальную конструкцию реактора-турбоабсорбера (рис. 5.24). 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 Филльда).

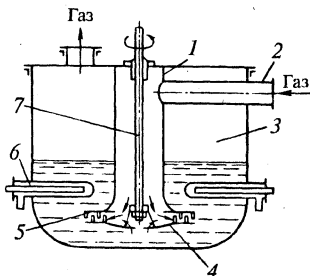


Рис. 5.24. Реактор-турбоабсорбер

Реакторы с механическим распылением жидкости. Развитую поверхность контакта между газом и жидкостью можно получить распылением жидкости различными распылителями, форсунками или вращающимися дисками. На рис. 5.25 приведена схема реактора с механическим распылением жидкости, применяемого в производстве этилового спирта серноокислотным методом. Реактор представляет собой горизонтальный цилиндрический корпус 1, по оси которого установлен ротор, состоящий из вала 2 с дисками 3. Аппарат примерно на 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. Образованная в реакторе развитая межфазная поверхность и энергичное перемешивание способствуют интенсивному массообмену между газом и жидкостью.

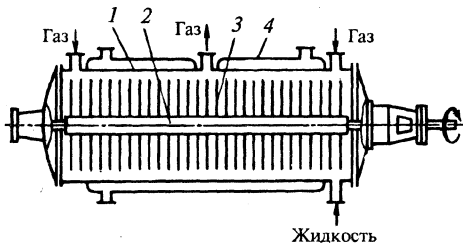


Рис. 5.25. Реактор с вращающимися дисками

В аппарате создаются благоприятные условия для быстрых реакций,

протекающих в диффузионной области, а также для теплоотдачи от реагирующих веществ к стенкам реактора, через которые отводится (или подводится) теплота с помощью рубашки 4. Чаще такие реакторы выполняют периодически действующими. К их недостаткам 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 служит катализатором, эти аппараты отличаются от абсорберов тем, что жидкость циркулирует в системе по замкнутому контуру. Насадочные колонны просты по устройству и обеспечивают значительную 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 обычно изготавливают 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, поскольку одновременно используется не весь объем жидкого реагента или катализатора, а лишь сравнительно небольшая его часть. Основная часть находится в системе циркуляции и в сборнике. В этом отношении предпочтительнее тарельчатые колонны, так как в них отсутствует циркуляция основной массы жидкости. Необходимый объем жидкости в реакторе можно обеспечить, регулируя уровень 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 толщина слоя жидкости на тарелке значительно больше. Примером может служить колонна для окисления изопропилбензола (рис. 5.26). Колонна имеет тарелки 1 с капсульными колпачками 2, снабженные переливными устройствами 3, которые обеспечива-

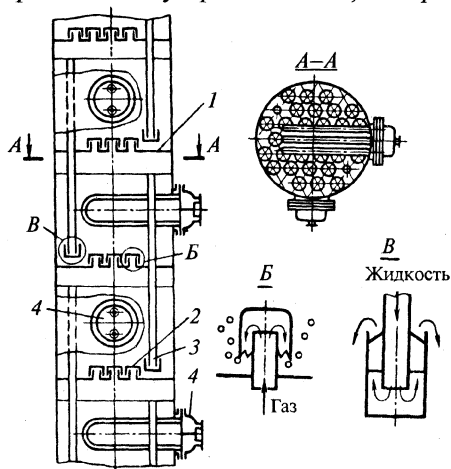


Рис. 5.26. Колонна для окисления изопропилбензола

ют 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, последовательно проходит противотоком к жидкости через тарелки и удаляется из верхней части аппарата.

Реакционные аппараты барботажного типа — простые и распространенные аппараты для газожидкостных реакций. Здесь 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 с мелкими отверстиями. Газ подается внутрь трубы и, выходя из отверстий в виде пузырьков, поднима-

ется 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. Чтобы поддерживать заданную температуру, аппарат обычно 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 обеспечиваются 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.

На рис. 5.27 показан *барботажный кожухотрубчатый реактор* для проведения реакций с большим тепловым эффектом. Конструктивно он представляет собой кожухотрубчатый теплообменник с центральной циркуляционной трубой 3. Удлиненные нижние концы трубок 4, находящиеся под

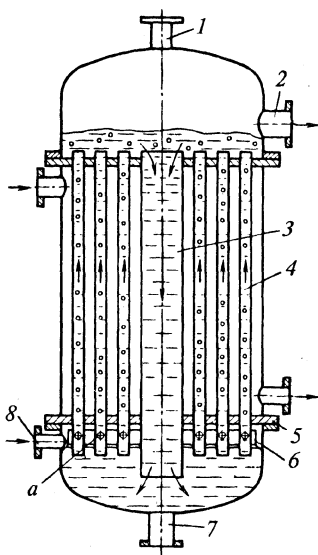


Рис. 5.27. Барботажный кожухотрубчатый реактор

трубной решеткой 5, имеющие боковые отверстия *a*, 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 достигает 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 характеризуется 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 объединяют в одну колонну.

Пенные аппараты. В пенных аппаратах пузырьки газа поступают в жидкость с большой скоростью, что отличает их от реакторов барботажного типа. В результате реакционная масса интенсивно перемешивается и образуется динамическая пена. У такой пенной системы малое диффузионное сопротивление, в связи с чем 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.

Чтобы происходило непрерывное обновление 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. 5.28 дана схема *трехполочного пенного аппарата*. Аппарат состоит из металлического корпуса 1 прямоугольного или круглого сечения, внутри которого на равных расстояниях расположены перфорированные тарелки 2, 3, 4. Газ подается в нижнюю часть аппарата, а жидкость выводится из верхней.

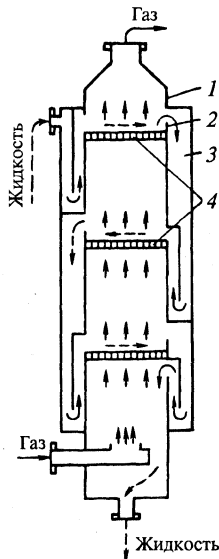


Рис. 5.28. Схема пенного реактора

ки-решетки 4, снабженные сливными порогами 2. С тарелки на тарелку жидкость переливается через переливные устройства 3, у которых должна быть достаточная 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. Толщина слоя 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. 5.29 показан *промышленный реактор* (для жидкофазного окисления алкилбензолов) типа газлифта с циркуляционным

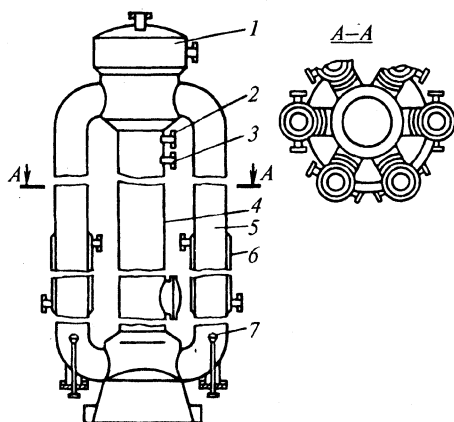


Рис. 5.29. Реактор с циркуляционным контуром

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, рис. 5.27). Для отвода (или подвода) теплоты на подъемных трубах предусмотрены теплообменные элементы в виде рубашек 6. Аппарат работает непрерывно. Шту-

цер 2 для выхода продукта располагается выше штуцера 3 для ввода сырья. Разделение газа и жидкости происходит в сепараторе 1.

5.5. 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 и отвода значительных количеств теплоты, поэтому реакторы называют печами. Газ (определенный компонент газовой смеси) может служить 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) с 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 относятся широко известная доменная печь — основа всей черной металлургии, а также печи обжига магнезита, доломита и других материалов. *Шахтная печь для обжига известняка* (рис. 5.30) 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.

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.

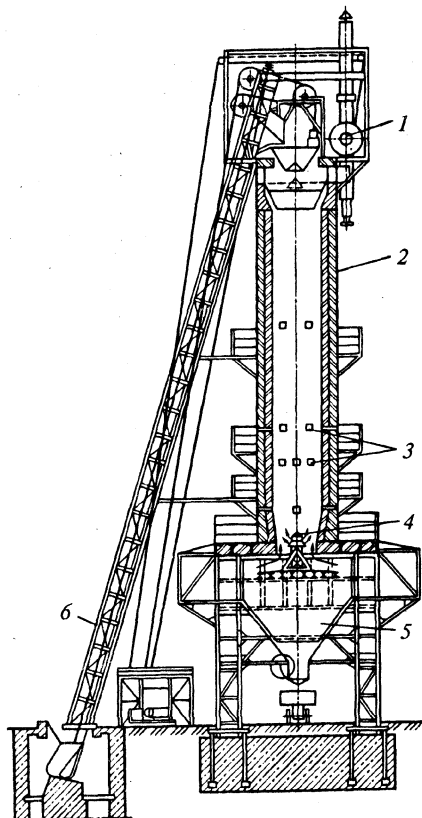


Рис. 5.30. Вертикальная печь для обжига известняка

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 400–500 °С); зону горения и обжига (температура 600–1200 °С), в которой происходит выделение диоксида углерода из известняка; зону охлаждения монооксида кальция и нагревания воздуха, где температура снижается до 500 °С. Температура стальной рубашки печи не превышает 100 °С, 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; главное отличие — меньшее отношение высоты к диаметру. Как и в шахтных печах, топливо загружают сверху, золу или шлак удаляют снизу. 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.

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 применяют 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 гг. этот процесс использовали в производствах синтетического аммиака и метанола, переведенных впоследствии на углеводородное сырье (природный газ), что позволило резко улучшить технико-экономические показатели. В настоящее время в связи с истощением ресурсов и ростом цен на нефть и природный газ целесообразно возвращение к твердому сырью на основе современной аппаратуры и технологии. В этом случае возрастает роль газогенератора.

Газогенератор (рис. 5.31) имеет вертикальный цилиндрический стальной кожух 2, футерованный изнутри двумя слоями кирпича (внутренний слой — огнеупорный). Топливо загружают сверху

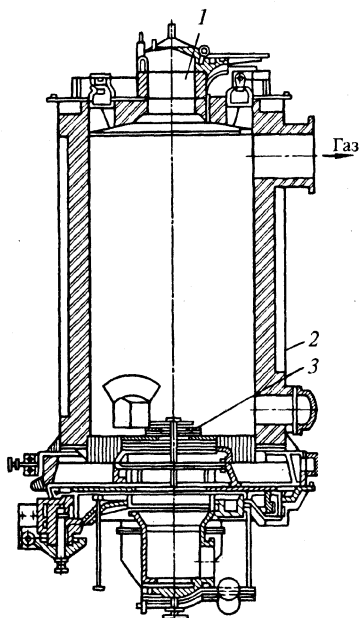


Рис. 5.31. Газогенератор для получения горючего газа (водяного)

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 пароводяной 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 $0,9 \text{ т}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$.

Барабанные вращающиеся печи. Основной частью такой печи является длинный вращающийся барабан, изготавливаемый обычно из листовой стали. Барабан расположен с некоторым наклоном к горизонтالي, снабжен двумя бандажами, которыми он опирается на роликовые опорно-упорные станции, и приводным зубчатым колесом, находящимся 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 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, барабан в отличие от сушилок 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 внутрь кирпичной кладки (косвенный обогрев). При этом барабан изготовляют из жаропрочной стали с более толстыми стенками без футеровки. Скорость газа в барабане не более 6 м/с (для уменьшения уноса пыли). Коэффициент заполнения барабана твердым материалом близок к 0,1.

На рис. 5.32 показана *барабанная печь для обжига пирита* с необходимым оборудованием. Барабан 2 печи опирается бандажми 3 на ролики 8 опорных станций и приводится во вращение че-

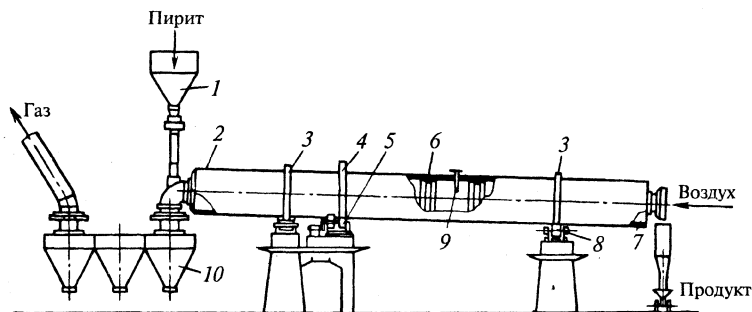


Рис. 5.32. Барабанная печь для обжига пирита

рез 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. Чтобы исключить местный перегрев, 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. 5.33), где *бикарбонат натрия при нагревании превращается в*

карбонат. Барабан 1 помещен внутри кирпичной кладки и обогревается снаружи топочными газами, получаемыми в топке 3 сжига-

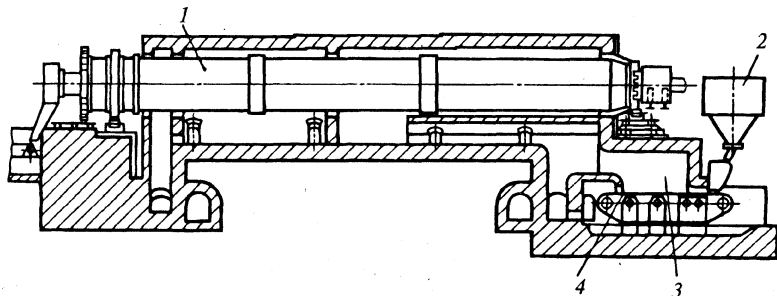


Рис. 5.33. Барабанная печь для кальцинирования соды

нием твердого топлива. Последнее поступает из бункера 2 на подвижную цепную колосниковую решетку 4. Для защиты от высокой температуры пламени печь экранирована почти на половину длины. 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 масса 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, 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. При всей их громоздкости герметизация, монтаж и обслуживание печей 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 перемещивается и по виду напоминает кипящую жидкость; поэтому он назван псевдооживленным или кипящим.

Псевдооживленный 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. Благодаря интенсивному перемешиванию слоя достигается постоянство концентраций и температуры по объему и оптимальные условия реакции.

Реакторы с псевдооживленным 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 путем секционирования 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 псевдооживленного слоя (рис. 5.34) создана Ф. Винклером для газификации измельченного угля. Измельченное топливо из бункера 1шнековым конвейером 4 подается в нижнюю часть газогенератора 2, где происходит газификация топлива в псевдооживленном

состоянии. Зола удаляется снизу шнеком 3, а газ отводится через верхний штуцер.

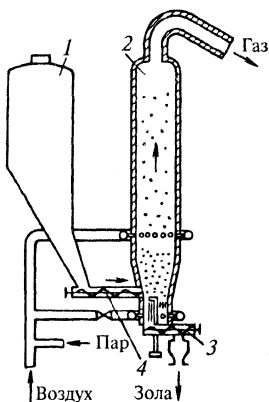


Рис. 5.34. Схема газогенератора Винклера

Другой пример экзотермической реакции, проводимой в псевдоожиженном слое, — *обжиг колчедана* (пирита) в производстве серной кислоты. Печь КС (с кипящим слоем) для этого процесса показана на рис. 5.35. Стальной корпус 2 печи футерован изнутри шамотным кирпичом или жароупорным бетоном. Печь имеет загрузочную камеру 13 (форкамеру), куда поступает колчедан через штуцер 14. Под печи состоит из беспровальной решетки 6, 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. Отвод теплоты и поддержание температуры в зоне кипящего слоя осуществляются с помощью охлаждающих элементов 5 и 11. Для зажигания колчедана при пуске печи служат газовые горелки или мазутные форсунки 4 и 12.

Беспровальная решетка с дутьевым устройством (рис. 5.36) представляет собой стальной лист 4 с отверстиями, снабженными патрубками 5 с внутренней резьбой. В патрубки нижними концами ввернуты дутьевые сопла (грибки) 1 с горизонтальными отверстиями для выхода воздуха в верхней части. Ре-

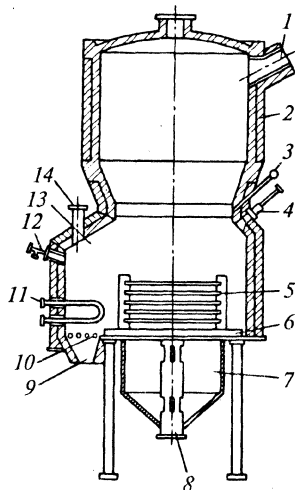


Рис. 5.35. Печь КС для обжига пирита

шетка 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 крафт-бумаги, 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. 5.37). Стальной цилиндрический корпус реактора 3 футерован изнутри огнеупорным материалом и разделен горизонтальными перегородками 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.

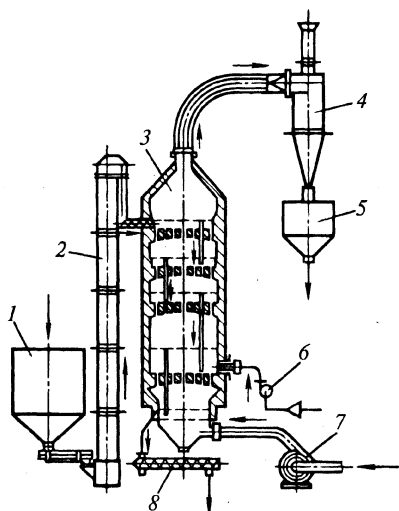


Рис. 5.37. Реактор с взвешенным слоем для обжига известняка

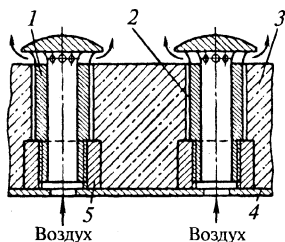


Рис. 5.36. Устройство для подачи воздуха в печь КС

ром 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 получать известь высокого качества.

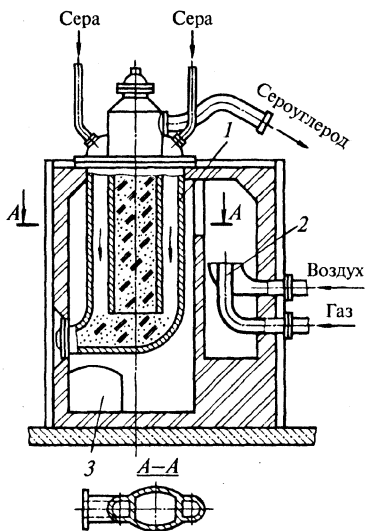


Рис. 5.38. Реактор для производства сероуглерода

Реакторы с ретортами, обогреваемыми снаружи, с периодической загрузкой твердых реагентов используют в малотоннажных производствах. В реакторе для получения сероуглерода (рис. 5.38) пары серы при температуре 900–1000 °С реагируют с древесным углем. Реторта 1 реактора эллиптического сечения 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.

5.6. Аппараты для проведения газовых реакций на твердом катализаторе

В качестве катализаторов используют различные неорганические и органические соединения. Во многих случаях необходим твердый катализатор высокопористой структуры с большой удельной поверхностью (удельная поверхность катализатора — суммарная поверхность пор, находящихся в 1 г катализатора). Если физико-химическая природа катализатора не позволяет приготовить его в виде высокопористого материала, то его наносят

на инертный носитель с большой удельной поверхностью. В качестве носителя часто используют силикагель и алюмосиликагель.

Действие катализатора специфично, т.е. каждый конкретный катализатор эффективен лишь для вполне определенных реагирующих веществ.

Активность катализатора может снижаться, во-первых, в результате отравления катализатора «ядами», присутствующими в реакционной среде. При этом катализатор изменяет свою физическую структуру и химический состав. Данный процесс необратим, поэтому необходимо тщательно очищать исходное сырье от ядов. Каждой группе катализаторов присущи определенные яды. Например, для такого широко распространенного катализатора, как $AlCl_3$, сильными катализаторными ядами являются сернистые соединения.

Во-вторых, активность катализатора уменьшается из-за отложений на его поверхности различных примесей, блокирующих активную поверхность, чаще всего слоя углерода. Этот слой можно удалить, например, путем выжига.

После того как активность катализатора оказывается ниже определенной нормы, его заменяют свежим. Срок службы катализатора различен в зависимости от процесса и сырья — от 100 ч до нескольких лет.

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 углеводородов. Реакторы для таких процессов обычно называют контактными аппаратами или колоннами синтеза.

В большинстве реакторов используют несколько неподвижных слоев катализатора в виде гранул или таблеток, расположенных на решетках (полках). Применяют также реакторы с движущимся зернистым катализатором, который образует псевдоожив-

женный (кипящий) слой или пересыпается сверху вниз в зоне реакции. Окисление аммиака и некоторые другие процессы проводят на катализаторе в виде нескольких слоев проволоочной сетки, изготовленной из платины с активизирующими добавками (родий, иридий).

Большинство реакций протекает со значительным тепловым эффектом; исключения составляют реакции, проводимые при малых концентрациях реагирующих веществ (очистка метана от серы). Для поддержания необходимого температурного режима в реакторе осуществляется отвод теплоты или путем подачи холодного газа либо 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

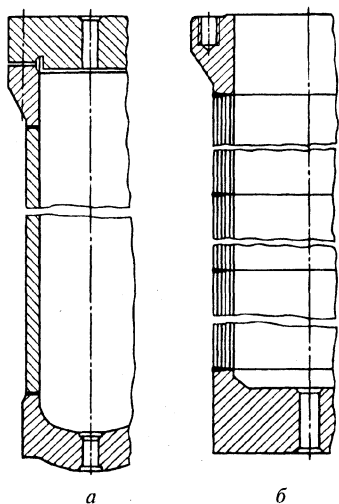


Рис. 5.39. Корпуса колонн синтеза аммиака:

а — ковано-сварной;
б — многослойный

достигается, когда теплообменные элементы помещены непосредственно в слой катализатора. Используют прямые, U-образные или более удобные для конструктивной компоновки двойные трубы (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. У реакторов низкого давления (контактные аппараты, конвертеры) обычно сравнительно тонкостенный сварной цилиндрический корпус, непосредственно к которому крепят решетча-

тые полки с катализатором. Штуцеры для подвода и отвода реагентов, как правило, приварены к боковой стенке корпуса. В качестве корпусов реакторов высокого давления (10–100 МПа) применяют цельнокованные, ковано-сварные, витые или многослойные сварные цилиндрические толстостенные сосуды (из стали 22Х3М), закрытые массивными плоскими крышками (рис. 5.39). Реагенты подводят и отводят через крышки; боковые штуцеры применяют редко. В последнее время для герметизации соединения корпуса и крышки используют преимущественно двухконусный самоуплотняющийся затвор.

Реакторы низкого давления. Примером высокотемпературного реактора, работающего при давлении, близком к атмосферному (абсолютное давление 0,17 МПа), может служить *конвертер метана* (рис. 5.40). 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 слой — из коррозионно-стойкой стали 12Х18 Н10Т. Изнутри корпус покрыт футеровкой 2 (послойно — шамотный кирпич, легковесный шамот, диатомовый кирпич и диатомовая крошка) толщиной 500 мм. Слой катализатора 3 с подслоем 6 из дробленого шамотного кирпича опирается на сводаобразную кирпичную кладку со щелями для прохода газа, играющую роль опорной решетки. Для контроля температуры в зоне реакции в карманы 4 и 5 помещены термопары. Парогазовая смесь подводится сверху, конвертированный газ отводится снизу.

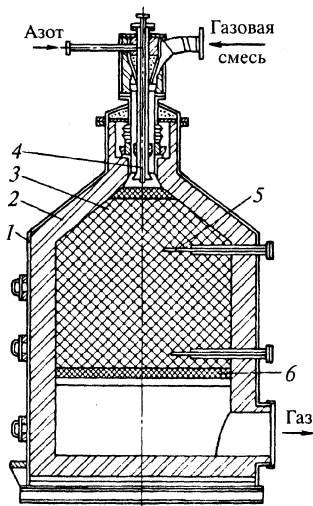


Рис. 5.40. Конвертер метана

При более низкой температуре и абсолютном давлении 0,13 МПа проводят конверсию монооксида углерода водяным паром в *реакторе с радиальным потоком газа* (рис. 5.41). Процесс происхо-

дит 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. Газ поступает в

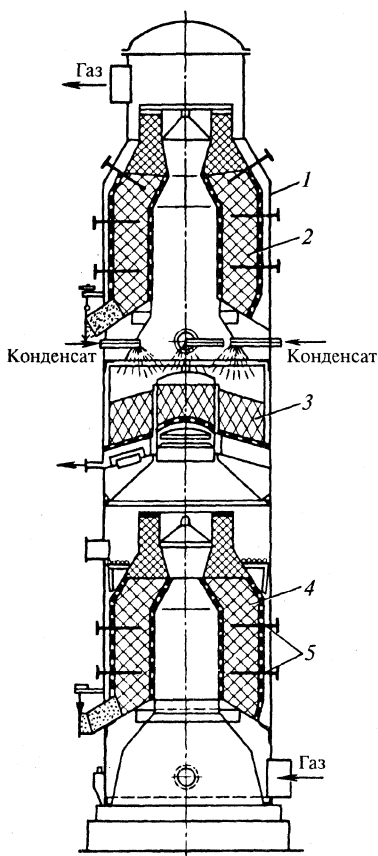


Рис. 5.41. Радиальный конвертер монооксида углерода

парата 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 охлаждения газа после первого слоя вводится холодный сернистый

телу корпуса 1. Газ поступает в зону реакции 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), которая подается семью форсунками в испаритель 3 из слоя колец Рашига, размещенных на решетке. Корпус конвертера снабжен карманами-трубками 5 для термопар и наружной теплоизоляцией 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. 5.42). В центре стального цилиндрического корпуса 2 ап-

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

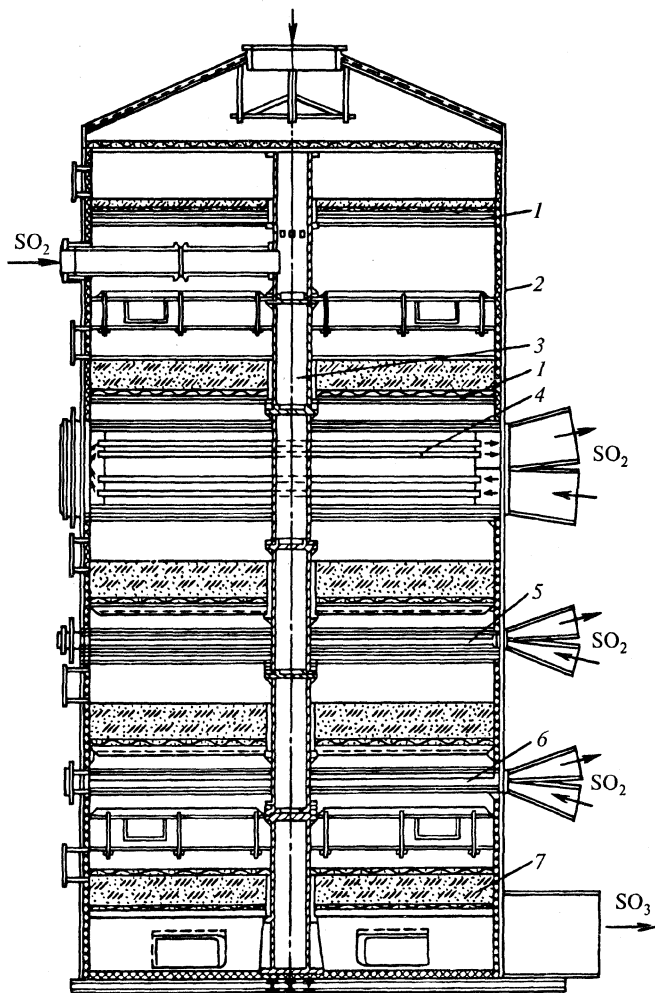


Рис. 5.42. Контактный аппарат для получения серного ангидрида

(1000 т/сутки) снабжают выносными теплообменниками; при этом конструкция аппаратов проще.

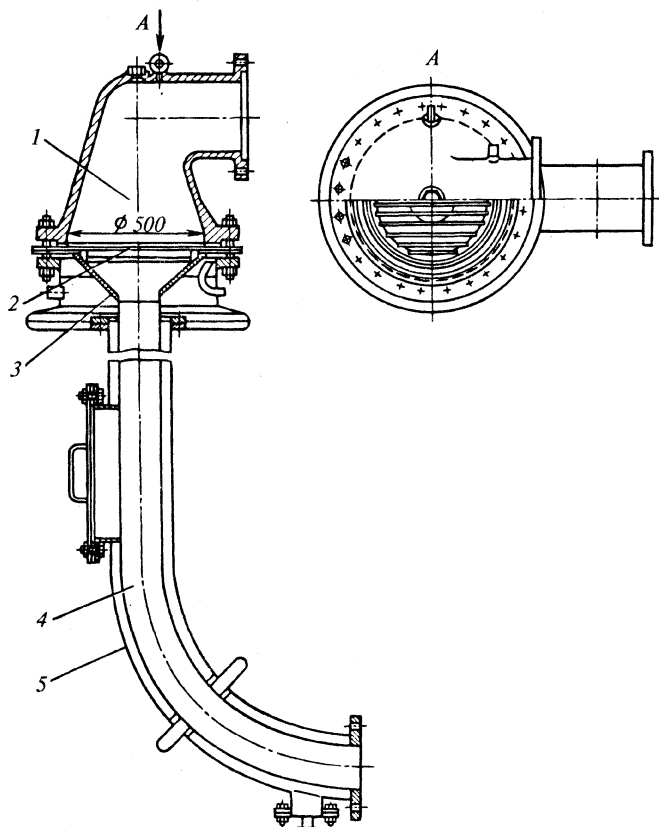


Рис. 5.43. Контактный аппарат для окисления аммиака

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. 5.43. 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 сеток,

опирающихся на решетку из нихромой проволоки. На малых основаниях конусов штуцеры 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.

Рассмотренные выше реакторы относятся к аппаратам с неподвижным катализатором. Крупным недостатком таких реакторов является неудовлетворительное распределение температуры и потоков по сечению и высоте реакционной зоны. В результате иногда получают нестандартные продукты и снижается эффективность работы реакционной установки. Этого недостатка в значительной степени лишены установки с подвижным катализатором.

Реакторы с движущимся катализатором существенно различаются в зависимости от размеров частиц применяемого катализатора. При этом катализатор из частиц размером 3–5 мм называют гранулированным, а из частиц размером 0,01–0,1 мм — пылевидным. Гранулированный катализатор перемещают в реакционной установке в плотном слое, пылевидный — в виде псевдоожиженной газопылевой смеси. Разумеется, эти различия весьма существенно сказываются на конструкции аппаратов и реакционной установки в целом.

В реакторах с гранулированным катализатором он, как правило, перемещается сверху вниз под действием силы тяжести, а снизу вверх с помощью механических приспособлений. В реакторах с пылевидным катализатором его перемещение осуществляется потоком газа или воздуха.

Для примера рассмотрим установку, в которой осуществляется процесс *дегидрирования бутана в бутилены* и с псевдоожиженным пылевидным катализатором (рис. 5.44). В этой установке совмещенные в одном аппарате реактор 8, регенератор 4 и десорбер 14 снабжены горизонтальными секционными решетками. Применение 8–12 таких решеток провального типа (дырчатых или из труб) позволяет в значительной степени устранить продольное перемешивание в аппарате и повысить выход бутиленов при дегидрировании бутана до 34–35% вместо 20–24% в реакторах без решеток.

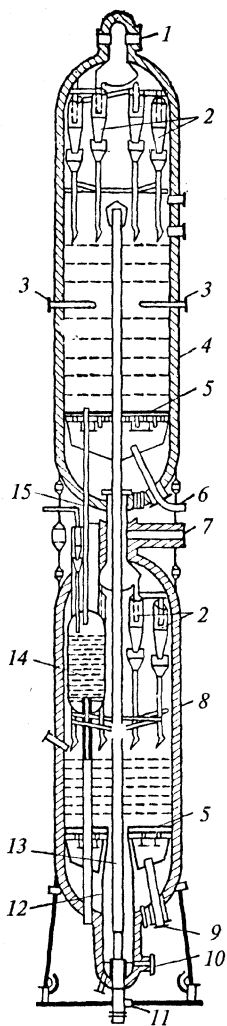


Рис. 5.44. Установка для дегидрирования бутана в бутилены в псевдоожиженном слое катализатора

Регенерированный катализатор из регенератора 4, расположенного над реактором 8, через стояк 15 и десорбтер 14, который продувается водородсодержащим топливным газом, поступает в реактор. Снизу через штуцер 10 и распределительную решетку 5 в реактор подается подогретая до температуры реакции бутановая фракция. Реакционный газ, пройдя циклоны 2, выходит из реактора через штуцер 7, а отработанный катализатор поступает в транспортную линию 13 и транспортируется в регенератор сжатым воздухом, подаваемым через штуцер 11.

Для отпарки адсорбированных продуктов реакции катализатор предварительно проходит отпарную секцию 12, в которую через штуцер 10 подается водородсодержащий топливный газ.

В регенераторе осуществляются выжигание кокса из катализатора и подогрев его до необходимой температуры. Для этого в регенератор через штуцер 6 подается воздух, а через штуцер 3 — топливный газ. Дымовые газы, пройдя предварительно циклоны 2, уходят из регенератора через штуцер 1.

В аппаратах с кипящим слоем проводят и другие каталитические реакции — окисление этилена на серебряном катализаторе, получение алкилхлоридов на медном катализаторе, получение винилацетата. Истощение запасов и высокая стоимость углеводородного сырья говорят о перспективности синтеза бензина из водорода и монооксида углерода (синтез Фишера—Тропша), также успешно осуществляемого в аппарате с псевдоожиженным слоем. Существуют также подобные реакторы для окисления SO_2 в SO_3 .

Реакторы высокого давления. Как отмечено, такие реакторы (колонны синтеза) имеют толстостенный цилиндрический корпус, закрытый плоскими крышками и охлаждаемый изнутри холодным газом. Внутри с зазором относительно корпуса помещена «насадка», состоящая из предварительного теплообменника и катализаторной коробки. Наилучший тепловой режим обеспечивается при установке теплообменных элементов непосредственно в слое катализатора. *Колонна синтеза с двойными трубками Фильда* показана на рис. 5.45. 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 — возможность поддержания температурного режима, близкого к оптимальному, высокая устойчивость работы, надежность конструкции, удобство монтажа насадки. Недостатки — высокое гидравлическое сопротивление и необходимость извлечения насадки из корпуса для замены отработавшего катализатора.

Известно, что при большом диаметре крышки затруднена герметизация корпуса. В связи с этим корпуса крупных колонн изготовляют ковано-сварными с суженными горловинами для умень-

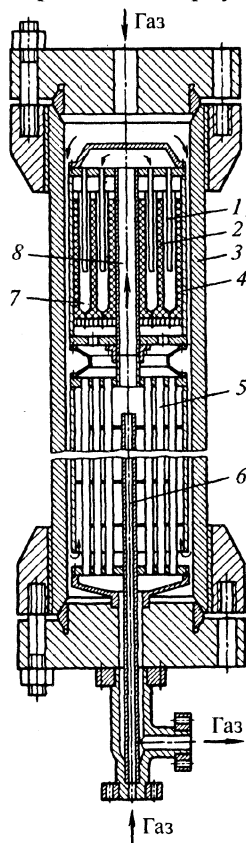


Рис. 5.45. Колонна синтеза аммиака с двойными противоточными трубками

шения диаметра 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/сутки (рис. 5.46) 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 2,4 м, высота 32 м, толщина стенки корпуса 250 мм, рабочее давление 31,5 МПа.

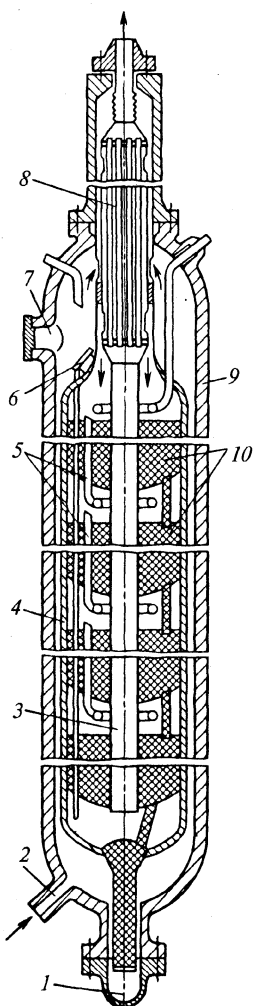


Рис. 5.46. Колонна синтеза аммиака

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 эффектив-

ность аппарата. В связи с этим невысока степень превращения азотоводородной смеси в аммиак в таких колоннах. 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.

Затворы высокого давления. Корпуса колонн высокого давления закрывают с торцов массивными коваными или литыми крышками. Уплотнения крышек и штуцеров колонн высокого давления являются весьма ответственными узлами. Они должны обеспечивать безусловную надежность в работе и герметичность при больших давлениях и значительных колебаниях температуры. Кроме того, затворы должны быть просты в изготовлении и удобны для сборки и разборки.

Затворы классифицируют по источнику силы затягивания: затворы с принудительным уплотнением посредством силы, развиваемой болтами; затворы с самоуплотнением, в которых уплотнение происходит под влиянием сил, возникающих в результате давления среды на крышку.

Наиболее простым по конструкции затвором с *принудительным уплотнением* является затвор с плоской металлической прокладкой (рис. 5.47). Прокладку изготовляют из мягких металлов — меди, алюминия, мягкой стали. Затворы подобной конструкции используют для колонн диаметром не более 600 мм. В колоннах большего диаметра площадь прокладки становится очень велика, что приводит к необходимости использовать слишком крупные шпильки и соответственно утяжеления фланца; кроме того, усложняются сборка и разборка соединения. Разра-

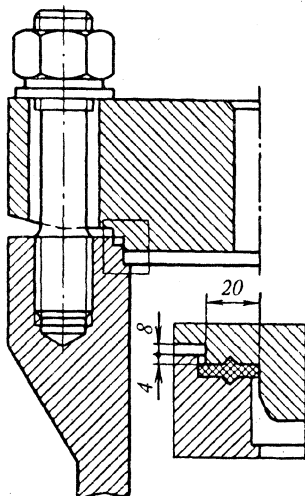


Рис. 5.47. Затвор с плоской металлической прокладкой

ботаны и другие затворы с принудительным уплотнением: муфтовые, затворы с прокладкой трапецевидного сечения.

В самоуплотняющихся затворах для смятия прокладки используют давление среды на крышку. Широкое распространение получила конструкция самоуплотняющегося затвора с двухконусным уплотнением (рис. 5.48). Основным элементом этого затвора — кольцо 2 с коническими срезами на его наружной поверхности, прикрепленное к крышке с помощью планки 1. Уплотняющим материалом этого затвора служат прокладки из алюминия или меди толщиной 1–1,5 мм, закрепляемые на боковых срезах кольца. Кольцо вместе с прокладками зажимается между крышкой и корпусом. Вначале прокладка сжимается основными крепежными шпильками, а по мере повышения давления среды в колонне кольцо начинает еще больше заклиниваться вследствие давления среды на его внутреннюю поверхность. Для этого в крышке фрезеруют 10 вертикальных канавок круглого сечения шириной 8 мм. Чтобы рабочая среда могла проникнуть в эти канавки, в прижимной планке 1 фрезеруют шесть каналов шириной 6 мм. Затворы подобного типа

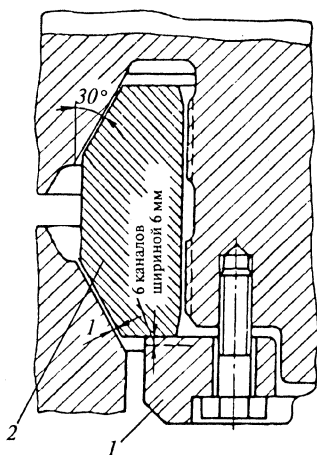


Рис. 5.48. Самоуплотняющийся затвор

используют в колоннах, нагруженных давлением до 34 МН/м². Они мало чувствительны к колебаниям температуры, сравнительно просты в эксплуатации и позволяют повторное использование прокладок.

Для больших давлений рекомендуется самоуплотняющийся затвор со стальным упругим кольцом.

5.7. Печи пиролиза и крекинга

Крекингом называют процесс высокотемпературного разложения углеводородного сырья с получением продуктов мень-

шей молекулярной массы. Из мазута или газойля путем крекинга получают автомобильные и авиационные бензины. При этом 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. Ранее процессы термического крекинга проводились в огневых печах с трубчатыми змеевиками при температуре 400–500 °С и давлениях до 6 МПа; теперь почти всюду процессы каталитического крекинга и риформинга реализуются в специальных реакторах с движущимся гранулированным твердым катализатором. Каталитические процессы позволяют получать более ценные продукты (бензины с высоким октановым числом, ароматические углеводороды), чем термический крекинг. 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 необходимые для нефтехимического синтеза и производства пластмасс вещества – этилен, пропилен, бутadiен, ацетилен. В свою очередь этилен служит сырьем для производства этилового спирта, стирола, полиэтилена и оксида этилена.

Процесс пиролиза проводят в трубчатых печах, точнее в их змеевиках. Змеевики представляют собой ряд 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 его пребывания 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 повышается и составляет на выходе 150–200 м/с. Из-за высокой скорости толщина пристенного пог-

раничного слоя уменьшается, в нем 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.

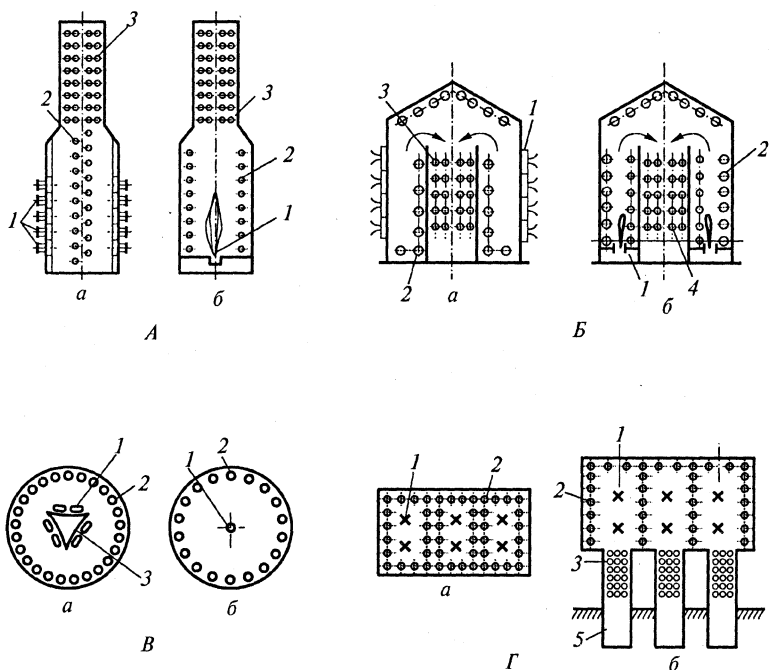


Рис. 5.49. Основные типы трубчатых печей:

А — узкокамерные трубчатые печи ГВ2 (а) и ГС1 (б) с верхним отводом дымовых газов и горизонтальным расположением труб змеевика; Б — узкокамерные трубчатые печи БВ2 (а) и БС2 (б) с нижним отводом дымовых газов и горизонтальным расположением труб; В — цилиндрические трубчатые печи ЦДЗ (а) и ЦГС (б) в плане; Г — секционные и многокамерные трубчатые печи ВС3 (а) и БС3 (б); 1 — горелки; 2 — трубы радиантной камеры; 3 — трубы конвективной камеры; 4 — стена для настила пламени и вторичного подвода воздуха по высоте пламени; 5 — боров-газоход

Схематические изображения некоторых характерных типов трубчатых печей представлены на рис. 5.49. При разработке трубчатой печи такие узлы, как корпус с обмуровкой и теплоизоляцией, трубные решетки для поддержки труб экранов и змеевиков, газосборники и дымовые трубы, разрабатываются как самостоятельные унифицированные узлы. Трубчатые змеевики проектируются отдельно, поскольку весьма затруднительно учесть для них всю совокупность производственных требований. Таким образом, за счет незначительных конструктивных модификаций печей (около 10 типов) можно получить до 100 типоразмеров печей, обеспечивающих требования самых разных технологических процессов.

Внутреннее пространство печи обычно разделено 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 преимущественно 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 главным образом печи коробчатой формы с горизонтальным расположением труб змеевика и беспламенными (точнее, короткопламенными) газовыми горелками панельного типа. Нижняя часть боковых стен печи (рис. 5.50) 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 двухстороннего 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-

нике поступает двумя потоками сначала в конвекционную часть змеевика печи, а затем в радиантную (т.е. в трубы экранов). Выходящий из печи пирогаз направляется в закалочный аппарат, где быстрым охлаждением (впрыскиванием воды) прекращают реакцию.

В печи можно регулировать теплоотдачу к различным участкам радиантного змеевика путем подачи топливного газа к горелкам. Для этого каждый ряд горелок питается независимо от обо-

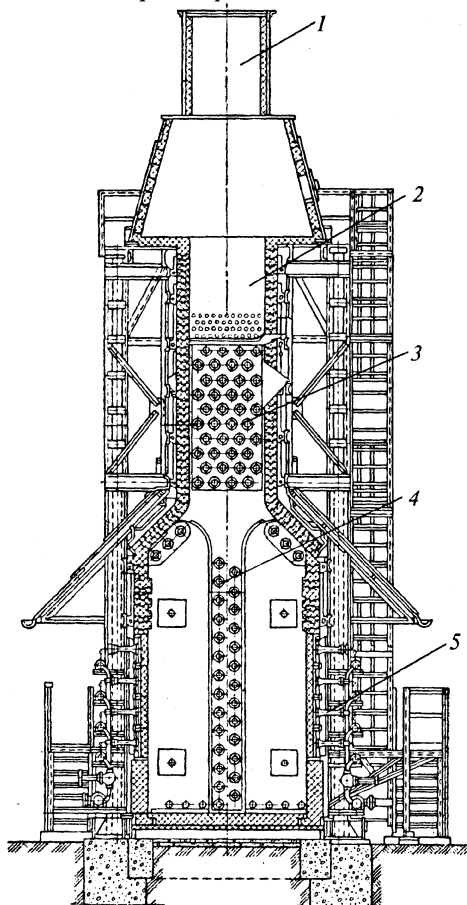


Рис. 5.50. Трубчатая печь с горизонтальными излучающими трубками

собленного коллектора. Принципиальные схемы конструкций горелок приведены на рис. 5.51.

Удобные и высокоэффективные нагреватели для печей — беспламенные панельные горелки (рис. 5.52), 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 газозвоздушной 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

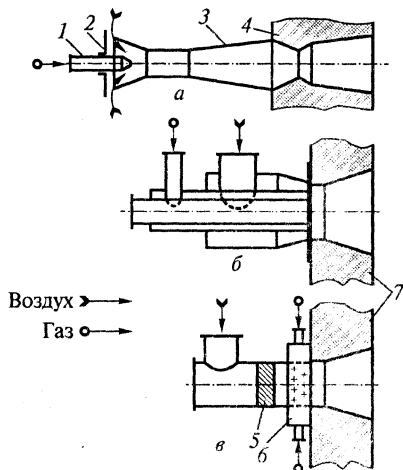


Рис. 5.51. Принципиальные схемы горелок для сжигания газа:

а — кинетическая инжекционная горелка среднего давления; б — горелка с принудительной подачей воздуха и закрученным потоком газа; в — диффузионная горелка с принудительной подачей воздуха и подачей газа мелкими струями; 1 — газовое сопло; 2 — регулирующая воздушная заслонка; 3 — смеситель; 4 — керамический насадок; 5 — лопаточный завихритель; 6 — газовый коллектор; 7 — обмуровка топки

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. Газовоздушная смесь, образующаяся в смесителе 2, обтекая 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 газозвоздушной смеси в распределительных трубках не должна быть меньше скорости рас-

пространения пламени. Благодаря конической форме в туннелях обеспечивается равенство этих скоростей, что является необходимым условием нормальной работы горелок.

Горелки, соединенные между собой болтами 8 с гайками 9, образуют 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,

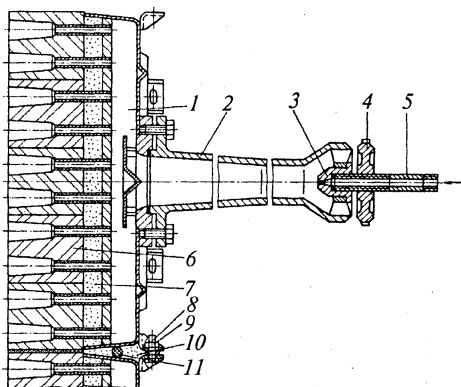


Рис. 5.52. Беспламенная панельная горелка

поскольку 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 распространены тру-

бы 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 изготавливать из гибкой трубы; их получают протяжкой труб или сваркой штампованных половин. В этом случае трубы очищают от кокса выжиганием, для чего в трубы подают смесь, состоящую из одной части воздуха и 10 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 изготавливают из углеродистой стали (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, а по торцам печи устанавливают две трубные решетки в виде вертикальных прямоугольных листов с отверстиями для труб. Трубные решетки теплоизолируют со стороны, обращенной к топочной камере. 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 20Х23Н12. В конвекционной камере, где температура ниже, используют подвески из чугуна СЧ21 или из стали 40Х9С2. Подвески крепят к каркасу печи болтами.

При проектировании трубчатых печей производят технологический, тепловой, прочностный расчеты, а также гидравлический расчет, который сводится к определению потери давления в печи и необходимой высоты дымовой трубы.

Приближенный гидравлический расчет пиролизной трубчатой печи. Целью гидравлического расчета является проверка соответствия принятых значений давлений продукта в трубах на входе и выходе из печи расчетным. На входе обычно задаются $P_{\text{вх}} = 0,5$ МПа, на выходе $P_{\text{вых}} = 0,13 \dots 0,2$ МПа. Перепад давления в пиролизных печах должен быть небольшим, так как процесс идет с увеличением объема.

Перепад давления в трубчатой печи определяется по формуле

$$\Delta P = \lambda_{\text{ср}} \frac{L + A d_{\text{вн}} n}{d_{\text{вн}}} \frac{\gamma_{\text{ср}} W_{\text{ср}}^2}{2g},$$

где $\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{н}} + \lambda_{\text{к}}}{2}$; $\gamma_{\text{ср}} = \frac{\gamma_{\text{н}} + \gamma_{\text{к}}}{2}$; $W_{\text{ср}}^2 = \frac{W_{\text{н}}^2 + W_{\text{к}}^2}{2}$; $\lambda_{\text{н}}, \lambda_{\text{к}}$ — коэффи-

циенты трения на начальном и конечном участках змеевикового теплообменника соответственно, определяемые по формуле для турбулентного движения реагентов, т.е. $\lambda = 0,316/\text{Re}^{0,25}$; $\gamma_{\text{н}}, \gamma_{\text{к}}$ — удельные веса реагента на входе и выходе из теплообменника соответственно; $W_{\text{н}}, W_{\text{к}}$ — скорости потока в начале змеевика и в его конце соответственно; $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр труб; L — общая длина труб змеевика; n — число местных сопротивлений, т.е. число ретурбентов или калачей в змеевиковом теплообменнике; g — ускорение свободного падения; A — коэффициент, учитывающий геометрию ретурбента или калача, принимаемый в интервале 40–110.

Труба должна обеспечить такую тягу, чтобы в радиантной камере было небольшое разряжение, равное 20–30 Па.

Тяга, создаваемая трубой, определяется по формуле

$$\Delta P = (\gamma_{\text{в}} - \gamma_{\text{г}}) H,$$

где H — высота трубы, м; $\gamma_{\text{в}}$ — удельный вес воздуха; $\gamma_{\text{г}}$ — удельный вес дымовых газов при средней температуре по длине трубы (падение температуры на 1 м трубы принимается для кирпичных труб 1–1,5 °С, для железных труб 3–4 °С).

С помощью этой формулы вычисляется высота трубы. По санитарно-гигиеническим соображениям, минимальная высота составляет 16 м; она должна быть на 3 м выше коньков зданий в радиусе 100 м.

Тяга, создаваемая трубой, равна сумме сопротивлений газоходов и трубы. Расчет сопротивлений проводится по обычным формулам с учетом потерь на трения, местные сопротивления и преодоление геометрического напора в трубе. Коэффициент трения $\lambda_{\text{ср}}$ принимается для металлических труб 0,015–0,03; для кирпичных труб и газоходов 0,045–0,050. Диаметр выходного отверстия трубы определяется из условия получения скорости газов на выходе из трубы 2,5–3 м/с. При такой скорости на выходе из трубы отсутствует задувание газов ветром в трубу. Обычно скорость газов в трубе составляет 4–8 м/с. Если сопротивление дымового тракта превышает 200–300 Па, ставится дымосос; скорость газов в трубе при наличии дымососа равна 8–16 м/с.

5.8. Перспективная реакционная техника (плазмохимические реакторы)

Теоретические и экспериментальные исследования плазмы определили возможности промышленного использования новой области технологии — плазмохимической технологии.

Плазма — это полностью или частично ионизированный газ, являющийся в целом электронейтральным. Полностью ионизированный газ называют *высокотемпературной плазмой* (температура ионных частиц выше 10^5 °C), а частично ионизированный, т.е. содержащий наряду с заряженными частицами (ионами, электронами) нейтральные компоненты (атомы, молекулы, радикалы) — *низкотемпературной плазмой* (температура частиц 10^3 – 10^4 °C). В состоянии плазмы могут быть и вещества, температура атомов и молекул которых ниже 830 °C, если их поместить, например, в сильное электрическое или магнитное поле. В плазмохимических процессах используют низкотемпературную плазму.

Если средние температуры всех компонентов плазмы близки между собой, то плазму можно считать *термически равновесной*. Такая плазма реализуется в разрядах при атмосферном давлении и выше.

Если плазма находится при пониженном давлении, когда время соударения легкого электронного компонента газа с тяжелым относительно велико, происходит отрыв среднегазовой температуры плазмы от электронной и такая плазма считается *термически неравновесной*.

В плазмохимической технологии применяют как равновесную плазму, так и неравновесную. Равновесная плазма является источником большого количества активных частиц (ионов, атомов, радикалов), поэтому именно ее чаще используют при проведении крупнотоннажных плазмохимических процессов — пиролиза и конверсии углеводородов и угля, получения высокодисперсных порошков металлов, карбидов, нитридов, боридов, оксидов и др.

Неравновесную плазму низкого давления применяют в основном для проведения различных синтезов, при которых недопустима высокая газовая температура. Это процессы получения пленок, травления и модификации поверхности различных материалов.

В настоящее время генераторы плазмы позволяют получать плазму практически любых газов при давлении от нескольких паскалей до десятков мегапаскалей. Температура газа может меняться от близкой 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 сейчас широко применяют в научных исследованиях и технике. Возможность получения высоких скоростей газового потока позволяет реализовать высокоскоростные высокотемпературные химические реакции.

В плазменном состоянии вещества получают в специальных устройствах — генераторах плазмы. Наиболее широко распространены *электродуговые плазмотроны постоянного и переменного тока промышленной частоты*. Такой генератор плазмы (рис. 5.53, 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 аноде-сопле. Стабилизацию дугового столба в пространстве обеспечивают благодаря соответствующей конструкции стенок камеры 3 и сопла или подаче газа тангенциально к этим стенкам (вихревая подача газа).

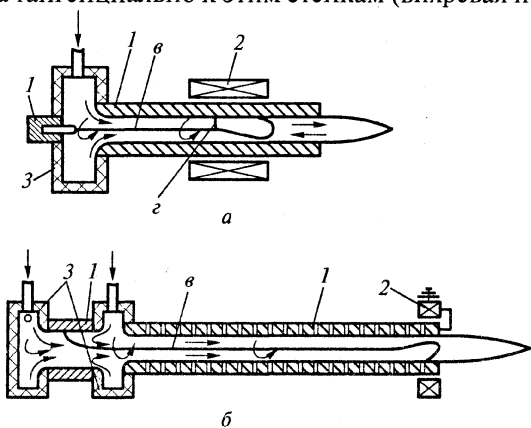


Рис. 5.53. Схемы электродуговых плазмотронов с самоустанавливающейся (а) и регулируемой (б) длиной дуги: 1 — электроды; 2 — катушки электромагнитов; 3 — разрядные камеры; в — дуга; з — канал шунтирующего пробоя

В плазмотронах с самоустанавливающейся длиной дуги длина дуги зависит от скорости газа и шунтирования в сопле анода. В плазмотронах другого типа длину дуги фиксируют путем применения либо секционированного электрода и подключения к источнику питания только его определенной секции (рис. 5.53, б), либо резко расширяющегося сопла, за которым образуется застойная вихревая зона, где и происходит шунтирование дуги.

В качестве плазмообразующего газа служат 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) плазмотроны.

По принципиальной схеме плазмохимический процесс отличается от любого традиционного химико-технологического процесса только тем, что некоторые стадии процесса плазмохимии часто 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 контактировали непосредственно, т.е. осуществить контакт на молекулярном уровне и затем реализовать сам процесс реакции. Таким образом, плазмохимический реактор для газофазных процессов должен состоять 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, а часть — по схеме встречных струй. Сырье в реакторы этого типа вводят спутно-вихревыми или встречно-вихревыми потоками.

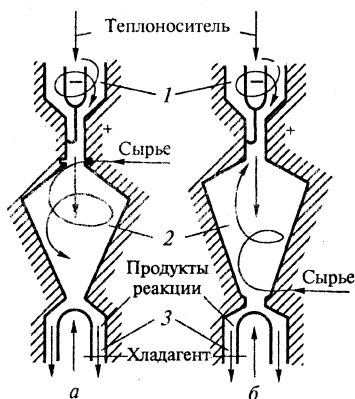


Рис. 5.54. Схемы плазмохимических реакторов спутно-вихревого (а) и встречно-вихревого (б) типа: 1 — плазмотрон; 2 — реакционная камера; 3 — закалочная камера

В реакторах со спутно-вихревой и встречно-вихревой подачей (рис. 5.54) сырье подается тангенциально к плазменной струе. При конической форме внутренней части реактора улучшается процесс смешения, 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, в которых резко увеличивается время контакта частиц с плазмой (рис. 5.55). 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 б 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.

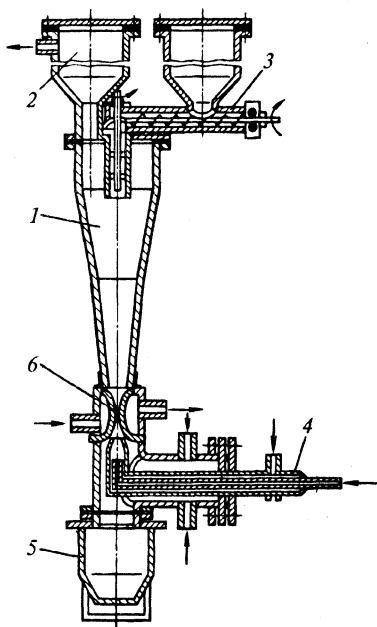


Рис. 5.55. Плазмохимический реактор для обработки дисперсных материалов в псевдооживленном слое

Недостатком реактора является то, что в очень важной высокотемпературной части реактора — в зоне ввода в него плазменной струи — температурное поле очень неоднородно.

На выходе из плазмохимического реактора прореагировавшая смесь содержит целевые продукты химического процесса. Для прекращения реакции служит операция закалки. Наиболее распространенный способ закалки — охлаждение в теплообменниках — пригоден для охлаждения газов с температурой до 3700 °С. Широко используют также способ 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 нашли промышленное применение, другие проходят опытные и опытно-промышленные испытания.

Например, электроразрядный реактор фирмы «Хюльс» (рис 5.56, а), предназначенный для пиролиза природного газа, вы-

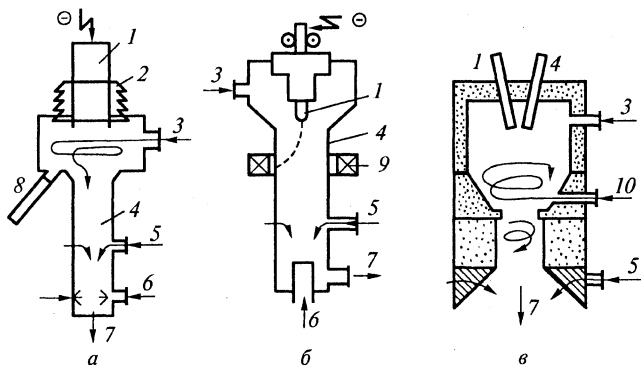


Рис. 5.56. Реакторы для пиролиза природного газа:

1, 4 — электроды; 2 — изолятор; 3 — плазмообразующий газ; 5 — подача углеводородов на вторую ступень; 6 — подача воды на закалку; 7 — продукты пиролиза; 8 — поджигающий электрод; 9 — магнитная система; 10 — ввод углеводородов

полнен на базе линейного плазмотрона постоянного тока мощностью 8,2 мВт с холодным катодом и вихревой стабилизацией разряда. Между катодом диаметром 150 мм и трубчатым анодом длиной 1500 мм и диаметром 100 мм в вихревую камеру подают метан (природный газ). В результате его пиролиза на выходе получают до 14,5% ацетилена и 63,4% водорода при расходе электроэнергии 10,3 кВт·ч на 1 кг ацетилена. Реактор фирмы «Дюпон» коаксиального типа (рис. 5.56, б) имеет графитовый катод, непрерывно подаваемый в плазмотрон, а также магнитную систему вращения дуги. Ввиду высокой скорости вращения дуги (8000 об/мин) происходит более равномерный прогрев сырья, что увеличивает выход ацетилена до 16–18%. Кроме того, существенная доля этилена появляется в выходном газе — до 5–7%.

При пиролизе жидких углеводородов наиболее перспективны реакторы, использующие водород в качестве плазмообразующего газа. На рис. 5.56, в показан реактор фирмы «Кнапзак-Грисхейм» (Германия), где водород нагревается в электрической дуге, горящей между двумя или тремя расходуемыми графитовыми электродами. Исходное сырье с большой скоростью подается в реакционную камеру тангенциально, поэтому оно поднимается вверх вдоль конусообразного канала, где смешивается с водородной плазмой. Такая организация ввода сырья позволяет снизить потери теплоты в реакторе, предотвратить его быстрое закоксовывание и увеличить общий КПД процесса пиролиза. Так, при использовании в качестве сырья крекинг-бензина выход ацетилена достигает 41,2%, этилена — 12%.

Еще одной из областей применения плазменной техники является получение *расплавов различных веществ из порошкообразного исходного сырья*. На рис. 5.57 представлены плазменные реакторы центробежного типа, применяемые для подобных задач. Конструкция, показанная на рис. 5.57, а, предполагает стабилизацию плазменной струи вращающейся стенкой горизонтально расположенного реактора. Плазменную струю генерирует плазмотрон со стержневым катодом, а реактор выполнен в виде тигля из огнеупорного материала, который вращается электродвигателем. Устройства такого типа работают в основном в дискретном режиме, т.е. реактор загружается материалом, который при вращении печи расплавляется, после чего печь наклоняется и жидкий продукт выпускается в соответствующую емкость.

Непрерывный процесс плавления организуется в реакторах с наклонной или вертикальной осью вращения (рис. 5.57, б, в). Материал подается в расплав через верхнюю часть реакторного объема, а жидкий продукт вытекает через выходное отверстие. Таким образом, время удержания расплава в реакторе определяется скоростью подачи сырья и эффективной глубиной слоя расплава. Температура реакции регулируется путем изменения тепловой мощности на входе в реактор, скорости подачи обрабатываемого материала и коэффициента использования теплоты в реакторе. При оптимальной скорости его вращения и наиболее совершенной параболической форме достигаются минимальные тепловые потери, которые обеспечивают коэффициент использования теплоты реактора до 86%.

В промышленности, главным образом в микроэлектронике, широко применяют пленки, полученные в плазме. Плазмохимические пленки могут быть кристаллическими или аморфными, толщиной от долей до сотен микрон. При осаждении в плазме тонких полимерных пленок на пористых основах образуются мембраны, применяемые в мембранной технологии для разделения раство-

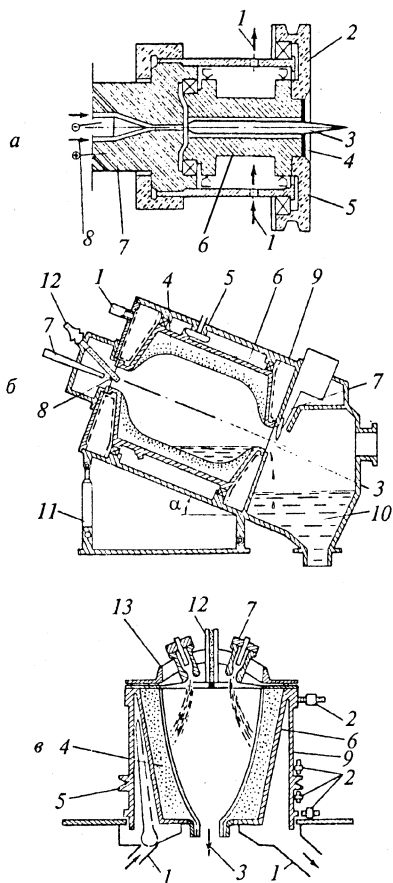


Рис. 5.57. Конструкции плазменных реакторов центробежного типа:
 а — горизонтальный; б — наклонный; в — вертикальный; 1 — охлаждающая вода; 2 — подшипник; 3 — выход продукта; 4 — вращающийся огнеупорный тигель; 5 — устройство вращения реактора; 6 — корпус реактора; 7 — электроды плазмотрона; 8 — плазмообразующий газ; 9 — внешний кожух реактора; 10 — сборник расплава; 11 — домкрат; 12 — ввод дисперсного материала; 13 — керамический свод реактора

ров солей, органических соединения и газовых смесей. Такие пленки получают двумя методами — полимеризацией углеводов 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 реализовать многие важнейшие химические процессы с высокими технико-экономическими показателями.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему реакторы с мешалками не используют для проведения реакций режима идеального вытеснения?
2. Химические реакции в аппаратах проходят или с выделением теплоты, или с его поглощением. Что предусматривается в конструкциях реакторов, чтобы обеспечить нормальный ход реакции?
3. Реактор с мешалкой работает при повышенном давлении. Какое уплотнение вала следует принять, чтобы обеспечить 100%-ную герметизацию?
4. Газожидкостные реакции могут проходить в кинетической, диффузионной или промежуточной области. Какие реакционные аппараты следует применять в зависимости от вида реакций?
5. Почему в реакторах высокого давления штуцер подвода и штуцер отвода продуктов располагают, как правило, на крышках и днищах?
6. В реакторах с гранулированными или пылевидными катализаторами периодически требуется регенерация катализатора. Что для этого предусматривается в таких реакционных установках?
7. Что предпринимается в реакторах высокого давления, чтобы обеспечить надежную герметизацию крышки и днища?
8. В чем суть самоуплотнения в затворах высокого давления?
9. Какие реакторы используются для процессов пиролиза? Какие вещества получают при пиролизе пропана, бутана?

10. Почему из всех газовых горелок предпочитают беспламенные?

11. Трубчатые печи пиролиза имеют две камеры — радиантную и конвекционную. Почему в одной камере используются трубы из углеродистой и хромомолибденовой сталей, а в другой из жаропрочной стали?

12. Какую плазму (высокотемпературную или низкотемпературную) используют в плазмохимических процессах?

13. В чем суть плазмохимической технологии?

ГЛАВА 6 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ

6.1. Технологические трубопроводы и их категорийность

Технологические трубопроводы являются неотъемлемой частью технологического оборудования на предприятиях химической промышленности. Они делятся на *внутрицеховые*, к которым относятся трубопроводы, соединяющие отдельные аппараты, установки, машины, расположенные на территории цеха, и *межцеховые* — трубопроводы, соединяющие оборудование, которое находится в разных местах.

В зависимости от расположения трубопроводы могут быть *подземными* и *наземными*. Последние более распространены, поскольку легче осуществлять их технический надзор.

Конструктивно технологический трубопровод состоит из ряда элементов — труб, трубопроводных деталей (фитингов) и арматуры, соединенных разъемными и неразъемными соединениями. Большое разнообразие элементов трубопроводов и значительные объемы их выпуска промышленностью обуславливают важное значение унификации и стандартизации этих элементов. Трубы, трубопроводные детали и трубопроводную арматуру изготавливают, поставляют и монтируют в соответствии с государственными и отраслевыми нормативно-техническими документами. В сущности проектирование трубопроводов сводится к подбору соответствующих трубопроводных элементов по действующим стандартам и нормам. При этом большую роль играют две характеристики трубопровода — условный проход и условное давление.

Условным проходом D_y называется номинальный диаметр отверстия в трубе или арматуре, служащего для прохода среды. Если два любых элемента трубопровода имеют одинаковые значения D_y , то, следовательно, у них одинаковые площади проходного сечения и одинаковые присоединительные размеры. Ряд условных диаметров определен ГОСТ 28338. Для широкого применения в техноло-

гических трубопроводах рекомендуют трубы и арматуру с условными проходами, мм: 10; 15; 20; 25; 32; 40; 50; 65; 80; 100; 125; 150; 175; 200; 225; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 600; 700; 800; 1000; 1200; 1400.

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, а при более высокой рабочей температуре — оно должно быть больше рабочего. ГОСТ 356 устанавливает следующий ряд условных давлений, МПа: 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 64; 80; 100; 160; 250.

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).

Группа А включает 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.

6.2. Трубы, соединительные детали, компенсаторы и опоры трубопроводов

В технологических трубопроводах широко применяют стальные *сварные* и *бесшовные трубы* — горячекатаные, холоднокатаные и холоднотянутые. Сварные трубы можно изготов-

ливать с продольным или спиральным сварным швом, но они менее надежны в работе, чем бесшовные. Последние применяют главным образом для транспортирования ядовитых, взрывоопасных и коррозионно-активных веществ, сварные — во всех остальных случаях.

Трубы изготовляют из сталей различных марок: трубы массового назначения — из стали 10 и 20, а трубы специального назначения — из легированных, высоколегированных, кислотостойких и жаропрочных сталей.

Находят применение трубы из чугуна, меди, латуни, свинца, керамики, стекла, фарфора, пластмассы. В настоящее время трубы из цветных металлов и свинца почти полностью заменены пластмассовыми. Из последних наиболее распространены трубы из винипласта, фаолита, полиэтилена. Они стойки к агрессивным средам, однако их можно применять только при невысокой температуре транспортируемой среды. Так, температурный предел винипластовых труб 40 °С, полипропиленовых труб 100 °С, а труб из фаолита 110 °С.

В химической промышленности все более широко применяют титановые трубы. Весьма перспективны стальные трубы с защитным покрытием внутренней поверхности полиэтиленом, винипластом, эмалью, стеклом и резиной. Отечественной промышленностью наиболее хорошо освоены 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 отвления труб в разные стороны. Обычно элементы стальных трубопроводов (трубы, колена, переходники) соединяют сваркой. Если в трубопроводах нецелесообразно применение сварных соединений, например при необходимости частой разборки соединения, используют фланцевые соединения с приварными, накатными или резьбовыми фланцами. Наиболее распространены приварные фланцы. Резьбовые фланцы устанавливают в основном на трубопроводах высокого давления в химической промышленности.

Вследствие разности температур транспортируемых продуктов и окружающей среды трубопроводы подвержены температурным деформациям. При значительной длине трубопроводов 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.

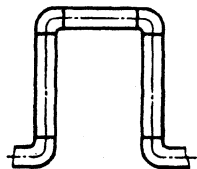


Рис. 6.1. П-образный компенсатор

Для компенсации температурных деформаций на технологических трубопроводах служат П-образные, линзовые, волнистые и сальниковые компенсаторы.

П-образные компенсаторы (рис. 6.1), широко применяемые для наземных технологических трубопроводов независимо от их диаметра, обладают большой компенсирующей способностью, «работают» при любых давлениях, однако они громоздки и требуют установки специальных опор, которые обычно располагают горизонтально и снабжают дренажными устройствами.

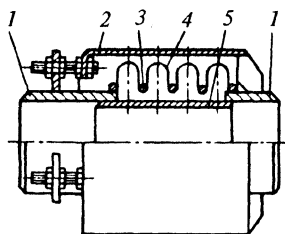


Рис. 6.2. Волнистый компенсатор

Линзовые компенсаторы используют для газопроводов при рабочих давлениях до 1,6 МПа. По конструкции они аналогичны компенсаторам кожухотрубчатых теплообменников (см. рис. 2.5).

Волнистые компенсаторы (рис. 6.2) устанавливают 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.

Сальниковые компенсаторы (рис. 6.3) используют на трубопроводах из чугуна и неметаллических материалов. Они состоят из корпуса 3, закрепленного на опоре 1, набивки 2 и грунdbufсы 4. Компенсация температурных деформаций происходит за счет взаимного перемещения корпуса 3 и внутренней трубы 5.

У таких компенсаторов высокая компенсирующая способность, однако их не используют при транспортировании горючих, токсичных и сжиженных газов из-за трудности обеспечения герметизации.

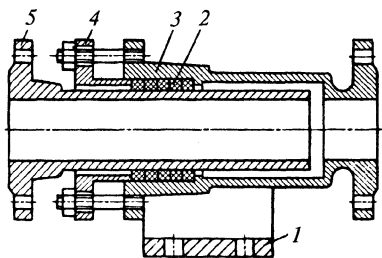


Рис. 6.3. Сальниковый компенсатор

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. 6.4, а), когда уголки 1, хомут 2 и башмак 3 жестко связаны между собой, и подвижными (рис. 6.4, б), которые обеспечивают компенсацию температурных деформаций трубопровода за счет того, что в подвижных опорах вместо нижнего болта 4 установлен ролик 5, свободно перемещающийся в отверстиях опорной пластины. Такие опоры необходимо периодически смазывать.

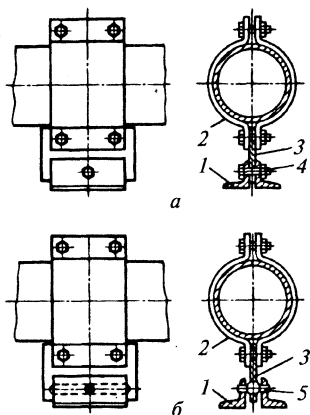


Рис. 6.4. Опоры для труб

6.3. Расчет на прочность деталей трубопроводов

При определении основных размеров деталей трубопроводов учитывается только основная нагрузка в деталях — внутреннее давление. В большинстве случаев для обеспечения

прочности конструкции достаточно определить основные размеры при этой нагрузке.

Расчет труб. Толщина стенки *прямых участков трубопроводов* вычисляется по формуле

$$S = S_R + C = \frac{PD_B}{2[\sigma]\varphi - P} + C, \quad (6.1)$$

где S_R — расчетная толщина стенки, м; P — расчетное давление, МПа; D_B — внутренний диаметр трубы, м; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение, МПа; φ — коэффициент прочности сварного шва; C — суммарная прибавка к расчетной толщине, м.

Для бесшовных труб $\varphi = 1,0$ и коэффициент прочности поперечного сварного шва не учитывается. Значение C рассчитывается по формуле

$$C = C_1 + C_2 + C_3,$$

где C_1 — прибавка, учитывающая предельное минусовое отклонение по толщине стенки, м; C_2 — прибавка, компенсирующая потерю на коррозию и эрозию, м; C_3 — прибавка для округления значения толщины до номинального выбранного по сортаменту трубы, м.

Для обеспечения достаточной толщины стенки в местах стыка труб необходимо учитывать, чтобы минимальная толщина стенки в месте стыка удовлетворяла условию

$$S_0 \leq S_m \leq 0,5(D_{\text{н min}} - d_{\text{к max}}), \quad (6.2)$$

где S_m — минимальная толщина стенки с учетом предельного минусового допуска наружного диаметра и предельного плюсового допуска внутреннего диаметра трубы, м; S_0 — условная толщина стенки трубы ($S_0 = S_R$ при $\varphi = 1$), м; $D_{\text{н min}}$ — минимальный наружный диаметр трубы, т.е. диаметр при предельном минусовом допуске, м; $d_{\text{к max}}$ — максимальный внутренний диаметр трубы в месте стыка, т.е. диаметр при предельном плюсовом допуске, м.

Толщина стенки *гнутой труб*, изготовленных из прямой цельнотянутой или сварной трубы, вычисляется по формуле (6.1). Прибавка C к расчетной толщине состоит из четырех составляющих C_1, C_2, C_3, C_4 .

Прибавка C_4 , связанная с овальностью гнутого участка и относительной толщиной $S_0/D_{\text{н}}$, определяется по формуле

$$C_4 = AS_R,$$

где A — коэффициент, выбираемый из табличных данных [7] в зависимости от назначения трубопроводов.

При используемой в настоящее время технологии гибки толщина стенки на растянутой сторонегиба должна удовлетворять условию

$$S_1 \geq 0,97 S_{\min} \left(1 - \frac{1 - S_{\min} / D_n}{2R / D_n} \right),$$

где S_1 — толщина стенки трубы на сторонегиба, м; S_{\min} — минимальная толщина стенки (с учетом минусового отклонения) прямой трубы, которая подвергается гибке, м; R — радиус гнутой трубы, м.

Однако следует учесть, что для обеспечения надежной стыковки труб необходимо, чтобы условие (6.2) удовлетворялось и для гнутых труб.

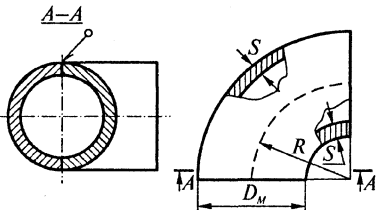


Рис. 6.5. Штампованное колено из несимметричных элементов

Расчет штампованных и штампованных коленьев (рис. 6.5). Для всех коленьев, имеющих незначительную овальность и практически не имеющих разностенности, толщина стенки вычисляется по формуле

$$S = S_R K + C,$$

$$\text{где } K = \frac{4R - D_n}{4R - 2D_n}.$$

Прибавка C состоит из C_1 , C_2 и C_3 , здесь под C_1 принимается прибавка, компенсирующая возможное утонение при штамповке. При сварке коленьев малого радиуса закругления ($R = D_n$) с прямой трубой допускаются расположение поперечного сварного шва у начала закругления, а также сварка коленьев между собой без прямого участка.

Расчет штуцерных и тройниковых соединений. Конструкции штуцерных и тройниковых соединений представлены на рис. 6.6. Расчет деталей этих соединений производится по одной схеме (рис. 6.7).

При известных размерах всех элементов соединений (трубы, корпуса тройника, трубы ответвления или штуцера) проверка прочности осуществляется следующим образом. Определяется предельно допустимый диаметр неукрепленного отверстия в трубе или корпусе тройника по формуле

$$d_{\text{пред}} = \left(\frac{2}{\varphi_0} - 1,75 \right) \sqrt{(D_n - S)(S - C)},$$

где

$$\varphi_0 = \frac{P[D_n - (S - C)]}{2[\sigma](S - C)} \quad (6.3)$$

— коэффициент использования трубы или корпуса тройника.

Если внутренний диаметр штуцера или ответвленной трубы d не превышает $d_{\text{пред}}$, то подкрепление отверстия не требуется. В этом случае толщину стенки привариваемой трубы или штуцера определяют по формуле (6.1). Если $d > d_{\text{пред}}$, то соединение требует укрепления компенсирующей площадью Σf , которая должна удовлетворять условию

$$\Sigma f \geq S_0 (d - d_{\text{пред}}). \quad (6.4)$$

Минимальную толщину трубы или корпуса S_0 находят по (6.1) при $\varphi = 1$, $C = 0$. Величина Σf представляет собой сумму площадей всех укрепляющих элементов:

$$\Sigma f = f_{\text{ш}} + f_{\text{н}} + f_{\text{св}},$$

где $f_{\text{ш}}$, $f_{\text{н}}$, $f_{\text{св}}$ — компенсирующие площади соответ-

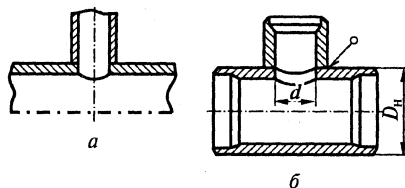


Рис. 6.6. Соединения:
а — штуцерные; б — тройниковые

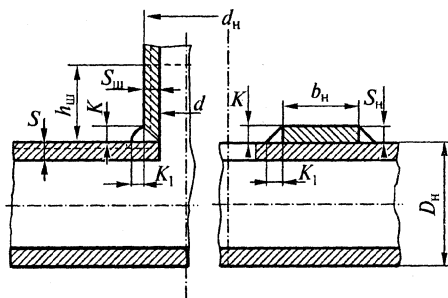


Рис. 6.7. Схема для расчета штуцерных и тройниковых соединений

ственно штуцера или ответвленной трубы, накладки, сварного шва, м^2 .

Компенсирующая площадь штуцера

$$f_{\text{шт}} = 2h_{\text{шт}}[(S_{\text{шт}} - C) - S_{\text{от}}],$$

где минимальная толщина штуцера или ответвленной трубы $S_{\text{от}}$ определяется по (6.1) при $\varphi = 1,0$ и $C = 0$, а высота $h_{\text{шт}}$, указанная на рис. 6.7

$$h_{\text{шт}} \leq \sqrt{(d_{\text{н}} - S_{\text{шт}})(S_{\text{шт}} - C)}.$$

Для точеных штуцеров принимается $C = 0$.

Компенсирующая площадь накладки

$$f_{\text{н}} = 2b_{\text{н}}S_{\text{н}}.$$

Ширина накладки $b_{\text{н}}$, указанная на рис. 6.7

$$b_{\text{н}} \leq \sqrt{(D_{\text{н}} - S)(S - C)}.$$

Компенсирующая площадь сварных швов принимается равной сумме площадей выступающих участков наплавленного металла:

для труб и штуцеров

$$f_{\text{св}} = KK_1;$$

для накладок

$$f_{\text{св}} = 2KK_1,$$

где K и K_1 — катеты выступающего участка сварного шва (рис. 6.7).

Если вычисленное таким образом значение компенсирующей площади Σf удовлетворяет условию (6.4), то прочность соединения достаточна. В противном случае следует увеличить толщину штуцера или накладки с таким расчетом, чтобы выполнялось условие (6.4).

В рассмотренном выше случае размеры всех элементов соединения заданы. Возможен вариант, когда известны лишь размеры одной трубы трубопровода (или корпуса тройника). В этом случае сразу определяется требуемая компенсирующая площадь по формуле

$$\Sigma f = \frac{\varphi_0 - \varphi'}{1 - \varphi'}(S - C)d,$$

где коэффициент использования ϕ_0 находится по (6.3), а коэффициент прочности трубы (корпуса тройника) с неукрепленным отверстием d — по формуле

$$\phi' = \frac{2}{\frac{d}{\sqrt{(D_n - S)(S - C)}} + 1,75}.$$

По полученному значению Σf выбирают необходимые размеры штуцера (ответвленной трубы) или накладки; при этом максимальную толщину штуцера (ответвленной трубы) или накладки следует выбирать так, чтобы она была равна или незначительно превышала толщину трубы (корпуса тройника).

У тройниковых соединений длина цилиндрической части корпуса должна быть не менее

$$x \geq (d + 2S_{ш}) + 2\sqrt{(D_n - S)(S - C)}.$$

6.4. 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 паро- 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. *Фланцевая арматура наиболее распространена в химической промышленности.*

Муфтовую арматуру используют на трубопроводах диаметром до 80 мм, предназначенных для транспортировки 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 с направлением на входе, и *угловую*, в которой это направление меняется на угол до 90° .

В зависимости от способа герметизации рабочего органа в корпусе различают сальниковую, сильфонную и мембранную арматуру. В *сальниковой* арматуре герметичность сопряжения рабочего органа и корпуса обеспечивается сальниковым устройством, в *сильфонной* и *мембранной* — соответственно сильфоном и мембраной.

В зависимости от конструкции привода рабочего органа трубопроводную арматуру разделяют на автоматически действующую, 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. 6.8) и пробковыми (рис. 6.9). *Шаровой* кран состоит из корпуса 1, шаровой пробки 2 и шпинделя 3. *Пробковые* краны в свою

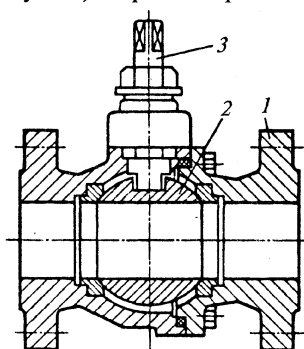


Рис. 6.8. Кран шаровой

очередь могут быть сальниковыми или натяжными в зависимости от способа их герметизации. В *сальниковых* кранах (рис. 6.9, 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. 6.9, б). Натяжные краны не могут обеспечить необходимой герметизации при давле-

нии, превышающем сотые доли мегапаскаля, поэтому в химических производствах их используют редко.

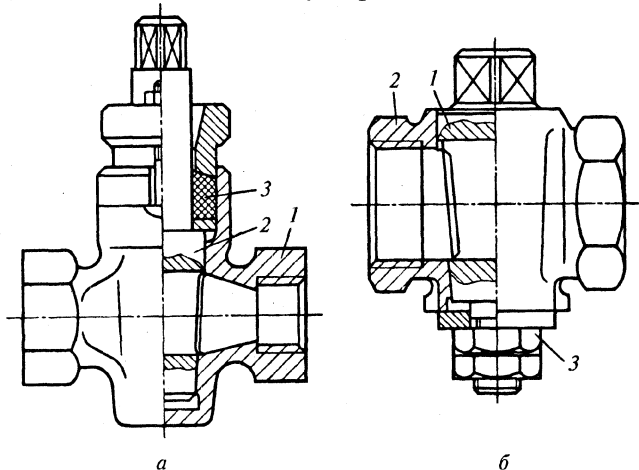


Рис. 6.9. Пробковые краны

Краны имеют малые размеры и низкое гидравлическое сопротивление, на трубопроводе их можно устанавливать в любом положении, однако они требуют ухода и периодического смазывания, в противном случае пробка может «прикипеть» к корпусу.

Описанные краны (с двумя присоединительными патрубками) называют проходными. В трехходовых кранах корпус 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.

Краны изготовляют из чугуна, стали и латуни. К недостаткам кранов следует отнести то, что кран быстро закрывается, вследствие чего в трубопроводе может возникнуть гидравлический удар; кроме того, они мало пригодны на линиях для пара и нагретой жидкости из-за возможности коробления корпуса и прилипания к нему пробки.

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 электроприводом.

Примером может служить *проходной* вентиль (рис. 6.10) с уплотнительным кольцом 2 из фторопласта, кожи или резины на золотнике 3. Корпус 1 и крышку 5 вентили уплотняют паронитовой прокладкой 4, а в качестве набивки сальника используют пропитанный асбест.

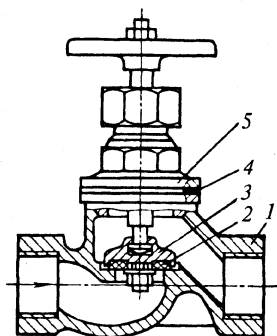


Рис. 6.10. Проходной вентиль

Если краны можно устанавливать на трубопроводе в любом положении, то вентили следует располагать так, чтобы среда в них попадала из-под золотника. При такой установке в положении «закрыто» сальник шпинделя не испытывает давления, и его ремонт в этом случае можно проводить, не

опорожняя трубопровод. Кроме того, при такой установке облегчается открытие вентили.

Мембранные вентили (рис. 6.11) предназначены для агрессивных сред. В них запорным органом служит мембрана 2 из пластмассы, резины или фторопласта, 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.

Запорный угловой вентиль высокого давления (рис. 6.12) применяют как запорный элемент системы измерений и пробоотборных систем в установках синтеза высокого давления. Для закрытия и открытия прохода в вентиле предусмотрен конусный золотник из стали 20Х13, перемещающийся относительно седла

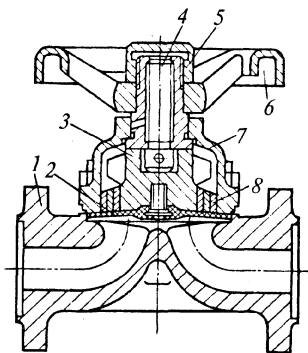


Рис. 6.11. Мембранный вентиль:
1 — корпус; 2 — мембрана; 3 — золотник; 4 — шпиндель; 5 — ходовая гайка; 6 — маховик; 7 — крышка; 8 — опорное кольцо

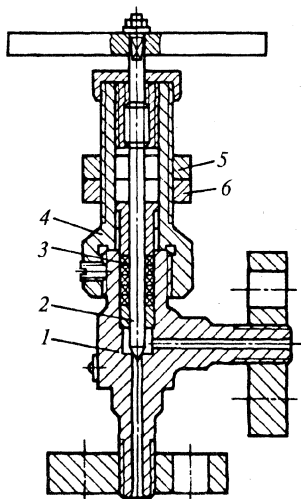


Рис. 6.12. Запорный угловой вентиль:

1 — корпус; 2 — игла;
3 — набивка сальника; 4 — стойка; 5 — контргайка; 6 — нажимная гайка

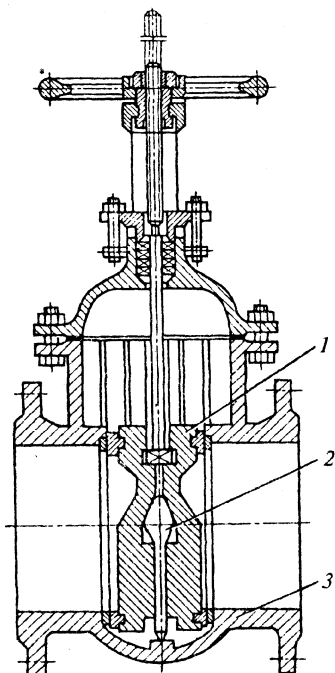


Рис. 6.13. Параллельная задвижка с выдвижным шпинделем

из стали 12Х18Н9Т. Уплотнение шпинделя сальниковое. В качестве набивки использован прорезиненный асбест.

Область применения вентилей весьма обширна. Их устанавливают и на паро- и водопроводах, на линиях транспортировки, не загрязненных осадками жидкости, так как твердые частицы, попадая под седло вентиля, могут нарушить его герметичность.

Задвижка — это запорная арматура, в которой затвор в виде диска или клина перемещается вдоль уплотнительных поверхностей перпендикулярно оси потока. При малых давлениях обычно используют параллельные (рис. 6.13) задвижки, при больших — клиновые (рис. 6.14).

По характеру движения шпинделя различают задвижки с выдвижным шпинделем, который при открывании задвижки перемещается поступательно, и с невыдвижным шпинделем, который

при работе совершает только вращательное движение и при вращении вворачивается в тело клина.

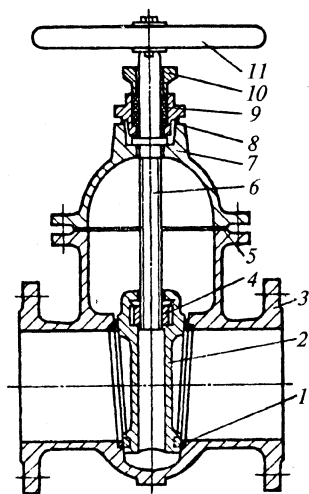


Рис. 6.14. Клиновая задвижка с неподвижным шпинделем:
1 — седло; 2 — клин; 3 — корпус;
4 — ходовая гайка; 5 — прокладка;
6 — шпindel; 7 — крышка;
8 — прокладка; 9 — сальник;
10 — нажимная втулка;
11 — маховик

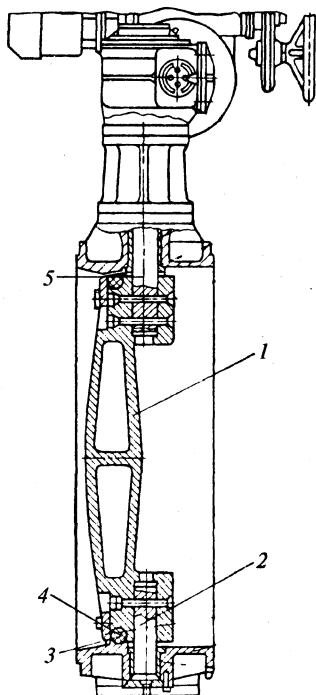


Рис. 6.15. Дисконная задвижка

В *параллельных* задвижках (см. рис. 6.13) запорным органом является шибер, состоящий из двух симметричных тарелок 1; между ними помещается клин 2, который при опускании тарелок распирает их, прижимая к уплотняющим поверхностям корпуса 3.

В *клиновых* задвижках с неподвижным шпинделем (см. рис. 6.14) при опускании или подъеме клина 2 он перемещается вдоль уплотнительных колец седла 1, закрывая или открывая задвижку. Шпindel 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 нежестких требованиях к герметичности запорного органа. Заслонками управляют вручную или с помощью гидро-, пневмо- или электропривода.

На рис. 6.15 показана стальная *дисковая* заслонка для водопроводов (при температуре до 80 °С), устанавливаемая как на горизонтальных участках, так и на вертикальных. Здесь уплотнение рабочего органа (диска 1), поворачивающегося вокруг оси 2, обеспечивается резиновым кольцом 3, установленным в канавке диска и закрепленным прижимным кольцом 4. Подвижное соединение вала 5 с корпусом уплотнено сальниковым устройством.

Регулирующая арматура — это прежде всего регулирующие клапаны и вентили, смесительные клапаны, редукционные клапаны и регуляторы уровня.

Регулирующие клапаны в системах автоматического регулирования управляют расходом среды в соответствии с поступающей командой. На рис. 6.16 показан регулирующий клапан с мембранным исполнительным механизмом.

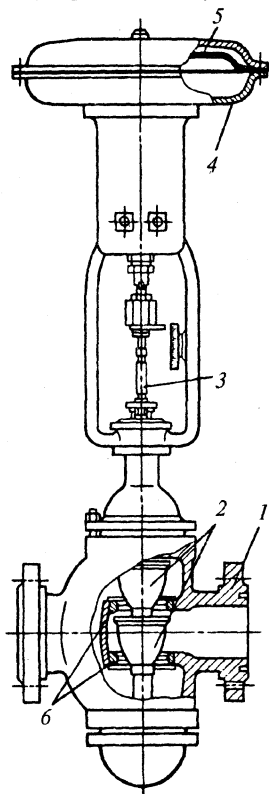


Рис. 6.16. Регулирующий клапан с мембранным исполнительным механизмом:
1 — корпус; 2 — затворы;
3 — шток; 4 — исполнительный механизм; 5 — мембрана;
6 — седла

мом. 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. 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 рассматриваются в курсе «Автоматика и автоматизация производственных процессов».

Фазоразделительная арматура — это в основном конденсатоотводчики, используемые для вывода конденсата из трубопроводной системы. *Конденсатоотводчики* действуют автономно, выпус-

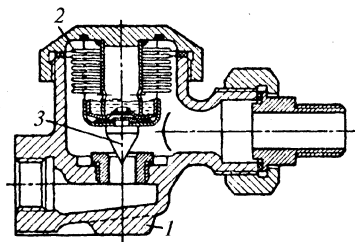


Рис. 6.17. Термостатический конденсатоотводчик

кая 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. 6.17) 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 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, в которых управляющим элементом выступает поплавок.

Конденсатоотводчики с поплавком колокольного типа (рис. 6.18) имеют цилиндрический поплавок 2, открытый снизу, в который конденсат поступает через входное отверстие корпуса 1. Поплавок соединен с затвором запорного органа при помощи рычажного устройства 6. Для того чтобы привести в действие конденсатоотводчик, необходимо конденсат, образованный при прогреве установки, и скопившийся воздух предварительно выпустить через спускные отверстия в корпусе и крышке 3, закрываемые пробками 5.

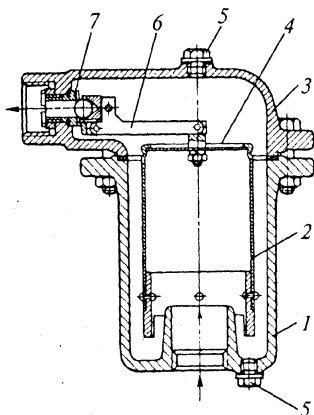


Рис. 6.18. Конденсатоотводчик с поплавком колокольного типа

Под действием смеси пара и конденсата поплавок поднимается в верхнее положение и закрывает выпускное отверстие в седле клапана 7, а пар постепенно выходит через небольшое отверстие 4 в верхнем доньшке поплавка. После выпуска пара из полости поплавка он теряет плавучесть, опускается вниз и открывает отверстие в седле. Конденсат под давлением выпускается из конденсатоотводчика, одновременно с воздухом и газами, накопившимися в корпусе. С поступлением новой порции смеси пара и конденсата цикл повторяется.

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. 6.19) и пружинными (рис. 6.20). Нижним штуцером их устанавливают на трубопроводе или аппарате, а через боковой штуцер отводится избыток среды. Давление на золотник клапана регули-

руют изменением числа грузов или силы сжатия пружины. Пружинные клапаны монтируют в любом положении, грузовые —

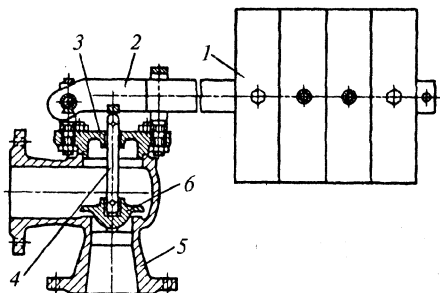


Рис. 6.19. Рычажно-грузовой клапан:
1 — груз; 2 — рычаг; 3 — крышка; 4 — шток;
5 — корпус; 6 — золотник

лишь в одном положении, при котором золотник строго вертикален. Грузовой клапан в отличие от пружинного не имеет сальника на штоке, поэтому его нельзя устанавливать внутри помещений, а также на трубопроводах, предназначенных для транспортировки огнеопасных сред.

Разрывные мембраны, устанавливаемые на трубопроводах, срабатывают при повышении рабочего давления на 20–25%. Они 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 клапанов — защита трубопроводных систем от обратного потока, который в ряде случаев может создать аварийную ситуацию. В показанном на рис. 6.21 обратном подъемном клапане для водопроводов золотник 2

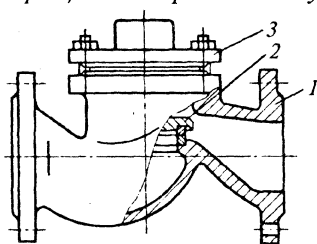


Рис. 6.21. Обратный подъемный клапан:
1 — корпус; 2 — золотник;
3 — крышка

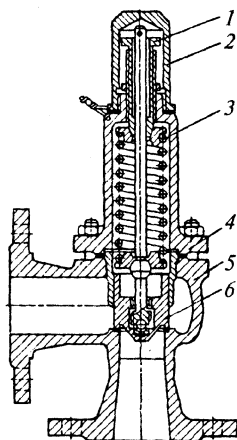


Рис. 6.20. Пружинный клапан:
1 — резьбовая втулка;
2 — колпак; 3 — пружина;
4 — крышка; 5 — корпус;
6 — золотник

находится в положении «открыто», когда сила от давления поступающей сре-

ды преодолевает вес золотника. С прекращением подачи среды при возникновении обратного потока золотник опускается на седло и клапан закрывается.

В *обратных поворотных* клапанах (рис. 6.22) проходное сечение закрывается диском 2, поворачивающимся вокруг горизонтальной оси 4. Такие клапаны менее чувствительны к загрязнению среды, но по герметичности уступают подъемным клапанам. Поворотные клапаны большого диаметра снабжают демпферами, противовесами и др. для уменьшения скорости закрывания и исключения возможности гидравлического удара.

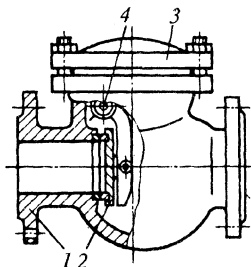


Рис. 6.22. Обратный поворотный клапан:
1 – корпус; 2 – диск;
3 – крышка; 4 – ось

6.5. Выбор трубопроводной арматуры

Задвижка — основной тип запорной арматуры, рекомендуемой для трубопроводов диаметром 50 мм и более; она имеет минимальное гидравлическое сопротивление, надежное уплотнение затвора и допускает изменение направления движения среды.

Вентили рекомендуются 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 сопротивлением или способные управлять несколькими расходящимися потоками; в последнем случае применяют трех-четырёхходовые краны.

Дисковые заслонки устанавливают на трубопроводах для жидких и 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 Ростехнадзора.

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 транспортировки 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, предпочтение отдают арматуре с сальниковым уплотнением штока в корпусе как наиболее дешевой перед арматурой с сальфонным уплотнением. Для трубо-

проводов с токсичной, огне- и взрывоопасной средой выбирают сильфонную арматуру.

Ручное управление арматурой применяют лишь при ее редком срабатывании. При частом использовании арматуры, а также в условиях автоматизированного управления производственным процессом требуется арматура с электро-, пневмо- и гидроприводами. Арматуру с электроприводом не используют при температуре 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 при этом необходимо минимальное число соединительных элементов; кроме того, резьбовые соединения просты по конструкции и исполнению. Для ответственных случаев, когда часто производится 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».

6.6. 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, в трубах вырезают отверстия, производят сборку и сварку элементов трубопроводов в сборочные единицы,

испытания сборочных единиц трубопроводов, их маркировку и др.

Сварку труб осуществляют на специальных сборочных стендах

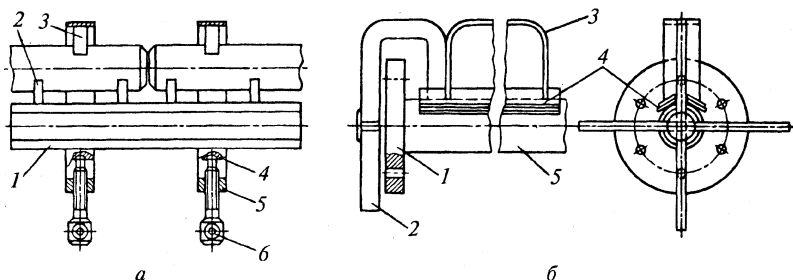


Рис. 6.23. Приспособления, применяемые при сборке деталей трубопроводов: *а* — для центровки труб (1 — основание, 2 — опорная призма, 3 — прижимная призма, 4 — упор, 5 — хомут, 6 — винт); *б* — для центровки трубы и фланца (1 — фланец, 2 — контрольная крестовина, 3 — рукоятка, 4 — уголок, 5 — труба)

с использованием приспособлений (кондукторов и центраторов), обеспечивающих правильное сопряжение деталей и узлов трубопроводов. Для центрирования труб небольшого диаметра при сварке применяют приспособление (рис. 6.23, *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. 6.23, *б*. Перпендикулярность фланца к оси трубы проверяют одновременно в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, измеряя шупом зазор между контрольной крестовиной 2 и фланцем 1.

Резку труб производят на дисковых, ножовочных или токарных станках. Применяют также установку для газопламенной резки и маятниковую пилу с абразивными армированными кругами.

После 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. Трубы заполняют сухим песком для уменьшения деформации стенок в процессе гибки.

Перед сборкой трубы и детали трубопроводов очищают от загрязнений и обдувают сжатым воздухом. Детали, покрытые смазочными маслами, расконсервируют одним из способов: либо нагревают в камерах или в ваннах с минеральным маслом при температуре 100–120 °С, а затем протирают уайт-спиритом или бензином, либо промывают горячей водой или моющими растворами.

Прокладке трубопроводов предшествует разбивка их трасс. Сначала 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 внутрицевых 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 размещают непосредственно у опор. Трубопроводы не должны пересекать оконные и дверные проемы. Над этими проемами нельзя устанавливать арматуру, фланцевые и резьбовые соединения. 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 трубопрово-

дами, арматурой, приборами контроля и управления поступают на монтажную площадку в готовом виде с заводов-изготовителей.

По окончании монтажных работ осуществляют гидравлические или пневматические испытания трубопроводов на плотность и прочность. Пневматические испытания проводят, если невозможно выполнить гидравлическое испытание, например при температуре окружающего воздуха ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ или при отсутствии воды на площадке. При испытательном давлении трубопровод выдерживают в течение 5 мин, затем давление снижают до рабочего и осматривают трубопровод, обстукивая 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 по время испытаний давление не уменьшается, а в сварных швах, фланцевых и прочих соединениях не обнаружены течи.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое условный проход D , и условное давление P ?
2. Какие устройства используются для компенсации температурных деформаций на технологических трубопроводах?
3. Что называют трубопроводной арматурой?
4. Чем отличается запорная арматура от регулирующей?
5. Каково назначение фазоразделительной и предохранительной арматуры?
6. В каких случаях не рекомендуется устанавливать чугунную арматуру?
7. Что нужно обязательно учитывать при выборе трубопроводной арматуры?
8. Какие приспособления используются при сварке труб и при соединении труб с фланцами?

ГЛАВА 7 МОНТАЖ И РЕМОНТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

7.1. Организация монтажных работ

Планы капитального строительства будут выполнены в установленные сроки при условии своевременного поступления оборудования, степени его комплектности и заводской готовности. Существенному ускорению строительства объектов способствует укрупненная поставка 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.

К монтажным работам относятся: монтаж оборудования промышленных предприятий; монтаж подъемно-транспортного оборудования; монтаж электротехнического оборудования, средств связи и сигнализации, контрольно-измерительных приборов и устройств; монтаж теплоэнергетического оборудования; монтаж технологических трубопроводов и металлоконструкций.

Монтаж оборудования — комплекс работ, включающих сборку машин и аппаратов, их установку в рабочее положение на предусмотренном проектом месте, соединение машин и аппаратов в технологические линии и установки, испытания на холостом ходу и под нагрузкой.

Монтаж оборудования состоит из подготовительных, собственно монтажных работ, испытаний и комплексного опробования смонтированного оборудования.

Подготовительные работы выполняются вне монтажной зоны на специальных площадках и включают в себя укрупнительную сборку оборудования, узлов трубопроводов и металлических конструкций, а также выполнение комплекса погрузочно-разгрузочных и транспортных операций.

К *собственно монтажным* относят следующие работы: проверка фундаментов и приемка их под монтаж; установка фундамент-

ных болтов и закладных частей; проверка комплектности оборудования и приемка его в монтаж; разборка оборудования, его очистка от консервирующей смазки; укрупнительная сборка оборудования, поставляемого монтажными блоками; перемещение оборудования в пределах монтажной зоны; установка оборудования в проектное положение; выверка и крепление оборудования к фундаментам.

Среди монтажных работ ведущими технологическими процессами являются: сборка оборудования и установка его в проектное положение; выверка этого положения с требуемой точностью и последующее закрепление на фундаментах. Именно эти процессы во многом определяют качество монтажа машин и аппаратов, а также их надежность при эксплуатации.

К *испытанию и комплексному опробованию* оборудования относятся работы по проверке соответствия технологическим условиям смонтированного оборудования, включающие проверку на плотность и прочность, точность установки узлов и деталей, испытания работы оборудования на холостом ходу и под нагрузкой, приработку его узлов.

Документация для монтажных работ. Монтаж оборудования, трубопроводов и конструкций проводят на основании технической, нормативной, проектно-сметной, технологической монтажной и производственной исполнительной документации.

К *технической* относится документация заводов-изготовителей оборудования, которую заказчик передает монтажной организации для подготовки и выполнения работ. Она включает: сборочные чертежи со спецификациями; паспорта машин, аппаратов, арматуры и контрольно-измерительных приборов, входящих в комплект поставки; схемы деления негабаритного оборудования на поставочные блоки; заводские технические условия (ТУ) на оборудование и инструкции по сборке, монтажу, сварке и испытаниям; акты завода-изготовителя на контрольную сборку и испытания оборудования; схемы строповки оборудования; сертификаты на металлопрокат, трубы и т.д.

Нормативная документация — строительные нормы и правила (СНиП), отраслевые и государственные стандарты, нормы технического проектирования, технические условия на производство и приемку монтажных работ, нормативные документы органов го-

сударственного надзора. Нормативные документы устанавливают комплекс норм, правил, положений, требований, обязательных при проектировании и производстве монтажных работ.

Состав и объем *проектно-сметной документации* определен СНиП 01.02.01.

Технологическая монтажная документация включает: проект организации строительства; проект производства работ; технологические карты и технологические схемы производства работ; журналы производства монтажных и специальных работ.

Проект организации строительства определяет порядок и последовательность производства строительно-монтажных работ и разрабатывается на стадии рабочего проекта промышленного объекта. Одной из составных частей проекта организации строительства является раздел «Механомонтажные работы. Монтаж оборудования».

Проект производства работ является основным технологическим документом, который разрабатывается в целом на объект или на отдельные виды работ и состоит из пояснительной записки, графической части и приложений. Состав, содержание, порядок согласования и утверждения проекта производства работ по монтажу технологического оборудования и трубопроводов регламентированы СНиП 03.01.01 «Организация строительного производства» и ОСТ 36–143 «Монтаж технологического оборудования и технологических трубопроводов. Проект производства работ. Порядок разработки, состав и содержание».

Монтаж отдельных машин и аппаратов осуществляют в соответствии с рабочими чертежами и инструкциями заводов-изготовителей. Если технология, заложенная в инструкциях, не соответствует условиям производства, монтаж отдельных машин осуществляют по технологическим картам, где указывают: наименование и характеристику машины; объемы работ; сметную стоимость и трудоемкость работ; продолжительность и сроки производства работ; план монтажной площадки; маршруты перемещения механизмов; требования к расконсервации и подготовке оборудования к монтажу; схемы перемещения, строповки, установки в проектное положение и выверки оборудования; последовательность работ; потребность в монтажных механизмах, приспособлениях и инструментах; порядок испытания вхолостую; технико-экономические показатели; требования техники безопасности.

Не нуждающиеся в сложных инженерных решениях работы по транспортировке и подъему выполняют по технологическим схемам производства работ, которые по составу аналогичны технологической карте, но имеют значительно меньший объем и оформляются на типовом бланке с приложением плана монтажной зоны, схем подъема и перемещения грузов.

Журналы производства работ ведут при монтаже ответственного оборудования (например, при сварке трубопроводов и оборудования, подведомственных Госгортехнадзору РФ), ответственных металлоконструкций (в частности, доменных печей), а также при защите оборудования от коррозии и испытаниях оборудования.

Производственная исполнительная документация — это схемы фундаментов и схемы смонтированного оборудования и трубопроводов; формуляры установки ответственных машин; акты на скрытые работы и т.д. Эту документацию составляют в процессе выполнения работ. В исполнительных схемах и формулярах указывают проектные и фактические размеры, положение осей и высотных отметок элементов оборудования и фундаментов, конструкций и трубопроводов, а также допускаемые и фактические зазоры в подшипниковых опорах, зубчатых и червячных зацеплениях и других вращающихся узлах.

Поставка, приемка, хранение и сдача оборудования в монтаж. Основной фактор, определяющий условия поставки оборудования, — его максимальная заводская готовность. ГОСТ 24444 «Оборудование технологическое. Общие требования монтажной технологичности» регламентирует заводскую готовность, монтажную технологичность и комплектность оборудования.

Габаритное оборудование должно поставляться в полностью собранном виде и испытанным (на прочность и плотность), а негабаритное — максимально укрупненными блоками. При этом каждый блок должен быть полностью собран и повергнут гидравлическому или пневматическому испытанию. Завод-изготовитель перед отгрузкой таких блоков выполняет контрольную сборку стыкуемых частей и наносит монтажную маркировку несмываемой краской и контрольные риски.

В комплект поставки входят эксплуатационные документы: техническое описание; инструкции по эксплуатации, техническо-

му обслуживанию, монтажу, пуску, регулированию и обкатке оборудования на месте монтажа; формуляр или паспорт; ведомость запасных частей, инструментов, принадлежностей и материалов (ЗИП); ведомость эксплуатационных документов.

По способу хранения оборудование делят на четыре группы. К первой группе относится оборудование, не чувствительное к атмосферным осадкам и температурным колебаниям, которое можно хранить на открытых площадках, — металлоконструкции, элементы трубопроводов и другие необработанные детали. Вторая группа включает оборудование, требующее защиты от прямого попадания атмосферных осадков, но не чувствительное к температурным колебаниям, которое хранят на полукрытых складах (под общим или индивидуальными навесами), — 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, которое хранят на закрытых неутепленных складах, — канаты, пневмо- и гидроцилиндры, детали с обработанными поверхностями трения и другие мелкие детали. К четвертой группе относится оборудование, чувствительное к осадкам и температурным колебаниям, которое хранят на закрытых утепленных складах, — подшипники качения и скольжения, тормозные системы, машины и механизмы со встроенным электрооборудованием, приборы.

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 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 оборудова-

ния до сдачи его в эксплуатацию возлагается на монтажную организацию.

Транспортировка оборудования, доизготовление его на месте монтажа. Перевозку крупногабаритного и тяжеловесного оборудования осуществляют железнодорожным, автодорожным и водным видами транспорта. Вид транспорта выбирают в соответствии с наличием путей сообщения от начального до конечного пункта транспортирования, а также с учетом экономичности.

Железнодорожные перевозки, особенно на значительные расстояния, более экономичны, чем перевозки водным и автодорожным транспортом, так как уменьшается число погрузок и вспомогательных работ. Для транспортирования аппаратов используют открытые железнодорожные платформы и 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 и когда груз не вписывается в очертания габарита погрузки.

Автодорожные перевозки более сложны из-за большого разнообразия препятствий, ограничивающих габарит автопоезда, радиусов закруглений, подъемов и уклонов на дорогах различных категорий. Схемы таких перевозок разрабатывают индивидуально для каждого объекта. Вначале обследуют возможные трассы провоза оборудования, определяют число препятствий, их тип (линии электропередачи, связи и пр.) и весовые ограничения дорожных сооружений (мостов, переездов). После этого выбирают состав автопоезда, тип транспортных средств, устанавливают тип и число тягачей, необходимый объем работ по оборудованию трассы.

Для автодорожных перевозок оборудования используют грузовые автомобили, тракторы, автомобильные тягачи обычной и повышенной проходимости, автомобильные прицепы и полуприцепы общего назначения, а также полуприцепы и прицепы-тяжеловозы грузоподъемностью 40—720 т.

Прицепы-тяжеловозы можно использовать для перевозки грузов в пределах, допускаемых габаритами платформ и номинальной грузоподъемностью. Длинномерные аппараты и другие грузы, габариты и масса которых превышают паспортные характеристики прицепов, можно перевозить по различным схемам на двух

прицепах (рис. 7.1). На рис. 7.1, *а* представлена схема перевозки аппарата на двух прицепах-тяжеловозах, оборудованных поворот-

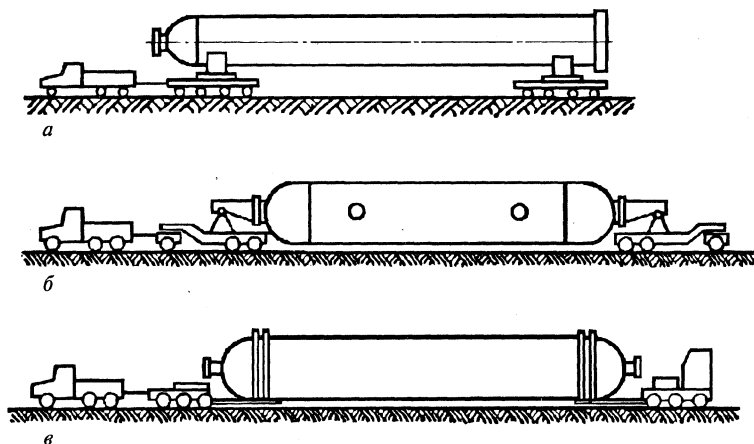


Рис. 7.1. Схемы автодорожной перевозки аппаратов:
а — прицепы, оборудованные поворотными столами; *б* — прицепы, оборудованные поворотными стойками; *в* — прицепы, оборудованные погрузочными площадками

ными столами. Прицепы с малой длиной погрузочной площадки оборудуют опорно-поворотными стойками, и аппарат при перевозке повисает между двумя прицепами, опираясь на их опорные стойки специальными консолями, жестко закрепленными на его днищах (рис. 7.1, *б*). Аппараты массой до 120 т перевозят на прицепах-тяжеловозах, имеющих опущенную погрузочную площадку длиной 9 м, которая может заменяться более длинной или выполняться как бы разрезной. Каждую половину погрузочной площадки скрепляют по концам с аппаратом, создавая единую транспортную систему (рис. 7.1, *в*). Для буксировки автопоездов с крупногабаритными тяжеловесными аппаратами применяют тяжелые колесные тягачи.

Водным транспортом перевозят оборудование, превышающее по габаритам и массе возможности железнодорожного транспорта, а также при удобном водном сообщении между изготовителем и заказчиком. Разрешается перевоз на плаву аппаратов диаметром до 10 м и длиной до 100 м, а на баржах-площадках — диаметром до 8 м и длиной до 50 м. При этом масса аппаратов не ограничена.

Основные трудности перевозок по водным путям связаны с выполнением погрузочно-разгрузочных операций, т.е. при передаче груза на водный транспорт и при выгрузке его на берег в пункте прибытия.

Для перевозки оборудования на плаву используют суда и баржи общего назначения, а также специальные самоходные суда и баржи-площадки грузоподъемностью 300–1760 т. При малой ширине фарватера и наличии встречного движения можно применять транспортные схемы, показанные на рис. 7.2, а и б. В первом случае аппарат перевозят двумя буксирами, причем задний буксир

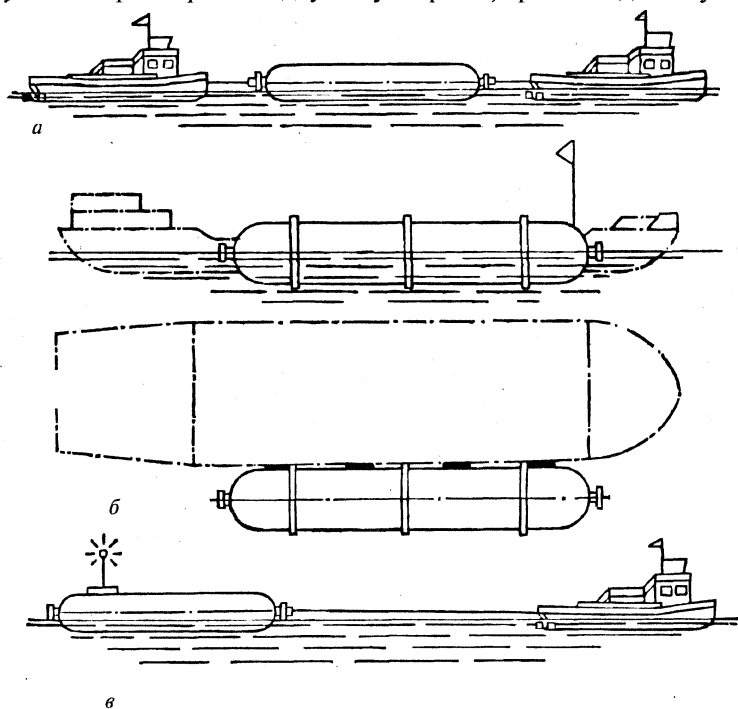


Рис. 7.2. Схемы перевозки аппаратов на плаву

направляет движение аппарата по фарватеру. По схеме, изображенной на рис. 7.2, б, аппарат пришвартовывают к борту попутной баржи или судна, что обеспечивает минимальные затраты на водную перевозку. При большой ширине фарватера (морские и

озерные перевозки) аппарат буксируют на канате длиной до 100 м (рис. 7.2, в). При буксировке аппарат оборудуют габаритными огнями, световой сигнализацией и килевым устройством для предотвращения кручения.

Значительное число тяжеловесных аппаратов доизготавливают на монтажной площадке. Это оборудование, поставляемое в виде укрупненных блоков, сборочных единиц, обечаек и др., которое 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, испытания собранного оборудования производят на месте монтажа, на специальных площадках укрупнительной сборки. В зависимости от объема работ и видов собираемого оборудования эти площадки оборудуют грузоподъемными кранами различных типов и оснащают специальными и универсальными сборочными стендами, а также оборудованием для автоматической или полуавтоматической сварки.

7.2. Основное грузоподъемное оборудование, механизмы и приспособления

Самоходные стреловые краны. По виду ходового устройства различают краны на гусеничном ходу и краны на колесном ходу (автомобильные краны, краны на специальном шасси автомобильного типа и пневмоколесные краны).

Гусеничные краны являются универсальными, обладают повышенной проходимостью и имеют наибольшую грузоподъемность (до 250 т). Низкое давление на грунт и значительный опорный контур обеспечивают возможность передвижения машины с грузом на крюке. Существенный недостаток гусеничных кранов — малая скорость передвижения (3 км/ч для кранов грузоподъемностью до 25 т и 0,75—1 км/ч для более мощных кранов), в связи с чем при переброске на значительное расстояние их необходимо разбирать и применять специальные транспортные средства. Гусеничные краны немецкой фирмы «Либхер» имеют грузоподъемность от 70 до 1000 т и высоту подъема крана до 175 м. Особенность

зарубежных кранов — унификация крановой установки со сменным шасси, так как одна и та же крановая установка может быть использована как с гусеничным шасси, так и с пневмоколесным.

Автомобильные краны на базе автомобилей ЗИЛ, КраЗ, КамАЗ имеют наибольшую скорость передвижения (до 80 км/ч), однако их грузоподъемность не превышает 25 т. Для уменьшения нагрузок на шасси и обеспечения устойчивости крана в конструкцию его ходового устройства введена дополнительная рама с выносными опорами, работающая как основание в период подъема грузов большой массы. При работе без выносных опор грузоподъемность автомобильных кранов уменьшается на 80%. Серийно выпускаются автомобильные краны с механическим, электрическим и гидравлическим приводом рабочих механизмов. Конструкция кранов позволяет совмещать рабочие операции (подъем—опускание) крюка или стрелы с вращением поворотной платформы.

Краны на специальном шасси имеют многоосное шасси с ведущими и управляемыми осями. Жесткая и балансирные подвески обеспечивают движение кранов со скоростью до 60 км/ч. На кранах грузоподъемностью 16, 25 и 40 т двигатель шасси служит и для привода механизмов крана. В кранах грузоподъемностью 63—100 т предусмотрены самостоятельные приводы для шасси и для механизмов, расположенных на поворотной части. Широкое распространение получили гидравлические краны на специальном шасси немецких фирм «Либхер», «Крупп» и «Демаг» и японской фирмы «Като».

Пневмоколесные краны имеют ходовое устройство в виде специального шасси, изготовленного с применением типовых сборочных единиц от автомобилей, или шасси специальной конструкции. Шасси имеет от двух до пяти осей (в том числе две ведущие) в зависимости от грузоподъемности крана, которая составляет от 16 до 100 т. На тяжелых машинах ведущие оси соединяются в балансирные тележки. Жесткая подвеска колес определяет скорость передвижения не выше 18 км/ч. В пневмоколесных кранах силовая установка смонтирована на поворотной части. Пневмоколесные краны успешно конкурируют с более дорогими и менее маневренными гусеничными кранами, однако для них характерна ограниченная проходимость по грунтовым дорогам.

Достоинствами самоходных стреловых кранов являются: мобильность; простота установки в рабочее положение и отсутствие

трудоемких подготовительных работ; технические возможности при манипуляциях при подъеме груза (основной подъем, изменение вылета стрелы, поворот стрелы, передвижение крана). К числу недостатков этих кранов, снижающих эффективность их использования на монтажных работах, относятся: крутопадающая характеристика грузоподъемности от вылета стрелы; малые подстреловые пространства на минимальных вылетах стрелы; резкое снижение грузоподъемности при использовании удлинненных стрел; высокая стоимость.

Мачтовые подъемники (мачты, порталы, шевры) — простейшие грузоподъемные механизмы, применяемые для подъема и установки в проектное положение крупногабаритных, тяжеловесных аппаратов на значительную высоту в условиях, если недостаточны грузовысотные характеристики стреловых кранов.

Монтажная мачта (рис. 7.3) представляет собой металлическую конструкцию 1 (трубчатую или решетчатую), оголовок 3 которой для удержания мачты в рабочем положении и изменения угла ее наклона укреплен тремя или четырьмя гибкими вантами 2. Ванты одним концом крепят за проушины оголовка мачты, а другим — к неподвижным якорям. Угол наклона вант к горизонту составляет $45\text{--}60^\circ$. Для уменьшения подвижности мачты после ее установки в проектное положение вантам с помощью винтовых стяжек (на рис. 7.3 не показаны) или полиспастов и лебедок придается предварительное усилие натяжения $10\text{--}30\text{ кН}$.

К оголовку 3 мачты (может быть вращающимся-

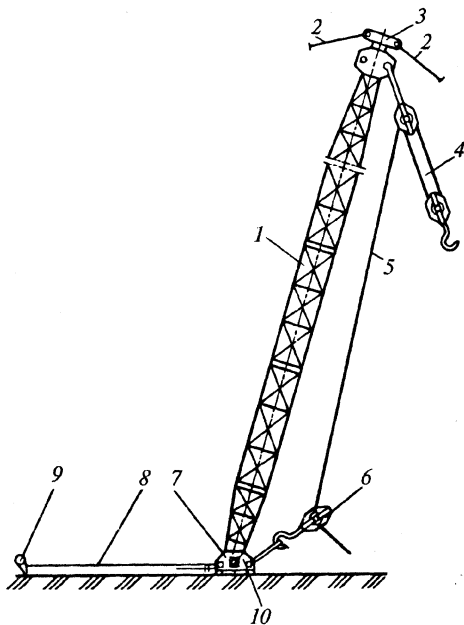


Рис. 7.3. Монтажная мачта

ся или неподвижным) крепятся один или два грузовых полиспаста 4, сбегающие ветви 5 которых через отводной блок 6 (или ролик) направляются к барабану лебедки. Мачта передает вертикальное усилие на грунт через опорный башмак 7, который устанавливают на шпалы или на специальный фундамент и закрепляют специальными растяжками 8 и якорями 9. Соединение мачты с опорой бывает жесткое (мачта работает в строго вертикальном положении), через цилиндрический или сферический шарнир 10 (мачта может изменять угол наклона в плоскости подъема груза). Наибольшее распространение получило соединение мачты с опорой через сферический шарнир, который позволяет поворачивать мачту без перестановки вант и наклонять ее на угол до 12° с вертикалью.

В тех случаях, когда условия монтажной площадки не позволяют разместить боковые ванты мачты, и в некоторых других случаях, обусловленных методами производства работ, применяют шевры.

Монтажный шевр (рис. 7.4) представляет собой А-образную раму 1, которую изготовляют из стальных труб или прокатных профилей (на виде А оснастка не показана). К оголовку шевра подвешивают грузовой полиспаст 2 и сбегающую ветвь, 5 которую через отводной блок 4 направляют на барабан лебедки. В вертикальном и наклонном положениях шевр удерживается канатом 6, который с целью изменения угла наклона шевра снабжается тяговым полиспастом (на рис. 7.4 не показан). Нижние концы

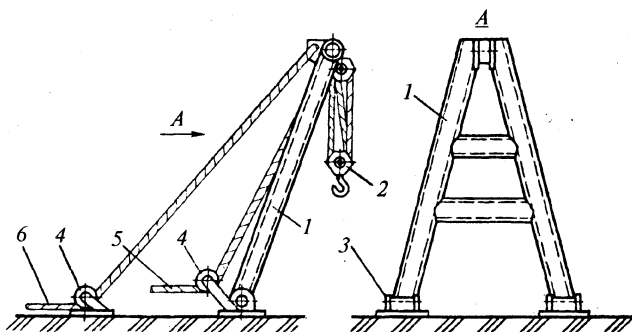


Рис. 7.4. Монтажный шевр

шевра посредством шарнира соединены с опорами 3, которые закреплены на фундаментах и удерживаются тросами от сдвига при наклоне шевра. Шекры высотой более 10 м для удобства транспортирования выполняют разборными с помощью фланцевых соединений. Грузоподъемность шевров 50–250 т, высота подъема до 35 м.

Портальные подъемники, или порталы (рис.7.5) целесообразно использовать для монтажа крупногабаритных тяжеловесных ап-

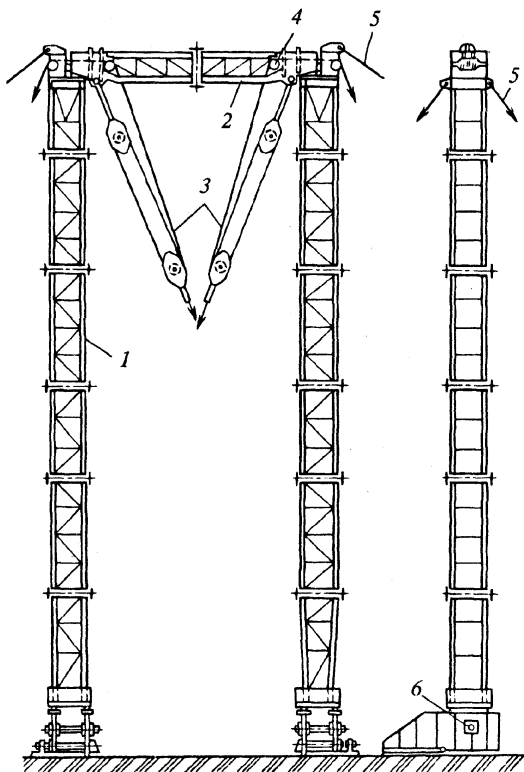


Рис. 7.5. Портальный подъемник

паратов, а также для сборки уникальных сооружений с большим количеством тяжеловесных подъемов. Портал представляет собой однопролетную П-образную конструкцию и состоит из двух опор-

ных стоек 1, которые в верхней части соединяются ригелем 2. Ригель и стойки портала представляют собой сварную пространственную конструкцию, собираемую из отдельных секций.

К ригелю на специальных осях крепят грузовые полиспасты 3, сбегаящие ветви которых через отводные блоки 4, прикрепленные к оголовку и опоре стоек, направляются к лебедкам. В рабочем положении портал удерживается шестью вантами 5, концы которых прикреплены к якорям. Портал может работать и в наклонном положении, для чего на ванты ставят полиспасты. Соединение стоек портала с опорными башмаками 6 осуществляется с помощью горизонтальных осей, обеспечивающих поворот портала при его монтаже и при изменении угла наклона в процессе работы. Опорные башмаки 6 во избежание сдвига крепят расчалками. Для соединения ригеля 2 с оголовками стоек портала 1 применяют сферический шарнир, который обеспечивает передачу нагрузки строго по оси стоек портала и допускает незначительный перекося стоек. Порталы позволяют перемещать груз вертикально и горизонтально; их грузоподъемность составляет 100–500 т, высота поднимаемых аппаратов до 100 м.

Лебедки — механизмы, у которых тяговое усилие передается посредством гибкого элемента (каната) от приводного барабана. Лебедки с электроприводом широко применяют при монтаже аппаратов (как самостоятельно, так и в комплекте с мачтовыми подъемниками). Лебедки состоят из сварных рам, на которых установлены барабан, редуктор, электродвигатель, тормозное и пусковое устройства.

Лебедки крепят к специальным якорям, к фундаментам или загружают балластом. Для предотвращения схода каната и защемления его в механизме привода лебедки, а также уменьшения момента, опрокидывающего лебедку, тяговый канат должен набегать на барабан снизу, причем канат должен быть параллелен основанию лебедки, что позволяет избежать отрыва лебедки от земли. Нормальная работа каната обеспечивается при условии, что оси барабана лебедки и отводного блока (ролика) параллельны и горизонтальны.

Ближайший к лебедке отводной блок устанавливают на расстоянии, не менее чем в 20 раз большем длины барабана. При этом угол перекося каната при его навивке на барабан не превышает

1,5°, благодаря чему канат наматывается равномерно по всей длине барабана. Несоблюдение этого условия вызывает ускоренный износ каната, приводит к односторонней навивке каната на барабан и к сбрасыванию с него каната.

Домкраты. Для механизации монтажных и такелажных работ, а также для подъема на небольшую высоту и выверки оборудования применяют гидравлические, реечные, винтовые (рис. 7.6) и клиновые домкраты.

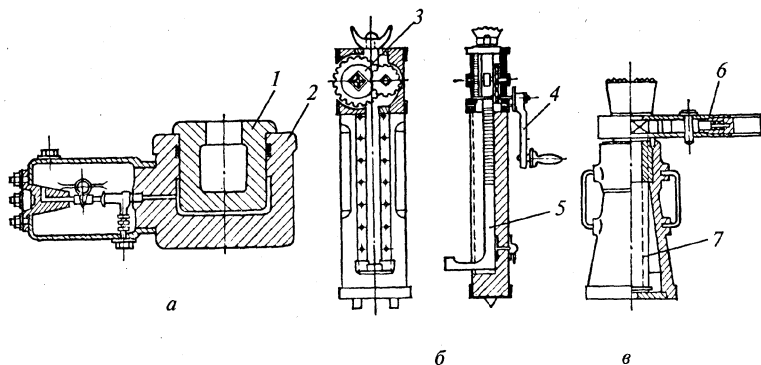


Рис. 7.6. Домкраты:
а — гидравлический; б — реечный; в — винтовой

Принцип действия *гидравлического домкрата* сводится к перемещению поршня 1 нагнетаемой в цилиндр 2 жидкостью с помощью ручного или приводного насоса. Насос может быть встроенным или отдельно расположенным. Грузоподъемность гидравлических домкратов до 500 т.

Реечные и винтовые домкраты просты по конструкции, имеют небольшие габаритные размеры и массу. *Реечные домкраты* (грузоподъемность 3—10 т) удобны тем, что имеют низко расположенные подъемные лапы, которые легко заправляются под поднимаемое оборудование. Подъем груза в них осуществляется за счет перемещения рейки 5 вверх посредством шестеренки 3, вращающейся с помощью рукоятки 4. *Винтовые домкраты* при такой же, как у реечных, грузоподъемности имеют меньшую массу. Их принцип действия основан на вращении винта 7 с помощью рукоятки 6 с храповиком. Они выгодно отличаются от реечных дом-

кратов тем, что при их работе исключается самопроизвольное опускание груза, так как угол подъема винтовой линии меньше угла трения.

Клиновые домкраты применяют главным образом при выверке оборудования в процессе монтажа.

Монтажные якоря. Анкерные устройства — монтажные якоря различных типов применяют для крепления вант и удержания в рабочем положении мачт, порталов, лебедок. Они должны выдерживать сосредоточенную нагрузку, действующую под углом $\pm 45^\circ$ в горизонтальной плоскости и под углом $0-90^\circ$ в вертикальной плоскости. В монтажной практике используют следующие типы

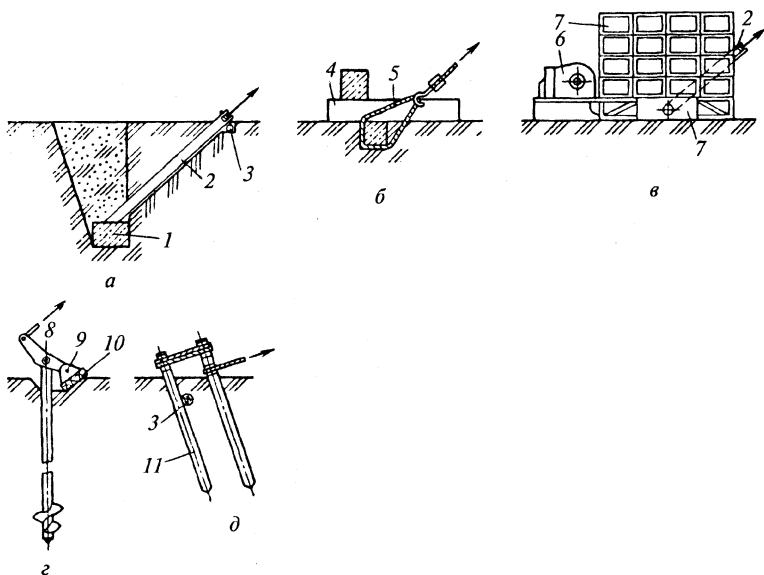


Рис. 7.7. Якоря, применяемые при монтажных работах:

1 — бетонный блок; 2 — металлическая тяга; 3 — деревянная или металлическая подкладка; 4 — железобетонный блок; 5 — строп; 6 — лебедка; 7 — металлическая рама; 8 — ось; 9 — опорная пята; 10 — шпалы; 11 — свая

якорей (рис. 7.7): *заглубленные*, работающие за счет сил трения и веса грунта, в который погружен якорь (рис. 7.7, а), их недостатки связаны с необходимостью большого объема земляных работ и невозможностью повторного его использования, что вызывает повышенный расход древесины, бетона и металла; *полузаглубленные* (рис. 7.7, б), не требующие больших земляных работ; *наземные* (или инвентарные), работающие за счет сил трения, обусловленных весом якоря (рис. 7.7, в), они могут многократно использоваться, не требуют трудоемких земляных работ, но имеют большую массу, почти вдвое превышающую несущую способность; кроме того, они характеризуются большой металлоемкостью и трудоемкостью сборки.

Заглубленные якоря бывают винтовые (рис. 7.7, г) и свайные (рис. 7.7, д). *Винтовой якорь* состоит из металлического стержня с винтовой лопастью на конце, коромысла и опорной пяты, которая воспринимает горизонтальную составляющую тягового усилия. Коромысло соединяется с металлическим стержнем и опорной пятой посредством осевых шарниров. Винтовые якоря, не имеющие опорной пяты, устанавливают наклонно, чтобы его ось совпадала с направлением нагрузки. Достоинства этих якорей: малая масса и возможность многократного использования, а недостаток — отсутствие специальных механизмов для завинчивания и вывинчивания. *Свайные якоря*, хотя просты по конструкции, требуют усилия при забивании свай.

Канаты и приспособления для закрепления стальных канатов. Для изготовления вант, стропов и оснастки грузоподъемных механизмов применяют стальные канаты, которые свивают из проволоки диаметром 0,22–3 мм следующим образом: из отдельных проволок формируются пряди, а из прядей вокруг органического сердечника (например, пенькового) свивается канат. Сердечник обеспечивает гибкость каната и является аккумулятором для смазки каната. В зависимости от сочетания направлений свивки проволок в пряди и прядей в канат различают канаты *односторонней* (параллельной) свивки, когда направления в пряди и канате совпадают, и *крестовой*, когда они противоположны. Канаты односторонней свивки более гибкие, но склонны к самораскручиванию; канаты крестовой свивки более жесткие, но зато не раскручиваются.

При монтажных работах следует использовать стальные канаты, соответствующие техническим требованиям по ГОСТ 3241 «Канаты стальные. Технические условия». Обычно применяют стальные канаты с линейным касанием типа ЛК проволок между слоями, состоящие из шести прядей с числом проволок в каждой пряди 19, 37 и 61. Канаты с 19 проволоками в пряди жесткие, поэтому их применяют в основном для изготовления вант и оттяжек. Канаты с 37 и более проволок в пряди применяют для запасовки полиспастов, изготовления стропов и других грузозахватных устройств.

Канаты для монтажных работ указанных выше конструкций обозначают сокращенно. Так, канат типа ЛК, состоящий из одного органического сердечника и шести прядей по 19 проволок

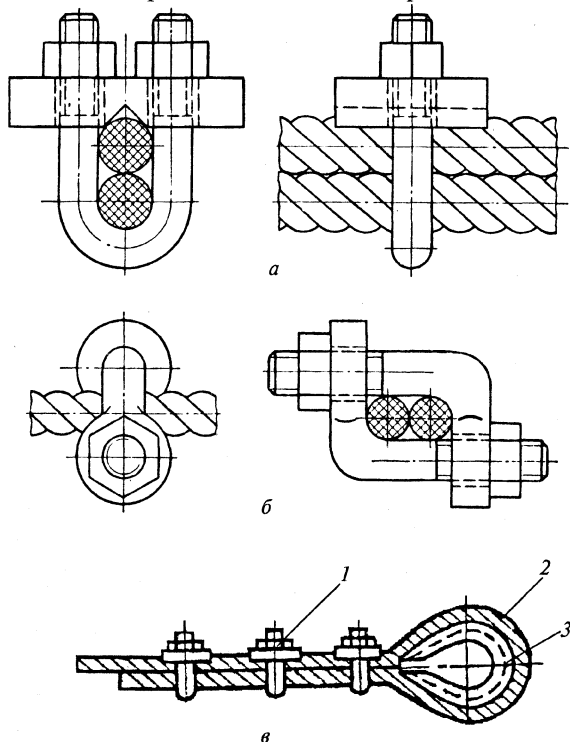


Рис. 7.8. Типы зажимов:

а — винтовой; *б* — Г-образный; *в* — схема установки зажимов;
1 — зажим; 2 — канат; 3 — коуш

(одна прядь в середине; шесть во втором слое; 12 в третьем слое пряди) обозначается следующим образом: ЛК6×19(1+6+12)+1 о.с.

Наибольшее допускаемое усилие в канате определяют из выражения

$$S = P/k,$$

где P — разрывное усилие каната, гарантированное паспортом или взятое по ГОСТ для данного типа каната, Н; $k = 3 \dots 6$ — коэффициент запаса прочности, принимаемый в зависимости от условий работы каната.

Наиболее надежным способом соединения концов каната и образования петель является сплетение их между собой, для чего сплетаемые концы каната распускают на пряди и вырезают мягкий сердечник. Прочность сплетаемого участка должна быть равна прочности целого каната. Сплетают только канаты одинакового диаметра и одинаковой конструкции. Сплетенные участки каната плотно обматывают по всей длине мягкой проволокой диаметром 1 ... 2 мм.

В тех случаях, когда требуется легкоразъемное соединение концов каната, применяют зажимы различных конструкций. Наиболее распространенные из них показаны на рис. 7.8.

Стропы — отрезки канатов, соединенные в кольца или снабженные специальными подвесными приспособлениями, обеспечивающими быстрое, удобное и безопасное закрепление груза. Выпускают стропы следующих типов (рис. 7.9): УСК1 — строп канатный универсальный (исполнение 1); УСК2 — строп канатный универсальный (исполнение 2); 1СК — строп канатный одноветвевой; 2СК — строп канатный двухветвевой; 3СК — строп канатный трехветвевой; 4СК — строп канатный четырехветвевой.

Число ветвей стропа выбирают в зависимости от массы груза и диаметра каната. При подвеске груза к крюку с помощью многоветвевых строп усилие в каждой ветви определяется из выражения

$$S = \frac{Q}{m \cos \alpha} k_n,$$

где Q — вес груза, Н; m — число ветвей стропа; α — угол наклона ветвей к вертикали, который для устойчивого равновесия груза не должен превышать 60° ; k_n — коэффициент неравномерности на-

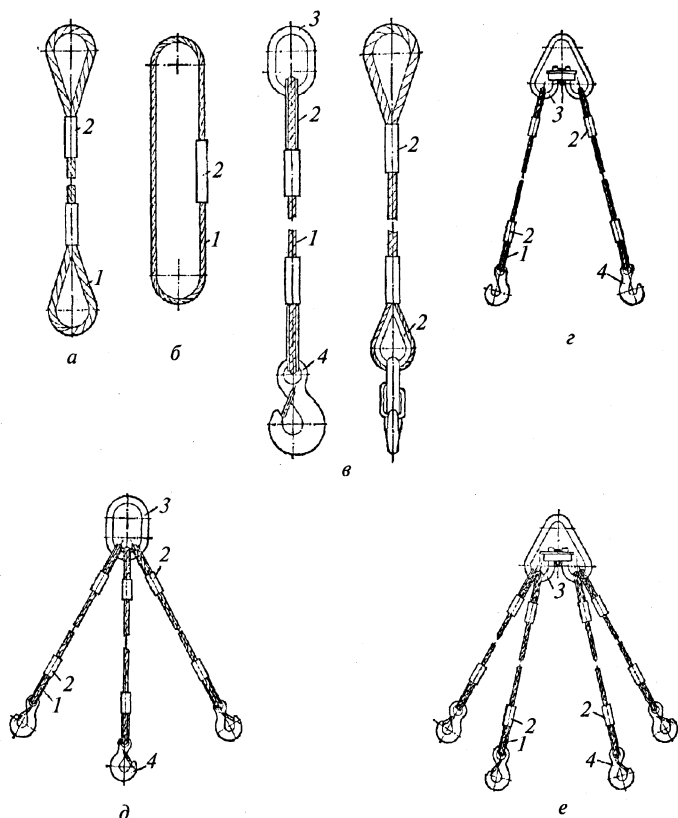


Рис. 7.9. Типы стропов:

а – УСК1; *б* – УСК2; *в* – 1СК; *г* – 2СК; *д* – 3СК; *е* – 4СК; 1 – канат;
2 – соединение (коуш); 3 – подвеска (разъемная или неразъемная); 4 – крюк

грузки на ветви стропа: если $m = 2$, то $k_H = 1$; если $m > 2$, $k_H = 1,3 \dots 1,4$.

Монтажные блоки, полиспасты. Блоки применяют для подъема или перемещения грузов, изменения направления движения каната и уменьшения силы, необходимой для подъема груза. Они состоят из одного или нескольких роликов, вращающихся на оси на подшипниках качения или скольжения, неподвижно установлен-

ной в щеках. Блоки оснащают приспособлениями, предохраняющими канат от соскальзывания. Однорольные блоки обычно применяют в качестве отводных, многорольные — для подъема тяжелых грузов.

Полиспасты используют для уменьшения тягового усилия, т.е. уменьшения нагрузки на канат и лебедку. Полиспаст (рис. 7.10) состоит из подвижного 5 и неподвижного 2 блоков, соединенных между собой канатом. Канат последовательно огибает все ролики блоков; один конец его 3 наглухо прикреплен к обойме одного из блоков, а другой 4 (сбегающий) отводится к барабану лебедки.

Рабочие ветви полиспаста — это канаты, на которых подвешен груз. Число рабочих ветвей подсчитывают следующим образом: все ветви полиспаста мысленно перерезают перпендикулярной к ним плоскостью и «отбрасывают» верхний неподвижный блок; число рабочих ветвей равно числу ветвей, на которых «висит» подвижный блок. Одна из характеристик полиспаста — кратность, равная числу рабочих ветвей; она показывает, во сколько раз снижается нагрузка на канат и лебедку по сравнению с весом поднимаемого груза, т.е. использование полиспаста дает выигрыш в силе за счет уменьшения скорости перемещения груза или увеличения длины каната. Кратность полиспаста можно определить также как общее число роликов в полиспасте без учета отводных и уравновешивающих роликов.

Усилие в сбегающей нитке, необходимое для подъема груза

$$S = Q \frac{1 - \eta}{1 - \eta^m},$$

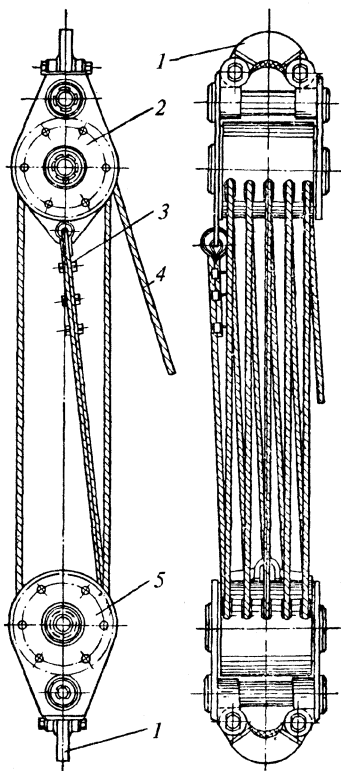


Рис. 7.10. Общий вид полиспаста:

- 1 — серьга; 2 — неподвижный блок;
- 3 — неподвижный конец троса;
- 4 — сбегающая ветвь троса;
- 5 — подвижный блок

где η — КПД одного ролика ($\eta = 0,96$ при установке ролика на подшипниках скольжения; $\eta = 0,98$ при установке на подшипниках качения); m — кратность полиспаста.

Траверы — важнейшие элементы такелажной оснастки, обеспечивающие безопасное выполнение монтажных работ, особенно при подъеме аппаратов двумя кранами.

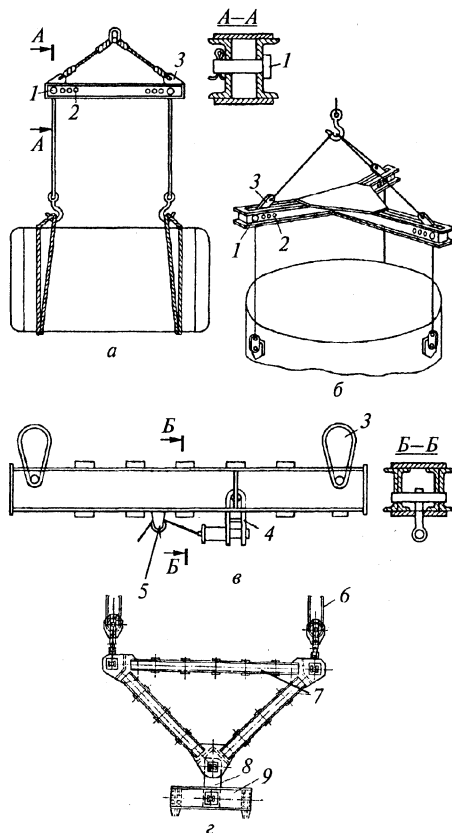


Рис. 7.11. Траверы:

a — двухлучевая; *b* — трехлучевая; *v* — балансирующая Гипронефтеспецмонтажа; *z* — балансирующая Гипрохиммонтажа; 1 — ось; 2 — отверстие; 3 — проушина; 4 — захват; 5 — отводной ролик для тягового тросика; 6 — грузовой полиспаст; 7 — верхняя траверса; 8 — подвеска; 9 — нижняя траверса

Траверсы служат для распределения усилия подъема на несколько точек строповки. *Двухлучевая* траверса (рис. 7.11, а) позволяет осуществить подвеску аппарата не в одной, а в двух точках, вследствие чего уменьшается прогиб аппарата от собственного веса. Кроме того, уменьшаются горизонтальные усилия, сжимающие конструкцию, при подъеме аппаратов большой длины. *Трехлучевая* траверса (рис. 7.11, б) дает возможность осуществлять подвеску цилиндрической обечайки в трех точках. При использовании траверсы сжимающие усилия, возникающие в поднимаемых элементах при наклонном положении стропов, заменяются усилиями, направленными вверх. Это позволяет избежать деформирования поднимаемых элементов.

Балансирные траверсы (рис. 7.11, в) служат для распределения веса аппарата на два крана. Проушинами 3 траверса подвешивается на крюках кранов. Аппарат подвешивается к полуавтоматическому захвату 4, к которому через отводной ролик 5 крепится тяговый тросик, в результате чего осуществляется расстроповка аппарата на высоте.

Балансирные траверсы (рис. 7.11, г) обеспечивают вертикальное (без перекоса) положение поднимаемого аппарата с помощью двух кранов. Соединение подвески 8 с верхней 7 и нижней 9 траверсами шарнирное. Благодаря этому в случае опережения (отставания) одного из полиспастов 6 положение подвески, а главное, нижней траверсы, соединенной с поднимаемым оборудованием, остается неизменным. Траверса может и не иметь средней секции (подвески). Обязательным элементом является шарнир между верхней траверсой, в которой закреплены стропы, идущие к грузовым полиспадам, и нижней траверсой, в которой закреплены стропы, идущие к поднимаемому грузу.

7.3. Монтаж вертикальных цилиндрических аппаратов

Методы производства работ при монтаже технологического оборудования весьма разнообразны и определяются: типом грузоподъемного механизма и техническими параметрами монтируемого оборудования (габаритами, массой); принятой тех-

нологией установки оборудования в проектное положение с учетом особенностей пространственного перемещения.

Тип основного грузоподъемного механизма определяет следующие методы монтажа: мачтовыми подъемниками; гидравлическими подъемниками; самоходными стреловыми кранами; башенными, козловыми, мостовыми кранами; полиспастами, закрепленными в существующих строительных конструкциях.

По условиям пространственного перемещения поднимаемого оборудования различают следующие основные методы монтажа: метод скольжения опорной части аппарата с отрывом или без отрыва опорной части от грунта, с оттяжкой низа аппарата перед установкой на фундамент или без оттяжки; метод поворота оборудования вокруг неподвижно закрепленного, либо скользящего шарнира; безъякорные методы, которые являются разновидностями метода поворота вокруг шарнира. К ним относятся: метод монтажа с помощью самомонтирующегося портала (или шевра); метод выжимания скользящей по рельсам подпоркой (или порталом); метод выталкивания с помощью гидравлического подъемника.

Производство работ мачтовыми подъемниками. В тех случаях, когда габариты и масса цилиндрических аппаратов (тарельчатых и насадочных колонн, скрубберов, реакторов, выпарных аппаратов и т.д.) сравнительно невелики, для их монтажа применяют самоходные стреловые краны.

Для монтажа тяжелых и высоких аппаратов в тех случаях, когда невозможно использовать краны из-за недостаточных грузоподъемных характеристик или стесненных условий монтажной площадки, применяют мачтовые подъемники.

Если мачта имеет достаточные грузоподъемность и высоту, то аппараты устанавливают одной мачтой. При подъеме аппаратов большого веса и диаметра, а также при наличии высокого фундамента используют спаренные мачты.

Монтаж мачтами производится следующими основными методами: методом скольжения с отрывом аппарата от земли с оттяжкой низа аппарата или без оттяжки; методом скольжения без отрыва аппарата от земли с подтаскиванием низа аппарата при заводке на фундамент; методом поворота вокруг шарнира.

При монтаже методом скольжения с отрывом аппарата от земли двумя вертикальными мачтами (рис. 7.12) аппарат уклады-

вают перед фундаментом, причем его положение (люков, штуцеров и т.д.) должно быть таким, чтобы после подъема он занял правильное положение.

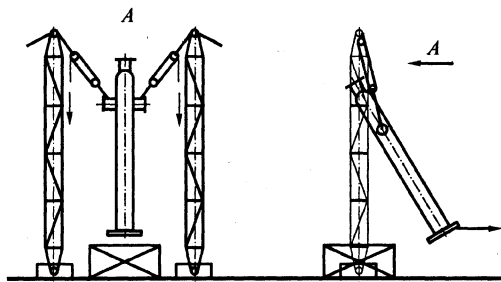


Рис. 7.12. Схема подъема аппаратов методом скольжения двумя вертикальными мачтами

Спаренные мачты, оснащенные грузовыми полиспастами, устанавливают вертикально и симметрично по обе стороны фундамента так, чтобы поднятый над фундаментом аппарат расположился строго по оси фундамента. В вертикальном положении мачты удерживаются гибкими вантами.

Строповку аппарата осуществляют за монтажные штуцеры, которые располагаются выше центра массы аппарата с таким расчетом, чтобы в поднятом положении отклонение от вертикали не превышало 10–15°. Сбегающие ветви грузовых полиспастов через отводные ролики направляют к барабанам лебедок.

Для придания необходимой траектории движения колонны при подъеме, а также для предотвращения ее раскачивания и вращения низ аппарата удерживают оттяжным канатом, свободный конец которого крепят к барабану лебедки. По мере подъема оттяжной канат отпускают.

Убедившись в надежности такелажной оснастки и проверив работу всех механизмов, включают тяговые лебедки и начинают подъем. Приподняв верхнюю часть аппарата примерно на 200 мм (это положение соответствует максимальным нагрузкам), лебедки выключают и осматривают элементы такелажной оснастки и строповку аппарата. При полной исправности строповки и такелажной оснастки вновь включают тяговые лебедки. Аппарат начинает передвигаться, при этом его опорная часть скользит по заранее подготовленному основанию — на санях (тележках) или металлических листах.

По мере подъема верхней части аппарата низ придерживают тормозной оттяжкой, постепенно ослабляя ее для перемещения аппарата в сторону фундамента. Далее, работая грузовыми лебедками, отрывают колонну от земли; постепенно ослабляя тормозную оттяжку, аппарат приводят в вертикальное положение и поднимают несколько выше фундамента. Включением реверса грузовых полиспастов плавно опускают аппарат на фундамент.

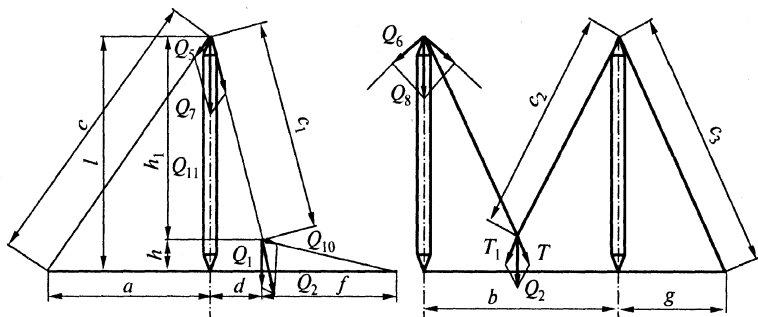


Рис. 7.13. Расчетная схема определения усилий в двух мачтах при подъеме груза с оттяжкой

Основными расчетными нагрузками являются (рис. 7.13):

- ♦ суммарная составляющая усилий в грузовых полиспастах

$$Q_2 = Q_1 \frac{fc_1}{fh_1 - dh};$$

- ♦ усилия в грузовых полиспастах при симметричном подвесе груза относительно осей мачт

$$T = T_1 = Q_1 \frac{fc_2}{2(fh_1 - dh)};$$

- ♦ горизонтальная Q_3 и вертикальная Q_4 составляющие усилий T и T_1 в полиспасте, действующих в плоскости полиспаста (на рис. 7.13 не показаны):

$$Q_3 = T \frac{\sqrt{d^2 + (b/2)^2}}{c_2}; Q_4 = T_1 \frac{h_1}{c_2};$$

- ♦ усилие в задней ванте

$$Q_5 = Q_1 \frac{f d c}{2(f h_1 - d h) a};$$

усилие в боковой ванте

$$Q_6 = Q_1 \frac{f b c_3}{4(f h_1 - d h) g};$$

усилие в тормозной оттяжке

$$Q_{10} = Q_1 \frac{d \sqrt{h^2 + f^2}}{f h_1 - d h};$$

суммарное усилие на основание мачты

$$Q_{11} = Q_4 + Q_7 + Q_8 + P_0 + P_m,$$

где $Q_7 = Q_5 l / c$ и $Q_8 = Q_6 l / c_3$ — вертикальные составляющие усилий Q_5 и Q_6 , действующие по оси мачты, Н; $P_0 = S_1 l / c n$ — вертикальная составляющая от усилия предварительного натяжения (на рис. 7.13 не показана), Н; P_m — вес мачты, Н; S_1 — усилие предварительного натяжения одной ванты (на рис. 7.13 не показано), Н; Q_1 — расчетное усилие (вес груза и грузовых полиспастов), Н; n — число вант на одной мачте; l — длина мачты, м; a — расстояние от оси мачты до якоря задней ванты, м; $c = \sqrt{l^2 + a^2}$ — длина задней ванты, м; b — расстояние между осями мачт, м; g — расстояние от оси мачты до якоря боковой ванты, м; d, f, h — расстояния от точки пересечения осей полиспастов, оттяжки и веса груза соответственно до основания мачты, до якоря оттяжки и от земли, м; $h_1 = l - h$; $c_1 = \sqrt{d^2 + h_1^2}$; $c_2 = \sqrt{c^2 + (b/2)^2}$; $c_3 = \sqrt{l^2 + g^2}$ — длина боковой ванты, м.

При монтаже колонных аппаратов *методом поворота вокруг шарнира* аппарат укладывают опорной частью к фундаменту и закрепляют в шарнире (рис. 7.14). Этот метод обычно применяется для подъема аппаратов колонного типа, металлических дымовых труб и высотных металлоконструкций, располагающихся на невысоких фундаментах (до 2 м). Данный метод характеризуется следующими преимуществами: максимальные нагрузки возникают в такелажной оснастке в начальный момент подъема, что повышает безопасность такелажных работ; вес поднимаемого обо-

рудования может значительно превышать грузоподъемность такелажных средств.

Подъем аппарата выполняют одной или двумя мачтами; в последнем случае следует применять балансирующие траверсы или не-

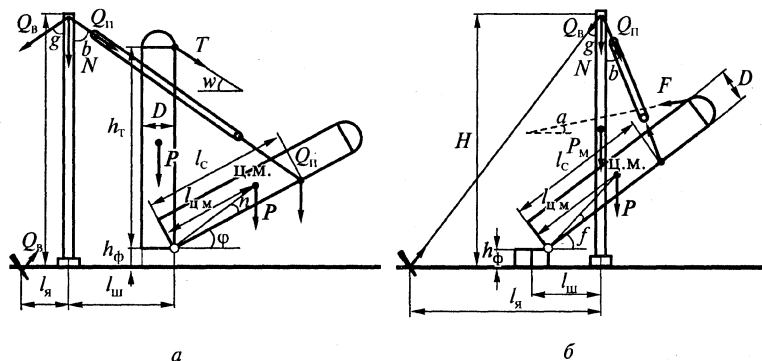


Рис. 7.14. Расчетная схема подъема аппарата методом поворота вокруг шарнира

прерывно контролировать нагрузки на мачты по показаниям приборов. Приподняв верхний конец аппарата на 100–200 мм (это положение соответствует максимальным нагрузкам), проверяют надежность такелажной оснастки и грузоподъемных механизмов. Далее подъем выполняют с периодическими остановками через каждые 15–20°. Перед моментом подхода аппарата к положению неустойчивого равновесия натягивают тормозной канат, который постепенно ослабляют при дальнейшем движении аппарата.

Применение этого метода подъема рекомендуется в том случае, когда высота мачт больше высоты поднимаемого оборудования. Взаимное расположение мачт и поднимаемого оборудования может быть выполнено по двум вариантам.

Первый вариант. Мачты устанавливаются за поворотным шарниром и центром массы аппарата (рис. 7.14, а). В этом случае оборудование поднимается до нейтрального положения в один этап и далее с помощью тормозной оттяжки плавно опускается на фундамент в проектное вертикальное положение под действием собственной силы тяжести.

Второй вариант. Мачты устанавливаются между поворотным шарниром и центром массы поднимаемого аппарата (рис. 7.14, б).

Оборудование поднимается в два этапа: вначале с помощью мачт на максимально возможный угол, затем дотягивающей системой до положения неустойчивого равновесия и, наконец, опускается в проектное положение тормозной оттяжкой. В этом варианте нагрузки на мачты, полиспасты и рабочие ванты меньше, чем в первом варианте. Во втором варианте одиночная мачта устанавливается рядом с поднимаемым аппаратом и наклоняется с расчетом расположения полиспаста в плоскости подъема аппарата.

Для парных мачт, установленных за поворотным шарниром (рис. 7.14, а), расчетное усилие в грузовом полиспасте при любом угле подъема аппарата φ можно определить из выражения

$$Q_{\text{п}} = \frac{Pl \cos(\varphi + \nu)}{2(H \sin \beta - h_{\text{ф}} \sin \beta - l_{\text{ш}} \cos \beta)}.$$

Это же усилие для мачт, установленных между поворотным шарниром и центром массы аппарата (рис. 7.14, б)

$$Q_{\text{п}} = \frac{Pl \cos(\varphi + \nu)}{2(H \sin \beta - h_{\text{ф}} \sin \beta + l_{\text{ш}} \cos \beta)},$$

где P — вес поднимаемого аппарата, Н; $l = \sqrt{l_{\text{цм}}^2 + r^2}$ — расстояние между шарниром и центром массы аппарата, м; $l_{\text{цм}}$ — расстояние от основания аппарата до центра его массы, м; r — радиус аппарата, м; H — высота мачты, м; $l_{\text{ш}}$ — расстояние от оси шарнира до плоскости установки парных мачт, м; $h_{\text{ф}}$ — высота фундамента, м; ν — угол между образующей аппарата и линией, соединяющей шарнир с его центром масс.

Усилие в полиспасте $Q_{\text{п}}$ для одиночной мачты в 2 раза больше.

Угол β между мачтой и грузовым полиспастом определяется графически путем построения схемы подъема в масштабе или по формуле:

$$\text{для схемы на рис. 7.14, а: } \operatorname{tg} \beta = \frac{l_{\text{с}} \cos \varphi + l_{\text{ш}}}{H - h_{\text{ф}} - l_{\text{с}} \sin \varphi};$$

$$\text{для схемы на рис. 7.14, б: } \operatorname{tg} \beta = \frac{l_{\text{с}} \cos \varphi - l_{\text{ш}}}{H - h_{\text{ф}} - l_{\text{с}} \sin \varphi},$$

где $l_{\text{с}}$ — расстояние от основания аппарата до места его строповки, м.

По усилию Q_n рассчитывают грузовой полиспаст (т.е. подбирают полиспастные блоки; определяют диаметр роликов в блоке и их количество; находят усилие в сбегающей ветви полиспаста, по которому подбирают лебедку; раесчитывают диаметр и длину каната для оснастки полиспаста), а также подбирают тип и диаметр каната для гибкого стропа.

Усилие в задней ванте Q_b независимо от места расположения мачт рассчитывают по формуле:

$$Q_b = Q_n \frac{\sin \beta}{\sin \gamma},$$

где угол γ (между мачтой и вантой) определяется графически или из выражения $\operatorname{tg} \gamma = l_n/H$; l_n — расстояние от мачты до якоря ванта, м.

По усилию Q_b подбирают тип и диаметр каната для задней ванта и рассчитывают якорь для нее, т.е. определяют вес якоря или усилия в анкерных болтах и проверяют устойчивость якоря против горизонтального сдвига и опрокидывания.

Усилие в тормозной оттяжке определяется из выражения

$$T = \frac{PD}{2h_r \cos \omega},$$

где D — диаметр аппарата, м; h_r — расстояние от оси шарнира до точки крепления тормозной оттяжки, м; ω — угол между тормозной оттяжкой и горизонталью.

Суммарное усилие, действующее по оси мачты:

$$N = Q_n \cos \beta + (Q_b + nS_0) \cos \gamma + S_n + P_m,$$

где n — число вант мачты, кроме рабочей (задней); S_0 — усилие предварительного натяжения вант, равное 10–30 кН (на рис. 7.14 не показано); P_m — вес мачты, Н. По усилию N проверяют прочность и устойчивость мачты на сжатие.

При установке мачт по варианту рис. 7.14, б рассчитывают дотягивающую систему для подъема аппарата на втором этапе от угла подъема мачтами до положения неустойчивого равновесия. С этой целью определяют максимальное усилие F , задаваясь значением α угла наклона дотягивающей системы к горизонту.

Кроме рассмотренных схем подъема цилиндрических аппаратов мачтами используют также следующие варианты: двумя наклонными мачтами с оттяжкой груза или без нее (рис. 7.15, а); с помощью одной наклонной или вертикальной мачты со строповой за верх аппарата (рис. 7.15, б) или за корпус (рис. 7.15, в); качающимися (одной или двумя) мачтами (рис. 7.15, г); методом поворота вокруг шарнира (рис. 7.15, д, е); в качестве мачты используется ранее установленный аппарат (рис. 7.15, ж); монтаж вертикальной мачтой при ее симметричном нагружении (рис. 7.15, з); монтаж аппаратов наклоняющимися («падающими») мачтами и шеврами (рис. 7.15, и, к).

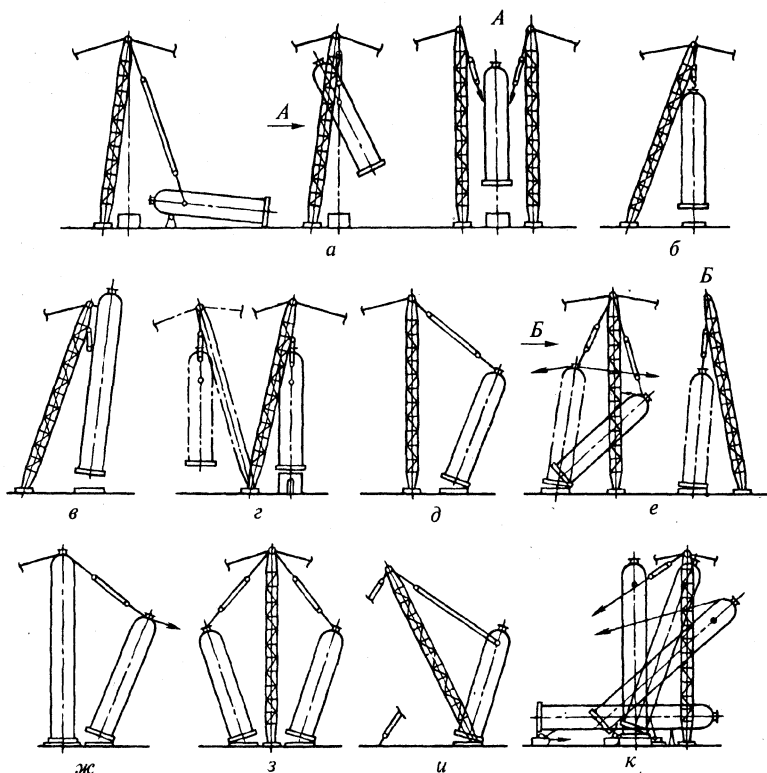


Рис. 7.15. Схемы монтажа вертикальных аппаратов мачтами:
а–г — методом скольжения с отрывом от земли; д–и — методом поворота вокруг шарнира; ж — методом скольжения без отрыва от земли

(рис. 7.15, и); монтаж аппаратов методом скольжения без отрыва от земли (рис. 7.15, к).

Если высота и грузоподъемность мачты достаточны, то аппарат можно поднять и установить одной мачтой со строповкой за верх аппарата (рис. 7.15, б). Если недостаточна только высота мачты, то аппарат может быть поднят со строповкой за корпус выше центра массы (рис. 7.15, в). При большой высоте колонны для снижения центра массы аппарата и соответственно места строповки применяют дополнительный груз в нижней части колонны, что позволяет использовать мачты определенной грузоподъемности, но небольшой длины.

Иногда аппарат по ряду причин не удается перед подъемом уложить близко к месту установки. Поэтому требуется значительное усилие оттяжки аппарата, что приводит к большим перегрузкам мачт и оттяжек. В таких случаях целесообразно применять схему подъема одной или двумя качающимися мачтами (рис. 7.15, г). Сущность метода заключается в следующем: в начале подъема мачты наклонены в сторону лежащего аппарата; после отрыва аппарата от земли с помощью полиспастов, установленных на вантах, мачты вместе с висящим аппаратом приводят сначала в вертикальное положение, а затем наклоняют в сторону фундамента. При установке нескольких аппаратов рядом этот метод дает значительный экономический эффект, так как отпадает необходимость перемещения мачт, что сокращает трудовые затраты и продолжительность монтажа.

На рис. 7.15, ж представлена схема подъема, когда в качестве мачты используется ранее установленный аппарат, предварительно снабженный грузовым полиспастом и вантами. Этот метод весьма эффективен благодаря уменьшению расходов, связанных с установкой и демонтажом мачт.

При монтаже двух аппаратов, стоящих рядом и близких по габаритам и массе, целесообразно применять метод одновременного подъема аппаратов одной или двумя мачтами (рис. 7.15, з). Благодаря симметричной нагрузке мачта работает только на сжатие без изгибающих моментов; в результате можно использовать тяжелую оснастку меньшей грузоподъемности. Так, при грузоподъемности мачты 50 т и высоте 35 м можно поднять одновременно два аппарата общей массой 160 т и высотой до 50 м.

При монтаже по схеме, показанной на рис. 7.15, 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 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 положению неустойчивого равновесия движение аппарата замедляют тормозной оттяжкой. При большой массе аппарата целесообразно поднимать его А-образным «падающим» шевром.

При подъеме колонны *методом скольжения без отрыва от земли* (рис. 7.15, к) опорную часть колонны сначала 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.

Метод монтажа порталами. Портал обладает большей грузоподъемностью, чем мачты. Преимуществами метода 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 метод скольжения (рис. 7.16, а), метод поворота вокруг шарнира, безъякорный метод. Один из основных недостатков портала — ограничение высоты монтируемого оборудования высотой портала. Этого не-

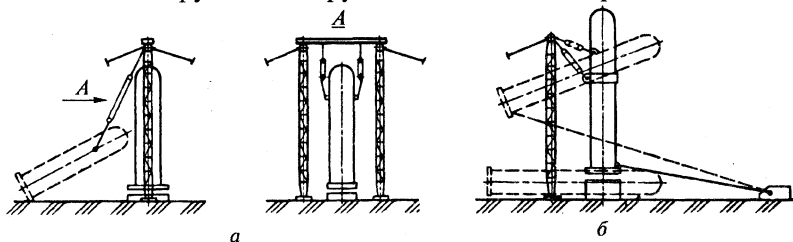


Рис. 7.16. Схемы монтажа аппарата порталом:

а — методом скольжения с отрывом от земли; б — с использованием консоли

достатка можно избежать, применив схему подъема, показанную на рис. 7.16, б, при этом высота портала составляет 0,55–0,65 высоты аппарата. Строповку осуществляют не по оси аппарата, как обычно, а за строповочную консоль, расположенную на боку аппарата, немного выше его центра масс, и закрепляемую на корпусе аппарата с помощью бандажей. Консоль обеспечивает выведение аппарата при его подъеме из пространства, занимаемого порталом.

Сначала аппарат поднимают до высоты, несколько превышающей положение его центра масс в рабочем состоянии. Затем аппарат оттягивают за нижнюю часть; при этом он поворачивается в вертикальной плоскости вокруг места строповки и выводится из плоскости 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 метода монтажа* с помощью самоподнимающегося портала заключается в следующем (рис. 7.17). Портал 1 поднимают полиспастами 2 из исходного горизонтального положения в наклонное, используя поднимаемый аппарат 3 в качестве якоря, который в начальный момент также находится в горизонтальном положении. При некотором угле подъема портала начинает подниматься аппарат. В процессе подъема аппарат и

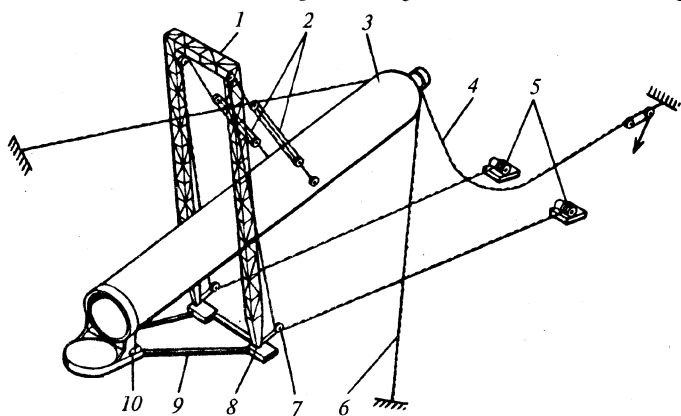


Рис. 7.17. Схема монтажа безъякорным методом

портал поворачиваются соответственно вокруг поворотного шарнира 10 и шарнирной опоры 8, соединенных между собой стяжкой 9. Стяжка служит для предотвращения горизонтального сдвига опор портала и перекоса оси поворотного шарнира в горизонтальной плоскости и изготавливается из стального каната, проката или труб. Для подъема аппарата используют две лебедки 5, к барабанам которых через отводные блоки 7 крепятся сбегающие ветви полиспастов 2. При сокращении длины полиспастов аппарат постепенно поднимается; длина полиспаста уменьшается до тех пор, пока не будет достигнуто положение неустойчивого равновесия системы аппарат–портал. При подходе к этому положению включают тормозную оттяжку 4, а при необходимости одновременно натягивают боковые ванты 6 аппарата. После установки аппарата в вертикальное положение его закрепляют с помощью фундаментных болтов, а портал опускают в исходное положение включением реверса лебедок.

Таким образом, процесс установки оборудования безъякорным способом состоит из трех этапов: самоподъем портала до момента начала подъема аппарата; подъем аппарата с одновременным опусканием портала; доводка аппарата в проектное положение с одновременным опусканием портала.

Кинематическая схема безъякорного способа подъема представляет собой четырехзвенный механизм, у которого ведущее звено (грузовой полиспаст) имеет переменную длину, а остальными звеньями постоянной длины являются аппарат, земля и портал. Замкнутая система взаимно уравнивающих сил исключает действие горизонтальных нагрузок на фундамент поднимаемого аппарата.

Преимущества безъякорного метода подъема: отсутствие вант и якорей к ним; незначительное превышение габаритов монтажной площадки по сравнению с габаритами поднимаемого аппарата, что весьма важно при монтаже в стесненных условиях; отсутствие необходимости поднимать и устанавливать в рабочее положение мачтовые подъемники с помощью дополнительных кранов или такелажных средств; отсутствие горизонтальных монтажных нагрузок на фундамент. К недостаткам данного метода подъема можно отнести: чувствительность системы к осадке опор портала; необходимость сооружения фундамента под опорные стойки портала при монтаже аппаратов массой свыше 250 т в

связи с большими усилиями, возникающими в опорно-поворотном шарнире.

Расчетная схема безъякорного метода представлена на рис. 7.18; основными расчетными величинами выступают:

- ♦ угол наклона портала к горизонту (рис. 7.18, а) в начальный мо-

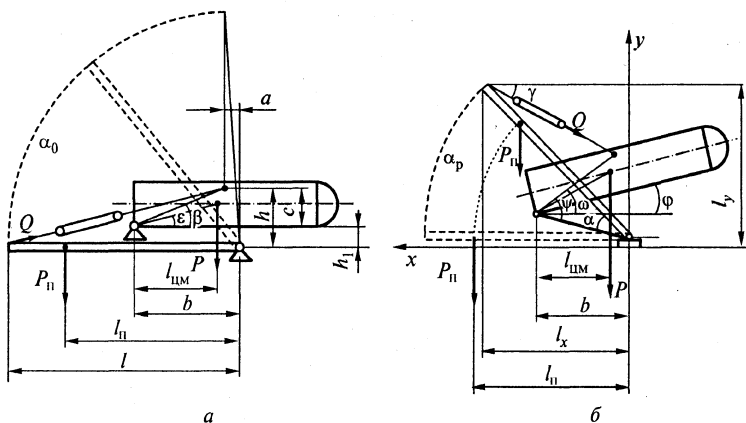


Рис. 7.18. Расчетная схема определения усилий в элементах такелажной оснастки безъякорным методом

мент подъема аппарата ($\varphi = 0$) в случае $a = 0$

$$\alpha_0 = \arcsin \left[\left(\frac{Pl_{цм}l}{P_{п}l_{п}b} + 1 \right) \frac{hb}{l\sqrt{c^2 + b^2}} \right] - \beta,$$

где $\beta = \arctg(c/b)$;

- ♦ угол наклона аппарата к горизонту в момент неустойчивого равновесия системы аппарат–портал (рис. 7.18, б)

$$\varphi_1 = \arcsin \left[\frac{bh_1}{l^2} + \sqrt{\frac{P^2 l_{цм}^2 - P_{п}^2 l_{п}^2}{P^2 l_{цм}^2 - P_{п}^2 l_{п}^2 b^2 / l^2}} \right] - \beta;$$

- ♦ угол подъема портала α_p при некотором угле наклона аппарата ($\varphi = 0 \dots 90^\circ$), когда система аппарат–портал находится в равновесии (так называемый равновесный угол подъема портала на второй стадии подъема) при любых значениях a :

$$\sin(\varphi + \alpha_p) - A \cos \psi \left(\frac{l_0}{l} \cos \omega - \frac{b}{l} \right) \operatorname{tg} \alpha_p = A \cos \psi \left(\frac{l_0}{l} \sin \omega + \frac{h_1}{l} \right) + \frac{b}{l} \sin \omega + \frac{h_1}{l} \cos \omega, \quad (7.1)$$

где $A = Pl_{\text{шм}} l / (P_n l_n l_0)$; $l_0 = \sqrt{c^2 + (b-a)^2}$; $\beta = \arctg [c / (b-a)]$.

Уравнение (7.1) решается методом последовательных приближений: сначала вычисляют правую часть уравнения как не зависящую от величины α_p ; затем рассчитывают левую часть уравнения при различных α_p , добиваясь равенства правой и левой частей уравнения. По (7.1) можно найти α_0 в том случае, когда $a \neq 0$. Для этого необходимо подставить значение $\varphi = 0$; усилие в грузовых полиспадах в начальный момент подъема портала, когда $\alpha = 0$ и $\varphi = 0$ (см. рис. 7.18, а):

$$Q = \frac{P_n l_n \sqrt{l^2 + h^2}}{lh};$$

усилие в грузовых полиспадах для любого положения поднимаемого портала (аппарат находится в горизонтальном положении, $\varphi = 0$)

$$Q = P_n \frac{l_n}{l} \frac{\sqrt{(l_x / h - a / h)^2 + (l_y / h - 1)^2}}{1 - a l_y / (h l_x)}.$$

При $a = 0$ (наиболее рациональная схема)

$$Q = P_n \frac{l_n}{l} \sqrt{\left(\frac{l_x}{h} \right)^2 + \left(\frac{l_y}{h} - 1 \right)^2},$$

где $l_x = l \cos \alpha$ и $l_y = l \sin \alpha$ — проекции длины портала на горизонтальную и вертикальную плоскости;

усилие в грузовых полиспадах при любом угле подъема аппарата φ (см. рис. 7.18, б):

$$Q = \frac{P_n l_n \cos \alpha_p}{l \sin(\alpha_p - \gamma_1)},$$

где $\gamma_1 = \arctg [(l \sin \alpha_p - l_0 \sin \omega - h_1) / (l \cos \alpha_p + l_0 \cos \omega - b)]$ — угол наклона грузового полиспаста к горизонту на втором этапе подъема.

При $\alpha_p = \alpha_0$ получим усилия в полиспастах в начальный момент подъема аппарата, когда $\varphi = 0$.

Длину полиспаста можно определить из выражений: на первом этапе самоподъема портала ($\varphi = 0$; $0 < \alpha \leq \alpha_0$)

$$L_n = \sqrt{(l \sin \alpha - h)^2 + (l \cos \alpha - a)^2};$$

на втором этапе подъема аппарата ($0 \leq \varphi \leq \varphi_1$)

$$L_{n1} = \sqrt{(l \sin \alpha_p - l_0 \sin \omega - h_1)^2 + (l \cos \alpha_p + l_0 \cos \omega - b)^2}.$$

В приведенных выше уравнениях приняты следующие обозначения (см. рис. 7.18): P и P_n — вес поднимаемого аппарата и вес портала, H ; $l_{цм}$ — расстояние по оси аппарата от его шарнира до центра массы, m ; l_n — расстояние по оси портала от его шарнира до центра массы портала, m ; b — расстояние по горизонтали между шарнирами аппарата и портала, m ; l — длина портала, m ; h — расстояние по вертикали между точкой строповки аппарата и шарниром портала в исходном положении, m ; h_1 — расстояние по вертикали между шарнирами аппарата и портала, m ; $c = h - h_1$ — кратчайшее расстояние от шарнира аппарата до точки строповки, m ; a — расстояние между вертикальной осью, проходящей через шарнир портала, и точкой строповки аппарата в исходном положении, m ; α , φ , γ — углы наклона портала, аппарата и полиспаста к горизонту соответственно; β — угол наклона к горизонту линии, соединяющей шарнир аппарата с точкой строповки, в исходном положении; $\omega = (\varphi + \beta)$ — угол, определяющий положение точки строповки в наклонном положении аппарата; $\varepsilon = \arctg (r/l_{цм})$ — угол наклона к горизонту линии, соединяющей шарнир аппарата с точкой центра масс, в исходном положении; $\psi = (\varphi + \varepsilon)$ — угол, определяющий положение центра масс в наклонном положении аппарата; r — кратчайшее расстояние от шарнира аппарата до его оси, m .

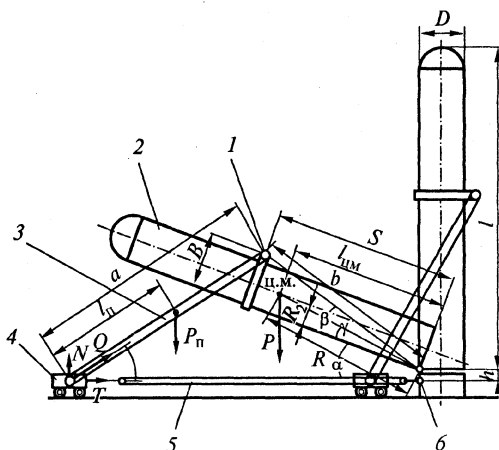
При монтаже *методом выжимания* опора аппарата разрезается и снабжается поворотным шарниром. Нижняя часть опоры с половиной шарнира крепится к фундаменту, верхняя с другой половиной шарнира остается на аппарате. Перед подъемом аппарат краном подтаскивается к фундаменту, нижняя его часть заводится

в поворотный шарнир (т.е. половины шарнира соединяются и вставляется ось), а верхняя приподнимается, насколько это возможно, и укладывается на временную опору, в качестве которой используются шпальная выкладка или металлические козлы.

Подъем аппарата производится с помощью рамной опоры (рис. 7.19). Верхний конец подпорки шарнирно закреплен на аппарате, а нижний, перемещаясь, создает усилие, необходимое для подъема аппарата. Для соединения верхнего конца подпорки с аппаратом выше его центра массы крепится или приваривается поворотная цапфа, находящаяся на уровне верхней образующей аппарата или выше ее. Рамная опора обеспечивает хорошую боковую устойчивость аппарата, поэтому боковые ваны обычно не применяют.

Нижние концы подъемной подпорки шарнирно опираются на каретки или тележки, катящиеся под действием тягового усилия по рельсовому пути. При подъеме оборудования массой до 80 т каретки выполняются однокатковыми, при массе более 80 т — в виде тележек. Не допускается на всех стадиях подъема расположение кареток под центром массы оборудования и ближе к поворотному шарниру. Подъем аппарата осуществляется двумя полиспастами, соединяющими поворотный шарнир аппарата с каретками. Сбегающие ветви этих полиспастов направляются к барабанам лебедок (на схемах не показаны).

Аппарат, выжимающие подпорки и полиспаст образуют замкнутую систему, от которой усилия на фундамент не передаются. Фундамент воспринимает только усилия от сбегающих ветвей по-



лиспастов. Грузовые полиспасты располагаются внизу, что обеспечивает удобный контроль за их состоянием во время подъема.

Основными расчетными параметрами являются:

- ♦ угол неустойчивого равновесия аппарата

$$\alpha_{\text{нр}} = 90^\circ - \arctg(R_2/l_{\text{цм}}),$$

где R_2 — расстояние от шарнира до оси аппарата (проходящей через центр массы), м; $l_{\text{цм}}$ — расстояние от шарнира до центра массы по длине аппарата, м;

- ♦ продольное усилие (сжатие) в подпорке с учетом ее веса в процессе подъема (аппарат поднят на угол α)

$$Q = \frac{PR \cos(\alpha + \nu)}{b \sin(\alpha + \beta + \varphi)} + \frac{P_{\text{п}} l_{\text{п}} \cos \varphi}{a \operatorname{tg}(\alpha + \beta + \varphi)},$$

где P — вес аппарата, Н; $R = \sqrt{l_{\text{цм}}^2 + R_2^2}$ — кратчайшее расстояние от оси шарнира аппарата до его центра массы, м; $b = \sqrt{S^2 + B^2}$ — кратчайшее расстояние от оси шарнира аппарата до точки крепления подпорки (до оси поворотной цапфы), м; $P_{\text{п}}$ — вес подпорки, Н; $l_{\text{п}}$ — расстояние от нижнего конца подпорки до ее центра массы, м; a — длина подпорки, м; углы $\beta = \arctg(B/S)$ и $\gamma = \arctg(R_2/l_{\text{цм}})$ постоянны; α — угол наклона аппарата к горизонту; φ — угол наклона подпорки к горизонту, $\sin \varphi = \frac{b \sin(\alpha + \beta)}{a} + \frac{h}{a}$; B — расстояние по ширине аппарата от оси его шарнира до оси поворотной цапфы (т.е. до верхнего конца подпорки), м; S — расстояние по длине аппарата от оси его шарнира до оси поворотной цапфы, м;

- ♦ сила прижатия каретки к рельсам, действующая вертикально вниз:

$$N = P_{\text{п}} + Q \sin \varphi - Q_1 \cos \varphi,$$

где $Q_1 = (P_{\text{п}} l_{\text{п}} \cos \varphi)/a$ — поперечная составляющая силы давления аппарата на подпорку;

- ♦ усилие в полиспасте в процессе подъема аппарата: без учета трения каретки о рельсы

$$T = Q \cos \varphi + Q_1 \sin \varphi;$$

с учетом трения

$$T_1 = T + fN,$$

где f — коэффициент трения качения каретки по рельсовому пути.

Гидравлические подъемные механизмы. По кинематической схеме метод подъема аппаратов гидроподъемником относится к безъякорным и называется *методом выталкивания* (рис. 7.20). Перед подъемом аппарат 1 с помощью крана укладывается нижней частью в шарнир 5, а верхней — на козлы или шпальную выкладку 2. Стойки гидроподъемника 3 устанавливают по обе стороны аппарата и расчаливают. Опоры стоек соединяются стяжками 4 или полиспастами с поворотным шарниром поднимаемого аппарата.

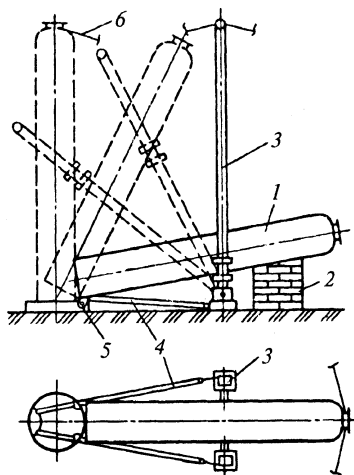


Рис. 7.20. Схема монтажа аппарата гидроподъемником

При перемещении подъемных устройств (каретки и траверсы) вдоль стоек поднимаемая колонна поворачивается вокруг шарнира; одновременно вокруг шарнирных опор поворачиваются стойки гидроподъемника. При подходе к положению неустойчивого равновесия включается тормозная оттяжка 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.

Монтаж оборудования самоходными стреловыми кранами. Все описанные выше методы монтажа вертикальных цилиндрических аппаратов мачтами применимы и при монтаже стреловыми кранами.

Аппараты в проектное положение можно устанавливать:

- ♦ *методом поворота вокруг шарнира* одним или двумя кранами; со строповкой за верх аппарата или за корпус; с доводкой в вертикальное положение вантами и с применением тормозной оттяжки; с передвижением крана (кранов), поворотом стрелы, с изменением вылета крюка или с одной установки крана; метод при-

меняют для оборудования, устанавливаемого на нулевой отметке либо на невысоком фундаменте;

- ♦ одним или двумя кранами *методом скольжения* опорной части аппарата с подтаскиванием его низа в процессе подъема; с оттяжкой при наличии высокого фундамента; со строповкой аппарата за верх или за корпус; без передвижения или с передвижением крана (кранов); с отрывом низа аппарата от саней и без отрыва; метод можно применять для монтажа оборудования на высоком фундаменте.

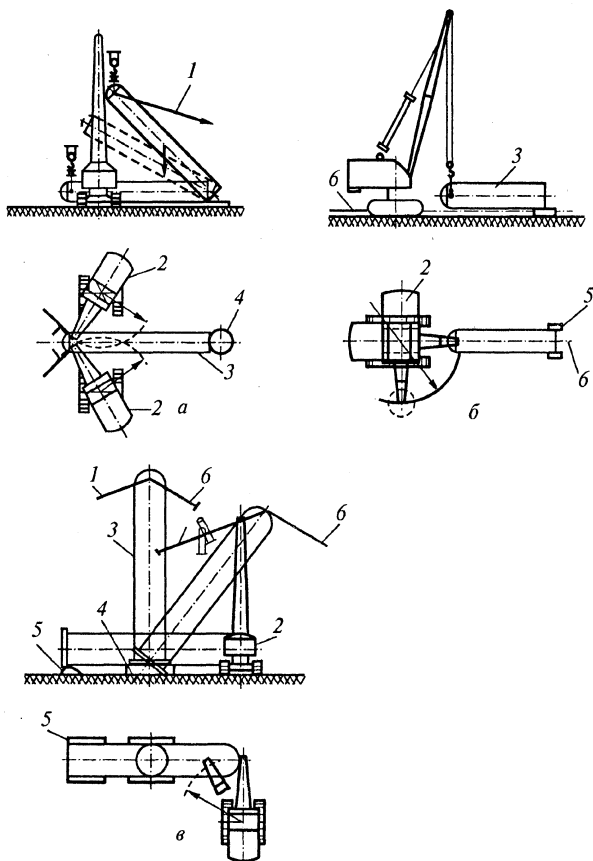


Рис. 7.21. Схемы методов монтажа вертикальных аппаратов стреловыми кранами:
 1 — дотягивающая ванга; 2 — стреловой кран; 3 — аппарат; 4 — фундамент; 5 — сани;
 6 — тормозная оттяжка

Некоторые варианты монтажа оборудования стреловыми кранами представлены на рис. 7.21. На рис. 7.21, *а* показан подъем аппарата методом поворота вокруг шарнира двумя кранами (с поворотом стрел кранов) с доводкой в вертикальное положение вантами и применением тормозной оттяжки; на рис. 7.21, *б* — подъем аппарата методом скольжения одним краном с подтаскиванием низа аппарата в процессе подъема, с отрывом аппарата от грунта, переносом на ось установки (поворотом стрелы) и опусканием в проектное положение; на рис. 7.21, *в* — подъем аппарата методом скольжения одним краном без отрыва низа аппарата от грунта, с установкой крана не по оси фундамента, с доводкой аппарата в вертикальное положение вантами и применением тормозной оттяжки.

В монтажной практике используются различные способы повышения грузовысотных характеристик стреловых кранов; так, применяют: опорную стойку (подпорки) под аппарат; стреловые краны с временно расчлененной стрелой; краны с опирающимися стрелами; краны со стрелами, соединенными ригелем; краны с разгрузочным устройством.

Монтаж оборудования стреловыми кранами со строповкой за опорную стойку под аппарат (рис. 7.22) пригоден в тех случаях, когда высота аппарата значительно выше высоты подъема крюка крана. Метод монтажа — поворот аппарата вокруг шарнира. До начала монтажа на аппарате 2 укрепляется опорная стойка 1, представляющая собой сварную пространственную конструкцию, как правило, треугольного сечения. Соединение стойки с аппаратом шарнирное. К шарнирной опоре аппарата крепится металлическая тяга 3 либо стягивающий полиспаст.

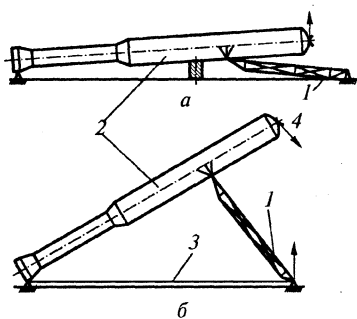


Рис. 7.22. Схема подъема аппарата с применением опорной стойки:
а, б — этапы подъема

Подъем осуществляется в два этапа. На первом этапе аппарат за его верхний штупер краном (кранами) поднимают на максимально возможную высоту подъема крюка. В этом положении аппарат фиксируют, соединяя низ опорной стойки с тягой (или стягивающим полиспастом). Аппарат, опорная стойка и тяга об-

разуют жесткий треугольник, при этом нижний конец опорной стойки через шпальную выкладку упирается в грунт. На втором этапе подъема краны (через балансирную траверсу) строятся за

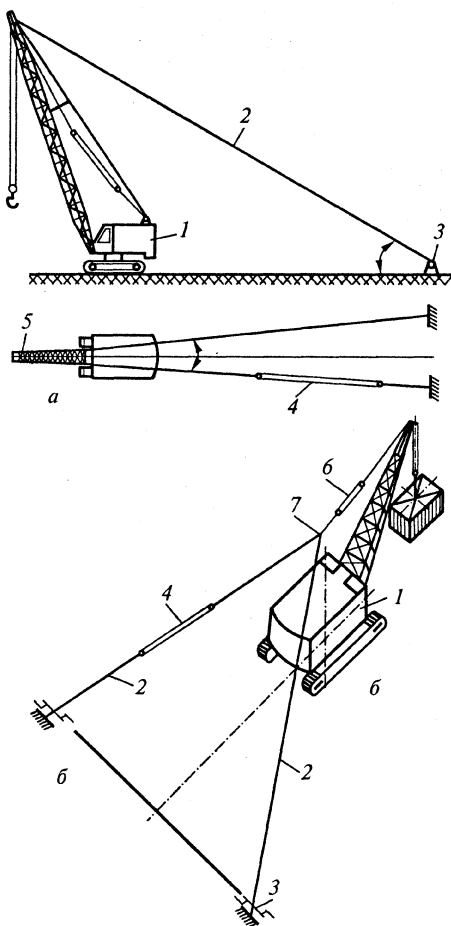


Рис. 7.23. Краны с расчальными стрелами: а — неманевренная стрела; б — маневренная стрела; 1 — кран; 2 — расчалка ветви системы расчальвания; 3 — якорь с лебедкой; 4 — полиспаст ветви системы расчальвания; 5 — уравнивательный блок; 6 — полиспаст системы расчальвания; 7 — соединительная траверса

нижний конец опорной стойки. Поднимая кранами основание опорной стойки, а следовательно, и аппарат, его перемещают в вертикальное положение без доводки вантой. В положении неустойчивого равновесия в работу включается тормозная оттяжка 4.

Монтаж оборудования самоходными стреловыми кранами с временно расчальными стрелами (рис. 7.23) применяют, если масса оборудования превышает паспортную грузоподъемность крана, а условия монтажной площадки позволяют разместить необходимые расчалки.

Временное расчальвание стрелы может быть *неманевренным* (рис. 7.23, а), когда можно ограничиться операциями лишь по подъему, опусканию крюка и изменению вылета стрелы, и *маневренным* (рис. 7.23, б), если в процессе подъема возникает необходимость поворачивать платформу с грузом на крюке. При этом поворот платформы крана допускается в пределах сектора, образованного про-

должением горизонтальных проекций ветвей расчалки. Во всех случаях центральный угол сектора обслуживания не должен превышать 120° .

При установке стрел самоходных стреловых кранов на опорные стойки (рис. 7.24) грузоподъемность кранов может превы-

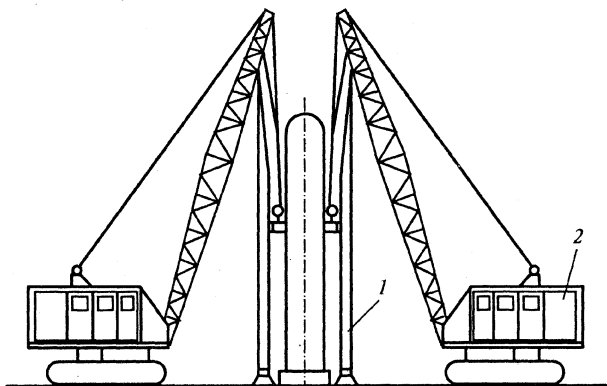


Рис. 7.24. Схема кранов с опирающимися стрелами:
1 — опорная стойка (А-образный шевр); 2 — стреловой кран

шать паспортную в 1,5 раза. Другим преимуществом этого метода является возможность подъема оборудования, высота которого почти в 2 раза больше высоты подъема крюка крана. В качестве опорных стоек используются А-образные шевры. Метод монтажа — скольжение с отрывом аппарата от земли, поэтому опорная часть аппарата при подъеме подтаскивается к фундаменту.

При производстве работ грузовые полиспасты не должны отклоняться от вертикали в плоскости стрелы более чем на 3° . Механизмы поворота кранов должны быть заторможены, стреловые полиспасты — натянуты.

При опирании стрел двух кранов на ригель (рис. 7.25) исключается потеря устойчивости кранов в плоскости расположения стрел. Поэтому данный метод монтажа применяют для установки в проектное положение аппаратов, масса которых превышает суммарную паспортную грузоподъемность имеющихся кранов. С точки зрения траектории движения аппарата в процессе подъема это метод скольжения с отрывом от земли.

Для того чтобы исключить появление дополнительных усилий на краны, место строповки аппарата располагается строго по оси

фундамента, совпадающей с плоскостью расположения стрел кранов. При подъеме не допускается отклонение грузовых поли-

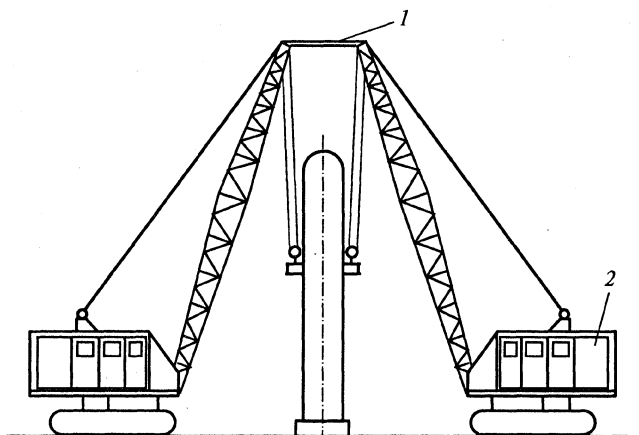


Рис. 7.25. Схема кранов со стрелами, соединенными ригелем:
1 – ригель; 2 – стреловой кран

спастов от вертикали более чем на 1° , поэтому опорная часть аппарата перемещается лебедкой к фундаменту, т.е. к плоскости расположения стрел кранов.

При монтаже методом поворота вокруг шарнира для снижения нагрузки на кран в момент отрыва аппарата от земли применяется дополнительная тяговая система, состоящая из шевра 4, полиспаста 3 с грузом 2 и лебедки 1 (рис. 7.26).

Дополнительный груз 2 (например, железобетонный блок) в начальный момент поднимается лебедкой от земли. Подъем аппарата 5 осуществляется совместным действием груза через шевр и краном, грузовой трос которого строится за верхний штуцер аппарата.

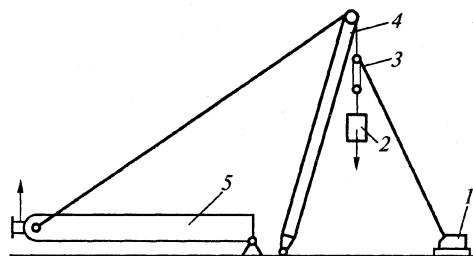


Рис. 7.26. Схема подъема краном
с использованием разгрузочного устройства

В конце подъема груз опускается на землю, выполняя роль якоря, а лебедка подтягивает аппарат до проектного положения.

7.4. Монтаж горизонтальных аппаратов

К горизонтальным аппаратам относятся, как правило, барабанные вращающиеся печи и сушилки, применяемые для обжига, прокаливания и сушки различных материалов, а также теплообменники.

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 торцевого биений 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 надежными бандажами; установка упорных роликов; установка зубчатого венца; установка редуктора и ведущей шестерни; установка узлов горячего и холодного концов барабана. Эти аппараты монтируют с использованием самоходных стреловых кранов, мачт, козловых кранов. Большое значение для их нормальной работы 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. 7.27). По схеме, представленной на рис. 7.27, а, аппарат перед подъемом располагают таким образом,

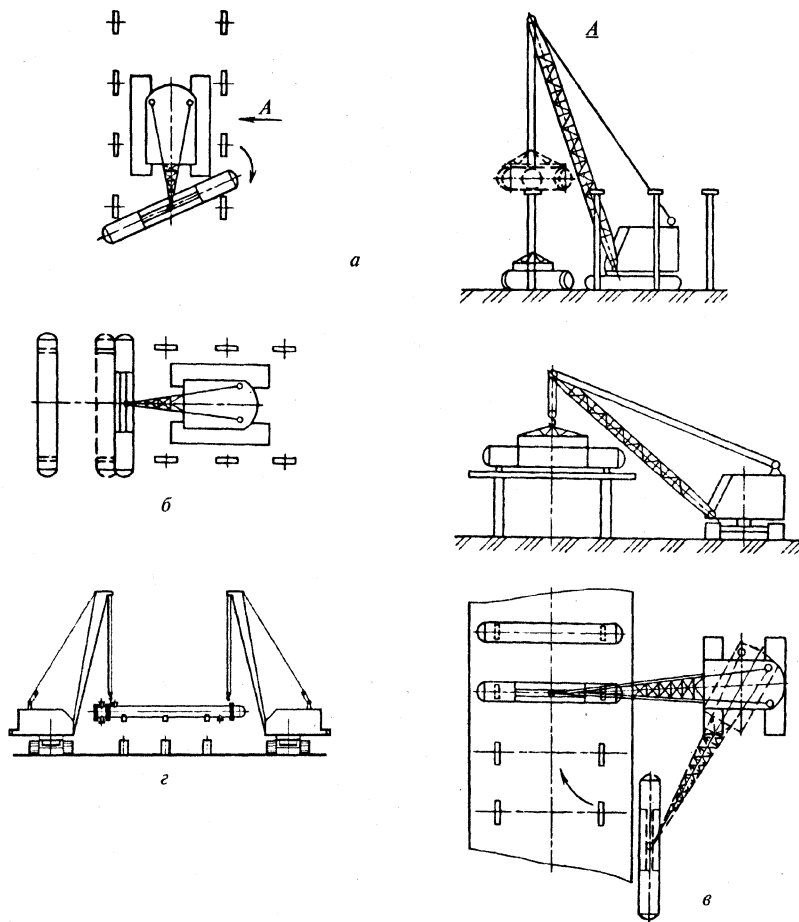


Рис. 7.27. Схемы монтажа теплообменных аппаратов на открытой площадке чтобы положение центра масс аппарата соответствовало проектному. Стрела крана имеет минимальный вылет, а его грузоподъемность максимальна. После подъема аппарат поворачивают на растяжках в проектное положение вокруг вертикальной оси и

устанавливают на опоры. Если перед подъемом удастся расположить аппарат рядом с фундаментом параллельно проектному положению, то монтаж осуществляют по схеме, показанной на рис. 7.27, б. После подъема аппарата над фундаментом кран перемещают до установки аппарата в проектное положение. При невозможности передвижения крана между фундаментами применяют схему подъема, изображенную на рис. 7.27, в.

При недостаточной грузоподъемности одного крана устанавливают спаренные краны (рис. 7.27, г). Для контроля равномерного распределения нагрузки на краны часто используют балансирные траверсы.

Теплообменные аппараты монтируют в технологических цехах 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. 7.28). Возможна схема монтажа с применением вертикальной мачты и полиспастов, прикрепленных к строительным конструкциям

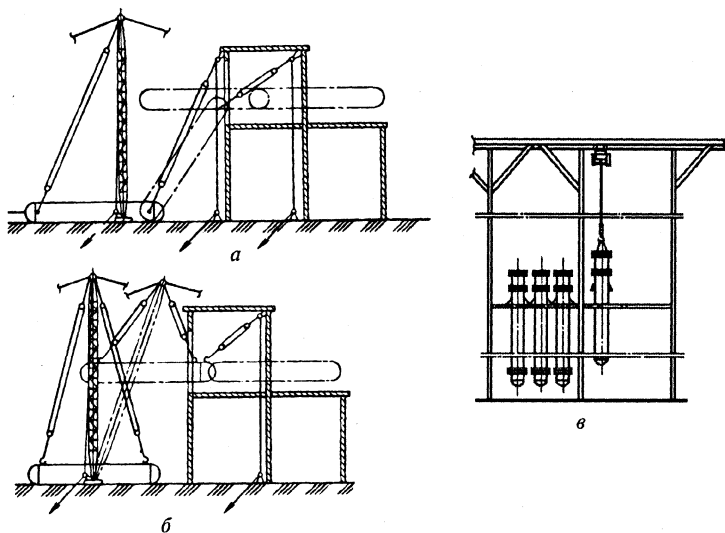


Рис. 7.28. Схемы монтажа теплообменных аппаратов под перекрытием

(рис. 7.28, *а*). Менее трудоемок монтаж с использованием качающейся мачты (рис. 7.28, *б*), оснащенной двумя полиспастами — передним и задним, когда подъем до необходимой отметки выполняют обоими полиспастами, 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. На рис. 7.28, *в* представлена схема монтажа теплообменников с помощью электротали.

7.5. Выверка, закрепление и испытания смонтированного оборудования

После сборки и монтажа машины и оборудование тщательно проверяют по нормам точности с помощью различных контрольно-измерительных инструментов и оптико-геодезических приборов (рис. 7.29 — 7.31).

При установке оборудования на фундамент проверяют соблюдение следующих требований: отклонения оборудования по высоте и в плане (привязка к осям здания или строительных конструкций); горизонтальность или вертикальность оборудования; соосность валов машин; прямолинейность и взаимное расположение плоскостей; параллельность и перпендикулярность осей и плоскостей.

Горизонтальное положение оборудования проверяют с привлечением уровня (рис. 7.29, *д*), гидростатического уровня (рис. 7.30) или нивелира по базовым поверхностям или по контрольным площадкам на собранном оборудовании.

Вертикальность проверяют с помощью отвеса или теодолита, используя приспособления, изображенные на рис. 7.31. Пакеты металлических подкладок (рис. 7.31, *а*) применяются в качестве постоянных (несущих) и временных (выверочных) опорных элементов. Пакеты набирают из стальных или чугунных подкладок толщиной 5 мм и более. Проектного уровня установки оборудования достигают в процессе его предварительного закрепления с помощью регулировочных подкладок толщиной 0,5—5 мм. В состав пакета могут входить плоские, клиновые и другие регулируемые

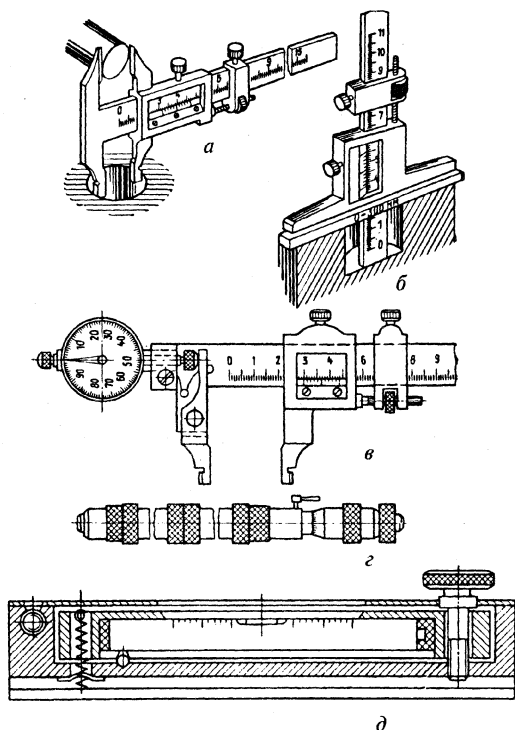


Рис. 7.29. Инструменты для контроля точности сборки и монтажа:
 а — штангенциркуль; б — штангенглубиномер; в — штангенциркуль с индикатором;
 з — микрометрический нутромер (штихмасс); д — слесарный уровень

по высоте подкладки. Число подкладок в пакете должно быть минимальным (не более 5).

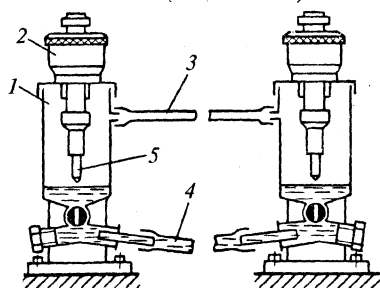


Рис. 7.30. Гидростатический уровень

Для выверки оборудования инвентарными домкратами используют винтовые (рис. 7.31, б), клиновые (рис. 7.31, в), гидравлические или реечные домкраты, обеспечивающие требуемую точность выверки, безопасность и удобство регулировки. Домкраты, размещенные на подготовленных фундаментах, предвари-

тельно регулируют по высоте с погрешностью не более ± 2 мм. Затем на домкраты опускают оборудование и выполняют окончательную выверку.

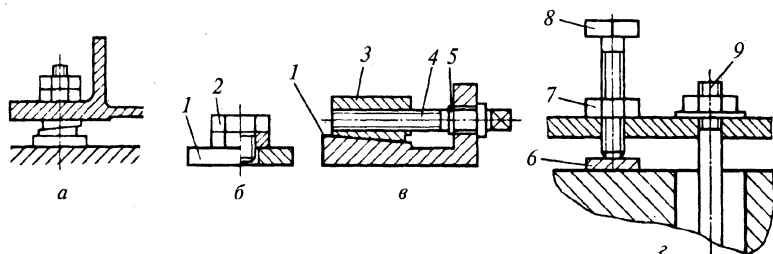


Рис. 7.31. Приспособления для выверки вертикальности аппаратов:
 а — подкладки; б — винтовой домкрат; в — клиновой домкрат; г — отжимной болт;
 1 — корпус приспособления; 2 — регулирующий винт; 3 — клин; 4 — винт; 5 — стопорная шайба; 6 — опорная пластина; 7 — контргайка; 8 — отжимной (регулируемый) болт; 9 — фундаментный болт

При выверке с помощью отжимных регулировочных болтов (рис. 7.31, г) опорные пластины 6 устанавливают на фундамент в соответствии с расположением регулировочных винтов в опорной части оборудования. Места расположения опорных пластин на фундаментах выравнивают по горизонтали с отклонением не более 10 мм на 1 м. Перед установкой оборудования на фундаменте размещают вспомогательные опоры, на которые опускают оборудование. При опускании оборудования на фундамент без вспомогательных опор регулировочные болты должны выступать ниже установочной поверхности оборудования на одинаковую величину, но не более чем на 20 мм. Положение оборудования по высоте и горизонтали следует регулировать поочередно всеми отжимными болтами, но не допускать в процессе выверки отклонения оборудования от горизонтали более чем 10 мм на 1 м. После завершения выверки оборудования положения регулировочных болтов необходимо зафиксировать стопорными гайками.

Проверку *соосности валов машин* производят по струне или по полумуфтам. В последнем случае соосность проверяют в два приема: предварительная проверка с помощью линейки и щупа; окончательная проверка — с помощью специальных скоб и индикаторов.

Прямолинейность плоскостей проверяют следующими методами:

- ♦ по краске с использованием поверочной линейки с широкой рабочей поверхностью. На рабочую поверхность линейки наносят

тонкий слой краски, затем накладывают линейку на проверяемую поверхность и перемещают по ней. О прямолинейности судят по оставшемуся количеству и расположению пятен краски на проверяемой поверхности;

- ◆ поверочной линейкой и щупом. Линейку накладывают на проверяемую поверхность в разных направлениях и щупом определяют зазоры между ними;
- ◆ лекальной линейкой по световой щели. Линейку укладывают острой кромкой на проверяемую поверхность, а сзади линейки помещают источник света. Просвечивание мест сопряжений линейки с поверхностью свидетельствует об отклонениях от прямолинейности;
- ◆ натянутой струной диаметром 0,3–0,5 мм и штихмассом (рис. 7.29, з);
- ◆ гидростатическим уровнем (рис. 7.30) с микрометрической головкой, работающим по принципу сообщающихся сосудов. Один из резервуаров 1 устанавливают на проверяемую поверхность и оставляют неподвижным, а второй, связанный с первым гибкими прозрачными шлангами 3 и 4 для воздуха и воды, переставляют на разные места поверхности. После каждой перестановки микрометрической головкой 2 с уровнем 5 измеряют уровень воды в обоих резервуарах и по разности замеров определяют отклонения по вертикали каждого места от базовой горизонтальной поверхности.

Проверку параллельности плоскостей в большинстве случаев выполняют путем непосредственного измерения расстояний между точками, расположенными на контролируемых поверхностях, различными инструментами (рис. 7.29, а – з): штангенциркулем, нутромером (штихмассом), штангенглубиномером, штангенрейсмусом и т.д.

Перпендикулярность плоскостей проверяют угольниками, размеры и тип которых выбирают в зависимости от конфигурации и размеров контролируемых деталей, узлов и расположения плоскостей; также применяют индикаторы на штативе, штангенрейсмусы, штихмассы.

В большинстве случаев оборудование крепят к фундаменту фундаментными болтами (рис. 7.32). По конструктивным признакам различают:

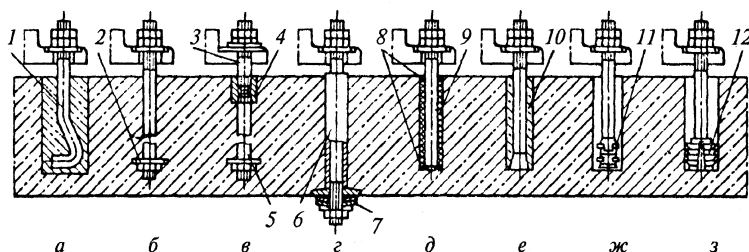


Рис. 7.32. Фундаментные болты:

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

- ♦ болты с отгибом (рис. 7.32, а), наиболее простые и устанавливающиеся либо непосредственно в массив фундамента, либо в колодец;
- ♦ болты с анкерными плитами (рис. 7.32, б), отличающиеся от болтов с отгибами меньшей длиной;
- ♦ составные болты с анкерной плитой (рис. 7.32, в) — съемные, применяемые при установке тяжеловесного оборудования методом поворота вокруг шарнира;
- ♦ болты с изолирующей металлической трубой (рис. 7.32, г), которая позволяет демонтировать болт, т.е. делать его съемным, и амортизирующими элементами в виде тарельчатой пружины; рекомендуются для установки оборудования, испытывающего при эксплуатации динамические нагрузки (вибрацию);
- ♦ прямые болты, закрепляемые эпоксидным клеем (рис. 7.32, д); устанавливаются в просверленные скважины;
- ♦ конические болты на цементном растворе (рис. 7.32, е);
- ♦ болты с распорной цангой (рис. 7.32, ж) или втулкой (рис. 7.32, з); являются самоанкерующимися, имеют глубину заложения в 3—4 раза меньше, чем обычные болты, и работают в условиях как статических нагрузок, так и динамических.

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 заво-

де-изготовителе. Повторным испытаниям на месте монтажа такие аппараты подвергают в случаях: истечения гарантийного срока хранения; повреждения оборудования при транспортировке 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 также на месте монтажа. Оборудование испытывают до наложения защитного покрытия или изоляции.

Значения пробных давлений при гидравлическом испытании аппаратов даны в табл. 7.1.

Т а б л и ц а 7.1. Значения пробного давления при гидравлическом испытании аппаратов

Сосуды	Расчетное давление p_p , МПа	Пробное давление $p_{пр}$, МПа
Все, кроме литых	Менее 0,07	0,2
	0,07—0,5	$1,5p_p [\sigma]_{20}/[\sigma]_t$ но не менее 0,2
	Более 0,5	$1,25p_p [\sigma]_{20}/[\sigma]_t$ но не менее $p_p + 0,3$
Литые	Вакуум (наружное давление)	$1,5p_p [\sigma]_{20}/[\sigma]_t$ но не менее 0,2
	Независимо от давления	$1,5p_p [\sigma]_{20}/[\sigma]_t$ но не менее 0,3

П р и м е ч а н и я: 1) $[\sigma]_{20}$ и $[\sigma]$ — допускаемые напряжения для материала сосуда при температуре 20 °С и рабочей температуре соответственно;

2) пробное давление при гидравлическом испытании сосудов и аппаратов, работающих при температуре ниже 0 °С, принимают таким же, как и при температуре 20 °С.

Гидравлические испытания сосудов, изготовленных из неметаллических материалов, должны производиться следующим пробным давлением:

- ♦ для материалов с ударной вязкостью более 20 Дж/см²

$$p_{пр} = 1,3p_p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t};$$

- ♦ для материалов с ударной вязкостью 20 Дж/см² и менее

$$p_{\text{пр}} = 1,6 p_p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t};$$

- ♦ для металлопластиковых сосудов

$$p_{\text{пр}} = [1,25 k_m + \alpha(1 - k_m)] p_p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t},$$

где k_m — отношение массы металлоконструкции к общей массе сосуда; $\alpha = 1,3$ — для металлопластиковых сосудов с ударной вязкостью более 20 Дж/см²; $\alpha = 1,6$ — для металлопластиковых сосудов с ударной вязкостью 20 Дж/см² и менее.

При испытании вертикальных аппаратов в горизонтальном положении к пробному давлению, принятому по табл. 7.1, 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.

Аппараты, работающие при атмосферном давлении, испытывают наливом воды до верхней кромки и в таком состоянии выдерживают в течение 4 ч, а затем осматривают, обстукивая сварные швы молотком. Допускается испытывать сварные швы, смачивая их поверхности изнутри аппарата керосином на протяжении всего периода испытания. Об отсутствии дефектов на наружной поверхности сварных швов, покрытых предварительно меловым раствором, свидетельствует отсутствие пятен. Продолжительность испытания сварных швов аппаратов этим способом указана в табл. 7.2.

Т а б л и ц а 7.2. Продолжительность испытания сварных швов керосином

Толщина сварных листов металла, мм	Время выдержки, мин, при положении шва	
	нижнем	верхнем
До 4	20	30
4—10	25	35
Более 10	30	40

При *пневматических испытаниях* воздухом или инертным газом (пробное давление см. в табл. 7.1), которые проводят, если невозможно выполнить гидравлические испытания, измеряют уменьшение давления в течение 24 ч и затем ведут расчет по формуле

$$\Delta p = \frac{100}{\tau} \left(1 - \frac{p_k t_k}{p_n t_n} \right),$$

где Δp — отношение снижения давления за 1 ч к давлению при испытаниях, %; τ — время испытаний, ч; p_n и p_k — суммы манометрического и барометрического давлений соответственно в начале и в конце испытаний, МПа; t_n , t_k — температура в начале и в 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. 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. Снаружи маты укрепляют крупной ячейистой проволоочной 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 и оцинкованное железо.

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.

Машины, механизмы и аппараты с приводами испытывают вхолостую и под нагрузкой. Испытания *вхолостую* включают: проб-

ные пуски с остановками для проверки работы всех узлов оборудования и устранения неполадок; непрерывные испытания вхолостую.

Испытания *под нагрузкой* включают следующие операции: 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 под нагрузкой составляют акт о готовности оборудования к комплексному опробованию.

7.6. Ремонт технологического оборудования

Система технического обслуживания и ремонта оборудования. *Техническое обслуживание (ТО) — это комплекс операций (или операция) по поддержанию работоспособности или исправности оборудования при использовании в технологическом процессе, при хранении и транспортировании.* Применительно к химическому оборудованию ТО — это комплекс работ по поддержанию работоспособности оборудования в периоды между ремонтами. Целями ТО являются: своевременное обнаружение и устранение неисправностей (дефектов) оборудования; предупреждение преждевременного износа узлов и деталей; накопление данных, необходимых для правильного определения объемов ремонтных работ, их периодичности и продолжительности.

В зависимости от характера и объема проводимых работ ГОСТ 18322 предусматривает ежесменное и периодическое ТО. *Ежесменное* ТО проводится силами технологического и дежурного персонала данной смены без остановки технологического процесса. В объем ежесменного ТО входят следующие основные работы: обтирка, чистка, наружный осмотр, выявление всех неисправностей, смазка, подтяжка сальников, проверка состояния масляных и охлаждающих систем подшипников, наблюдение за состоянием крепежных деталей и их подтяжка, проверка исправности ограждающих устройств и заземления и др. Все обнаруженные в работе

оборудования неисправности необходимо устранять в возможно короткие сроки и фиксировать в сменном журнале. Сменный журнал по учету выявленных дефектов и работ ежесменного ТО является первичным документом, отражающим техническое состояние и работоспособность действующего оборудования, и служит для контроля работы дежурного ремонтного персонала.

Периодическое ТО выполняется через установленные в эксплуатационной документации значения наработки или интервалы времени. Оно проводится либо во время планово-периодической остановки оборудования (для производств с непрерывным технологическим процессом), либо в период нахождения оборудования в резерве, либо 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. Для выполнения периодического ТО привлекается ремонтный персонал технологического цеха или централизованного ремонтного подразделения. Основное назначение периодического ТО — устранение 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.

Ремонт (Р) — это комплекс операций по восстановлению исправности или работоспособности оборудования и восстановлению ресурсов оборудования или его составных частей.

Ресурс — это время работы оборудования до предельного состояния (оговоренного в технической документации), обусловленного либо снижением эффективности его дальнейшей эксплуатации, либо требованиями безопасности.

Содержание некоторых операций ремонта и технического обслуживания могут совпадать, однако при выполнении ремонтов обязательным условием является восстановление первоначальных характеристик оборудования, указанных в нормативно-технической документации.

Система ТОиР — это совокупность взаимосвязанных средств, документации и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления качества оборудования. Система ТОиР предусматривает комплекс профилактических мероприятий, которые исключают возможность работы оборудования в условиях прогрессирующего износа, а именно: предварительное изготовление деталей и узлов; планирование ремонтных работ и потребности в трудовых и материальных ресурсах; установление нормативов трудовых затрат на все виды плановых ремонтов, структуры ремонтного цикла и перечня типовых работ, выполняемых при плановых ремонтах. Эта система предусматривает принудительную остановку оборудования на профилактические осмотры и ремонты через заранее запланированные промежутки времени (межремонтные периоды) с возможными пределами их изменения.

Система планово-предупредительного ремонта. Принятая в химических отраслях промышленности система технического обслуживания и ремонта базируется на сочетании ТО и планово-предупредительных ремонтов (ППР), которые проводят по методу *планово-периодических ремонтов* для основного оборудования, когда ремонты всех видов планируют и выполняют в строго установленные ремонтными нормативами сроки, и методу *послеосмотровых ремонтов (по техническому состоянию)* для вспомогательного оборудования, когда виды и сроки ремонта планируют на основе сведений о техническом состоянии оборудования, полученных при проведении периодического технического обслуживания.

Заметим, что деление на основное и вспомогательное оборудование условно и зависит от конкретных условий эксплуатации данного оборудования и степени его влияния на получение конечного 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.

Система ППР оборудования химической промышленности предусматривает текущий и капитальный ремонты.

Текущий ремонт выполняется для обеспечения или восстановления работоспособности оборудования и состоит в замене или восстановлении отдельных сборочных единиц и деталей оборудо-

вания. При этом осуществляются: операции периодического ТО; 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 сальников и прокладок; ревизию арматуры; смену масла в смазочных системах и т.д.

Капитальный ремонт выполняют для восстановления исправности оборудования и полного или близкого к полному восстановления ресурса оборудования с заменой или восстановлением любых его элементов, включая базовые. При этом выполняют, как правило, работы по модернизации оборудования и внедрению новой техники. 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 или восстановление всех изношенных деталей и узлов, включая базовые; полная или частичная замена изоляции, футеровки; сборка, выверка, регулирование оборудования; окраска и послеремонтные испытания. При капитальном ремонте устраняют дефекты оборудования, выявленные как в процессе эксплуатации, так и при проведении ремонта.

Планово-предупредительный ремонт оборудования проводят на основе ремонтных нормативов, разработанных для машин и оборудования различных типов и определяющих: межремонтный период (ресурс); продолжительность простоя с разбивкой на подготовительный, ремонтный и заключительный периоды (в часах); трудоемкость ремонта (в человеко-часах).

Межремонтный период — время работы оборудования между двумя последовательно проведенными ремонтами — является основой для разработки такого показателя системы ППР, как структура ремонтного цикла. Общее число рабочих часов оборудования принято равным 720 ч в месяц, 8640 ч в год. В зависимости от условий работы производства и с учетом технического состояния оборудования допускаются следующие отклонения межремонтного периода от норматива: $\pm 15\%$ между текущими ремонтами; $\pm 10\%$ между капитальными ремонтами. На основе межремонтного периода разрабатывается *ремонтный цикл* — наименьшие повторяющиеся интервалы времени, или наработка обо-

рудования, в течение которых выполняются в определенной последовательности и в соответствии с требованиями нормативно-технической документации все установленные виды ремонта. Для химического оборудования в качестве ремонтного цикла принимают период между двумя капитальными ремонтами.

Чередование ремонтов в определенной последовательности и через определенные промежутки времени называется *структурой ремонтного цикла*. Она основана на объединении деталей и узлов по группам, внутри которых наработки до первого отказа практически одинаковы. При этом выявляют группы быстроизнашивающихся деталей, восстановление которых при ремонте производится путем замены или незначительного по объему ремонта, и группы деталей с большим сроком наработки, требующих при ремонте больших трудозатрат по восстановлению. Соотношением таких групп деталей и определяется структура ремонтного цикла.

Продолжительность простоя в ремонте исчисляется 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 т.д. 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 для сосудов и аппаратов (или обкатки вхолостую для машин и механизмов). К *заключительным работам* относятся подготовка, пуск оборудования в эксплуатацию и вывод его на рабочий режим.

Трудоемкость ремонта — это трудозатраты на проведение одного ремонта оборудования данного вида. Ее 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 шестиразрядной сетке.

При планировании ремонтов *основными документами* являются: годовой (перспективный) график планово-периодических ре-

монтов 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 по изготовлению запасных частей и нестандартного оборудования; расчет объема ремонтных работ на плановый год; расчет трудоемкости ремонтных работ; расчет численности ремонтного персонала.

Виды дефектов в оборудовании. *Дефектом называют каждое несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией.* Они бывают как явные — видимые глазом, так и скрытые — определяемые с помощью специальных методов и средств.

В зависимости от возможного влияния на работу оборудования выявленные дефекты могут быть *критическими*, когда использование продукции по назначению невозможно ввиду несоответствия требованиям безопасности или надежности; *значительными*, которые существенно влияют на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность, но не являются критическими; *малозначительными*, которые не оказывают влияния на использование продукции по назначению или на ее долговечность.

По происхождению различают производственные и эксплуатационные дефекты.

Производственные дефекты в свою очередь подразделяются на: *металлургические*, возникающие при отливке и прокатке (усадочные раковины, пористость, неметаллические включения, мелкие трещины и т.д.); *технологические*, возникающие при изготовлении деталей (сварке, пайке, клепке, механической, термической и других видах обработки); к ним относятся трещины в зоне сварного шва, непровар (отсутствие сплавления между основным и наплавленным металлом при сварке), поры и раковины в металле сварного шва, шлаковые включения в металле сварного шва, тре-

щины в процессе закалки, надрывы (трещины, возникающие при механической обработке тупым инструментом) и т.д.

Эксплуатационные дефекты возникают после некоторой наработки изделия в результате усталости материала деталей, коррозии, износа, а также вследствие неправильного технического обслуживания и ремонта. К ним относятся:

- ♦ трещины усталости — наиболее распространенный эксплуатационный дефект, появляющийся в результате действия высоких переменных напряжений. Они возникают в местах концентрации напряжений (галтели, резкие переходы сечений, основание резьбы и зубьев шестерен, углы шпоночных канавок и т.д.), а также в местах дефектов металлургического и технологического происхождения;
- ♦ коррозионные поражения, степень которых зависит от агрессивности среды, качества защитных покрытий и других факторов;
- ♦ трещины ползучести встречаются на деталях из жаропрочных металлов и сплавов. Причины их образования: высокие статические напряжения при кратковременном действии нагрузки, перегрев материала, длительное действие статической нагрузки;
- ♦ термические трещины возникают при резких сменах температур, при недостаточной смазке или при заедании поверхностей трущихся деталей;
- ♦ трещины термической усталости похожи на термические. Они характерны для деталей из жаропрочных сплавов и возникают в результате циклического изменения температур (нагрева и охлаждения);
- ♦ трещины-надрывы образуются под действием высоких напряжений, приложенных один раз (растяжение, изгиб, кручение), когда нагрузки превышают прочность детали;
- ♦ механические повреждения (забоины, вмятины, риски, местный наклеп, гофры) могут быть вызваны различными причинами.

В задачу ремонтной службы входят обнаружение дефектов любого вида; определение их допустимости в соответствии с существующими нормами; замена деталей с недопустимыми дефектами.

Методы неразрушающего контроля позволяют проверить качество деталей, не нарушая пригодности их к использованию по назначению.

Данные методы подразделяют на визуально-оптические; капиллярные; ультразвуковые; магнитные; радиационные, или методы просвечивания.

Визуально-оптические методы позволяют обнаружить относительно крупные трещины, механические повреждения, нарушение сплошности защитных покрытий и др. Эффективность метода зависит от субъективных факторов (остроты зрения и опыта работы оператора) и условий контроля (освещенности, оптического контраста).

Капиллярные методы основаны на увеличении контраста между дефектами и бездефектными участками при обработке всего изделия индикаторной жидкостью. С их помощью выявляют поверхностные трещины, поры и коррозионные поражения деталей, в том числе из немагнитных материалов. По типу применяемой жидкости капиллярные методы делятся на люминесцентный и цветной. При люминесцентном методе в жидкость вводят люминофоры и под действием ультрафиолетового света дефектные места светятся в темном помещении. Суть цветного метода заключается в следующем. В индикаторной жидкости растворяют красители. Краситель — красного цвета, так как любой предмет красного цвета глаз видит красным (другие цвета при малой освещенности могут казаться серыми). После пропитки детали избыток жидкости удаляют с поверхности, а часть жидкости, проникшая в дефект, остается в нем, т.е. дефекты выявляются в виде цветных пятен. Для извлечения красителя контролируемую поверхность покрывают слоем проявителя, который адсорбирует жидкость, просочившуюся в несплошность. Чтобы усилить контраст между красными следами индикатора и фоном проявителя, применяют адсорбент белого цвета (раствор каолина в этиловом спирте).

Ультразвуковой метод позволяет выявлять внутренние скрытые дефекты и трещины в труднодоступных местах деталей из магнитных и немагнитных материалов. Но он не дает возможности с полным основанием судить о характере дефекта. С помощью ультразвуковых дефектоскопов можно лишь определить координаты и условную площадь дефекта; чтобы выяснить характер дефекта, необходимо провести дополнительные исследования.

Магнитопорошковый метод используется для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов. Он применим для

контроля деталей из ферромагнитных материалов и отличается высокой чувствительностью. Сущность метода заключается в том, что дефекты вызывают искажение магнитных силовых линий, так как несплошности обладают иными магнитными свойствами. Это искажение, называемое полем рассеяния, можно обнаружить с помощью тонкоизмельченного магнитного порошка. Магнитное поле может быть создано пропусканием электрического тока по детали либо с помощью соленоида или электромагнита. Метод относительно прост и не имеет ограничений в отношении размеров, формы, состава и термообработки ферромагнитных деталей.

Методы просвечивания (рентгенографический и гаммаграфический) относятся к точным методам и позволяют выявить внутренние скрытые дефекты. Однако они характеризуются существенными недостатками, такими, как громоздкость и сложность аппаратуры, необходимость защиты от облучения.

Ремонт колонных аппаратов. Основные виды износа колонной массообменной аппаратуры — забивка колонны отложениями и коррозия ее элементов. Содержание операций и их число при разборке колонны зависят от ее диаметра. Так, царговые колонны разбирают полностью, а 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 оборудование, находящееся внутри колонны. Далее необходимо выполнить тщательный наружный и внутренний осмотр корпуса колонны для выявления возможных дефектов, образовавшихся в процессе эксплуатации (механических повреждений, трещин, коррозии и др.), обращая особое внимание на состояние сварных швов и уплотнительных поверхностей корпуса и крышки.

Если выявлены повреждения наружной поверхности (вмятины, коррозионные разрушения и др.), нужно удалить дефектный металл путем шлифования. Надежность ликвидации поверхностных дефектов контролируют магнитной или ультразвуковой де-

фектоскопией. Глубина повреждения допускается в пределах 20% толщины стенки в зависимости от размеров повреждения.

При осмотре уплотнительных поверхностей корпусов, крышек и обтюраторов требуется прежде всего контролировать качество поверхности (на отсутствие забоин, рисок, следов коррозии) и точность геометрической формы; при необходимости следует использовать методы механической обработки. Запрещается устранять дефекты на уплотнительных поверхностях установкой ввертышей. Все уплотнительные поверхности следует проверять на отсутствие трещин с помощью магнитной или ультразвуковой дефектоскопии.

Тарелки разбирают внутри колонны, выносят через люки на обслуживающие площадки и транспортируют для чистки и ремонта. Иногда чистку тарелок производят 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. Наиболее трудоемкие операции, связанные с разборкой закоксованных тарелок и отбойников, 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. Новую насадку подают на верх колонны (или к любому люку) при помощи лебедки, бабьи и крана-укосины, предварительно удалив старую. Для загрузки и выгрузки насадки обычно используют бабьи с открывающимся днищем и сменные переносные лотки.

Изношенные штуцеры и люки вырезают и заменяют новыми, обязательно устанавливая укрепляющие кольца. 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, а нижнюю часть колонны отрезают и удаляют, когда верхняя часть будет поднята 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 соединений; ремонт футеровки и защитных покрытий деталей с частичной заменой; сборку и испытания аппарата на прочность и плотность.

При подготовке теплообменника к ремонту следует произвести следующие операции: снизить избыточное давление 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.

Снизить трудоемкость работ по монтажу и демонтажу резьбовых соединений помогают гайковерты с пневматическим или 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 полиспаг) 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 вы-

полняют без разборки теплообменника 5–15%-ным раствором соляной кислоты или углеводородных 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 шомпола (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. При гидромеханической очистке используют сопла, установленные 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. Сущность дробеструйной очистки заключается в обработке очищаемой поверхности смесью стальной дроби, вводимой в смесь эжекционными насосами, с воздухом или водой, подаваемой с большой скоростью.

К специальным методам очистки относится 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 вследствие несовершенства конструкций трубчатых печей и тяжелых условий их работы (вы-

сокая 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 и одновременно зажигают несколько форсунок, доводя 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 по данным анализа 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 защищены от ржавчины и отложений до металлического блеска. Трубы крепят развальцовкой или сваркой.

После ремонта, связанного с заменой труб, двойников и других элементов, змеевик печи должен быть подвергнут гидравлическим испытаниям.

При ремонте барабанных печей и сушильных аппаратов необходимо контролировать состояние внутренних устройств барабана. Об их износе свидетельствуют нарушение температурного режима

процесса сушки, а также истончение стенок корпуса от трения проходящего материала. Нормальная работа барабанной сушилки достигается при хорошем состоянии уплотнений горячего и холодного концов и отсутствии 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 17280 ч). Ремонтный цикл включает три текущих и один капитальный ремонты.

Основные демонтируемые или сменные детали — обечайки, опорные ролики, бандаж, 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 износа; оголение металла обечаек в результате 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 несколько меньшей твердости, чем сталь, из которой выполнены бандаж, поскольку сменить или восстановить ролик легче, чем бандаж. Поверхности роликов должны быть хорошо обработаны.

В процессе работы бандаж изнашивается и форма их искажается. Поверхности бандажей обтачивают на месте. Если степень износа бандаж так велика, что обтачивать его невозможно, 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, фильгров. При ремонте *центробежных насосов* выполняются следующие мероприятия:

- ♦ проверка осевого разбега ротора; очистка и промывка картеров подшипников, смена масла, промывка масляных трубопроводов; ревизия сальниковой набивки, промывка систем охлаждения и смазки, 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 биений ротора и его статическая балансировка; ревизия и замена деталей торцовых уплотнений; осмотр и восстановление резьбовых соединений насоса, шпоночных канавок и резьбы 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, цапапины и риски — зачисткой шабером или завариванием. Значительно изношенные уплотнительные поверхности протачивают или фрезеруют. Допускаются расточка изношенных мест и запрессовка втулок с последующей расточкой до номинальных размеров.

Рабочие колеса наиболее интенсивно изнашиваются в результате действия механического трения, эрозионного и коррозионного действия перекачиваемой среды, кавитационного разрушения и ряда других факторов. Визуально выявляются задиры и забоины, которые необходимо зачистить. Поврежденные места восстанавливают наплавкой с последующей проточкой. Рабочие колеса заменяют (допуск $\pm 0,01$ мм) и при ослаблении посадки при сильном кавитационном разрушении (сквозные отверстия, полное или частичное разрушение лопастей).

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 должна 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.

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 (помимо указанных работ) заменяют сопла, ножи, манжеты гидросистемы, пальцы и втулки муфты привода, подшипники 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 устранения причины вибрации.

Особенно подвергаются износу тормозной обод на барабане и тормозная лента. Тормозной обод обтачивают на станке, причем после каждого ремонта проводят статическую и динамическую балансировку ротора. 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 си-

стемы блокировки электродвигателя, тормоза и механизма запи- рания крышки.

При текущем ремонте *вакуум-фильтров* промывают масленки и маслопроводы, заменяют масло в редукторе, проверяют состоя- ние полумуфт. При капитальном ремонте (кроме работ текущего ремонта) снимают крышки фильтра, заменяют фильтровальную ткань, проволоку и сетки, ремонтируют шнек или нож, выполня- ют проточку и шабрение шайб распределительной головки, про- водят ремонт подшипников барабана, ревизию и (при необходи- мости) замену зубчатых колес и червяков редуктора и подшипни- ков 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 клапаны, штуцеры, кронштей- ны, корыто, изношенные зубчатые колеса. Проверяют отклоне- ние от горизонтальности корпуса фильтра.

При текущем ремонте *рамных фильтр-прессов* заменяют филь- тровальную ткань, сальники, кожаные манжеты, поршни гидрав- лического зажима, масло в редукторе привода, проверяют цент- ровку электродвигателя с редуктором. При капитальном ремонте (кроме работ текущего ремонта) выполняют ревизию и замену плит, рам, плунжеров, ремонт или замену гидравлического зажи- ма, ревизию гидронасоса с заменой изношенных деталей.

При текущем ремонте *электрофильтров* проверяют состояние изоляторной коробки, изоляторов и шин, осматривают механизм встряхивания осадительных электродов. При капитальном ремон- те, кроме того, заменяют газораспределительную решетку и меха- низм встряхивания, коронирующие электроды и термоизоляцию.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Кем и на основе каких документов разрабатываются проект орга- низации строительства и проект производства работ? В каких случаях монтаж осуществляется по технологическим картам, а в каких — по тех- нологическим схемам?

2. Как осуществляется транспортирование крупногабаритного, тяжеловесного оборудования?
3. Какие способы используются для временного увеличения грузовысотных характеристик стреловых самоходных кранов?
4. Какое влияние на устойчивость лебедки оказывает положение сбегającego конца троса?
5. Какие типы стропов определены ГОСТом?
6. Что такое полиспаст и как определяется его кратность?
7. Какие устройства служат для строповки сосудов и аппаратов?
8. По каким признакам выполняется классификация методов монтажа технологического оборудования?
9. Какими методами можно монтировать оборудование самоходными стреловыми кранами? Сравните эти методы между собой. Какие краны могут перемещаться с грузом на крюке?
10. Какие методы используются для монтажа специальными монтажными средствами (мачтами, порталами, шеврами, гидравлическими подъемниками)?
11. В чем сущность безъякорных методов монтажа?
12. Соблюдение каких требований проверяется при установке оборудования на фундамент? Какие при этом используются инструменты и приспособления?
13. В каких случаях оборудование подвергается повторным испытаниям на месте монтажа?
14. Чем отличается планово-периодический ремонт от ремонта по техническому состоянию?
15. Какие методы неразрушающего контроля используют для обнаружения дефектов в металле?

8 **ОСНОВЫ БЕЗОПАСНОЙ** **ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН** **И АППАРАТОВ ХИМИЧЕСКИХ** **ПРОИЗВОДСТВ** **И НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКИ**

8.1. Общие положения

Проблема промышленной безопасности уходит корнями в то время, когда начали производить взрывчатые вещества, но она значительно обострилась во второй половине XX в., когда в химической промышленности стали создавать крупные установки с целью повышения производительности и экономической целесообразности. Вследствие этого возрастает содержание опасных веществ в технологическом процессе, что сопровождается угрозой катастрофических пожаров, взрывов, токсичных выбросов и других разрушительных явлений, способных поражать население и окружающую среду.

Количество таких потенциально опасных производств увеличилось после Второй мировой войны, когда технология дешевых нефти и газа сменила технологию угля. В промышленность широко вошла и технология сжиженных углеводородных газов, а также криогенных жидкостей — кислорода, азота и этилена.

Еще одной характерной особенностью современного производства является применение на одном предприятии, в одном цехе самых разнообразных технологических процессов, сложных по своей физико-химической основе. Для реализации технологических процессов используются разные виды машин, аппаратов, вспомогательного и другого оборудования. В технологических системах могут обращаться значительные количества высокотоксичных, легковоспламеняющихся, коррозионно-активных и других потенциально опасных веществ, находящихся при повышенном давлении и высокой температуре.

В период реформирования экономики Российской Федерации и в связи с ее переходом на рыночные отношения надзор за безопасностью труда в промышленности и горный надзор возложены на Федеральный горный и промышленный надзор России (Госгортехнадзор России). Его функции определены положениями Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», принятого в 1997 г., постановлениями Правительства Российской Федерации и Положением о Госгортехнадзоре России.

Госгортехнадзор России в соответствии с возложенными на него функциями осуществляет государственный надзор за соблюдением требований нормативных правовых и нормативно-технических документов по промышленной безопасности во всех отраслях промышленности, в геологоразведочных экспедициях и партиях, при устройстве и эксплуатации подъемных сооружений, котельных установок и сосудов, работающих под давлением, трубопроводов пара и горячей воды, объектов, связанных с добычей, транспортировкой, хранением и использованием газа, при ведении взрывных работ в промышленности, а также за правильностью эксплуатации месторождений полезных ископаемых и за охраной недр.

Госгортехнадзор России реализует возложенные на него функции через территориальные органы – управления и инспекции. Должностным лицом, непосредственно осуществляющим надзорные, контрольные, профилактические и другие функции, предусмотренные положениями о Госгортехнадзоре России в территориальном органе, является государственный инспектор (главный государственный инспектор).

В области государственного надзора за безопасным ведением работ в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности Госгортехнадзор России обеспечивает:

- ♦ контроль за безопасной эксплуатацией технологического оборудования, контрольно-измерительных приборов и автоматики, систем противоаварийной защиты и сигнализации, электротехнических устройств, систем связи и оповещения;
- ♦ соблюдение установленного порядка при проектировании, монтаже и проведении пусконаладочных работ на оборудовании и объектах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности;

- ♦ организацию обучения и аттестацию производственного персонала, руководителей и специалистов подконтрольных организаций и предприятий;
- ♦ боеготовность профессиональных и нештатных аварийно-спасательных формирований к локализации и ликвидации аварий и инцидентов;
- ♦ ведение государственного реестра опасных производственных объектов, их правильную идентификацию и страхование;
- ♦ надзор за безопасной эксплуатацией гидротехнических сооружений на подконтрольных предприятиях;
- ♦ регистрацию технических устройств и установленный порядок продления срока службы их безопасной эксплуатации;
- ♦ установленный порядок ввода в эксплуатацию законченных строительством объектов;
- ♦ участие своих представителей в приемке в эксплуатацию технических устройств, применяемых на подконтрольных предприятиях;
- ♦ разработку и соблюдение требований планов локализации аварийных ситуаций на химико-технологических объектах;
- ♦ контроль за соблюдением установленного порядка осуществления экспертизы промышленной безопасности и др.

В 2004 г. указом Президента Российской Федерации Госгортехнадзор России преобразован в Федеральную службу по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ (Ростехнадзор РФ) с передачей ей дополнительно к прежней сфере деятельности надзорных и контрольных функций упраздненного Министерства энергетики Российской Федерации и преобразованного Государственного комитета Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу.

Недооценка опасностей, которые могут возникнуть во время проведения технологического процесса или ремонтных работ, незнание или малейшие отклонения от требований правил, норм и инструкций по технике безопасности могут привести к авариям и пожарам. Надо уметь предупреждать и устранять их.

Выполнение работниками предприятий достаточно большого числа правил, норм и инструкций по промышленной безопасности строго обязательно. Это обусловлено тем, что одному человеку невозможно предвидеть все возможные обстоятельства, случаи отклонения от технологического регламента и выхода из строя ма-

шин и аппаратов. Это в большей степени реально на базе мирового опыта, а техническая документация (правила, нормы, инструкции) базируется именно на долголетнем мировом опыте. Об этом нужно помнить всем, кто связан с химическим производством.

Для инженеров-механиков химических производств наиболее важный технический документ — «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», где изложены основные требования к сосудам, выполнение которых обеспечивает их безопасную эксплуатацию. Эти правила (брошюра) можно считать настольным документом для инженерно-технических работников химических предприятий.

Решающее направление улучшения условий труда, превращения всех производств в безопасные связано с техническим перевооружением промышленности на основе безопасной техники.

8.2. Безопасная эксплуатация машин химических производств и нефтегазопереработки

Эксплуатация машин (измельчители, смесители, центрифуги, центробежные сепараторы, фильтры и др.) должна отвечать ряду общих требований, выполнение которых обеспечивает их безопасную работу:

- ♦ все движущиеся и передаточные механизмы (клиноременные передачи, муфты и т.д.) должны иметь ограждения, предохраняющие доступ к ним во время работы;
- ♦ при обработке вредных продуктов повышаются требования к уплотнениям валов, разъемных соединений (крышки, штуцеры, клапаны) и других элементов конструкций, где возможно просачивание продуктов в окружающую среду;
- ♦ пусковые устройства располагают таким образом, чтобы оператор имел возможность просматривать все рабочие места и проходы около пушенной в ход машины;
- ♦ машина должна быть немедленно остановлена при возникновении недопустимо большой вибрации, изменения характера шума во время работы (резкие звуки, стуки), нагреве подшипников выше нормы;

- ♦ машина должна быть обязательно заземлена, чтобы обеспечить безопасность обслуживающего персонала от статического электричества и предотвратить возможное возгорание пыли в некоторых машинах.

Общими условиями безопасной работы для *измельчающих машин* являются:

- ♦ механизированная равномерная загрузка и выгрузка материалов;
- ♦ предотвращение выброса материала из машины;
- ♦ установка устройств, предупреждающих поломку деталей и обеспечивающих быстрый останов машины в случае поломки;
- ♦ меры по предотвращению или уменьшению пыления.

Для предотвращения пылевыведения измельчающие машины должны быть закрыты, обеспечены аспирационными отсосами, блокируемыми с пусковыми устройствами и поддерживающими внутри машины небольшое разрежение.

Чтобы исключить загорание и взрыв пыли при измельчении угля, серы и других горючих материалов, а также многих органических веществ, необходимо устранить возможность воспламенения прежде всего от статического электричества (например, заземлением), поддерживать высокую концентрацию пыли, при которой она не способна воспламеняться, в отдельных случаях вести процесс в токе инертного газа.

В *шнековых и конусных дробилках* для удаления металлических предметов в местах загрузки на пути транспортирования должны быть установлены магнитные ловушки.

В *дезинтеграторах, молотковых дробилках и мельницах* имеется опасность выброса центробежной силой износившихся частей пальцев или бил, поэтому корпус этих машин должен быть достаточно прочным.

При эксплуатации *вибрационных мельниц* особую опасность представляют вибрация и шум. Чтобы их уменьшить, следует применять относительно «мягкие» опорные элементы, гасящие вибрацию, передаваемую на опорные конструкции. Обычно мельницы работают в резонансном режиме с соотношением частот вынужденных и собственных колебаний более 4:1. Тем не менее посты, где находится обслуживающий персонал, должны быть установлены на вибрационных прокладках из пористой резины, или рабочих следует снабдить специальной противовибрацион-

ной одеждой — ботинками и перчатками, в которых изолирующим материалом служит мягкая крупнопористая резина.

Уровень шума существенно увеличивается при ослаблении креплений пружин-амортизаторов, поэтому при профилактических осмотрах помимо ревизии технического состояния узлов и деталей мельниц особое внимание следует обращать на состояние узлов крепления пружин, футеровки, люков и т.п.

Корпус мельницы сильно нагревается, поэтому он должен быть защищен ограждениями, исключающими возможность контакта обслуживающего персонала с нагретыми частями мельниц.

Центрифуги представляют собой быстроходные машины, поэтому особенно внимательно нужно следить за вращением барабана. При нарушении балансировки ротора, когда появляется заметная визуальная вибрация, центрифугу необходимо немедленно остановить.

При работе центрифуг важными факторами безопасности являются соответствие обрабатываемого продукта условиям эксплуатации, непрерывная и равномерная загрузка ротора. Перед пуском центрифуги следует убедиться в отсутствии посторонних предметов внутри барабана. В процессе работы нужно систематически контролировать количество масла в подшипниках привода (его должно быть достаточно); состояние шаровых опор в подвесках колонок и станины; надежность крепления всех узлов; состояние ограждения гидромукты, шкива и ремней.

После каждого ремонта ротора необходимо произвести его статическую и динамическую балансировку.

Большинство *смесителей* имеют движущие части, поэтому к ним предъявляются требования, как и к другим машинам химических производств.

Смесители периодического действия для сыпучих материалов должны иметь аспирационные системы, осуществляющие отсасывание пылевоздушной массы от разгрузочных и загрузочных штуцеров и последующее отделение пыли от воздуха.

При эксплуатации пластосмесителей и мешателей следует контролировать исправность системы охлаждения корпуса и ротора смесителя, так как в случае превышения температуры более установленного предела может нарушиться технологический процесс, возникнуть дополнительные напряжения в элементах машины, что приведет к нарушению герметичности машины,

уменьшению зазоров в подшипниках, заклиниванию роторов и в итоге к поломке. В смесителях для высоковязких материалов предъявляются повышенные требования к защите двигателей от перегрузки.

Как внутри смесителя, так и во время его открытия возможно образование взрывоопасной смеси, поэтому необходимо строго соблюдать установленные режимы вентиляции, использовать инертные газы, особенно в тех случаях, когда горючие газы выделяются в самом процессе смешения.

8.3. Безопасная эксплуатация теплообменных аппаратов

Безопасная работа теплообменников предполагает:

- ♦ строгий контроль давления и температуры в теплообменниках, исключающий повышение их более допустимых пределов;
- ♦ систематическое наблюдение за состоянием конденсатоотводчиков, предохранительных клапанов и воздушных кранов, которые для отвода из парового пространства аппарата воздуха или других неконденсирующихся газов следует держать приоткрытым так, чтобы температура отводящей трубы составляла примерно 50 °С;
- ♦ контроль качества тепловой изоляции теплообменников, так как обнаженные поверхности аппарата могут стать причиной ожога при случайном соприкосновении.

В вакуумных аппаратах необходимо наблюдать за разрежением, а в кожухотрубных — за компенсацией температурных напряжений.

Правильная эксплуатация теплообменника требует систематической очистки поверхности его элементов от загрязнений. Для этого используются механический, химический, гидравлический, термический способы очистки (см. § 7.6).

Осмотр и ремонт внутренних частей аппарата допускаются только после его остывания до температуры 30 °С. При этом работу должны вести не менее двух человек: один — внутри аппарата, другой — снаружи.

В теплообменниках-испарителях, обогреваемых топочными газами, уровень жидкости в испарителе не должен быть ниже «ог-

невого» уровня, поскольку корпус аппарата может чрезмерно нагреваться с появлением в нем температурных напряжений. Недопустимо переполнение закрытого сосуда жидкостью.

8.4. Безопасная эксплуатация массообменных колонных аппаратов

В процессе эксплуатации корпуса аппаратов подвергаются механическому и коррозионному износу и постепенно теряют надежность. Чтобы предотвратить выход аппарата из строя, необходим систематический надзор и уход за ним как в процессе эксплуатации, так и при ремонтах. Лишь при строгом соблюдении правил эксплуатации можно обеспечить длительную работоспособность аппарата и предупредить аварии. Каждый аппарат должен использоваться только в соответствии с его конструктивным назначением и для тех сред и параметров, на которые рассчитан металл аппарата. Аппараты должны быть снабжены предусмотренными проектами предохранительными и защитными устройствами.

Особая ответственность требуется при эксплуатации аппаратов, работающих под давлением. Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, утвержденными Госгортехнадзором РФ, предусматривается, в частности, снабжение аппарата приборами для измерения давления и температуры среды, предохранительными устройствами и запорной арматурой. Аппарат, работающий при изменяющейся температуре стенок, должен быть снабжен приборами по длине сосуда и реперами для контроля тепловых перемещений.

Дополнительные меры безопасности предусматриваются для массообменных аппаратов, где обрабатываются вещества, склонные к окислению с образованием полимерных и других высоковязких, губчатых материалов, способных закупорить трубопроводы, в результате чего давление может превысить заданное (например, при обработке диеновых и ацетиленовых углеводородов). В таких случаях общими мерами безопасности являются применение эффективных ингибиторов процессов полимеризации и поликонденсации и ведение процессов в «мягких» режимах (при

низких оптимальных температурах и давлениях, под вакуумом и т.д.).

Условия безопасной эксплуатации исключают: ремонт аппаратов во время их работы; неисправность арматуры, контрольно-измерительных приборов и предохранительных устройств; невыполнение инструкций по режиму работы и обслуживания. При аварийных ситуациях аппарат должен быть остановлен согласно действующей инструкции.

Особенно тщательно контролируют корпуса аппаратов, коррозия которых не просто приводит к нарушению их прочности, но опасна еще и тем, что продукты коррозии могут загрязнить содержащийся в аппарате продукт, закупорить трубопроводы малого сечения, теплообменники и другие аппараты, связанные единой технологической схемой. Поэтому необходимо стремиться к предотвращению коррозии аппаратов любой интенсивности и характера.

Чтобы снизить опасность образования взрывных смесей, массообменные аппараты размещают на открытых площадках и продуваемых этажерках. Вынос оборудования на открытые площадки позволяет уменьшить воздействие тепловыделений на обслуживающий персонал, снизить опасность отравлений токсичными газо-выделениями, исключить необходимость устройства дорогостоящей вентиляции.

8.5. Безопасная эксплуатация реакторов

Бесперебойная и безопасная работа контактных аппаратов с *неподвижным слоем катализатора* достигается при строгом обеспечении устойчивости как экзотермических, так и эндотермических процессов при любых гидродинамических условиях. Во избежание нарушения режима фильтрования газа через слой катализатора необходим определенный гранулометрический состав катализатора. При регенерации и замене катализатора возникает опасность загорания, отравлений и термических ожогов. Поэтому перед регенерацией контактный газ, а после регенерации воздух вытесняют из реакторов водяным паром или инертным газом. Загрузка и выгрузка катализатора должны проводиться пнев-

матически через бункер и циклон или с помощью подъемных механизмов.

В реакторах с гранулированным движущимся слоем катализатора главной опасностью является прорыв контактного газа из реактора в регенератор через транспортную систему. Эта опасность предотвращается путем подачи инертного газа в участки, через которые контактный газ может проникнуть в регенератор, а также при установке специальных затворов. Опасно также образование пыли от истирания катализатора, что приводит к нарушению гранулометрического состава зерен и неравномерной фильтрации газа через поток катализатора. От пыли избавляются при смене катализатора в системе.

Нарушение нормальной работы блока реактор–регенератор с движущимся слоем катализатора возможно, например, при падении давления воздуха или азота и завышении давления в реакторе вследствие остановки компрессора. Для предотвращения аварии необходимо прекратить подачу исходных веществ в реактор и стравить газ во всасывающую линию компрессора.

В реакторах и регенераторах с псевдооживленным пылевидным катализатором происходит его истирание и унос образовавшейся пыли отходящими газами. Для улавливания катализаторной пыли используются электрофилтры или аппараты мокрой очистки. Наконец, весьма опасна подача пара или газа в транспортную линию, поскольку вызывает прекращение кипения катализатора и быстрое его оседание. В этом случае пары органических веществ могут попасть в регенератор, что приводит к их возгоранию. Для предотвращения аварии необходима остановка всей системы.

В реакторах полного смешения в связи с большим объемом реакционного пространства возможно неравномерное контактирование поступающих продуктов, вследствие чего развиваются нежелательные побочные реакции и вторичные процессы. Чтобы исключить это явление, в аппаратах предусматривают устройства для лучшего перемешивания. В современных конструкциях используют бессальниковые приводы с экранированным электродвигателем, так как в реакторах с мешалками герметизация сальников мешалки представляет собой трудную задачу.

В колонных реакторах высокого давления основным фактором надежности и безопасности работы является автоматизация системы защиты, позволяющая при возникновении аварийной ситу-

ации перевести в безопасное состояние весь агрегат. Для наиболее ответственных органов управления предусматривают так называемый третий автономный источник питания, к которому можно подключить электроприводы вентилей, установленных на основных технологических потоках системы сигнализации и блокировок, дублирующие приборы для измерения параметров систем, наиболее опасных в аварийном отношении.

Реакционные аппараты, работающие под давлением, которое создается в результате реакции, кроме инспекторских испытаний подвергаются испытаниям на герметичность после каждого вскрытия аппарата. Эти испытания проводят давлением воздуха или инертного газа.

8.6. Безопасная эксплуатация сушилок и технологических печей

В сушилках непрерывного действия места выгрузки и загрузки твердых пылящих материалов должны быть по возможности герметизированы и обеспечены вытяжной вентиляцией. При сушке вредных веществ применяются вакуумные аппараты, которые позволяют лучше улавливать пыль, вредные испарения и снижать температуру сушки.

Взрывоопасные продукты сушат в токе инертного газа, который циркулирует по замкнутой системе. Влага и органические вещества извлекаются из газа в герметически закрытом скруббере, газ после скруббера нагревается калорифером и возвращается в сушилку. Иногда взрывоопасный продукт смешивают с негорючим инертным наполнителем и сушат полученную пасту. При сушке в кипящем слое могут образовываться застойные зоны, в которых происходит комкование продукта, вызывающее его перегрев, а иногда разложение и загорание. Для устранения этого явления сушилки оборудуют рыхлителями, подвижными решетками, предусматривают пульсирующую подачу газа и т.п.

В процессе сушки при движении и трении частиц продукта возможны их электризация и образование зарядов статического электричества. Наиболее сильно электризация проявляется в аппаратах с кипящим слоем при сушке органических веществ, осо-

бенно пластмасс. Для предотвращения накопления статического электричества применяют специальные устройства для его снятия.

При сушке пожароопасных продуктов необходимо предусматривать в сушилке устройства автоматического водяного и парового пожаротушения. Например, при сушке каучука предусмотрены трубопроводы водяного пожаротушения, постоянно находящиеся под давлением воды. Они расположены над верхними ветвями конвейеров с вмонтированными спринклерными головками, автоматически срабатывающими при температуре 182 °С. Трубопроводы парового пожаротушения размещены под верхними ветвями конвейеров. Пар в них подается при открывании одного из двух запорных вентилей, расположенных у приемного бункера сушилки и под площадкой привода конвейера. Выходя через отверстия в трубах, пар заполняет рабочий объем сушилки, тем самым препятствуя доступу кислорода в зону горения.

Печи, применяемые в химической промышленности, можно разделить на две основные группы — реакционные аппараты и печи для получения теплоты, необходимой для технологического процесса.

Для всех видов печей характерными опасностями являются возгорание, хлопки и взрывы, при этом обслуживающий персонал может подвергнуться термическим ожогам и отравлению продуктами сгорания. Для обеспечения безопасной работы особое внимание необходимо уделить выбору огнеупорных и связующих материалов для футеровки внутреннего рабочего пространства печей. В печах, работающих на жидком и газообразном топливе, возможны выбросы пламени, хлопки и взрывы при неправильном розжиге или нарушении процесса горения, в случае подачи топлива при пуске печи без запала или при внезапном прекращении и возобновлении подачи топлива в печь. Чтобы избежать взрывов, топку печи обязательно оборудуют пусковым запальным устройством, блокированным с устройством подачи топлива в печь. При любом срыве пламени в печи необходимо перекрыть подачу топлива и продуть паром топочное пространство, чтобы удалить взрывоопасную смесь. Предотвратить возможность взрыва газовых смесей внутри печи позволяет применение беспламенных панельных горелок, теплоотдача в которых осуществляется не от газового факела, а от раскаленных стенок печи. Для защиты печей

от разрушений при небольших взрывах в торцевых стенках предусматриваются выхлопные окна или предохранительные легко разрушаемые панели.

Одно из важнейших условий безопасной эксплуатации печей — наличие тяги, создаваемой дымососами или дымовыми трубами. Для повышения безопасности труда рабочие отверстия печей закрываются заслонками с запорными устройствами и термоизоляционными покрытиями. Открывание и закрытие заслонок должно быть механизировано. Смотровые окна следует закрывать синими стеклами для ограничения интенсивности излучения.

В случае применения жидкого топлива (мазута) расходные хранилища располагают изолированно от печи. Они должны иметь вентиляцию, измеритель уровня, переливные линии без запорной арматуры для предотвращения переполнения емкости и спусковые линии, соединенные с аварийной емкостью, установленной вне печного помещения. В печах, предназначенных для получения теплоты, необходимой для технологического процесса, широко используется теплоноситель — водяной пар. Недостаток пара как теплоносителя состоит в том, что с повышением его температуры значительно возрастает давление в трубах. Поэтому насыщенный водяной пар применяют при температурах до 180–190 °С, а это возможно при его давлении в трубах 1,0–1,2 МПа. Наличие давлений в системах всегда сопряжено с отрицательными явлениями, поэтому используют и другие высокотемпературные жидкие теплоносители, не имеющие этого недостатка, например производные ароматических углеводородов (масла), которые позволяют получать температуру нагрева до 400 °С при атмосферном давлении, или неорганические теплоносители (расплавленные соли и металлы), с помощью которых при атмосферном давлении осуществляется нагрев до 800 °С и выше.

8.7. Безопасная эксплуатация трубопроводов

Основным назначением технологических трубопроводов является транспортировка жидких и газообразных продуктов в системе производственных установок. Количество трубо-

проводов, как правило, велико. В нефтехимической промышленности стоимость технологических трубопроводов достигает 25% стоимости всего оборудования.

Как показывает мировой опыт, подводящие трубопроводы, а также насосы и клапаны значительно более уязвимы, чем сосуды под давлением, и поэтому выступают потенциальной причиной аварий.

Так, 19 ноября 1984 г. в пригороде Мехико (Мексика) в хранилище сжиженного нефтяного газа на современном предприятии произошла катастрофа с тяжелыми последствиями, инициированная повреждением трубопровода. Основная версия причины аварии — утечка газа в одном из трубопроводов диаметром 0,2 м подачи сжиженного газа. В результате утечки газа образовалось облако газозооушной смеси размером 200×150×2 м, которое воспламенилось со взрывом от факельного устройства (расположенного в 100 м от повреждения) через 5—10 минут после начала утечки. В зоне трещины в трубопроводе образовался мощный факел горящего газа, направленный в сторону сферического резервуара, который взорвался, и возник огненный шар диаметром до 300 м. В течение полутора часов произошли восемь мощных и много менее мощных взрывов почти всех цилиндрических резервуаров, а на газобаллонной станции взорвались сотни баллонов с газом. Взрывы сопровождались пожарами, продолжавшимися около 20 часов. В результате катастрофы погибло не менее 500 человек, получили травмы 7230, из которых 144 скончались в больнице. Около 200 тыс. человек остались без крова или были эвакуированы.

При проектировании промышленных трубопроводов в связи со спецификой эксплуатационных условий учитывают:

- ♦ возможность образования загазованной зоны (из-за неплотностей конструкций), представляющей опасность, особенно при прокладке газопроводов внутри помещений;
- ♦ корродирующее воздействие как наружной, так и внутренней сред, особенно при наличии в них серы и других агрессивных примесей;
- ♦ абразивное воздействие потока взвешенных частиц в газе;
- ♦ влияние на сооружение технологического и атмосферного температурного режимов.

Усилия, возникающие в трубопроводах от внешних нагрузок и температурных напряжений, а также передаваемые на оборудование, должны быть минимальны, что достигается при оптимальных схемах компоновки трубопроводной системы минимальной жесткости и применении специальных компенсаторных звеньев. Трубопроводные системы с низкой жесткостью (гибкие системы) способны компенсировать температурные напряжения за счет изгиба и поворота при рациональной расстановке опор. В жестких системах используют компенсаторы различных типов — шарнирные, продольно-подвижные и др.

В технологических процессах, протекающих в условиях высоких давлений и температур, применяют трубопроводы высокого давления. Высокий уровень требований к этим трубопроводам определяют указанные факторы, а также пульсация давления в трубах, переменность температурных режимов, повышенный уровень вибраций, частые гидравлические удары и нередко корродирующее воздействие транспортируемых продуктов.

Надежность и безопасность эксплуатации трубопроводов требуют внешних осмотров, выборочной и генеральной ревизий, а также периодических испытаний согласно инструкциям.

В ходе периодических ревизий определяют состояние трубопровода (толщину стенки, плотность и прочность сварных швов, износ крепежных деталей) и на основании результатов устанавливают возможность его дальнейшей эксплуатации.

Наибольшему износу подвержены участки трубопровода, в которых изменяется направление потока и возникают местные гидравлические сопротивления (отводы, тройники, места установки арматуры и т.д.). Весьма надежным способом предупреждения случайного выхода трубопровода из строя по причине износа является контрольная проверка толщины стенки трубопровода (например, засверловкой).

Особенно тщательного надзора требует состояние арматуры. Она должна быть герметична. Гарантией безаварийной работы является систематическая проверка уплотнений шпинделя, который должен иметь плавный ход. Арматура должна надежно открываться и закрываться без приложения добавочных рычагов к маховику.

8.8. Основы безопасности при монтажных и ремонтных работах

Монтаж оборудования включает множество трудоемких операций, выполнение которых связано с применением различных машин, механизмов, приспособлений и инструментов. Безопасные условия работы обеспечиваются только при безоговорочном выполнении утвержденных инструкций, которые предполагают подготовку рабочего места, обучение и проверку знаний всего персонала, участвующего в монтаже.

Сборка оборудования осуществляется как на земле, так и в его рабочем положении. Необходимо максимально сократить объем работ на высоте, для чего отдельные блоки, собираемые на земле, должны быть максимально крупными.

Для безопасности монтажных работ наиболее важны правильная организация и последовательность сборки и монтажа технологической аппаратуры и машин.

Для предотвращения аварий при выполнении монтажных работ во взрывоопасных цехах применяются инструменты из цветного металла или покрытые медью. Запрещается применять открытый огонь и использовать механизмы, создающие возможность искрообразования.

Всем участвующим в монтаже необходимо иметь надежную связь друг с другом; они должны видеть друг друга непосредственно либо передавать команды через промежуточных лиц (сигнальщиков), хорошо видимых, либо применять радиосвязь, мобильную связь. Во время подъема оборудования все операции выполняются по команде только одного человека.

Подъем или спуск оборудования нужно тщательно подготовить и начать с таким расчетом, чтобы он был завершен в течение одного дня. Если продолжительность работ такова, что приходится применять искусственное освещение, необходимо, чтобы оно было достаточным и равномерным по всей монтажной площадке и не слепило работающих.

Подъем и спуск грузов запрещаются при скорости ветра более 11 м/с, при гололедице. При подъеме нельзя переключать скорость тракторных лебедок и заглушать двигатели. Рывки и толчки

при неквалифицированном управлении тракторами могут привести к перегрузкам, не предусмотренным проектом.

При подготовке к проведению ремонтных работ составляют график и план, в котором предусматриваются необходимые мероприятия по технике безопасности. В процессе подготовки оборудования к ремонту, т.е. в ходе разборки аппаратуры и коммуникаций, при наличии в них огневзрывоопасных веществ имеется опасность пожаров и взрывов. В этом случае необходимо следить за безотказной работой общеобменных и местных вентиляционных систем. Запрещается проведение сварочных и других работ в период разборки технологического оборудования, когда возможно выделение горючих и взрывоопасных газов и паров.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая организация при Правительстве России обеспечивает контроль безопасности на химических предприятиях? Каковы ее функции и задачи?

2. С какой целью необходимо обязательное заземление машины?

3. Что нужно предпринять, чтобы уменьшить влияние вибрации вибрационных машин на здоровье обслуживающего персонала?

4. Зачем после каждого ремонта ротора машины производят его статическую и динамическую балансировку?

5. Почему при ремонте внутренних частей аппарата работу должны вести не менее двух человек?

6. Почему массообменные аппараты желательно размещать на открытых площадках и продуваемых этажерках?

7. В реакторах с гранулированным движущимся слоем катализатора существует опасность прорыва контактного газа в регенератор. Что можно предпринять, чтобы избежать этого?

8. Зачем для реакторов высокого давления предусматривается запасной, так называемый третий источник питания?

9. Какие меры предосторожности принимаются, чтобы избежать взрывов в печах, применяемых в химической промышленности?

10. Почему при выполнении монтажных работ во взрывоопасном помещении применяются инструменты из цветного металла или покрытые медью?

11. Почему во время подъема оборудования все операции выполняются по команде только одного человека?

Библиографический список

1. *Александров И.А.* Ректификационные и абсорбционные аппараты: Методы расчета и основы конструирования. 3-е изд., перераб. М.: Химия, 1978. 277 с.
2. *Барановский М.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р.* Пластинчатые и спиральные теплообменники. М.: Машиностроение, 1973. 288 с.
3. *Бауман В.А., Клушанцев Б.В., Мартынов В.Д.* Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1981. 324 с.
4. *Вихман Г.Л., Круглов С.А.* Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов. М.: Машиностроение, 1978. 328 с.
5. *Владимиров А.И., Щелкунов В.А., Круглов С.А.* Основные процессы и аппараты нефтегазопереработки: Учебное пособие. М.: Недра-бизнес-центр, 2002. 227 с.
6. *Гумеров Ф.М., Сабирзянов А.Н., Гумерова Г.И.* Суб- и сверхкритические флюиды в процессах переработки полимеров. Казань: ФЭН, 2000.
7. *Гуревич Д.Ф., Шпаков О.Н.* Справочник конструктора трубопроводной арматуры. Л.: Машиностроение, 1987. 517 с.
8. *Дытнерский Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 2002. Ч. 1. 400 с.; Ч. 2. 368 с.
9. *Зверьков В.В. и др.* Расчет и конструирование трубопроводов: Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1979. 245 с.
10. *Ермаков В.И., Шеин В.С.* Ремонт и монтаж химического оборудования. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 202 с.
11. *Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А.* Дробилки: конструкция, расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
12. Конструирование и расчет машин химических производств / Под общ. ред. Э.Э. Кольмана-Иванова. М.: Машиностроение, 1985. 408 с.

13. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.Н. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Л.: Химия, 1982. 255 с.
14. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. М.: Химия, 1970. 432 с.
15. Маньковский О.Н., Толчинский А.Р., Александров М.В. Теплообменная аппаратура химических производств: Инженерные методы расчета. Л.: Химия, 1976. 367 с.
16. Мартынов В.Д., Алешин Н.И., Морозов Б.П. Строительные машины и монтажное оборудование. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
17. Мартынов В.Д., Сергеев В.П. Строительные машины. М.: Высшая школа, 1970. 304 с.
18. Матвеев В.В. Примеры расчета такелажной оснастки. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1987. 319 с.
19. 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.
20. 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.
21. Машины химических производств. Атлас конструкций / Под ред. Э.Э. Кольмана-Иванова. М.: Машиностроение, 1981. 118 с.
22. Монтаж технологического оборудования / В.З. Маршев, М.Л. Эльяш, М.П. Демат и др.; Под ред. В.З. Маршева. М.: Стройиздат, 1983. 584 с.
23. Моргулис М.Л., Мазус М.Г., Мандрико А.С., Биргкер М.И. Рукавные фильтры. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.
24. Мустафаев А.М., Гутман Б.М. Гидроциклоны в нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Недра, 1981. 260 с.
25. Муштаев В.И., Ульянов В.М., Тимонин А.С. Сушка в условиях пневмотранспорта. М.: Химия, 1984. 232 с.
26. Основы жидкостной экстракции / В.В. Сергиевский, А.В. Очкин, Г.А. Ягодин и др.; Под ред. Г.А. Ягодина. М.: Химия, 1981. 400 с.
27. Примеры и задачи по курсу «Машины и аппараты химических производств» (технологические расчеты): Учеб. пособие / В.М. Ульянов, А.А. Иванов, А.А. Сидягин и др.; Под ред. В.М. Ульянова. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т, 2003. 356 с.
28. 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, 1984. 301 с.

29. *Рахмилевич З.З., Радзин И.М., Фармазов С.А.* Справочник механика химических и нефтехимических производств. М.: Химия, 1985. 592 с.
30. *Романков П.Г., Рашковская Н.Б.* Сушка во взвешенном состоянии. Л.: Химия, 1979. 272 с.
31. Роторные дробилки: Исследование, конструирование, расчет и эксплуатация / Под общ. ред. В.А. Баумана. М.: Машиностроение, 1973. 268 с.
32. *Сергеев В.П.* Строительные машины и оборудование. М.: Высшая школа, 1987. 376 с.
33. *Сиденко П.М.* Измельчение в химической промышленности. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1977. 368 с.
34. *Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И., Щелкунов В.А.* Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии. М.: Недра, 2000. 680 с.
35. Система технического обслуживания и ремонта оборудования предприятий химической промышленности / В.Н. Азаров и др. М.: Химия, 1986. 352 с.
36. *Соколов В.Н., Доманский И.В.* Газожидкостные реакторы. Л.: Машиностроение, 1976. 216 с.
37. *Соколов В.И.* Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1992. 398 с.
38. *Соколов В.И.* Центрифугирование. М.: Химия, 1976. 407 с.
39. *Тимонин А.С.* Основы конструирования и расчета технологического и природоохранного оборудования: Справочник. Т. 2, 3. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. Т. 2 – 1025 с., т. 3 – 955 с.
40. *Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю.* Очистка газов мокрыми фильтрами. Л.: Химия, 1972. 248 с.
41. *Фармазов С.А.* Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1984. 328 с.
42. *Холланд Ф., Чапман Ф.С.* Химические реакторы и смесители для жидкофазных процессов / Пер. с англ.; Под ред. Ю.М. Жорова. М.: Химия, 1974. 208 с.
43. *Шкоропад Д.Е., Новиков О.П.* Центрифуги и сепараторы для химических производств. М.: Химия, 1987. 255 с.

О ГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Машины и аппараты для механических процессов	5
1.1. Назначение, выбор и классификация дробильно-размольного оборудования	5
1.2. Дробилки	8
1.3. Расчет на прочность основных элементов дробилок	29
1.4. Мельницы грубого и тонкого измельчения	41
1.5. Расчет на прочность шаровых барабанных мельниц	53
1.6. Мельницы сверхтонкого измельчения	59
1.7. Расчет параметров колебательных движений вибромельниц	66
1.8. Назначение и классификация оборудования для смешения сыпучих и пастообразных материалов	67
1.9. Смесители для сыпучих материалов	68
1.10. Смесители для пастообразных материалов	78
1.11. Назначение и классификация оборудования для разделения сыпучих материалов на фракции	82
1.12. Грохоты	85
1.13. Классификаторы	91
1.14. Параметры движения и расчет усилий в быстроходных грохотах с плоскими ситами	96
1.15. Перспективная техника для механических процессов	105
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>112</i>
Глава 2. Теплообменные аппараты	113
2.1. Назначение, выбор и классификация теплообменных аппаратов	113

2.2.	Кожухотрубчатые теплообменники	115
2.3.	Элементы кожухотрубчатых теплообменных аппаратов	130
2.4.	Расчет на прочность элементов кожухотрубчатых теплообменных аппаратов	139
2.5.	Интенсификация процесса теплообмена в кожухотрубчатых теплообменниках	147
2.6.	Аппараты с поверхностью теплообмена, изготовленной из листового материала	151
2.7.	Теплообменники воздушного охлаждения, «труба в трубе», оросительные, погружные змеевиковые и смесительные	166
2.8.	Теплообменные аппараты из неметаллических материалов	179
2.9.	Регенеративные теплообменники	186
2.10.	Перспективная теплообменная техника	192
	<i>Контрольные вопросы</i>	197
	Глава 3. Массообменные аппараты	199
3.1.	Тарельчатые массообменные аппараты для процессов ректификации и абсорбции	199
3.2.	Основные параметры контактных массообменных устройств	203
3.3.	Конструкции контактных массообменных устройств	205
3.4.	Рекомендации по выбору тарельчатых колонных аппаратов	220
3.5.	Автоматизированный расчет ректификационных колонн	222
3.6.	Насадочные массообменные аппараты	229
3.7.	Устройства для сепарации газожидкостных потоков	243
3.8.	Расчет колонных аппаратов на прочность и устойчивость	245
3.9.	Экстракционные аппараты для систем жидкость — жидкость	252
3.10.	Аппараты для сушки материалов	262
3.11.	Расчет барабанной сушилки на прочность	291
3.12.	Перспективные массообменные процессы и техника	302
	<i>Контрольные вопросы</i>	309

Глава 4. Машины и аппараты для разделения неоднородных систем	311
4.1. Фильтры для жидкостей	311
4.2. Расчет на прочность обечайки барабанных вакуум-фильтров	339
4.3. Микро- и ультрафильтрационные аппараты	341
4.4. Центрифуги	344
4.5. Сепараторы	361
4.6. Расчет на прочность барабанов центрифуг и сепараторов	369
4.7. Динамика центрифуг и сепараторов	375
4.8. Гидроциклоны	380
4.9. Пылеочистное оборудование	383
4.10. Перспективная техника разделения неоднородных систем	401
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>406</i>
Глава 5. Реакционные аппараты	407
5.1. Назначение и классификация реакционных аппаратов	407
5.2. Аппараты для жидкостных реакций	409
5.3. Сосуды с рубашкой. Расчет на прочность	422
5.4. Газожидкостные реакторы	433
5.5. Аппараты для проведения реакций между газом и твердым веществом	441
5.6. Аппараты для проведения газовых реакций на твердом катализаторе	450
5.7. Печи пиролиза и крекинга	462
5.8. Перспективная реакционная техника (плазмохимические реакторы)	471
<i>Контрольные вопросы</i>	<i>478</i>
Глава 6. Технологические трубопроводы	480
6.1. Технологические трубопроводы и их категорийность	480
6.2. Трубы, соединительные детали, компенсаторы и опоры трубопроводов	481
6.3. Расчет на прочность деталей трубопроводов	484
6.4. Трубопроводная арматура	489
6.5. Выбор трубопроводной арматуры	499
6.6. Особенности монтажа и эксплуатации трубопроводов	501

<i>Контрольные вопросы</i>	504
Глава 7. Монтаж и ремонт технологического оборудования	505
7.1. Организация монтажных работ	505
7.2. Основное грузоподъемное оборудование, механизмы и приспособления	513
7.3. Монтаж вертикальных цилиндрических аппаратов	527
7.4. Монтаж горизонтальных аппаратов	551
7.5. Выверка, закрепление и испытания смонтированного оборудования	554
7.6. Ремонт технологического оборудования	562
<i>Контрольные вопросы</i>	578
Глава 8. Основы безопасной эксплуатации машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки	580
8.1. Общие положения	580
8.2. Безопасная эксплуатация машин химических производств и нефтегазопереработки	583
8.3. Безопасная эксплуатация теплообменных аппаратов	586
8.4. Безопасная эксплуатация массообменных колонных аппаратов	587
8.5. Безопасная эксплуатация реакторов	588
8.6. Безопасная эксплуатация сушилок и технологических печей	590
8.7. Безопасная эксплуатация трубопроводов	592
8.8. Основы безопасности при монтажных и ремонтных работах	595
<i>Контрольные вопросы</i>	596
Библиографический список	597

*Иван Ильич ПОНИКАРОВ,
Мансур Гаязович ГАЙНУЛЛИН*
**МАШИНЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ
И НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКИ**

Учебник

Издание шестое, стереотипное

Редакция естественнонаучной
литературы

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
196105, Санкт-Петербург, пр. Ю. Гагарина, д. 1, лит. А.
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

ГДЕ КУПИТЬ

ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИЙ:

*Для того, чтобы заказать необходимые Вам книги, достаточно обратиться
в любую из торговых компаний Издательского Дома «ЛАНЬ»:*

по России и зарубежью
«ЛАНЬ-ТРЕЙД». 196105, Санкт-Петербург, пр. Ю. Гагарина, д. 1, лит. А.
тел.: (812) 412-85-78, 412-14-45, 412-85-82; тел./факс: (812) 412-54-93
e-mail: trade@lanbook.ru; ICQ: 446-869-967

www.lanbook.com
пункт меню «Где купить»
раздел «Прайс-листы, каталоги»

в Москве и в Московской области
«ЛАНЬ-ПРЕСС». 109387, Москва, ул. Летняя, д. 6
тел.: (499) 722-72-30, (495) 647-40-77; e-mail: lanpress@lanbook.ru

в Краснодаре и в Краснодарском крае
«ЛАНЬ-ЮГ». 350901, Краснодар, ул. Жлобы, д. 1/1
тел.: (861) 274-10-35; e-mail: lankrd98@mail.ru

ДЛЯ РОЗНИЧНЫХ ПОКУПАТЕЛЕЙ:

интернет-магазин
Издательство «Лань»: <http://www.lanbook.com>
магазин электронных книг
Global F5: <http://globalf5.com/>

Подписано в печать 26.11.19.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108^{1/32}.
Печать офсетная. Усл. п. л. 31,71. Тираж 100 экз.

Заказ № 804-19.

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета
в АО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.