

X X X

6608
Т-37

А. И. Тетеревков,
В. В. Печковский

ОБОРУДОВАНИЕ ЗАВОДОВ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования БССР в качестве учебного пособия для студентов химико-технологических вузов и факультетов

A-363 / 1

БИБЛИОТЕКА
РЕГИОНАЛЬНЫЙ
ФАКУЛЬТЕТ

БИБЛИОТЕКА
РЕГИОНАЛЬНЫЙ
ФАКУЛЬТЕТ

12487/5

МИНСК
«ВЫШЕЯШАЯ ШКОЛА»
1981

ББК 66.02.01.63

Т 37

МДК 661.2/6.02.001.63(075.8)

Рецензенты: кафедра технологии неорганических веществ Днепропетровского химико-технологического института (зав. кафедрой С. Н. Ганз, проф.); В. В. Стрельцов, д-р техн. наук (Сумский филиал Харьковского политехнического института).

Тетеревков А. И., Печковский В. В.

Т 37 Оборудование заводов неорганических веществ и основы проектирования: [Учеб. пособие для хим.-техн. вузов и фак.].— Мн.: Выш. школа, 1981.— 335 с., ил.

В пер.: 1 р. 10 к.

В пособии рассматривается общезаводское и специальное оборудование заводов неорганических веществ. Основы проектирования представлены разделами: определение технико-экономической целесообразности строительства нового или реконструкции действующего предприятия, разработка задания по проектированию промышленных предприятий, проектирование промышленного объекта, основы составления смежно-финансовых расчетов.

Пособие предназначено для студентов химико-технологических вузов и факультетов по специальности «Технология неорганических веществ».

Т $\frac{31402-043}{М 304(05)-81}$ 83-81 2802000000

ББК 35.20я 73
6 П7.2

© Издательство «Высшая школа», 1981.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие «Оборудование заводов неорганических веществ и основы проектирования» базируется на курсе прикладной механики и знакомит студентов с конструкцией основных машин и аппаратов, широко применяемых в технологии неорганических веществ, со свойствами ряда конструкционных материалов и способами защиты от коррозии, с методами расчетов на прочность отдельных деталей и узлов, принципами подбора основного и вспомогательного оборудования, основами организации проектного дела, а также с содержанием дипломного проекта и требованиями, предъявляемыми к нему.

В книге не приведены технологические расчеты машин и аппаратов, так как они рассматриваются в курсах «Процессы и аппараты» и «Технология неорганических веществ». Больше внимания уделено тем видам оборудования, которые недостаточно рассматриваются в других курсах. В пособие включены примеры расчетов на прочность отдельных деталей.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов по специальности «Технология неорганических веществ» и мо-

жет быть использовано студентами других химико-технологических специальностей при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Главы 1—3, 6, 8 и 16 написаны А. И. Тетеревковым и В. В. Печковским, главы 4, 5, 7, 9—12 — А. И. Тетеревковым, главы 13, 14, 15 — С. А. Рябовой, параграфы 15.4 и 15.5 в главе 15 — Ю. Г. Ходасевичем и А. И. Тетеревковым.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам кафедры технологии неорганических веществ Днепропетровского химико-технологического института имени Ф. Э. Дзержинского (зав. кафедрой профессор С. Н. Ганз) и профессору В. В. Стрельцову за ценные замечания, сделанные при рецензировании рукописи и заранее благодарны всем, кто укажет на имеющиеся недостатки.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

П. В соответствии с решениями партии и правительства химическая промышленность Советского Союза развивается ускоренными темпами. Так, с 1965 по 1975 г. валовая продукция химической промышленности возросла почти в три раза, а в десятой пятилетке по сравнению с 1975 г. увеличится на 60—65%.

Значительные масштабы выпуска многих видов продукции основной химии требуют применения совершенной технологии, полной автоматизации производства, а также использования машин и аппаратов большей единичной мощности. Рост производительности оборудования снижает капитальные затраты на строительство предприятий и себестоимость продукции, повышает производительность труда. В то же время с увеличением единичной мощности машин и аппаратов возрастают требования к надежности оборудования. Крупное оборудование экономически невыгодно резервировать, а простой его на ремонт приводят к большим убыткам. Надежность оборудования зависит от конструкции машины или аппарата, правильного подбора материалов для изготовления узлов и деталей с учетом давления, температуры и коррозионной активности реакционной среды, своевременности и качества выполнения ремонта.

Оборудование — это один из важнейших элементов производства, оно включает машины, аппараты и транспортные устройства, необходимые для осуществления данного технологического процесса.

Технология производства и его аппаратурное оформление взаимосвязаны: каждому способу получения данного вещества соответствует определенный набор машин и аппаратов.

Технолог должен знать принцип действия и устройство оборудования, его достоинства и недостатки, чтобы грамотно, со знанием дела выбирать машины и аппараты для любого технологического процесса, уметь рассчитывать производительность для данного режима работы, выполнять прове-

рочные расчеты на прочность наиболее ответственных узлов аппарата и выбирать способы защиты от коррозии.

Устойчивость работы технологической линии в значительной мере зависит от качества проектирования, т. е. от правильности выбора и расчета норм технологического режима машин, аппаратов, средств управления и контроля, используемых в данном производстве. Ошибки в расчетах отдельного аппарата приводят к снижению производительности всей технологической линии. В то же время слишком большие запасы прочности или производительности вызывают увеличение капитальных затрат и, следовательно, уменьшение экономической эффективности производства. Инженер химик-технолог должен знать основы проектирования и уметь выполнять все работы, необходимые для разработки технологической части проекта, реконструкции или строительства нового предприятия.

Оборудование заводов неорганических веществ — инженерная дисциплина, обобщающая и систематизирующая данные по принципам подбора типа и конструкции аппаратов и машин, по расчету основных их размеров и производительности в соответствии с требованиями технологии и экономики.

Данная дисциплина базируется на курсах процессов и аппаратов химической промышленности, теории технологических процессов, механики и тесно связана с курсами общей химической технологии, специальной технологии данного производства и экономики.

1.

Часть I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ, ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НЕМУ, И ПОРЯДОК РАСЧЕТА

В основной химической промышленности применяют множество различных по назначению, конструкции и принципу действия аппаратов и механизмов, в связи с чем необходима их классификация.

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

По назначению и принципу действия оборудование подразделяется на машины и аппараты.

Машины — это механизмы или сочетания механизмов, осуществляющие определенные целесообразные движения для преобразования энергии или для производства работы. Так, в компрессоре механическая энергия затрачивается на сжатие газа, а в дробилке на измельчение материала.

Аппараты — это устройства, предназначенные для проведения химических, физико-химических, тепловых и гидромеханических процессов, в которых механические операции играют вспомогательную роль. Они являются основным видом химического оборудования, их конструкция и размеры определяются свойствами исходных и конечных веществ, условиями проведения процесса и требуемой производительностью.

По областям применения и масштабам производства оборудование подразделяется на универсальное, специализированное и специальное. К *универсальному* относится типовое оборудование, пригодное для многих производств химической промышленности: насосы, компрессоры, теплообменники, фильтры, центрифуги, конвейеры и т. д.

Специализированное оборудование предназначено для одного или нескольких близких по типу производств. Его выпускают небольшими сериями. К специализированному оборудованию относятся абсорберы, ректификационные колонны, выпарные аппараты и кристаллизаторы.

Специальное оборудование применяют для проведения одного определенного технологического процесса или опера-

ции; его не используют в других производствах. Сюда, например, можно отнести колонны синтеза аммиака, контактные аппараты для окисления двуоксида серы, печи для обжига колчедана, колонны карбонизации в содовом производстве и печи для кальцинации соды.

Технологическое оборудование по его роли в осуществлении процесса подразделяется на основное и вспомогательное. К *основному (технологическому) оборудованию* относятся аппараты и машины, необходимые для проведения химических и физико-химических процессов, в результате которых образуются целевые продукты. Поскольку такое оборудование предназначено для осуществления определенных технологических процессов, то его размеры, форма и конструкция должны соответствовать свойствам перерабатываемых материалов и параметрам проводимого в нем процесса. Важнейшие факторы, определяющие тип и конструкцию аппарата, — агрегатное состояние веществ, участвующих в процессе, их химические свойства, концентрация C , температура T , давление P и тепловой эффект процесса. Размеры аппарата зависят от количества веществ, проходящих через данный аппарат, необходимого времени пребывания τ или количества передаваемого тепла или массы, а также от режима работы.

Вспомогательное оборудование (мерники, емкости, хранилища, бункера) не оказывает существенного влияния на технологический процесс. Производительность установки (технологической линии) или выход готового продукта не зависит от размеров и конструкции вспомогательного оборудования, поэтому последние можно изменять в определенных пределах.

По условиям работы различают непрерывно и периодически действующее оборудование. В *аппаратах или машинах периодического действия* локальная интенсивность процесса и его параметры (T , P , C) непрерывно изменяются во времени. Производительность таких аппаратов обычно меньше, чем у аппаратов непрерывного действия, вследствие того, что часть времени затрачивается на вспомогательные операции. Аппараты периодического действия, как правило, требуют больших затрат труда на обслуживание, их труднее автоматизировать.

Аппараты и машины непрерывного действия отличаются постоянством локальной интенсивности процесса и его параметров. Все операции, необходимые для осуществления процесса, выполняются одновременно в разных аппаратах или в разных частях одного аппарата, в результате чего достигается высокая производительность. В аппаратах данного типа меньше расходуется энергии, легче поддержать оптимальный технологический режим и их проще автоматизировать.

В химической промышленности нередко применяют аппараты смешанного типа — *полунепрерывные*, в которые один компонент (газ или жидкость) подается и выгружается непрерывно, а другой (твердое или жидкость) — периодически.

Машины, используемые в химической промышленности, подразделяются на следующие группы.

1. Подъемно-транспортные устройства — предназначены для транспортировки сыпучих (пылевидных, порошкообразных или кусковых) твердых материалов и штучных грузов (мешки, ящики и т. д.) в пределах цеха или предприятия. К данному классу машин относятся различные транспортеры и элеваторы, широко используемые на предприятиях основной химии.

2. Дробильно-размольное оборудование — машины, предназначенные для уменьшения величины частиц твердых материалов. Это дробилки (щковые, конусные, молотковые и т. д.), бегуны, мельницы (шаровые, стержневые, струйные и других типов) и дезинтеграторы.

3. Смесители — устройства для механического перемешивания неоднородных твердых и жидких материалов в целях получения смесей твердых веществ, суспензий и эмульсий.

4. Грануляторы и прессы — машины для увеличения размера частиц твердых сыпучих материалов. Они широко используются для превращения пылевидных и порошкообразных веществ в гранулы с величиной частиц 1—50 мм.

5. Классификаторы — устройства для разделения твердых веществ по величине, форме или плотности частиц. В зависимости от конструкции подразделяются на сита и грохоты.

6. Питатели (дозаторы) для твердых сыпучих материалов — используются для непрерывной или периодической подачи материалов в заданном количестве. В зависимости от принципа действия и конструкции подразделяются на весовые и объемные.

7. Машины для растаривания поступающих материалов (например, для разрезания бумажных или пластиковых мешков), расфасовки и упаковки готовой продукции. Ими оборудуются склады.

8. Машины для транспорта газов (компрессоры) и жидкостей (насосы). По принципу действия и особенностям конструкции они подразделяются на поршневые, центробежные, вихревые, ротационные, струйные и др.

Аппараты в зависимости от основной величины, определяющей их производительность, делятся на поверхностные и объемные.

К *поверхностному типу* относятся все аппараты, производительность которых определяется поверхностью тепло- или массопередачи, а также некоторые аппараты гидромеханиче-

ских процессов, производительность которых зависит от поверхности фильтрации или отстаивания.

В аппаратах объемного типа величиной, определяющей производительность, является объем, а поверхность тепло- или массопередачи не играет существенной роли.

По технологическому назначению аппараты подразделяются на теплообменные, массообменные, гидромеханические и реакционные [3].

Следует иметь в виду, что в заводских аппаратах одновременно могут протекать процессы различных типов, например при сушке одновременно происходят теплообмен и массопередача, а процессы абсорбции (массообменные) часто сопровождаются химическим взаимодействием.

Аппараты гидромеханических процессов делятся на три группы:

1) аппараты для разделения газовых неоднородных систем — выделяют из газов пыль и капли жидкости. К ним относятся пыльные камеры, циклоны, брызгоуловители, электрофильтры и тканевые фильтры для очистки газов;

2) аппараты для разделения жидких неоднородных систем — служат для выделения из жидкой фазы твердых частиц или капель нерастворимой жидкости. К этой группе аппаратов относятся отстойники, фильтры, центрифуги, гидроциклоны и сепараторы;

3) аппараты для образования неоднородных систем — смесители, аппараты с кипящим и взвешенным слоем.

В теплообменных аппаратах осуществляется теплопередача между различными фазами или различными технологическими потоками.

К массообменным относятся те аппараты, в которых основным процессом является перенос массы между различными фазами: абсорберы и десорберы различных типов, растворители и кристаллизаторы, сушилки и реакторы гетерофазных процессов.

Аппараты, предназначенные для проведения химических процессов, в которых происходит изменение молекулярного состава веществ, называют *реакторами*. В зависимости от условий работы они бывают следующих видов:

1) реакторы идеального смешения (РИС) — аппараты с перемешивающими устройствами, обеспечивающими постоянство всех параметров во всех точках объема. Это растворители и кристаллизаторы, смесители, аппараты КС;

2) реакторы идеального вытеснения (РИВ) — аппараты, в которых отсутствует перемешивание реагирующих веществ. К данному типу можно отнести контактные аппараты с фильтрующим слоем, трубчатые контактные аппараты и шахтные печи.

По технологическому назначению реакторы подразделяются на:

1) контактные аппараты, или конверторы, служат для проведения каталитических процессов в системах газ — газ с участием твердых катализаторов;

2) печи — реакторы, предназначенные для осуществления высокотемпературных процессов;

3) аппараты для проведения химических процессов между жидкостями и твердыми веществами — реакторы жидкофазных процессов;

4) аппараты высокого давления — реакторы, предназначенные для проведения химических процессов при высоких давлениях. Они выделяются в отдельную группу в связи с особенностями конструкции, которая должна выдерживать давление 10—200 МПа.

1.2. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОБОРУДОВАНИЮ

Любое оборудование должно удовлетворять ряду технологических и конструктивных требований.

Технологические требования: 1. Максимальная производительность при минимальных затратах материалов, энергии, труда на обслуживание. Достигается выбором оптимальной конструкции и режима работы, обеспечивающего максимальную интенсивность процесса.

2. Устойчивость заданного технологического режима и основных параметров процесса (P , T , C), точность и удобство регулирования, возможность применения автоматического контроля и управления. Обеспечиваются правильным выбором конструкции, установкой приборов контроля и средств регулирования параметров процесса.

3. Механизация и автоматизация загрузки и выгрузки.

4. Конструкция аппаратов должна отвечать требованиям техники безопасности и промышленной санитарии: обеспечивать безопасность труда, исключать вредные выбросы и излучения путем герметизации и изоляции аппаратуры.

Конструктивные требования: 1. Механическая прочность и устойчивость формы. Химические аппараты работают при повышенных температурах и давлениях и часто содержат ядовитые, вредные или взрывоопасные вещества. Для предотвращения аварий при расчете принимается повышенный запас прочности. В ряде случаев обечайки рассчитываются из условий устойчивости, например, если аппараты работают под наружным давлением.

2. Долговечность и надежность. Расчетный срок службы аппаратуры — 10—12 лет, а фактический может значительно отличаться от указанного срока. Повышение долговечности

достигается путем применения коррозионноустойчивых материалов, устройства покрытий, защищающих от действия коррозионноактивных сред и высоких температур, надежных узлов и механизмов, а также путем периодического ремонта и замены изнашиваемых деталей и узлов.

3. Конструктивное совершенство. Характеризуется малыми габаритами и весом аппарата или машины, малым расходом дефицитных и дорогих материалов, простотой и дешевой изготовлением, сборки и разборки, а также безопасностью эксплуатации.

4. Транспортабельность. Увеличение производительности аппаратов приводит к росту их габаритных размеров, в связи с чем при конструировании необходимо учитывать возможность транспортировки аппарата или его частей от завода-изготовителя к месту монтажа.

5. Унификация. Оборудование для химико-технологических производств чрезвычайно разнообразно по конструкции и габаритам. Однако для близких процессов в различных отраслях промышленности могут быть применены аналогичные по конструкции машины, аппараты или узлы. Это дает возможность унифицировать многие узлы и детали химической аппаратуры, а также ряд аппаратов и машин. При проектировании необходимо максимально использовать унифицированные узлы, детали и аппараты, руководствоваться ГОСТами, регламентирующими типы, параметры и основные размеры химической аппаратуры, например:

ГОСТ 9931—69. Сосуды и аппараты цилиндрические стальные сварные. Типы и основные размеры.

ГОСТ 9493—73. Сосуды и аппараты. Ряд давлений.

ГОСТ 9617—76. Сосуды и аппараты. Ряд диаметров.

ГОСТ 13372—67. Сосуды и аппараты. Ряд емкостей.

ГОСТ 10168—75. Насосы центробежные для химических производств. Типы и основные параметры.

ГОСТ 11875—73. Аппараты с вращающимися барабанами общего назначения. Основные параметры и размеры.

ГОСТ 11987—73. Аппараты выпарные трубчатые стальные. Типы, основные параметры и размеры.

ГОСТ 5748—68. Вакуум-фильтры барабанные с наружной фильтрующей поверхностью.

1.3. НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН И АППАРАТОВ

Конструкция и качество аппаратов, машин должны соответствовать ряду требований, поэтому их проектирование, изготовление и эксплуатацию осуществляют по единой нормативно-технической документации, которая включает: «Прави-

ла устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» (правила Госгортехнадзора); ГОСТы — нормативные требования на размеры, конструкцию, качество материалов, методы расчета и испытаний, единые для всех предприятий и имеющие силу закона; ОСТы — отраслевые стандарты, действие которых распространяется на данную отрасль; СТП — стандарты предприятия, требования, действующие на данном предприятии; РТМ — руководящие технические материалы; ТУ — технические условия.

Завод-изготовитель поставляет оборудование предприятию-заказчику с паспортами и инструкциями по монтажу и безопасной эксплуатации. К корпусу аппарата прикрепляется фирменная табличка с указанием паспортных данных: наименование завода-изготовителя, заводской номер аппарата, год изготовления, рабочее и пробное давление, допустимая температура стенок аппарата.

Правила Госгортехнадзора и ОСТ 26-291—71 включают требования к устройству, условиям изготовления, монтажа, ремонта, эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Эти правила распространяются на сосуды и аппараты, работающие под давлением свыше 0,07 МПа; цистерны и бочки для перевозки сжиженных газов, если давление паров при температуре до 50° превышает 0,07 МПа; баллоны, предназначенные для перевозки и хранения сжатых и сжиженных газов под давлением свыше 0,07 МПа.

Все аппараты после монтажа, до пуска в эксплуатацию, необходимо зарегистрировать в местной инспекции Госгортехнадзора, для чего представляют следующие документы; письменное заявление дирекции предприятия, паспорт аппарата, акт, подтверждающий, что монтаж аппарата выполнен в соответствии с проектом и правилами Госгортехнадзора, схему включения аппарата. В паспорте аппарата отмечают дату регистрации.

Аппараты, подлежащие контролю Госгортехнадзора, следует подвергать осмотру и гидравлическим испытаниям после их установки до пуска в работу и периодически в процессе эксплуатации. *Осмотр* в целях исследования состояния наружных и внутренних поверхностей и влияния коррозионной активности среды на стенки аппарата проводят не реже одного раза в четыре года. *Гидравлические испытания* проводят после внутреннего осмотра не реже одного раза в восемь лет: сосуд или аппарат заполняют водой, герметизируют и увеличивают давление до пробного значения, при котором выдерживают определенное время.

Пробное давление $P_{пр}$ в сварных аппаратах зависит от расчетного P : при P , равном 0,07—0,50 МПа, $P_{пр} = 1,5 P \sigma_{д}^{20} / \sigma_{д}^t$, но не менее 0,2 МПа; при $P \geq 0,50$ МПа $P_{пр} = 1,25 P \sigma_{д}^{20} / \sigma_{д}^t$, но не

менее $P+0,3$ МПа. Для сварных сосудов, работающих под вакуумом, $P_{пр}=0,15 \sigma_{д}^{20}/\sigma_{д}^t$, но не менее 0,2 МПа ($\sigma_{д}^t$ — допускаемое напряжение при рабочей температуре).

Время выдержки при пробном давлении зависит от толщины стенки и составляет 10—60 минут. После выдержки давление снижают до рабочего и при этом давлении осматривают и обстукивают сварные швы сосудов молотком массой 0,5—1,5 кг. Аппарат считается выдержавшим гидравлические испытания, если в нем нет признаков разрыва, течи, «потения» в сварных швах и видимых остаточных деформаций. В табличку, закрепляемую на аппарате, вносят следующие данные: регистрационный номер, разрешенное давление, дату (месяц и год) следующего внутреннего осмотра и гидравлического испытания.

Чтобы испытать сосуды и аппараты, работающие при атмосферном давлении, их наполняют водой доверху и выдерживают в течение 4 часов до начала осмотра.

Пневматические испытания проводят редко и выполняют в соответствии со специальными инструкциями.

1.4. ПОРЯДОК РАСЧЕТА АППАРАТУРЫ

Аппараты должны соответствовать ряду технологических и конструктивных требований, нормам техники безопасности и промышленной санитарии. В определенной последовательности проводят следующие расчеты аппаратов.

Технологический расчет. Цель данного расчета — определение размеров аппарата или их числа при заданных размерах. Его начинают с составления материального баланса аппарата на основе закона сохранения массы (или числа атомов) реагирующих веществ с учетом степени превращения их в конечный продукт, побочных реакций и потерь. На основе заданной производительности и материального баланса рассчитывают материальные потоки исходных, промежуточных и конечных веществ.

Основные размеры аппарата — объем V_p (m^3) или поверхность массо- или теплопередачи F (m^2) — вычисляют в соответствии с нормами технологического режима (T, P, C) по законам кинетики химических реакций, тепло- или массообмена.

Основные величины, определяющие объем аппаратов емкостного типа V_p , — это необходимое время пребывания реакционной смеси τ (с), объемная производительность по реакционной массе w (m^3/c) и число аппаратов n :

$$V_p = w\tau/n.$$

Время пребывания или продолжительность взаимодействия τ вычисляется в соответствии с законами кинетики химических

реакций с учетом температуры, давления, концентрации исходных веществ, активности катализаторов и необходимой степени превращения или выхода готового продукта.

При расчете объема аппаратуры необходимо учитывать степень заполнения ее реакционной смесью и возможность незапланированных остановок вследствие поломок и нарушений режима. Как правило, аппараты жидкофазных процессов (реакторы, растворители, выпарные аппараты, кристаллизаторы и т. д.) не могут полностью заполняться раствором или суспензией из-за возможных переливов и гидравлических ударов. Отношение объема реакционной смеси (V_p) к полному объему аппарата (V_a) называется *коэффициентом заполнения*:

$$\varphi = \frac{V_p}{V_a}.$$

Величина коэффициента заполнения зависит от конструкции аппарата и типа процесса. Так, у простых аппаратов без внутренних устройств (мерники, сборники, хранилища) $\varphi=0,85-0,9$; у аппаратов с мешалками (реакторы, растворители, кристаллизаторы) $\varphi=0,75-0,8$; у аппаратов, в которых протекают процессы с большим пенообразованием, $\varphi=0,4-0,6$.

Современные методы изготовления и расчета машин и аппаратов не обеспечивают их полной надежности. Нельзя исключить возможность непредвиденных остановок из-за поломок отдельных деталей и узлов или снижение производительности машин и аппаратов вследствие ошибок в расчетах, вызванных недостаточным знанием кинетики процесса или свойств материалов. Для компенсации недостающей надежности аппаратуры вводится *коэффициент запаса производительности*, равный отношению расчетной производительности к фактической. Величина коэффициента запаса α зависит от сложности механического устройства и величины параметров технологического режима. У простых аппаратов без движущихся частей α равен $1,0-1,05$; у аппаратов с внутренними устройствами без вращающихся частей, работающих при низких и средних температурах и без давления, — $1,1-1,15$; у аппаратов с быстровращающимися деталями и работающих при высоких температурах и давлениях — $1,15-1,20$.

С учетом введенных коэффициентов получим уравнение для расчета объема аппарата:

$$V_a = \omega \tau \frac{\alpha}{\varphi n}. \quad (1.1)$$

Формула (1.1) позволяет рассчитать объем одного аппарата V_a , если задано их число n . Можно задаться объемом

аппарата по стандарту или нормали и найти число аппаратов.

Способы технологического расчета аппаратуры рассматриваются в курсах технологии соответствующего производства, теории технологических процессов и в курсе процессов и аппаратов химической промышленности.

Тепловой расчет. Необходим для определения поверхности теплопередачи, расхода энергии, теплоносителя или хладагента и потерь тепла в окружающую среду, а также толщины изоляции при заданных потерях тепла. На основании материального баланса и закона сохранения энергии составляют *тепловой баланс* аппарата с учетом всех источников подвода и расхода энергии.

Кроме того, обязателен *расчет тепловой изоляции*, так как для большинства аппаратов температура наружной поверхности ограничена нормами техники безопасности и не должна превышать 50 °С.

Гидравлический расчет. В данном случае определяют сопротивление аппарата проходу газа или жидкости при заданной производительности и вычисленных габаритных размерах, основные размеры патрубков и штуцеров для ввода исходных веществ и вывода продуктов. Число и расположение патрубков и штуцеров принимают с учетом требований технологии, агрегатного состояния веществ и конструкции аппарата.

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

Механический расчет. Проверочному механическому расчету подлежат наиболее ответственные узлы и детали, работающие в самых тяжелых условиях под максимальными нагрузками. Как правило, выполняют механические расчеты: на прочность обечайки, днища и крышки аппаратов, работающих под внутренним или наружным давлением; трубных решеток и труб теплообменных аппаратов; валов и лопастей мешалок; уплотнений аппаратов высокого давления.

Глава 2. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Выбор конструкционного материала для изготовления химической аппаратуры в значительной мере определяется агрессивностью среды и условиями работы данного аппарата. Коррозионное воздействие среды приводит к снижению механической прочности, твердости, износостойчивости материала и к другим нежелательным явлениям.

Коррозия — разрушение материала при химическом или электрохимическом воздействии среды. *Коррозионная стойкость* — способность материала противостоять коррозионному

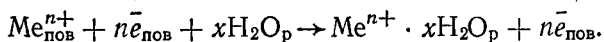
воздействию среды. Это понятие относительное, так как коррозионная стойкость зависит от вида среды, концентрации химически активного компонента, температуры и ряда других факторов. Например, углеродистые стали вполне устойчивы в серной кислоте при массовой концентрации 75 % и выше, однако они неустойчивы в разбавленной кислоте. Многие силикаты вполне стойки в серной кислоте любой концентрации, но неустойчивы в растворах плавиковой кислоты.

В зависимости от природы агрессивной среды и условий работы разрушение металлов и сплавов может протекать по химическому или электрохимическому механизму [4, 5].

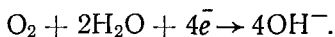
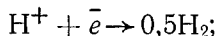
2.1. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ

Электрохимическая коррозия возникает при действии на металлы и сплавы (проводники 1 рода) электролитов (проводники 2 рода), т. е. растворов солей, кислот, щелочей, влажных газов и расплавов солей и щелочей. Разрушение металлов связано с проходом электрического тока в результате образования микро- или макрогальванических пар между участками металла с различным составом или различной активностью коррозионной среды.

При электрохимической коррозии одновременно протекают два процесса (на аноде катионы металла переходят в раствор, а на поверхности металла остается эквивалентное количество электронов):



На катоде избыточные электроны расходуются в реакции с каким-либо деполаризатором, которым чаще всего являются ионы водорода в кислых средах либо растворенный кислород. При этом протекают следующие реакции:



Последняя реакция чаще наблюдается в нейтральных средах.

Электронная проводимость металла и ионная проводимость электролита обуславливают пространственное разделение анодного и катодного процессов (рис. 2.1). Для работы гальванического элемента, следствием которой является коррозия металла, необходима неоднородность металла или окружающей среды: наличие в металле примесей, нарушения структуры металла или защитной пленки на его поверхности, неравномерная деформация различных участков, непостоянство состава раствора и распределения кислорода или неодинаковая температура различных участков.

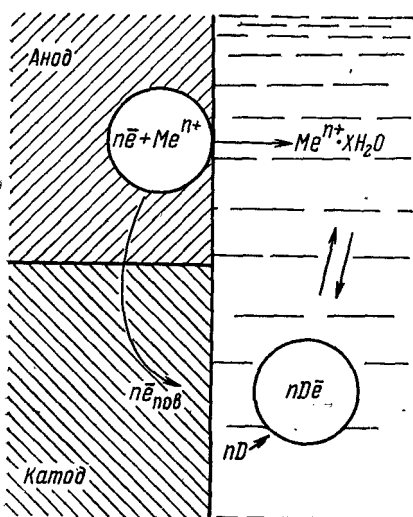


Рис. 2.1. Схема работы микрогальванического элемента.

Скорость коррозионного разрушения металла зависит от ряда физико-химических, тепловых, гидродинамических и механических факторов. Наибольшее влияние оказывает состав и концентрация раствора, состав, структура и наличие механических напряжений, качество обработки поверхности металла, температура, скорость движения раствора и его давление.

Скорость электрохимической коррозии сильно зависит от концентрации ионов водорода (рН среды). Каждому металлу соответствует свое значение рН, при котором металл наиболее устойчив.

Так, Та, Мо, W устойчивы в кислых и разрушаются в щелочных растворах, а Мп, Fe, Cu, Ni, Сг неустойчивы в кислых средах, умеренно стойки в нейтральных растворах и пассивируются в щелочах.

На скорость коррозии влияет растворимость продуктов коррозии. Если продукты коррозии хорошо растворимы на анодных и катодных участках, то наблюдается постоянная скорость коррозии, например коррозия железа в растворах хлоридов, сульфатов и нитратов щелочных металлов. В то же время в растворах карбонатов, фосфатов и цианидов на анодных участках металлов группы железа образуются пленки нерастворимых продуктов коррозии, что приводит к резкому снижению скорости разрушения металла. Аналогично нерастворимые продукты коррозии образуются на анодных участках свинца в растворах сернокислых солей и разбавленной серной кислоты.

По влиянию на скорость коррозии металлов одни соли являются активаторами, другие — пассиваторами. *Активаторы* (например, галогениды щелочных металлов) способствуют образованию рыхлых, проницаемых пленок на поверхности металла, значительно увеличивая скорость его разрушения. *Пассиваторы*, к которым относятся окислители (хроматы, бихроматы и перманганаты), способствуют образованию плотной защитной пленки на поверхности металла, что уменьшает скорость коррозии железа и сплавов на его основе. Повышение концентрации соли — пассиватора — приводит к сниже-

нию скорости коррозии металлов. Низкие концентрации солей, не являющихся окислителями, в растворе увеличивают скорость разрушения металла вследствие возрастания электропроводности раствора, а при высоких концентрациях скорость коррозии падает из-за уменьшения растворимости кислорода.

Скорость электрохимической коррозии металлов увеличивается с ростом концентрации бескислородных кислот, например соляной. В серной кислоте с массовой концентрацией 75 % и выше железо и сплавы на его основе достаточно устойчивы. В щелочных растворах скорость коррозии железа уменьшается с ростом концентрации NaOH до 30 %, дальнейшее увеличение концентрации вызывает рост скорости коррозии:

Скорость электрохимической коррозии с водородной деполаризацией возрастает с повышением температуры. Более сложно влияние температуры на скорость коррозии с кислородной деполаризацией: рост температуры увеличивает скорость диффузионных процессов, электропроводность раствора и скорость собственно химического взаимодействия, в то же время уменьшая растворимость кислорода. В закрытых системах, где невозможно выделение кислорода, рост температуры вызывает почти линейное увеличение скорости коррозии. В открытых системах с повышением температуры кислород выделяется из раствора, в результате чего снижается скорость коррозии при высоких температурах.

Повышение давления, как правило, вызывает увеличение скорости коррозии вследствие роста содержания кислорода в растворах.

Скорость движения раствора влияет на скорость коррозии весьма сложно. При малых скоростях жидкости скорость коррозии возрастает из-за увеличения поступления деполаризатора — кислорода. В широком интервале скоростей раствора наблюдается пассивация поверхности, в данном случае скорость коррозии не зависит от скорости раствора. При высоких скоростях движения жидкости скорость коррозии увеличивается из-за разрушения защитной пленки. Очень высокие скорости жидкости (десятки метров в секунду) приводят к возникновению *кавитации*, которая сопровождается интенсивным разрушением многих металлов и сплавов.

2.2. ХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ

Химическая коррозия наблюдается при действии сухих газов и жидких неэлектролитов на металлы, а также при действии электролитов на неметаллы. Наиболее часто встречается ее разновидность — *газовая коррозия*, которая возникает

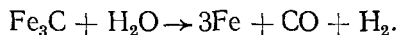
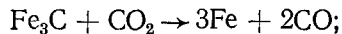
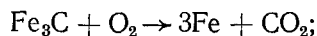
при воздействии химически активных газов на металлы при повышенных давлениях и температурах.

Поверхность металла всегда покрыта пленкой окислов, образующихся при реакции

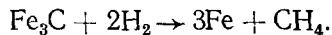


Если парциальное давление кислорода в газе больше равновесного, то реакция протекает в сторону образования окисла. Повышение температуры, как правило, увеличивает скорость окисления металла. Во многих случаях окисная пленка обладает защитными свойствами. Толщина такой пленки зависит от условий ее образования и свойств металла, она может изменяться от 1,5 нм до десятых долей миллиметра. Хорошими защитными свойствами обладают плотные оксидные пленки, прочно сцепляющиеся с металлом, не взаимодействующие с агрессивной средой, при условии, если температурные коэффициенты расширения пленки окисла и металла близки между собой. Скорость газовой коррозии железа и сплавов на его основе может быть существенно уменьшена при введении в поверхностный слой Al (алитирование), Cr (хромирование) или Si (силицирование).

Различные металлы существенно отличаются своей устойчивостью к действию агрессивных газов. Углеродистые стали при повышенных температурах *обезуглероживаются* вследствие протекания следующих реакций:

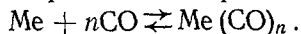


При повышенных давлениях и температурах обезуглероживание может происходить за счет гидрирования (водородная коррозия):



Обезуглероживание приводит к снижению механической прочности и понижению предела устойчивости металла, что особенно важно при переменных нагрузках. Устойчивость к водородной коррозии увеличивается при введении Cr, Ti, Mo, V, так как эти металлы образуют карбиды, устойчивые к водороду. Хромистые стали устойчивы к действию водорода при содержании хрома свыше 8,4 %.

Разновидностью газовой коррозии является *карбонильная коррозия* — разрушение металлов при действии на них окиси углерода вследствие образования карбониллов:



Этот процесс наблюдается при высоких давлениях и относительно невысоких температурах. С повышением давления

скорость образования карбонила железа увеличивается, а при изменении температуры она проходит через максимум, наблюдающийся при 200 °С.

Углеродистая сталь Ст20 и низколегированная сталь 30ХМА малоустойчивы к карбонильной коррозии. Легированные стали подвергают коррозии в незначительной степени, устойчивость их возрастает с увеличением содержания легирующих элементов. Хорошо устойчивы в среде окиси углерода медь и сплавы на ее основе — бронза, латунь. Алюминий практически не подвергается карбонильной коррозии.

Сернистые соединения (SO_2 , H_2S) и пары серы при повышенных температурах вызывают коррозию многих материалов, особенно опасен в этом отношении сероводород. Обычные углеродистые стали уже при 300 °С подвергаются сильной газовой коррозии в атмосфере сероводорода. Легирование стали хромом при его содержании не менее 12 % увеличивает коррозионную устойчивость стали. Никель и стали, легированные никелем, малоустойчивы в атмосфере сероводорода и сернистого газа при температурах выше 600 °С в результате образования сульфидов никеля, нарушающих структуру металла.

Алюминий вполне устойчив в атмосфере сернистых соединений. Введение его в стали (не менее 4 %) повышает их устойчивость к сернистым соединениям. Стойкость сталей к газовой коррозии заметно увеличивается при введении в них кремния.

Отмечается повышенная устойчивость некоторых материалов к действию влажного хлора или влажного хлорида водорода: углеродистые стали могут применяться до 430 °С, высокой стойкостью в указанных средах обладают титан и тантал, а также их сплавы.

Высокой коррозионной активностью обладают фтор, фторид водорода и пары кремнефтористоводородной кислоты. Многие металлы и сплавы (Al, Fe, Ti, Zn) неустойчивы в данных газовых средах. Хорошей или удовлетворительной стойкостью к действию паров F_2 и HF при температурах до 300—400 °С обладают никель, монель и медь, а в среде паров H_2SiF_6 при 100 °С — среднелегированные стали 12Х18Н9Т и 10Х17Н13М3Т.

Химическая коррозия — типичный гетерогенный процесс. Обычно ее скорость выражается на единицу поверхности и имеет размерность грамм на квадратный метр в час ($\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$). Скорость разрушения материала чаще тормозится диффузионными стадиями и порядок реакции равен единице:

$$U_f = \frac{dG}{Fdt} = K\Delta C.$$

Зависимость скорости коррозии от температуры выражается уравнением Аррениуса.

Важное значение имеет устойчивость металлов и сплавов к действию кислорода или кислородсодержащих газовых смесей. *Жаростойкость (окалиностойкость)* определяется скоростью образования окалины, т. е. количеством окислов, образующихся в единицу времени на единицу поверхности металла. Повышение температуры вызывает экспоненциальный рост скорости окисления металла в соответствии с уравнением Аррениуса. Хорошей жаростойкостью обладают Ni, Cr, Ti, Cu, Al и сплавы на их основе.

Предельные температуры применения металлов:

Металл	Al	Ni	Ti	Cu	Pb	08X18N10T	15X25H20ГC	X30Ю5
Температура, °C	400	700	500	400	150	900	900	1100

Жаростойкость сплавов на железной основе повышается при введении Ni, Cr, Al, Si.

Повышение температуры значительно уменьшает прочность металла. Большинство металлов обладает низкой жаропрочностью, т. е. не способно выдерживать длительные механические нагрузки при повышенных температурах.

2.3. ВИДЫ КОРРОЗИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В зависимости от вида коррозии и конкретных условий эксплуатации (природа среды, виды металла, действующие напряжения) наблюдаются различные виды разрушений. Коррозия металла подразделяется на сплошную и местную [4, 5].

Сплошная коррозия появляется при отсутствии защитных пленок на поверхности металла или при равномерном распределении анодных и катодных участков. Потеря прочности образца металла приблизительно пропорциональна уменьшению его массы, поэтому данный вид коррозионного разрушения менее опасен по сравнению с другими.

Местная коррозия имеет несколько разновидностей: пятнистая, язвенная, подповерхностная, межкристаллитная и др. Для всех ее разновидностей характерно разрушение отдельных участков металла. Так, при *пятнистой коррозии* (рис. 2.2, а) отмечается большая площадь очагов и их малая глубина. Этот вид коррозионных разрушений близок к сплошной коррозии.

При *язвенной коррозии* (рис. 2.2, б) глубина разрушений, как правило, превышает их протяженность, а при *точечной* (рис. 2.2, в) часто образуются сквозные отверстия. Точечная коррозия наблюдается при наличии в агрессивной среде ионов хлора и растворенного кислорода, ее очагами являются раз-

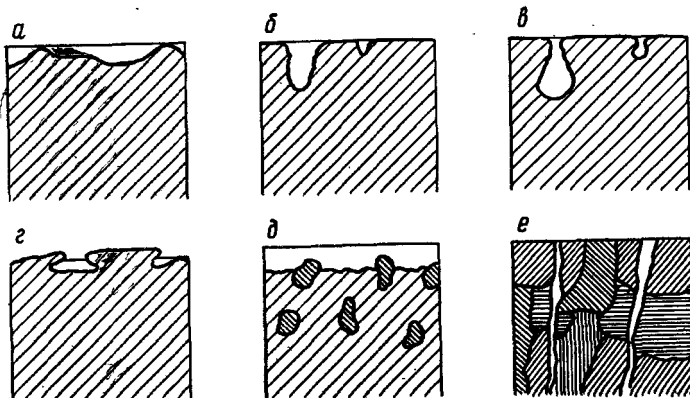


Рис. 2.2. Виды коррозионных разрушений.

личные примеси в металле, микротрещины или царапины. Металлы высокой чистоты и сплавы, легированные молибденом, менее подвержены точечной коррозии. Этот вид коррозии более опасен, чем сплошная или пятнистая, так как в данном случае прочность отдельных участков снижается в большей мере, чем потеря массы образца.

Подповерхностная коррозия (рис. 2.2, г) характеризуется распространением очага разрушения под поверхностью металла, что приводит к вспучиванию и расслоению металла продуктами коррозии.

Избирательная коррозия (рис. 2.2, д) обусловлена разрушением одного из компонентов или одной из фаз гетерогенного сплава. К ней относят и *межкристаллитную коррозию*, при которой разрушение идет по границам зерен кристаллов. Особенно склонны к ней хромистые и хромоникелевые стали после их нагрева до 500—800 °С. В некоторых случаях разрушение может распространяться по кристаллам в глубь металла. Такой вид разрушений называется *транскристаллитной (внутрикристаллической) коррозией* (рис. 2.2, е).

Межкристаллитная коррозия — наиболее опасный вид коррозионных разрушений, поскольку в данном случае протекание ее часто невозможно контролировать по изменению массы или визуальными наблюдениями. Она приводит к значительному снижению прочности образца или детали. Склонность к данному виду коррозии падает при уменьшении содержания углерода. Если его содержится не более 0,01 %, то межкристаллитная коррозия не наблюдается.

Щелевая коррозия — разновидность электрохимической коррозии. Она обусловлена неравномерным обтеканием средой различных участков поверхности аппарата. В щелях, зазо-

рах и застойных зонах, куда затруднен доступ раствору, концентрация кислорода в нем значительно меньше, чем в объеме раствора, и металл данных участков становится анодом, а металл участков, омываемых потоком раствора, катодом.

2.4. КОРРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Коррозионная устойчивость металлов и сплавов оценивается по скорости и глубинному показателю коррозии.

Скорость коррозии — это количество металла, разрушаемого в единицу времени (час, сутки) с единицы геометрической поверхности металла (м^2):

$$K = \frac{\Delta m}{F\tau}, \quad \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

Глубинный показатель коррозии (проницаемость) — величина, характеризующая уменьшение толщины металла (мм) в течение года вследствие коррозии. Данный показатель относится к равномерной или пятнистой коррозии.

Глубинный показатель Π (мм/год) и скорость коррозии K связаны следующим отношением:

$$\Pi = \frac{K8760}{\rho 1000} = 8,76 \frac{K}{\rho},$$

где ρ — плотность металла, $\text{г}/\text{см}^3$.

При местной коррозии фактическая глубина разрушения металла будет выше расчетной, так как в этом случае пло-

Табл. 2.1. Коррозионная устойчивость металлов по ГОСТ 13819—68

Балл стойкости	Группа стойкости	Проницаемость (скорость коррозии) Π , мм/год
1	совершенно стойкие	менее 0,001
2		0,001—0,005
3	весьма стойкие	0,005—0,01
4		0,01—0,05
5	стойкие	0,05—0,1
6		0,1—0,5
7	пониженно стойкие	0,5—1,0
8		1,0—5,0
9	малостойкие	5,0—10,0
10	нестойкие	более 10

щадь, пораженная коррозией, меньше общей площади, соприкасающейся со средой.

По ГОСТ 13819—68 материалы по их коррозионной устойчивости делятся на шесть групп и оцениваются по десятибалльной шкале в зависимости от глубинного показателя коррозии (табл. 2.1).

Материалы, используемые для изготовления химической аппаратуры, должны обладать баллом стойкости не более 5, а скорость коррозии не должна превышать 0,1 мм/год. Для неотчетственных деталей (перегородки, мешалки и т. д.) допускается применение материалов с баллом стойкости, равным 6 (P до 0,5 мм/год).

Глава 3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Химическая аппаратура часто эксплуатируется в тяжелых условиях: при повышенных температурах и давлениях, в агрессивной среде. Для обеспечения достаточного срока службы оборудования выбор материала носит первостепенное значение. Ввиду большого разнообразия условий эксплуатации в химическом машиностроении используется большое число сталей и сплавов различного состава. В качестве защитных и конструкционных материалов широкое применение находят неорганические и полимерные материалы [4—9].

3.1. МАРКИРОВКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Для обозначения марок легированных сплавов по ГОСТ принята буквенно-цифровая система. Буквы соответствуют легирующим элементам:

Элемент	Ni	Cr	Mo	W	V	Si	Mn	Cu	Ti	Al
Обозначение	Н	Х	М	В	Ф	С	Г	Д	Т	Ю

Первые две цифры, стоящие перед буквами, обозначают содержание углерода в сотых долях процента, а цифры, стоящие после букв, — содержание данного элемента в процентах. Если в сплаве находится менее 2 % легирующего элемента, то содержание его не указывается. Так, в сталь 12Х18Н10Т входит: С — 0,12; Cr — 18; Ni — 10 и Ti — менее 2. К сталям принято относить сплавы с массовым содержанием железа не менее 45 %.

Примерные области применения некоторых сталей приведены в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Примерные области использования сталей

Марка/стали	Область применения	
	Производство	Изготавливаемое оборудование, детали
Стали углеродистые Ст3, Ст5 (ГОСТ 380—71)	серной кислоты	корпуса башен, сборников, хранилищ, печей; холодильники, трубопроводы, насосы; транспортеры колчедана и огарка
	едкого натра	гаситель-каустификатор, отстойники, выпарные аппараты
	фосфорной кислоты	корпуса экстрактора, хранилищ, испарителя абсорбционных башен; бункера, транспортеры
	простого и двойного суперфосфата	корпуса камеры, смесителя, циклонов, абсорбционных башен; бункера, транспортеры
	хлорида калия	бункера, отстойники, флотомашин; транспортеры, кристаллизаторы, вакуум-конденсаторы, грохоты, циклоны, растворители, сушилки
Стали качественные 08—60 (ГОСТ 1050—74)	серной кислоты	трубы, фланцы, крепежные изделия; теплообменные устройства печи КС и котла-утилизатора
	удобрений и солей	корпуса сушильных барабанов, вращающихся печей и холодильников, грануляторов; валы перемешивающих устройств; трубы, фланцы, компенсаторы, выпарные аппараты, трубные решетки
	реактивов	корпуса эмалированных аппаратов
	синтез газа, аммиака, метанола	детали компрессоров; трубы, запорная арматура, крепежные изделия
Стали низколегированные 09Г2С, 14Г2, 10Г2С1Д (ГОСТ 19281—73)	синтез газа, аммиака, метанола	кованые и рудонированные корпуса, крышки и днища аппаратов высокого давления; подогреватели, теплообменники; детали котлов-утилизаторов; трубы, арматура, фланцы, крепежные изделия
	синтез газа, аммиака, метанола, паросиловые установки и котлы-утилизаторы	трубы, трубные решетки, обечайки, днища, крышки, смеевники и теплообменных устройств; фланцы, штуцера, арматура трубопроводов; крепежные изделия; тройники; компенсаторы
Стали легированные 15Х, 30ХРА, 50Г2, 40ХФА, 20НМ (ГОСТ 4543—71); 25Х1МФ, 20Х1М1Ф1БР (ГОСТ 20072—74)	хлорида калия	валы шнековых растворителей, элеваторов; детали насосов

Марка стали	Область применения	
	Производство	Изготавливаемое оборудование, детали
Стали высоколегированные 08X17H5M3	серной кислоты	насосы, холодильники пластинчатые
08X22H6T 10X17H13M2T 15X18H12C4TЮ 04X18H10 06XH28MDT	фосфорной кислоты аммиака	насосы, мешалки, трубы, арматура, фильтры, теплообменники трубы для пиролиза метана; трубопроводы горячих газов; арматура; детали насадки колони синтеза
03X21H21M4ГБ (ГОСТ 5632—72)	азотной кислоты	теплообменная аппаратура, контактный аппарат, абсорбционная колонна, трубопроводы, арматура, детали турбокомпрессоров; котел-утилизатор
08X18H10T 10X23H18 20X23H13 (ГОСТ 5232—72)	карбамида аммиачной селитры	футеровка колонн синтеза; штуцера, трубопроводы плава, смесители, колонны дистилляци, абсорбции, выпарные аппараты подогреватели, реакторы, выпарные аппараты, насосы, детали грануляционной башни и холодильника КС
	фосфорных и бариевых солей	реакторы, фильтры, центрифуги, насосы, выпарные аппараты, трубопроводы, мешалки, фильтр-прессы, сушилки
	хлорида калия	мешалки, элеваторы растворителей, подогреватели, детали сушилок, вакуум-фильтры, центрифуги

3.2. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Металлы и сплавы являются основными конструкционными материалами химического машиностроения, поэтому необходимо рассмотреть основные области их применения.

Сплавы на железной основе. Чугун — сплав железа с углеродом, содержащий свыше 2 % углерода. Кроме указанных компонентов, в состав чугуна входит 0,5—4,5 % кремния, до 1,2 % марганца, не более 0,2 % фосфора и до 0,1 % серы. Фос-

фор и сера являются вредными примесями, поэтому их содержание в сплаве ограничивается.

Чугуны обладают удовлетворительной коррозионной устойчивостью и нередко используются для изготовления химической аппаратуры, работающей с температурой стенки — 15 + 250 °С; при диаметре 1000 мм допускается максимальное давление — 0,6 МПа. В целях повышения прочности и коррозионной устойчивости выпускают легированные чугуны.

Из щелочестойких чугунов (СЧЩ) изготавливают котлы, предназначенные для концентрирования растворов щелочей, упарку которых осуществляют при температурах до 350 °С. При этом скорость коррозии чугуна достигает 2,5—5,0 мм/год.

Высокохромистые чугуны (например, Х28Л) обладают повышенной жаростойкостью и жаропрочностью, их можно применять при температурах до 500 °С.

Кремнистые чугуны характеризуются повышенной коррозионной устойчивостью в кислородных кислотах — серной и азотной. В то же время они недостаточно прочны, хрупки и растрескиваются при резких перепадах температур. Устойчивость их к соляной кислоте повышается при введении 3,5—4,0 % Мо (чугун С15МЧ, ГОСТ 2233—70). Этот чугун антихлор устойчив в растворах серной и соляной кислот любых концентраций и отличается высокой жаростойкостью, его используют при температурах до 900 °С. Высококремнистые чугуны не поддаются механической обработке, детали из них получают отливкой. Эти чугуны применяют для изготовления насосов, арматуры, труб, теплообменников и колонной аппаратуры. Необходимо учитывать, что данные чугуны неустойчивы в щелочных расплавах, растворах плавиковой кислоты и фтористых солей.

Углеродистые стали и конструкционные низколегированные стали удовлетворительно устойчивы в растворах серной кислоты при массовой концентрации свыше 65 % и температуре не более 40 °С. В азотной кислоте они устойчивы в интервале концентрации 80—96 % благодаря образованию защитной окисной пленки, которая при более высоких концентрациях разрушается. Указанные материалы обладают удовлетворительной коррозионной устойчивостью в растворах едкого натра при температурах до 100 °С и массовой концентрации до 30 %.

Коррозионная устойчивость значительно повышается при легировании сталей никелем, хромом, молибденом и другими металлами.

Высоколегированные стали хорошо устойчивы во многих агрессивных средах — азотной, серной, фосфорной и других кислотах, однако они заметно разрушаются в слабых растворах кислот при наличии растворенных солей и кислорода.

В то же время такие стали отличаются повышенной жаростойкостью и могут применяться при высоких температурах.

Никель и его сплавы. Никель обладает хорошими механическими свойствами и высокой коррозионной устойчивостью в ряде агрессивных сред. Однако примеси углерода, серы, свинца, висмута, цинка и растворенные газы снижают его механические свойства и коррозионную устойчивость. В химическом машиностроении чистый никель используют редко вследствие его дефицитности и дороговизны. Никель марок НП2 (99,5 % Ni) и НПЗ (99,3 % Ni) применяют для облицовки аппаратуры из углеродистых сталей.

На воздухе и в среде водяного пара никель можно использовать до 450 °С; при более высоких температурах его механические свойства снижаются. В расплавах щелочей никель можно применять до 500 °С. Он достаточно устойчив в серной кислоте, в растворах органических кислот и солей, однако неустойчив в азотной кислоте, в соляной при ее концентрации более 10 %, в растворах хлоридов железа, меди и хроматов.

Более высокой коррозионной устойчивостью обладают сплавы никеля с медью (монель), молибденом (хастеллой) и хромом (инконель). Эти сплавы устойчивы в растворах H_2SO_4 , H_3PO_4 , HF при комнатной температуре. Хорошей устойчивостью в слабых растворах кислот обладают никель-молибденовые сплавы, например Н65М30Л, который содержит 0,01 % С, 0,55 % Mn, 65,47 % Ni, 29,21 % Mo, 4,73 % Fe.

Свинец. Это легкоплавкий металл ($t_{пл}$ 327 °С), обладающий низкой прочностью, высокой пластичностью и плотностью, что затрудняет его использование как конструкционного материала. В химическом машиностроении применяется свинец марки С2, содержащий 99,95 % Pb и незначительное количество примесей Cu, As, Sb, Sn, Zn, Fe и других металлов. Из свинца изготавливают трубы, роли (листовой свинец) и другой прокат.

Свинцовые трубы используются для изготовления теплообменников, а рольный свинец — для аппаратуры на стальных каркасах и для защиты внутренней поверхности стальных аппаратов от коррозии листами толщиной 2—5 мм. Гомогенное освинцовывание заключается в наплавлении свинца толщиной 4—6 мм по луженой поверхности углеродистой стали.

Свинец отличается повышенной коррозионной устойчивостью в слабых растворах кислот. В серной кислоте на поверхности свинца образуется слой сульфата, защищающий от разрушения. Однако при концентрации кислоты более 80 % скорость коррозии свинца возрастает. Свинец устойчив в растворах фосфорной, плавиковой и хромистой кислот при комнатной температуре. В атмосфере сухих и влажных газов (хлор, сероводород, сернистый газ) он устойчив при темпе-

ратуре до 100 °С, но разрушается фторидом водорода, оксидами азота и азотной кислотой.

Для повышения механической прочности свинца в него вводят 4—12 % сурьмы. Этот сплав (гартблей) применяют для изготовления арматуры и насосов. Он хорошо устойчив в соляной кислоте. Так, в 10 % HCl при 100 °С скорость коррозии составляет 0,2 мм/год, тогда как чистый свинец разрушается со скоростью более 4 мм/год.

Алюминий и его сплавы. Алюминий отличается низкой плотностью ($\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$), высокой пластичностью и теплопроводностью, но низкой прочностью при растяжении. Для него характерна высокая коррозионная устойчивость в атмосферных условиях благодаря защитному действию плотной окисной пленки. Коррозионная стойкость алюминия повышается с уменьшением содержания примесей. Аппараты и сосуды из алюминия допускаются к работе при давлении не выше 600 КПа (6 кг/см²) и температуре среды не более 70 °С. При отсутствии давления максимальная температура его применения 150 °С.

Силумины (сплавы алюминия с кремнием), содержащие 9—13 % Si, весьма устойчивы в различных средах. Особенно высокой стойкостью к действию азотной кислоты отличаются силумины СИЛ-1 и СИЛ-2, содержащие 10—13 % Si.

Прочность и пластичность алюминия и его сплавов сохраняется при низких температурах, поэтому ряд сплавов алюминия используется для изготовления аппаратуры, работающей при низких температурах — до 77 °К.

Титан. Находит все более широкое применение для изготовления химической аппаратуры благодаря высокой механической прочности и коррозионной устойчивости в некоторых средах. Максимальная температура его применения — 350 °С, дальнейшее повышение температуры приводит к резкому снижению прочности.

Титан хорошо устойчив в морской воде, в растворах многих хлоридов, в атмосфере влажного хлора и других галогенов и их соединений. В то же время он неустойчив в растворах азотной, серной, соляной, плавиковой и фосфорной кислот.

В концентрированной азотной кислоте, содержащей растворенные оксиды азота, в сухом хлоре и броме титан воспламеняется. Высокой коррозионной устойчивостью обладают сплавы титана с танталом и молибденом.

Титан чаще всего применяется для футеровки аппаратуры, выполненной из углеродистой стали. Широкое распространение получил сплав ВТ1, содержащий не более 0,3 % Fe, 0,15 % Si, 0,1 % С и 0,215 % других элементов, остальное — титан.

3.3 НЕОРГАНИЧЕСКИЕ КОРРОЗИОННОУСТОЙЧИВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Неорганические коррозионноустойчивые материалы широко используются в химической промышленности для защиты аппаратуры. Во многих случаях они успешно заменяют дефицитные и дорогие высоколегированные стали и сплавы, обеспечивая в то же время долговечность службы аппаратуры и надежность ее работы. Эти материалы обладают рядом специфических свойств; а) низкой механической прочностью на растяжение и довольно высокой на сжатие; б) низкой теплопроводностью; в) значительно меньшим температурным коэффициентом линейного расширения по сравнению с металлами; г) высокой теплостойкостью.

В промышленности находят применение как материалы естественного происхождения (асбест, андезит, бештаунит, диабаз, базальт), так и искусственные (огнеупорный кирпич, стекло, керамика и вяжущие силикатные материалы).

Андезит и бештаунит — горные породы вулканического происхождения, промышленные месторождения их имеются на Кавказе. Как и большинство силикатов, они неустойчивы к плавиковой кислоте.

Эти материалы применяют для футеровки аппаратуры, работающей в тяжелых условиях. Реже их используют как конструкционные материалы для изготовления корпусов башен, электрофильтров и колосниковых устройств абсорбционных аппаратов. Андезит и бештаунит применяют в виде щебня и муки в качестве наполнителей в кислотоупорных бетонах и замазках.

Асбест — природный минерал волокнистого строения. Он содержит 41,5—58 % SiO_2 ; 29—40 % MgO ; 2—10 % FeO и Fe_2O_3 , 1,7—12,5 % H_2O . Встречаются два вида асбеста — антофиллит и хризотил.

Антофиллит относится к кислотостойким материалам (кислотостойкость 87,0—88,5 %), его можно применять при температуре 600—800 °С. Хризотил в кислотах неустойчив, он является щелочестойким материалом, применять его можно до температуры 400 °С.

Асбест используется в виде картона, шнура и ткани как изолирующий и прокладочный материал, а также в различных коррозионноустойчивых композициях в качестве наполнителя на основе органических смол.

Диабаз и базальт — горные породы, которые применяют главным образом для изготовления различных деталей путем литья после расплавления их в печах при 1400—1500 °С. Каменное литье обычно содержит 47—48 % SiO_2 , 15—16 % Al_2O_3 , 11—12 % FeO и Fe_2O_3 , 6—7 % CaO и 2—4 % K_2O . Оно отли-

чается высокой прочностью (предел прочности на сжатие — 250, на изгиб — 47 МПа), износостойкостью и кислотостойкостью (99,3 %) во всех кислотах, за исключением плавиковой. Из каменного литья изготавливают футеровочную плитку размерами $180 \times 115 \times 18$ мм и плиты размерами $235 \times 360 \times 30$ мм, трубы диаметром 200—400 мм и фасонные детали для трубопроводов (патрубки, штуцера, тройники и т. д.). Кроме того, из него получают порошок, который используют в качестве наполнителя кислотоупорных замазок.

Кислотоупорную керамику получают при обжиге специальных глин с добавками песка и полевого шпата. Она содержит 50—75 % SiO_2 , 20—40 % Al_2O_3 , 0,4—2,2 % MgO и CaO , 0,5—3,0 % Na_2O и K_2O , 0,3—1,6 % Fe_2O_3 . Керамика обладает большой прочностью, газонепроницаемостью и стойкостью к действию минеральных и органических кислот. Однако она неустойчива к действию плавиковой кислоты, щелочей, а при высоких температурах разрушается фосфорной кислотой. Из кислотоупорной керамики изготавливают кирпич, плитку и трубы.

Вязущие материалы служат для плотного и прочного соединения (склеивания) защищаемой поверхности со штучными или листовыми материалами защитного покрытия. При многослойном покрытии они обеспечивают соединение слоев и отдельных штучных материалов (плитки, кирпичи), связывая их в единое целое.

Вязущие материалы для защитных покрытий должны обладать высокой стойкостью к агрессивной среде и пластичностью во время укладки.

При изготовлении футеровки из неорганических материалов широко используют замазки на основе жидкого стекла. *Калиевое жидкое стекло* обеспечивает большую пластичность и более высокую химическую устойчивость замазки, чем натриевое. В состав замазки входит калиевое стекло с модулем (отношение $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2(\text{K}_2)\text{O}$), равным 2,6—2,9 (27—40 в. ч.), кислотостойкий порошкообразный наполнитель (кварцевый песок, андезитовая или диабазовая мука — 100 в. ч.) и кремнефторид натрия (4—15 в. ч.), вводимый для ускорения твердения. Замазка схватывается через 40—60 минут и затвердевает через 6—8 часов. Ее кислотостойкость составляет 92—96 %.

Для приготовления замазок и кислотостойких футеровок выпускают цемент кислотоупорный кварцевый кремнефтористый, который, согласно ГОСТ 5050—69, содержит $4 \pm 0,5$ % (I тип) или $8 \pm 0,5$ % (II тип) Na_2SiF_6 , остальное — кварцевый песок.

Кислотостойкий и жароупорный бетон изготавливают на жидком стекле с кислотостойкими и огнеупорными наполните-

лями в виде муки, песка и щебня с добавкой кремнефторида натрия. Величина частиц наполнителя (кислотостойкостью не ниже 96 %) изменяется в пределах 1—40 мм, расход до 1500 кг на 1 м³ бетона.

Для получения жароупорного кислотостойкого бетона в качестве наполнителя используют шамот, хромит или магнезит; такой бетон может применяться при температуре 900—1200 °С.

3.4. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОРГАНИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

В химической промышленности широко используют органические материалы на основе полимеризационных и поликонденсационных смол, битумов и пеков, резины (пластмассы, лаки, клей), а также каучук и графит. Механические свойства и коррозионная устойчивость этих материалов изменяется в широких пределах, особенностью их являются низкая теплоустойчивость и малая устойчивость в среде сильных окислителей.

Широкое применение в качестве защитных и конструктивных материалов нашли графит и углеграфитовые композиции благодаря устойчивости во многих коррозионноактивных средах, хорошей теплопроводности и термостойкости, достаточной прочности. Недостаток этих материалов — высокая пористость (до 35 %) и сильное окисление при температурах выше 550 °С.

Углеграфитовые материалы используются в виде блоков и плит, которые пропитываются смолами или металлами для снижения пористости, а также в виде порошков в композициях на основе искусственных смол. Для изготовления химической аппаратуры применяют мелкозернистый графит (марки ЗХП или АРВ), который пропитывают фенолформальдегидной, фуриловофенольной или полиэфирной смолой. Теплопроводность пропитанных графитов составляет 80—100 Вт/м·град, разрушающее напряжение при растяжении — 12,5—20 МПа, при сжатии 70—100 МПа, максимальная температура применения 150 °С.

Графитопласти (антегмиты) — коррозионноустойчивые теплопроводные материалы, полученные прессованием графитового порошка с фенолформальдегидной смолой с последующей термообработкой. Марки АТМ-1, АТМ-10 и АТМ-1Г используют для изготовления плиток, труб и других изделий. Они устойчивы к действию большинства минеральных кислот до температуры 110—130 °С, за исключением сильных окислителей.

Замзка арамзит применяется для футеровки химической аппаратуры и разделки наружных швов при футеровке силикатными материалами. Связующим в этой замзке является

фенолформальдегидная смола, а наполнителем — графитовый порошок (арамзит 4—7) или кварцевая мука (арамзит 1). Замазки арамзит 1 и арамзит 4 устойчивы в кислотах, арамзит 5 и арамзит 7 в кислотах и щелочах, арамзит 6 термостоек, его применяют до 250 °С. Замазки арамзит 4 и арамзит 5 обладают хорошей теплопроводностью (21—23 Вт/м·град). Замазки изготовляют также на основе фууролацетонового мономера, эпоксидных и полиэфирных смол.

Полиизобутилен — термопластичный полимер. Выпускается в виде листов 800×1800 — 3000 мм толщиной 2,5 и 4 мм. В химической промышленности используется полиизобутилен марки ПСГ, наполненный сажей и графитом. Максимальная температура применения 90 °С.

Полиизобутилен употребляют чаще всего в качестве непроницаемого подслоя при многослойной футеровке аппаратуры. Он устойчив в 50 %-ной HNO_3 до 50 °С, в 30 %-ной H_2SiF_6 до 60°, в 40 %-ной HF до 60°, в 96 %-ной H_2SO_4 до 20°, в 30 %-ной HCl до 80°, в 80 %-ной H_3PO_4 до 100°, в большинстве растворов солей щелочных металлов до 100 °С. В то же время этот полимер неустойчив в олеуме, хромовой кислоте, жидком аммиаке, в атмосфере хлора и оксидов азота.

Резина и эбонит находят широкое применение для защиты аппаратуры от коррозии методом гуммирования. Их получают на основе натурального или синтетического каучука, в сыром виде они представляют собой механическую смесь каучука, серы, наполнителя и различных добавок. Мягкие резины содержат 2—4 в. ч., а эбониты 30—60 в. ч. серы. Различные сорта резин отличаются по химической стойкости, максимальная температура их применения 70—90 °С. Все резины и эбониты малоустойчивы в среде сильных окислителей.

Винипласт (поливинилхлорид) представляет собой термопластичный материал, устойчивый ко многим химическим веществам при температурах до 60 °С, за исключением сильных окислителей. Выпускается в виде листов, труб и стержней. Используется для футеровки аппаратуры и как коррозионноустойчивый конструкционный материал.

Винипласт легко обрабатывается и сваривается, обладает удовлетворительной механической прочностью, но склонен к ползучести. Разрушающее напряжение при растяжении — 40 МПа, а допускаемое при сроке службы 50 000 часов и температуре 60 °С составляет только 1,9 МПа. Он устойчив при 40 °С в азотной кислоте при концентрации ниже 50 %, в органических кислотах, 32 %-ной H_2SiF_6 , 40 %-ных HF , H_2SO_4 и NaOH , но неустойчив в этих средах при повышении температуры до 60—70 °С, а также в ацетоне, бензоле, винилацетате, жидком бrome, жидком аммиаке, олеуме, концентрированной

серной и азотной кислотах, в атмосфере хлора и окислов азота.

Фторопласты — фторсодержащие полимерные материалы этиленового ряда. Широкое применение получил фторопласт-4 (тефлон или политетрафторэтилен), который выпускается трех марок — А, Б, В. Марка А используется для изготовления пленки, марка Б — для изготовления крупных, а марка В мелких изделий. Фторопласт-4 обладает очень высокой химической устойчивостью в любых средах и высокой термостойкостью; его недостаток — склонность к ползучести и высокая стоимость.

Основные свойства фторопласта-4: температура применения от -296 до $+260$ °С; разрушающее напряжение при растяжении составляет $14-31,5$ МПа, теплопроводность — $0,24$ Вт/м·град. Фторопласты не склеиваются и не свариваются. Из них изготавливаются трубы, трубопроводная арматура, пленки, плитки, блоки и прутки методом спекания под давлением. Фторопласты обладают низким коэффициентом трения, поэтому их с успехом применяют в качестве материала для набивки сальников. Для этой цели выпускается материал марки ФУМ. Кроме того, их используют как материал для прокладок в фланцевых соединениях и для футеровки аппаратуры, а в последнее время как конструкционный материал для изготовления теплообменников, работающих в коррозионно-активных средах.

3.5. КОРРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Нет материалов абсолютно устойчивых к любым средам и при любых условиях, поэтому правильный выбор материала определяет долговечность и надежность работы аппарата, узла или машины. Скорость коррозии того или иного материала, а следовательно, и его устойчивость, зависят от температуры, состава и концентрации раствора.

На рис. 3.1 показаны области применения различных материалов в растворах едкого натра. Балл стойкости для рекомендуемых материалов, как правило, не ниже 6, а глубинный показатель коррозии не превышает $0,5$ мм/год. Однако при температуре выше 150 °С и концентрации щелочного раствора более 55% проникаемость для чугуна СЧЦ достигает 4 мм/год, что считается допустимым. При любых температурах и любой концентрации щелочи наиболее устойчивы никель, цирконий, сталь Х18Н10Т, а из полимерных материалов — фторопласт (до 150 °С). Применение таких материалов, как углеродистые стали, медь, винипласт, полиэтилен и рези-

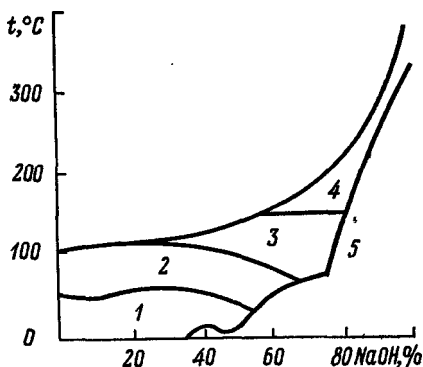


Рис 3.1. Области применения материалов в растворах едкого натра:

1 — чугун, углеродистые стали, 12Х18Н9Т, Ni, Cu, винилпласт, полиэтилен, резина; 2 — СЧЦ, 08Х18Н10Т, Ni, хастеллой, Н7ОМ27, Zr, фторопласт; 3 — СЧЦ, 08Х18Н10Т; 4 — СЧЦ, Ni, Ag, Pt, Zr; 5 — СЧЦ, 08Х18Н10Т, Ni, Н7ОМ27, Ag, фторопласт (до 150°С).

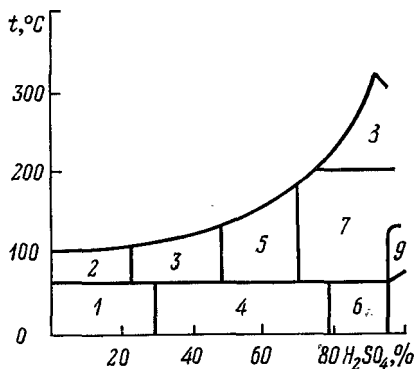


Рис. 3.2. Области применения материалов в растворах серной кислоты:

1 — чугун, Cu, Al, Pb, ферросилид, хастеллой, 06Х23Н28М3Д3Т, винилпласт, полиэтилен, резина, антегмит, керамика; 2 — ферросилид, Pb, Cu, хастеллой, фторопласт, фаолит, антегмит, стекло; 3 — ферросилид, хастеллой, Pb, Н65М30Л, фторопласт, графит, антегмит; 4 — ферросилид, Cu, Pb, Н65М30Л, хастеллой, фторопласт, фаолит, антегмит, керамика; 5 — ферросилид, Pb (до 80°С), фторопласт, фаолит (до 100°С), антегмит, керамика, диабаз; 6 — чугун, углеродистая сталь, стекло, диабаз, фторопласт, графит; 7 — Та, Pt, фторопласт (до 150°С), стекло, диабаз; 8 — Та, фарфор, диабаз; 9 — Та, 14Х21Н5Т, 08Х21Н6М2Т, 12Х18Н9Т.

на, ограничено температурой 60°С и концентрацией NaOH не более 55 %.

В сернокислотных растворах наиболее устойчивы ферросилид и неорганические материалы — керамика, стекло, фарфор, диабаз (рис. 3.2), при температурах выше 200°С — тантал. Свинец можно применять в относительно разбавленных растворах H₂SO₄ (до 75 %) и при температуре не выше 80°С. Углеродистые стали достаточно устойчивы при 75—98 %-ной H₂SO₄ и температурах до 60°С, в связи с чем они нередко используются в качестве материала для теплообменной аппаратуры. Фаолит и антегмит можно применять при температурах среды до 100°С, они более устойчивы в растворах серной кислоты, чем углеродистые стали.

В производствах фосфорных удобрений в качестве побочного продукта получают 1—15 %-ную H₂SiF₆, обладающую высокой коррозионной активностью. Углеродистые, низколегированные стали в этой кислоте сильно корродируют; при температурах до 60°С можно применять сталь 06Х23Н28М3Д3Т (П ~ 0,6 мм/год), а также такие материалы, как винилпласт, резину, антегмит, полиэтилен. В области более высоких температур (до 100°С) устойчивы никель, никельмолибденовые сплавы, монель и фторопласт.

3.6. СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ОТ КОРРОЗИИ

Наиболее надежным методом защиты металлов и сплавов от коррозионного воздействия среды является применение материалов, устойчивых в данных условиях. При выборе материала необходимо учитывать не только его коррозионную стойкость, но и стоимость, а также доступность. Легированные стали с повышенной коррозионной устойчивостью в 4—20 раз дороже углеродистых. Еще выше стоимость таких материалов, как титановые сплавы, никель и фторопласт. Применение очень дорогих материалов может привести к резкому увеличению стоимости оборудования, а следовательно, и к росту себестоимости продукции. В то же время во многих случаях нет необходимости в использовании дорогостоящих и дефицитных материалов; аппаратура, трубопроводы могут быть изготовлены из дешевой углеродистой стали и защищены от коррозии различными покрытиями [5].

Двухслойные стали. Коррозионностойкая аппаратура может быть изготовлена из двухслойной металла: внутренний слой, соприкасающийся с разрушающей средой, — из металла или сплава, устойчивого в данной среде, а наружный, несущий механическую нагрузку, — из углеродистых или конструкционных сталей. Использование биметалла позволяет снизить расход дорогостоящих легированных сталей и уменьшить стоимость аппаратуры.

По ГОСТ 10885—75 защитный слой изготавливается из различных коррозионностойких металлов и сплавов, его толщина изменяется в пределах 1—20 мм, а общая толщина составляет 4—160 мм. Стоимость двухслойной стали примерно в 1,5—4 раза меньше, чем легированной той же толщины (табл. 3.2). Особенно большой эффект дает использование биметалла для изготовления толстостенной аппаратуры высокого давления.

Защитные покрытия. Основной материал корпуса, несущий механическую нагрузку, может быть защищен от воздействия агрессивной среды следующими методами: нанесением пленки или сравнительно толстого слоя коррозионно-устойчивого материала, покрытием поверхности листами химически стойкого материала и обкладкой защищаемой поверхности футеровкой из штучных химически стойких изделий (плитка, кирпичи или блоки) на химически устойчивом вяжущем. Защитное покрытие должно обладать высокой стойкостью к агрессивной среде, непроницаемостью, устойчивостью к механическому и абразивному износу и к температурным напряжениям, возникающим из-за различных коэффициентов температурного расширения материала корпу-

Табл. 3.2. Стоимость различных материалов по состоянию на 1.01.70 г., руб./т

Материал	Лист 4—8 мм	Трубы 38×2 мм цельнонатянутые
Углеродистая сталь ВМСтЗкп	98	—
Хромистая 0Х17Т	380	1 050
Нержавеющая 10Х21Н5Т	557	1 485
12Х18Н10Т	728	1 690
08Х18Н10Т	803	1 810
06Х23Н28МЗДЗТ	2 020	—
Двухслойная ВМСтЗсп+Х18Н10Т	475	—
Алюминий АД00	1 180	1 720; 38×2,5
Медь МЗ	1 210	1 240; 38×1,5
Никель НП2	4 720	5 600; 25×3,5
Свинец С2	755	—
Титан ВТ1-0	6 300	10 400; 35×2
Фаолит А	1 400	—
Винипласт ВН	900	—
Фторопласт-4	10 500	—

са и футеровки, а также из-за наличия градиента температур в покрытии.

Пленочные покрытия из органических (лаки, краски, полимеры, битумы и каучуки), и неорганических материалов применяются для защиты от парогазовых сред, в том числе и от атмосферной коррозии. Они наносятся различными способами:

- а) многослойной окраской лаками, красками или битумами с сушкой каждого слоя;
- б) гуммированием защищаемой поверхности из раствора каучука с последующей вулканизацией;
- в) газопламенным или вихревым напылением порошкообразных полимерных материалов;
- г) многократным напылением эмульсии из полимерных материалов с последующей сушкой и спеканием;
- д) нанесением шихты из порошкообразного материала с последующим спеканием в стекловидное покрытие.

Пленочные покрытия обладают низкой механической прочностью (толщина их 0,1—0,5 мм) и их нельзя использовать при наличии в реакционной массе абразивных частиц. Недостатком таких покрытий, кроме эмалей, является низкая допустимая температура среды.

Усиленное защитное покрытие выполняется из терморезистивных пластмасс (фаолит и асбовинил) или из кислотостой-

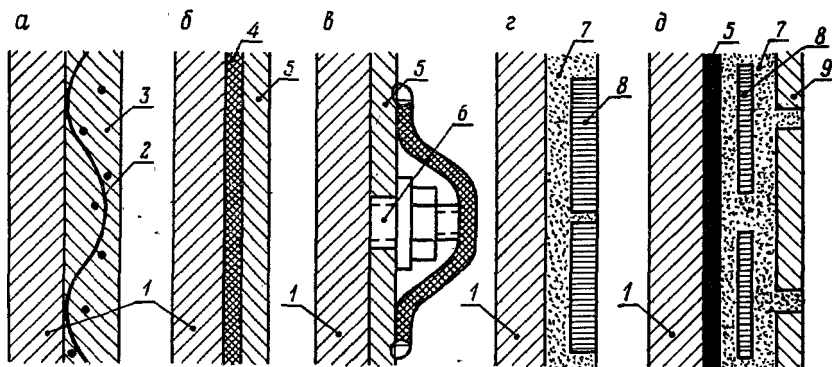


Рис. 3.3. Схемы защитных покрытий:

1 — стальная стенка защищаемого аппарата; 2 — металлическая сетка; 3 — защитный слой (обмазка); 4 — слой клея; 5 — листовый защитный материал; 6 — болты для крепления листового материала; 7 — кислотоупорный вязнущий материал; 8 — плитка; 9 — кислотоупорный кирпич.

ких замазок, которые при последующей термообработке или выдержке переходят в твердое состояние. Толщина покрытия составляет 10—25 мм. Для увеличения механической прочности покрытия в сырую массу вводят металлическую сетку, приваренную к защищаемой поверхности точечной электро-сваркой (рис. 3.3, а).

Покрытия на основе органических материалов можно применять при температуре среды до 120°, а из силикатных материалов при 300 °С и выше. Такой вид покрытия используют для защиты трубопроводов, арматуры, мешалок, газосборников и крышек аппаратов.

Листовое покрытие выполняется из листовых полимерных материалов, сырой или вулканизированной резины, которые крепятся к защищаемой поверхности клеем либо специальными болтами. Толщина покрытия составляет 3—6 мм.

Наибольшее распространение получили покрытия из резины, которые рекомендуется использовать при температуре среды до 70 °С. Раскроенные листы сырой или вулканизированной резины приклеиваются к очищенной и обезжиренной поверхности металла клеем, содержащим в своем составе каучук (рис. 3.3, б). При использовании сырой резины необходима последующая вулканизация. Полимерные материалы обычно сваривают по швам для обеспечения герметичности. Такие полимерные материалы, как полиэтилен, полипропилен, плохо приклеиваются из-за неполярности, и поэтому крепятся с помощью болтов (рис. 3.3, в), которые защищают от коррозии накладками из того же материала, приваренными к основному слою.

Данный метод покрытия обладает следующими достоинствами: возможностью применения готовых материалов, выпускаемых промышленностью, и несложной технологией выполнения защитного покрытия. К недостаткам его относятся невозможность защиты деталей сложной конфигурации, слабая механическая прочность соединения защитного материала с металлом.

Футеровка аппаратуры *штучными кислотоупорными изделиями* находит все более широкое применение в промышленности, особенно при высокой агрессивности среды. На защищаемую поверхность укладывают штучные кислотоупорные изделия (плитка, блоки, кирпичи), которые соединяются кислотоупорными вяжущими химически стойкими замазками. Штучные изделия изготовляют из природных (диабаз, бештаунит, базальт) или искусственных (керамика, стекло, фарфор) материалов и графита, пропитанного полимерами. Футеровки могут быть однослойными (рис. 3.3, *г*), многослойными и комбинированными (рис. 3.3, *д*). Толщина футеровки может изменяться от 50 до 500 мм.

Однослойную футеровку применяют для защиты аппаратов и газопроводов, работающих с парагазовыми средами, а также полов и фундаментов в химических цехах. Многослойную и комбинированную футеровки используют для защиты аппаратуры при высокой агрессивности среды, высоких температурах, больших механических нагрузках и большом абразивном воздействии среды. Эти виды футеровок нашли применение для защиты промывных и абсорбционных башен, сборников и хранилищ в производстве серной кислоты, барботажных выпарных аппаратов для серной и фосфорной кислот, смесителей и камер в производстве простого и двойного суперфосфата.

Широкое распространение футеровок обусловлено высокой механической прочностью, высокой рабочей температурой (до 400 °С) и низкой стоимостью.

Глава 4. РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ

В химическом производстве широко используется стандартная и нормализованная аппаратура, которая может применяться в различных условиях. При этом значительные изменения технологического режима (давление, температура, состав и свойства рабочих сред) предопределяют необходимость проверочных расчетов наиболее ответственных деталей аппаратуры на прочность. Обычно такие расчеты выполняют для

обечайки, днища и крышки аппарата, элементов перемещающих устройств и уплотнений [7, 10—17].

Обозначения основных величин:

- α — угол полураствора конуса, корень частотного уравнения, основной тон
- α^t — коэффициент линейного расширения, 1/град
- β — коэффициент толстостенности
- ε — коэффициент динамичности
- η — коэффициент, учитывающий условия эксплуатации
- μ — коэффициент Пуассона
- $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³
- σ^* , σ_d — нормативное допускаемое напряжение и допускаемое напряжение, МПа
- σ_B^t , σ_C^t , σ_H^t — предел прочности материала соответственно при растяжении, сжатии и изгибе при температуре $t^\circ\text{C}$, МПа
- σ_T^t , $\sigma_{дл}^t$, $\sigma_{пл}^t$ — нижний предел текучести, длительной прочности и ползучести материала при температуре $t^\circ\text{C}$, МПа
- σ_ν , σ_t , σ_r , σ_z — меридиональное, кольцевое или тангенциальное, радиальное и осевое напряжения
- τ_d , $\tau_{ср}$ — допускаемое напряжение на кручение и срез, МПа
- φ_c — коэффициент уменьшения допускаемого напряжения при осевом сжатии
- $\varphi_{ш}$ — коэффициент прочности сварного шва
- φ_y — конструктивный коэффициент
- ω — частота вращения вала, рад/с
- ω_{01} — первая критическая скорость вращения вала, рад/с
- a — длина отбортовки днища, м
- b — ширина прокладки, ширина поперечного сечения кольца жесткости в зоне приварки, м
- C_k , C_ε , C_o , C_d — прибавки соответственно на коррозию, эрозию, округление размеров по технологическим и монтажным причинам, м
- D_n , $D_{ср n}$, D_n , D_p , D_y , D_6 — соответственно диаметр внутренний, средних по уплотняемой поверхности, наружный, расчетный, условного прохода и диаметр окружности центров шпилек, м
- d_n , d_m — диаметр отверстия и мешалки, м
- E^t — модуль продольной упругости материала при температуре $t^\circ\text{C}$, МПа
- F — площадь поперечного сечения, м²
- G_m , G_d — максимальная сила тяжести аппарата и допустимая сила тяжести на одну опору, МН
- g — ускорение силы тяжести, м/с²
- H — высота колонны, аппарата или детали, м

- $H_{ж}$ — высота столба жидкости в аппарате, м
 $h_{в}$ — внутренняя высота днища в его вершине, м
 I — момент инерции расчетного сечения, м⁴
 $K, K_{и}, K_{э}$ — конструктивные коэффициенты
 $K_{о}$ — коэффициент ослабления днища отверстиями
 K_N — критерий мощности
 L — длина вала или обечайки, м
 l — расстояние между кольцами жесткости по осям, м
 l' — расчетная длина обечайки, м
 $M_{и}, M_{кр}$ — изгибающий и крутящий моменты, Нм
 m — коэффициент пульсации скоростного напора
 $N_{м}$ — мощность привода, Вт
 $N_{с}$ — потеря мощности в сальниках, Вт
 n — коэффициент запаса прочности или устойчивости, скорость (частота) вращения, об/с
 $P, P_{д}, P_{пр}, P_{кр}, P_{н}, P_{с}$ — соответственно давление расчетное, допускаемое, пробное, критическое, наружное и рабочее, Па
 $Q_{д}$ — равнодействующая внутреннего давления, действующего на крышку, Н
 $N, N_{д}$ — расчетная и допускаемая осевая сжимающая сила, Н
 $R_{п}$ — реакция прокладки, Н
 S — толщина стенки обечайки, м
 q — удельная нагрузка затяжки прокладки, ветровой напор, Па
 t — температура, °С
 W — момент сопротивления расчетного сечения, м³
 z — число шпилек или болтов.

✓ 4.1. ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ДОПУСКАЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Выбор материала определенной детали или части аппарата обуславливается такими основными факторами, как рабочая температура, давление, коррозионное воздействие среды, способ защиты от коррозии, требуемая прочность и долговечность детали, доступность и стоимость различных материалов.

Прочность любого материала зависит от условий эксплуатации, т. е. от вида нагрузки (растяжение, сжатие, кручение и т. д.) и температуры. Допускаемое напряжение $\sigma_{д}$ (МПа) вычисляют по формуле

$$\sigma_{д} = \frac{\sigma_t^t}{n_t} \eta = \sigma^* \eta, \quad (4.1)$$

где σ_t^t — предел прочности для данного вида нагрузки при температуре t , МПа; n_t — коэффициент запаса прочности для

Табл. 4.1. Величины коэффициентов запаса прочности для основных конструкционных сталей в виде проката и поковок

Избыточное давление в аппарате	Запас прочности		
	n_B	n_T	$n_{дл}$
$< 0,5$ МПа (5 ати)	2,60	1,65	1,50
$\geq 0,5$ МПа (5 ати)		1,50	

данного вида нагрузки; σ^* — нормативное допускаемое напряжение, МПа; η — коэффициент, учитывающий условия эксплуатации детали или аппарата.

В зависимости от условий эксплуатации используют различные характеристики прочности — σ_B^t , σ_T^t , $\sigma_{дл}^t$, $\sigma_{пл}^t$, σ_c^t , σ_n^t .

Коэффициенты запаса прочности n_i зависят от вида материала и вида нагрузок (табл. 4.1). Для хрупких металлических материалов (бронза, чугун) n_i рекомендуется принимать равным 4—5.

Прочность любых материалов с повышением температуры уменьшается, поэтому учет влияния температуры на допускаемую прочность обязателен.

Рабочая температура — температура среды в аппарате при протекании в нем нормального или форсированного технологического процесса.

Расчетная температура стенки или другой внутренней детали аппарата при температуре среды в аппарате не менее 250 °С принимается равной максимально возможной в условиях работы температуре среды.

При обогревании стенки или трубы открытым пламенем, горячими газами с температурой 250 °С или выше либо открытыми электронагревателями расчетная температура t определяется по формуле

$$t = t_{cp} + 50^\circ,$$

где t_{cp} — температура горячей среды, °С.

При наличии изоляции, защищающей стенку или другую деталь от непосредственного контакта с греющим агентом, расчетная температура соответствует температуре поверхности изоляции, соприкасающейся с этой деталью. Температура поверхности изоляции находится теплотехническим расчетом.

Нормативное допускаемое напряжение (см. формулу (4.1)) принимается при расчетной температуре согласно табл. 4.2.

Более полные данные о зависимости прочности материалов от температуры даны в литературе [7].

Табл. 4.2. Зависимость нормативных допускаемых напряжений σ^* и модули продольной упругости E^t от температуры

Расчетная температура, °С	ВСт3пс (ГОСТ 380—71)		20К (ГОСТ 1050—74) σ^*	12Х18Н10Т; 10Х17Н13М2Т (ГОСТ 5632—72)		09Г2С (ГОСТ 19281—73) σ^*
	σ^*	$E^t \cdot 10^{-5}$		σ^*	$E^t \cdot 10^{-5}$	
20	140	1,99	147	160	2,00	170
100	134	1,91	142	152	2,00	160
150	131	1,86	139	146	1,99	154
200	126	1,81	136	140	1,97	148
250	120	1,76	132	136	1,94	145
300	108	1,71	119	130	1,91	134
350	98	1,64	106	126	1,86	123
375	93	—	98	124	—	116
400	85	1,55	92	121	1,81	105
420	75	—	80	120	—	92
450	—	1,40	61	117	1,75	71
500	—	—	—	113	1,68	—
560	—	—	—	101	1,61	—
600	—	—	—	74	1,53	—

Табл. 4.3. Выбор прочностной характеристики материала

Материал	Расчетная температура, °С	Предел прочности σ_i^t для расчета σ_d	
Углеродистая сталь	≤ 380	$\sigma_{в}^t$	$\sigma_{т}^t$
	> 380	$\sigma_{т}^t$	$\sigma_{дл}^t$
Низколегированная	≤ 420	$\sigma_{в}^t$	$\sigma_{т}^t$
	≥ 420	$\sigma_{т}^t$	$\sigma_{дл}^t$
Легированная аустенитного класса	≤ 525	$\sigma_{в}^t$	$\sigma_{т}^t$
	> 525	$\sigma_{т}^t$	$\sigma_{дл}^t$
Титан и его сплавы	любая	$\sigma_{в}^t$	$\sigma_{т}^t, \sigma_{дл}^t$

Из полученных значений допускаемого напряжения (например, по пределу прочности при растяжении $\sigma_{в}^t$ и нижнему пределу текучести $\sigma_{т}^t$) для расчетов берется меньшая величина (табл. 4.3).

При расчете деталей на кручение и срез допускаемые напряжения $\tau_{ср}$ и τ_d принимаются равными σ_d с коэффициентом 0,6. В расчетах на устойчивость формы используются такие характеристики материала, как модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Модуль продольной упругости E^t (МПа) характеризует жесткость материала и его способность противостоять деформации. Модуль упругости вычисляют по закону Гука:

$$E^t = \sigma / \epsilon,$$

где ϵ — относительная продольная деформация.

Значения нормативных допускаемых напряжений σ^* и модуля упругости E^t приведены в ГОСТ 14249—73.

Коэффициент Пуассона μ — безразмерная величина, характеризующая способность материала к поперечной деформации. Его значения для всех материалов изменяются в пределах $0 \leq \mu \leq 0,5$. Для многих сортов стали при упругих деформациях в среднем $\mu = 0,3$.

Поправочный коэффициент η , учитывающий условия эксплуатации аппарата, принимается равным 0,85—1,0. Так, при расчете аппаратов, предназначенных для обработки, хранения или транспортировки химических продуктов I категории опасности (токсичных — предельно допустимая концентрация (ПДК) менее 5 мг/м³, взрывоопасных — с нижним пределом взрываемости $C_{п.в}^H$ менее 1 %, пожароопасных — с минимальной температурой самовоспламенения $t_{св}^M$ менее 175 °С), поправочный коэффициент принимается равным 0,85, а для веществ II категории опасности (ПДК 5—50 мг/м³, $C_{п.в}^H$ 1—5 %, $t_{св}^M$ 175—300) — 0,9. В случае обогрева аппаратов открытым пламенем или открытыми электронагревателями коэффициент η принимают равным 0,9. При работе с веществами III категории опасности (ПДК 51—1000 мг/м³; $C_{п.в}^H$ 6—10 %, $t_{св}^M$ 301—450 °С) $\eta = 0,95$.

При расчете сосудов и аппаратов, устанавливаемых вне помещения, значения коэффициента η увеличивают на 0,05. Во всех остальных случаях данную величину принимают равной единице.

Коэффициент прочности сварного шва. Большая часть современных аппаратов и машин имеет сварные соединения, поэтому при расчете деталей, имеющих сварные швы, необходимо учитывать ослабление основного материала в зоне сварки. Коэффициент прочности сварного шва $\varphi_{ш}$ характеризует прочность соединения в сравнении с прочностью основного материала. Величина коэффициента $\varphi_{ш}$ зависит от вида материала, конструкции шва и способа сварки (табл. 4.4).

Табл. 4.4. Значение коэффициента прочности сварных швов

Вид сварки	Тип шва	Стали углеродистые и легированные	Титан и его сплавы	Винипласт
Автоматическая под слоем флюса	стыковой двусторонний	1,0	0,95	—
	стыковой односторонний	0,80	—	—
Ручная электродуговая	стыковой двусторонний	0,95	0,90	0,50
	стыковой односторонний	0,70	0,65	0,35

Прибавки к номинальным расчетным толщинам. Детали химической аппаратуры подвергаются действию агрессивных соединений и механическому воздействию абразивных частиц. В связи с этим к номинальной расчетной толщине детали дается прибавка C . Ее находят по уравнению

$$C = C_k + C_э + C_o + C_d, \quad (4.2)$$

где C_k — прибавка на коррозию, определяемая как произведение срока службы аппарата (10—15 лет) на проницаемость выбранного материала P , м; $C_э$ — прибавка на эрозию (принимается по опытным данным при скорости жидкости более 20 м/с, газов ≥ 100 м/с, а также при наличии в рабочей среде абразивных веществ, м; C_o — прибавка на округление размера, м; C_d — прибавка по технологическим, монтажным и другим соображениям, м.

Рабочее и расчетное давление. Давление — одна из важнейших величин, учитываемых при расчете на прочность деталей и узлов аппаратуры, которая работает под давлением, отличным от атмосферного.

Рабочее давление P_c (МПа) — давление среды в аппарате, возникающее при нормальном или форсированном технологическом процессе.

Расчетное давление P (МПа) — давление среды в аппарате, на которое производится расчет аппарата на прочность и устойчивость.

Если гидростатическое давление столба жидкости в аппарате на 5 % превышает рабочее, то расчетное давление определяют по формуле

$$P = P_c + g\rho_{ж}H_{ж}10^{-6},$$

где g — ускорение силы тяжести, 9,81 м/с²; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³; $H_{ж}$ — высота столба жидкости, м.

Табл. 4.5. Расчетные давления в аппаратах

Рабочее давление среды P_c , МПа	Расчетное давление P , МПа
Сжиженный газ	
без давления	0,01
$< 0,05$	0,06
$0,05-0,07$	0,1
$> 0,07$	$1,2 P_c$, но не менее 0,3
Аммиак	1,6
Сернистый ангидрид	0,8
Углекислый газ	7,6

Расчетные давления в аппаратах, предназначенных для хранения и переработки пожаро- и взрывоопасных сред и сжиженных газов, сведены в табл. 4.5. Во всех прочих случаях расчетное давление принимается равным рабочему.

Условное давление P_y — максимальное избыточное давление среды в аппарате, допускаемое в эксплуатации при температуре стенок 20°C . Ряд условных давлений определен ГОСТ 9493—73.

4.2. РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК НА ВНУТРЕННЕЕ ДАВЛЕНИЕ

Цилиндрические обечайки — основной элемент многих химических аппаратов. От размеров обечайки зависит объем аппарата. Цилиндрическая форма обечайки весьма проста в изготовлении, экономична по расходу материала и хорошо противостоит внутреннему давлению благодаря равномерно распределению нагрузки по ее площади.

Основные уравнения для расчета цилиндрических обечаек выводятся на основе безмоментной (мембранной) теории тонкостенных оболочек, согласно которой стенки сосуда рассматриваются как тонкие оболочки (мембраны), не воспринимающие изгибающих усилий и сил среза. Однако для применения этой теории необходимы следующие условия:

1) толщина стенки цилиндрической обечайки S должна быть весьма малой по сравнению с ее внутренним радиусом:

$$\frac{S}{R_v} \ll 0,1 - 0,2;$$

2) благодаря малой толщине стенки нормальные напряжения растяжения (сжатия) не изменяются по толщине, их

величина в R_b/S раз больше нормальных напряжений от изгиба. Малая величина последних и определяет безмоментное состояние оболочки;

3) форма сосуда — тело вращения, например цилиндрическая поверхность образуется при вращении прямой, параллельной оси вращения, лежащей в той же плоскости, что и ось вращения;

4) нагрузка (внутреннее давление) должна быть симметричной оси вращения.

В цилиндрической тонкостенной обечайке с радиусом R и толщиной S' , находящейся под внутренним давлением газа P_c , возникают меридиональное напряжение σ_v , направленное параллельно образующей цилиндра, и кольцевое напряжение σ_t , направленное тангенциально к поверхности цилиндра. Значение σ_t может быть найдено из уравнения Лапласа:

$$\frac{\sigma_v}{R_1} + \frac{\sigma_t}{R_2} = \frac{P_c}{S'}$$

Для цилиндра радиус кривизны меридионального сечения R_1 равен бесконечности, а $R_2 = R$, поэтому

$$\frac{\sigma_t}{R_2} = \frac{P_c}{S'} \text{ и } \sigma_t = \frac{P_c R}{S'}$$

В целях определения меридионального напряжения σ_v рассмотрим равновесие кольцевого сечения, перпендикулярного оси цилиндра. Условие равновесия всех сил

$$\sigma_v \pi^2 R S' - P_c \pi R^2 = 0,$$

откуда

$$\sigma_v = \frac{P_c R}{2S'}$$

Из сопоставления последних уравнений видно, что $\sigma_t > \sigma_v$, следовательно, цилиндрическую оболочку необходимо рассчитывать на кольцевое напряжение σ_t .

Принимая в соответствии с третьей теорией прочности $\sigma_t \leq \sigma_d$ и заменяя P_c на P , получим

$$S' = \frac{PR}{\sigma_d}$$

Заменим $R = (D_b + S)/2$ и введем коэффициент прочности сварного шва $\varphi_{ш}$, коэффициент условий эксплуатации η и прибавки на коррозию и эрозию C :

$$S = \frac{PD_b}{2\sigma_d \varphi_{ш} \eta - P} + C. \quad (4.3)$$

Формула (4.3) справедлива при соблюдении неравенства

$$\frac{S - C}{D_B} \leq 0,1.$$

Если выполняется неравенство $\sigma_d \varphi_{ш} / P \geq 25$, то уравнение (4.3) может быть упрощено:

$$S = \frac{PD_B}{2\sigma_d \varphi_{ш}} + C. \quad (4.4)$$

Допускаемое внутреннее давление $P_{в.д}$ рассчитывают по формуле

$$P_{в.д} = 2\varphi_{ш} \sigma_d (S - C) / (D_B + S - C). \quad (4.5)$$

4.3. РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК НА НАРУЖНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Под наружным давлением работают корпуса вакуум-выпарных аппаратов, вакуум-кристаллизаторов, некоторых ректификационных колонн, а также элементы конструкции аппаратов высокого давления. Под действием наружного давления в цилиндрической оболочке возникают силы сжатия, которые в определенных условиях могут привести к нарушению устойчивости первоначальной формы. Давление, при котором оболочка теряет первоначальную форму, называется *критическим* $P_{кр}$.

Потеря устойчивости формы может произойти при внешнем давлении, меньшем критического, если исходная форма является овальной. По техническим условиям стальные сварные сосуды, предназначенные для работы под наружным давлением, должны иметь овальность (отклонение диаметра в разных направлениях), не превышающую 0,5 %, но не более 0,02 м.

Под действием критического и большего давления первоначально круглая обечайка приобретает волнообразную или эллипсоидную форму. Обязательным условием безопасной эксплуатации таких аппаратов является сохранение первоначальной формы и размеров.

Для относительно длинных цилиндров (труб), когда $l : d > 5$ и можно пренебречь силами осевого сжатия, допускаемое наружное давление $P_{н.д}$ рассчитывается по уравнению

$$P_{н.д} = 0,85 E^t \left(\frac{S - C_k}{D_B} \right)^3 \geq P_n, \quad (4.6)$$

и толщина стенки без прибавки на коррозию S' по формуле

$$S' = 1,06D_B \sqrt[3]{\frac{P_H}{E^t}}, \quad (4.7)$$

где P_H — расчетное наружное давление, МПа.

Уравнения (4.6) и (4.7) справедливы при соблюдении следующих условий:

$$\frac{L}{D_B} > \sqrt{\frac{D_B}{2(S - C_K)}} \quad \text{и} \quad \frac{S - C_K}{D_B} \leq 0,95 \sqrt{\frac{\sigma_T^t}{E^t}},$$

где L — длина трубы, м; D_B — внутренний диаметр трубы, м; S — полная толщина стенки с прибавками: $S = S' + C$, м; σ_T^t — нижний предел текучести материала при расчетной температуре t , МПа.

Уравнение (4.7) выведено для коэффициента устойчивости формы:

$$n_y = P_{кр}/P_H = 2,6.$$

Для относительно коротких гладких обечаек, работающих в пределах упругости при $n_y = 2,6$, толщина стенки рассчитывается по формуле

$$S = 0,47 \frac{D_B}{100} \cdot \left(\frac{P_H}{E^t 10^{-6}} \cdot \frac{l}{D_B} \right)^{0,4} + C, \quad (4.8)$$

где l — расчетная длина обечайки, м; она равна расстоянию между фланцами, а при наличии сферических или эллиптических днищ — сумме длин цилиндрической части обечайки l_1 и $1/3$ высоты днища H и отбортовки a (рис. 4.1).

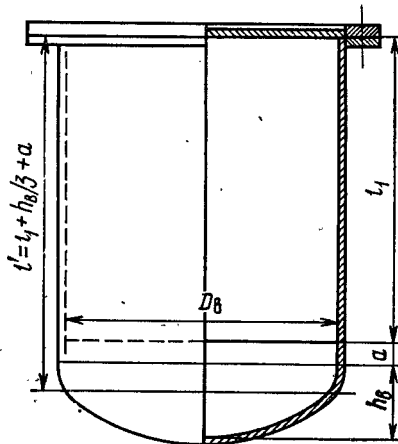


Рис. 4.1. Цилиндрический сосуд с отбортованным эллиптическим днищем.

Уравнение (4.8) справедливо при соблюдении следующего условия:

$$0,052 \sqrt[6]{\frac{P}{E10^{-6}}} \leq \frac{l}{D} \leq 7,68 \sqrt{\frac{E10^{-6}}{P}}.$$

Если выполняется неравенство

$$1,5 \sqrt{\frac{2(S-C)}{D_B}} \leq \frac{l}{D_B} \leq \sqrt{\frac{D_B}{2(S-C)}},$$

то допускаемое наружное давление рассчитывают по формуле

$$P_{н.д} = 6,49 \cdot 10^{-6} E \frac{D_B}{l} \left[\frac{100(S-C)}{D_B} \right]^2 \sqrt{\frac{100(S-C)}{D_B}}, \quad (4.9)$$

которая применима при выполнении условия

$$\frac{S-C}{D_B} \leq 1,1 \cdot 10^{-2} \sqrt[3]{\left(\frac{l}{D_B}\right)^2 \left(\frac{\sigma_T}{10^{-3}E}\right)^2}.$$

Обечайки, укрепленные кольцами жесткости, рассчитывают по ГОСТ 14249-73.

4.4. РАСЧЕТ ОБЕЧАЕК, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОСЕВОЙ СЖИМАЮЩЕЙ СИЛЫ, ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА И НАРУЖНОГО ДАВЛЕНИЯ

Чаще всего под *осевой сжимающей силой* понимают суммарное действие собственной массы вертикальных аппаратов, их изоляции и реакционной смеси. Во многих случаях осевая нагрузка вызывает значительные сжимающие усилия в обечайке у основания аппаратов.

Цилиндрические обечайки, нагруженные осевой сжимающей силой N (МН), проверяют на местную устойчивость по формуле

$$N_d = \pi D_B (S-C) \varphi_c \sigma^*, \quad (4.10)$$

где $N \leq N_d$.

Коэффициент уменьшения допускаемых напряжений φ_c определяют по следующим уравнениям:

$$\text{при } \frac{D_B}{2(S-C)} > 0,18 \frac{E}{\sigma_T} \quad \varphi_c = \frac{0,75 K_c}{\frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{D_B}{2(S-C)}}; \quad (4.11)$$

$$\text{при } \frac{D_B}{2(S-C)} < 0,18 \frac{E}{\sigma_T} \quad \varphi_c = \frac{1}{1 + 23 \left[\frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{D_B}{2(S-C)} \right]^2}. \quad (4.12)$$

Конструктивный коэффициент K_c принимают в соответствии с ГОСТ 14249—73 в зависимости от отношения $D_B/2(S-C)$:

$\frac{D_B}{2(S-C)}$	от $0,18 \frac{E}{\sigma_T}$	до 250	250	500	750	1000
K_c	0,140		0,140	0,120	0,095	0,080
		1500	2000			
		0,070	0,060			

Изгибающий момент чаще всего возникает при действии на обечайку усилий, не совпадающих с осью вращения, например от ветровой нагрузки на вертикальные аппараты, или от силы тяжести конструкций и реакционной смеси на горизонтальные аппараты.

Цилиндрические обечайки, работающие под действием изгибающего момента M_H (Н·м), проверяют на устойчивость по формуле

$$M_H \leq M_d, \quad (4.13)$$

где допускаемый изгибающий момент вычисляют по следующим уравнениям:

$$\text{при } \frac{D_B}{2(S-C)} \geq 0,23 \frac{E}{\sigma_T} \quad M_d = 0,785 K_H E D_B^2 (S-C)^2; \quad (4.14)$$

$$\text{при } \frac{D_B}{2(S-C)} < 0,23 \frac{E}{\sigma_T} \quad M_d = 0,785 \varphi_H E D_B^2 (S-C). \quad (4.15)$$

Коэффициент K_H выбирают в зависимости от отношения $D_B/2(S-C)$ из следующего ряда:

$\frac{D_B}{2(S-C)}$	от $0,23 \frac{E}{\sigma_T}$	до 250	250	500	750	1000
K_H	0,170		0,170	0,130	0,120	0,100
		1500	2000			
		0,085	0,080			

Коэффициент φ_H вычисляют по формуле

$$\varphi_H = \frac{1}{1 + 15,3 \left[\frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{D_B}{2(S-C)} \right]^2}. \quad (4.16)$$

При действии на обечайку изгибающего момента, вызванного поперечной нагрузкой, цилиндрическую оболочку в дополнение к расчету по формуле (4.13) проверяют в месте дейст-

ния наибольшей перерезывающей силы Q на местную устойчивость по формуле

$$Q \leq E(S - C)^2 \left[0,15 + 2,6 \frac{D_B(S - C)}{L^2} \right] \quad (4.17)$$

Цилиндрические обечайки, работающие под совместным действием наружного давления P_n , осевой сжимающей силы N и изгибающего момента M_n , проверяют на устойчивость в наиболее опасном сечении по формуле

$$\frac{N}{N_d} + \frac{M_n}{M_d} + \frac{P_n}{P_{n,d}} \leq 1. \quad (4.18)$$

При отсутствии какого-либо вида нагрузки расчет обечайки выполняют по формуле (4.18), принимая соответствующую нагрузку равной нулю.

4.5. РАСЧЕТ ДНИЩ НА ВНУТРЕННЕЕ ДАВЛЕНИЕ

Днище (крышка) — составная часть корпуса аппарата. Оно, как правило, изготавливается из того же материала, что и обечайка. Днище составляет с обечайкой единое целое в литых аппаратах или соединяется с ней сваркой или пайкой. Форма днища определяется условиями работы аппарата (P, T), технологическими требованиями к аппарату и конструктивными соображениями. По форме днища бывают эллиптические, полушаровые, сферические, конические и плоские.

Эллиптические днища (рис. 4.2). Нашли широкое применение в химическом аппаратостроении. В результате непрерывного изменения радиуса кривизны днища внутренние напряжения распределяются равномерно, при этом не наблюдается опасных концентраций напряжений. Эти днища изготавливаются штамповкой из листового проката цельными или составными с последующей сваркой отдельных частей.

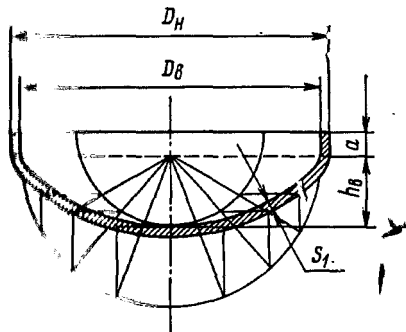


Рис. 4.2. Эллиптическое отбортованное днище.

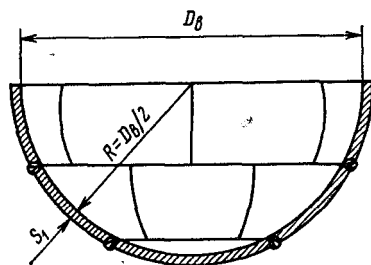


Рис. 4.3. Полушаровое днище.

Стандартные эллиптические днища рекомендуется использовать в сварных и паяных цилиндрических аппаратах вертикального и горизонтального исполнения, работающих под внутренним и наружным давлением свыше 0,07 МПа. Допустимо их применение в аппаратах, работающих под наливом и атмосферным давлением. Верхний предел применения стандартных эллиптических днищ на внутреннее давление — 10 МПа.

Размеры эллиптических отбортованных днищ определяются ГОСТ 6533—68, их внутренний диаметр D_b может быть равен 400—4000 мм, толщина днища S_1 6—60 мм; высота H — 0,25 D_b , а длина отбортовки $a \geq 2S_1$, но не менее 25 мм. Длину борта принимают из ряда величин: 25, 40, 50, 70, 90, 100 и 110 мм. Отверстия в эллиптических днищах рекомендуются укреплять.

Основные размеры эллиптических отбортованных днищ из алюминия и латуни определяются по ГОСТ 13472—68.

Толщина эллиптического днища S_1 , работающего под внутренним давлением, определяется из расчета на прочность по формуле

$$S_1 = \frac{R_b P}{2\sigma_d \varphi_{ш} - 0,5P} + C,$$

которая применима при соблюдении условий $(S_1 - C)/D \leq 1$ и $H \geq 0,2D$.

Если выполняется неравенство $\frac{\sigma_d}{P} \varphi_{ш} \geq 20$, то расчет ведут по формуле

$$S_1 = \frac{R_b P}{2\sigma_d \varphi_{ш}} + C, \quad (4.19)$$

где R_b — радиус кривизны днища в его вершине, м ($R_b = D_b^2/4h_b$); C — прибавки на коррозию и эрозию.

Пример условного обозначения эллиптического днища с внутренним базовым диаметром D_b 1000 мм, толщиной стенки S_1 10 мм, высотой борта h 40 мм из стали марки 09Г2С: днище 1000×10—40—09Г2С ГОСТ 6533—68.

Полушаровые днища (рис. 4.3). Они имеют постоянный радиус кривизны, равный внутреннему радиусу обечайки. Изготавливаются цельными или сваркой из отдельных штампованных частей. Полушаровые днища с одинаковой толщиной всех элементов предназначены для аппаратов, работающих под вакуумом. Кроме того, их рекомендуют использовать в стальных цилиндрических аппаратах большого диаметра ($D_b \geq 4$ м). Для аппаратов горизонтального исполнения эти днища можно применять независимо от давления, а для аппаратов вертикального исполнения — при избыточном давлении более

0,07 МПа. В аппаратах с внутренним давлением используются полушаровые днища с различной толщиной стенки элементов. Размеры таких днищ определяются нормалью МН 4704—63, в соответствии с которой их изготавливают с внутренним базовым диаметром D_B 3600—12 000 мм и толщиной стенки S_1 10—36 мм.

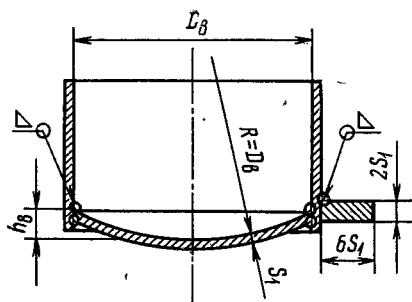


Рис. 4.4. Сферическое неотбортованное днище.

Толщина стенки полушарового днища, работающего под внутренним давлением, может быть рассчитана по уравнению (4.19), в котором принимают $R_B = R$.

Пример условного обозначения полушарового днища с D_B 6000 мм, S_1 12 мм из стали 15Х5М: днище 6000×12—15Х5М МН 4704—63.

Сферические неотбортованные днища (рис. 4.4). Изготавливаются цельными или составными из отдельных элементов, соединяемых сваркой. Выполняются из углеродистых, низколегированных и двухслойных сталей.

Сферические днища рекомендуется применять в цилиндрической сварной аппаратуре горизонтального и вертикального исполнения, работающей под наливом, а также под избыточным давлением не более 0,07 МПа для температур до 200 °С. В соответствии с ОСТ 26-01-1297—75 их изготавливают диаметром 400—3000 мм и толщиной стенок 4—12 мм. Такие днища рекомендуется усиливать кольцами.

Номинальная расчетная толщина стенки сферического неотбортованного днища S_1' определяется при условии, что меридиональное изгибающее напряжение $\sigma_{и}$, возникающее в месте соединения днища с обечайкой, не должно превышать допускаемого напряжения на разрыв для материала днища: $\sigma_{и} \leq \sigma_{д}$.

Конические днища (переходы). Они применяются независимо от давления в вертикальных цилиндрических аппаратах, когда это обусловлено технологической необходимостью и когда нельзя использовать эллиптические или плоские днища.

Угол конуса при вершине 2α для вязких жидкостей и суспензий, влажных, склонных к налипанию порошкообразных и кусковых материалов принимается равным 60°, а для невязких жидкостей и сухих порошкообразных материалов — 90°.

Размеры конических отбортованных днищ (рис. 4.5; а) с углом при вершине 60—90° определяются ГОСТ 12619—67 и

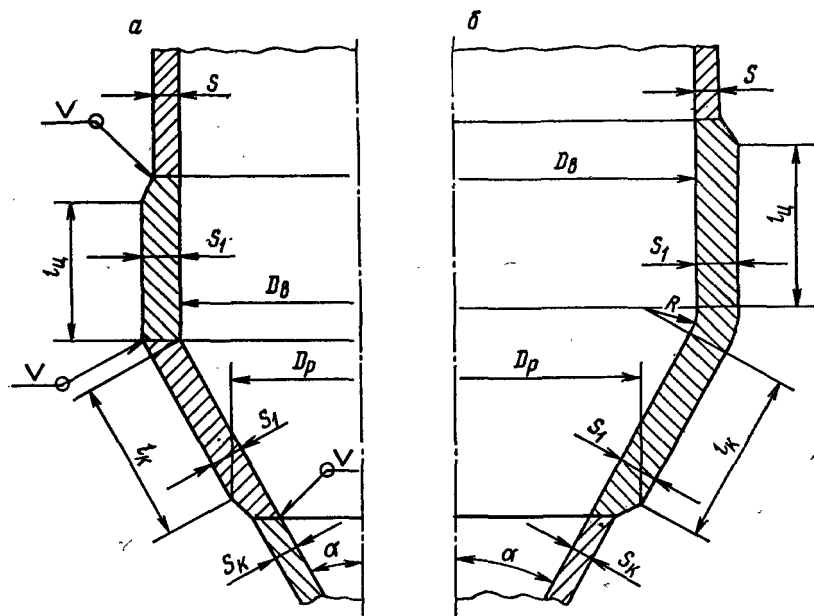


Рис. 4.5. Конические днища:
 а — без тороидального перехода; б — с тороидальным переходом.

12621—67 для аппаратов с диаметром 273—3000 мм и толщиной стенки 4—30 мм, работающих под внутренним давлением.

ГОСТ 12620—67 и ГОСТ 12622—67—12624—67 регламентируют основные размеры конических неотбортованных днищ (рис. 4.5, б) с углом при вершине 60, 90, 120, 140° и толщиной стенки соответственно 4—12, 4—12, 2—12, 4—16 мм, предназначенных для аппаратов диаметром 273—3000 мм (1600—4000 мм по ГОСТ 12624—67), работающих под давлением не более 0,07 МПа.

Пример условного обозначения конического днища с $D_{\text{в}}$ 1200 мм, S_1 16 мм, изготовленного из стали 20К: днище 1600 × 16—20К ГОСТ 12619—67.

Для случая, когда угол при вершине $2\alpha \leq 140^\circ$, в качестве толщины стенки S_1 цилиндрической обечайки на расстоянии $l_{\text{и}} = 0,5 \sqrt{D_{\text{в}}(S_1 - C)}$ и конического элемента на расстоянии $l_{\text{к}} = 0,5 \sqrt{D_{\text{в}}(S_1 - C)/\cos \alpha}$ (рис. 4.5, а) принимают большую из двух величин:

$$S_1 = \frac{PD_{\text{в}} y}{4\varphi_{\text{ш}} \sigma_{\text{д}}} + C;$$

$$S_1 = \frac{P}{2\varphi_{ш}\sigma_d - P} \cdot \frac{D_B}{\cos \alpha} + C.$$

Во всех случаях S_1 должна быть не меньше толщины обечайки S , определяемой по формуле (4.3).

Расчетный диаметр D_p для конических элементов с тороидальным переходом (отбортованных) определяют по уравнению

$$D_p = D_B - 2[r(1 - \cos \alpha) + l_k \sin \alpha],$$

где r — внутренний радиус отбортовки.

Для днищ без тороидального перехода (неотбортованных) расчетный диаметр вычисляют по формуле

$$D_p = D_B - 2l_k \sin \alpha,$$

где l_k — высота конического элемента.

Коэффициент формы конического днища y зависит от угла полураствора конуса α и отношения r/D_B . Он изменяется от 1,1 до 9,4 [7, 10].

За пределами расстояния l_k толщину конического днища S_k рассчитывают по формуле

$$S_k = \frac{P}{2\varphi_{ш}\sigma_d - P} \cdot \frac{D_p}{\cos \alpha} + C,$$

в которой

$$D_p = \frac{0,9D_1 + 0,1D_0}{\cos \alpha},$$

где D_0 — диаметр центрального отверстия в днище.

Плоские круглые днища (крышки) (рис. 4.6). Находят широкое применение в кованных аппаратах высокого давления; в сварных аппаратах вертикального исполнения их следует использовать при работе аппарата под наливом. С точки зрения распределения напряжений и расхода материала плоская форма днища наименее рациональна. Изготавливаются такие днища отбортованными по ГОСТ 12625—67 толщиной 4—10 мм и неотбортованными по ГОСТ 12626—67 толщиной 3—12 мм для аппаратов диаметром 400—4000 мм. При значительных диаметрах плоские днища усиливаются радиальными или параллельными ребрами жесткости.

Пример условного обозначения плоского отбортованного днища с внутренним диаметром $D_B = 2000$ мм, толщиной $S_1 = 10$ мм, изготовленного из стали марки ВСтЗпс: днище 2000 × 10—ВСтЗпс ГОСТ 12625—67.

Плоские круглые днища и крышки сосудов и аппаратов,

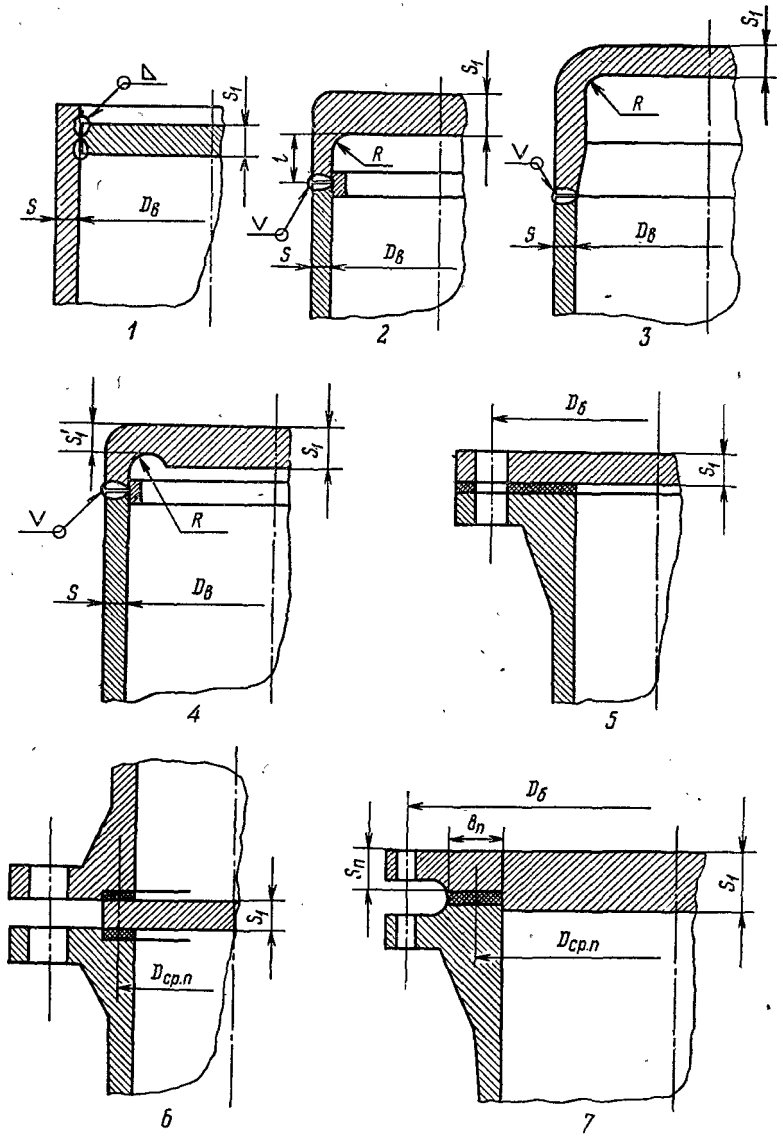


Рис. 4.6. Типы плоских круглых днищ.

работающие под внутренним давлением, рассчитывают по формуле

$$S_1 = \frac{K}{K_0} D_p \sqrt{\frac{P}{\sigma_d}} + C, \quad (4.20)$$

где K — конструктивный коэффициент, зависящий от типа днища (см. рис. 4.6); K_0 — коэффициент ослабления днища отверстиями; D_p — расчетный диаметр, м.

Тип днища	1	2	3	4	5	6
D_p	D_b	$D_b - r$	$D_b - r$	D_b	D_6	$D_{ср.п}$
K	0,55	—	0,40	0,45	0,40	0,45

Для днищ типа 2 величина коэффициента K зависит от длины отбортовки l :

$$\text{при } l \geq \sqrt{D_p(S-C)} \quad 0,35 \leq K = 0,45 (1 - 0,23S/S_1);$$

$$\text{при } l < \sqrt{D_p(S-C)} \quad 0,40 \leq K = 0,47 (1 - 0,23S/S_1).$$

Коэффициент ослабления днища отверстиями K_0 вычисляются для одного центрального отверстия диаметром d_0 :

$$\text{при } \frac{d_0}{D_b} < 0,35 \quad K_0 = 1 - 0,43 \frac{d_0}{D_b};$$

$$\text{при } 0,35 \leq \frac{d_0}{D_b} \leq 0,75 \quad K_0 = 0,85.$$

Для днищ (крышек), имеющих несколько произвольно расположенных отверстий или одно нецентральное отверстие, величину коэффициента K_0 определяют по формуле

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

Для днищ (крышек), присоединяемых на болтах к фланцу (см. рис. 4.6, 5 или 7), в формуле (4.20) за расчетный диаметр принимают средний диаметр прокладки $D_{ср.п}$, а конструктивный коэффициент K вычисляют по формуле

$$K = \sqrt{0,0515 \left(\frac{D_6}{D_{ср.п}} + 1 \right)^2 + 0,5 \left(\frac{D_6}{D_{ср.п}} - 1 \right) \left(\frac{Q}{Q_d} - 1 \right)},$$

где Q — болтовая нагрузка в условиях эксплуатации, МН; Q_d — равнодействующая внутреннего давления, МН ($Q_d = 0,785 D_{ср.п}^2 P$).

Болтовая нагрузка

$$Q = Q_d + R_{п},$$

где $R_{п}$ — реакция прокладки, определяемая по формуле

$$R_{п} = \pi D_{ср.п} m P b_0,$$

где m — прокладочный коэффициент, зависящий от материала и формы прокладки (см. табл. 4.8); b_0 — расчетная ширина прокладки, м.

Для плоских прокладок при ширине прокладки $b_{\text{п}} \leq 0,015$ м принимают $b_0 = 0,5 b_{\text{п}}$; при $b_{\text{п}} > 0,015$ м $b_0 = 0,6 \sqrt{b_{\text{п}}}$. Для прокладок овального и восьмигранного сечения $b_0 = b_{\text{п}}/8$.

Толщину днища (крышки) над уплотнительной поверхностью $S_{\text{п}}$ (м) определяют по формуле

$$S_{\text{п}} = 0,8 \left(\sqrt{\frac{D_6}{D_{\text{ср.п}}} - 1} \right) \sqrt{\frac{Q}{\sigma_{\text{доп}}}} + C.$$

Толщина днища над уплотнительной поверхностью должна быть $S_{\text{п}} \geq 0,85 S_1$.

Расчет днищ, укрепленных ребрами жесткости, смотрите в работе [7, с. 476].

4.6. РАСЧЕТ ДНИЩ НА НАРУЖНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Эллиптические днища. Толщину стенки эллиптического днища вычисляют по следующим формулам:

$$S_1 = \frac{K_9 R_{\text{в}}}{300} \sqrt{\frac{P}{E 10^{-6}}} + C; \quad (4.21)$$

$$S_1 = \frac{P R_{\text{в}}}{2 \sigma_{\text{доп}}} \beta_1 + C, \quad (4.22)$$

где K_9 — конструктивный коэффициент, зависящий от отношений $D/(S_1 - C)$ и H/D , который принимают по ГОСТ 14249—73 (черт. 9), или по справочнику [7, рис. 6.15]; в первом приближении K_9 принимают равным единице; $R_{\text{в}}$ — радиус кривизны при вершине днища.

Коэффициент β_1 определяют по формуле

$$\beta_1 = 0,5 + \sqrt{0,25 + 12 K_9^2 \frac{\sigma_{\text{т}}}{E} \cdot \frac{\sigma_{\text{д}}}{P}}.$$

В качестве исполнительной толщины днища принимают большее из полученных значений.

Допускаемое наружное давление $P_{\text{н.д}}$ принимают наименьшим из двух значений, полученных по уравнениям

$$P_{\text{н.д}} = 9 \cdot 10^{-6} E [100(S_1 - C)/K_9 R_{\text{в}}]^2; \quad (4.23)$$

$$P_{\text{н.д}} = 2 \sigma_{\text{д}} (S_1 - C)/R \left(1 + 6 K_9^2 \frac{\sigma_{\text{т}}}{E} \cdot \frac{R_{\text{в}}}{S_1 - C} \right). \quad (4.24)$$

Формулы (4.22) и (4.23) применимы, если отношение высоты выпуклой части днища $h_{\text{в}}$ к диаметру $D_{\text{в}}$ находится в пределах $0,2 \leq h_{\text{в}}/D_{\text{в}} \leq 0,5$.

Сферические днища. Толщина стенки сферического днища, нагруженного наружным давлением, рассчитывается по уравнению (4.21), при этом K_9 принимается равным 1, а $R_{\text{в}} = R$.

Конические днища. Для конических днищ, работающих под наружным давлением, расчет толщины стенки выполняется из условий устойчивости формы. Толщина днища принимается равной толщине сопряженной с ним цилиндрической обечайки и проверяется на устойчивость формы с учетом действия осевой сжимающей силы и наружного давления.

Осевая сжимающая сила рассчитывается по формуле

$$N_{o.c} = \frac{\pi}{4} D_n^2 P_n.$$

Допускаемая осевая сжимающая сила

$$N_d = \varphi_c \sigma^* \pi D_p (S_1 - C_K) \cos^2 \alpha,$$

где φ_c — коэффициент, зависящий от отношения $D/2(S-C)$, вычисляются по формулам (4.11) и (4.12).

Расчетный диаметр днища находят по формуле

$$D_p = \frac{0,9D_b + 0,1D_{b1}}{\cos \alpha},$$

где D_b и D_{b1} — больший и меньший внутренние диаметры конического днища; α — угол полураствора конуса.

Допускаемое наружное давление $P_{н.д}$ определяют по уравнению (4.9). Днище сохраняет свою форму при условии, если

$$\frac{P_n}{P_{н.д}} + \frac{N_{o.c}}{N_{oc.д}} \leq 1. \quad (4.25)$$

Если условие (4.25) не выполняется, то увеличивают толщину стенки днища или днище укрепляют кольцами жесткости, если это допустимо.

4.7. РАСЧЕТ ОБЕЧАЕК НА ВЕТРОВУЮ НАГРУЗКУ

Аппараты колонного типа значительных размеров нередко устанавливают на открытых площадках, в связи с этим необходима проверка корпуса и опор данных аппаратов на ветровую нагрузку, если их высота от уровня земли превышает 20 м.

Нормативный скоростной напор ветра q (Па) зависит от географического расположения местности и высоты от уровня земли. Так, для Белоруссии, Литвы и средней полосы Российской Федерации (I район) он составляет 270 Па, а для большинства районов Украины и Прибалтики — 350 Па при высоте от поверхности земли до 10 м. Увеличение высоты вызывает рост скоростного напора, например для I района при высоте 20 м он составляет 365 Па, 40 м — 485, 60 м — 500 и 100 м — 595 Па.

Колонну рассчитывают как консольную балку, одновременно нагруженную распределенным ветровым напором, сосредоточенными силами от действия ветрового напора на элементы

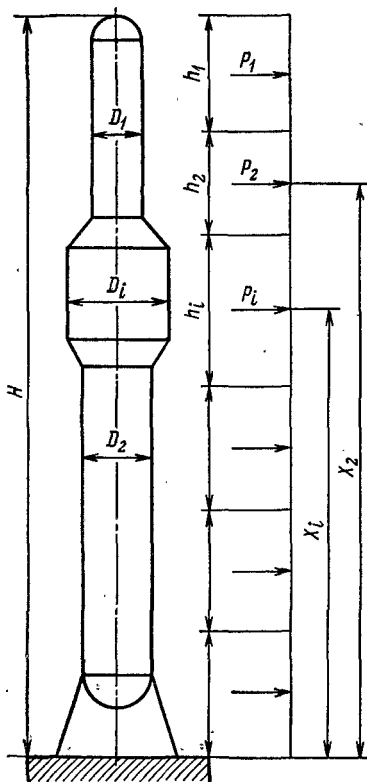


Рис. 4.7. Схема разбивки колонны на участки для расчета ветровой нагрузки.

коэффициент динамичности, определяемый в зависимости от периода собственных колебаний колонны τ , с. Если $\tau \leq 0,25$ с, то $\varepsilon = 1$.

$$\text{При } \frac{H}{D} \geq 15 \quad \tau = 1,79H \sqrt{\frac{G_m H}{E^t I g}}$$

где H — общая высота колонны, м; I — момент инерции поперечного сечения корпуса аппарата, м^4 .

Для кольцевого сечения

$$I = \frac{\pi}{8} (D_b + S)^3 (S - C_k)$$

(подробнее см. [7, с. 687]).

Изгибающий момент от ветровой нагрузки M_w ($\text{МН} \cdot \text{м}$) относительно основания колонны рассчитывают по формуле

конструкции колонны (лестницы, площадки и т. д.) и осевого усилия массы аппарата, его изоляции и содержимого.

Для определения изгибающего момента колонну условно разбивают на участки высотой не более 10 м (рис. 4.7) и находят равнодействующую каждого участка по формуле

$$Q_i = q_i F = c \beta_i q_i D_i h_i,$$

где c — коэффициент обтекания, равный 0,6 для цилиндра и 1,4 для решетчатых ферм; β_i — коэффициент увеличения скоростного напора; q_i — нормативный скоростной напор, Па; D_i — наружный диаметр аппарата с изоляцией, м; h_i — высота рассматриваемого участка, м.

Коэффициент увеличения скоростного напора

$$\beta_i = 1 + \varepsilon m_i,$$

где m_i — коэффициент пульсации скоростного напора, зависящий от высоты участка над землей X_i , м; если X_i составляет до 20, 40, 60, 100 м и более, то соответственно m_i равен 0,35, 0,32, 0,28, 0,21; ε —

$$M_n = \sum_{i=1}^n Q_i X_i.$$

Сечение у основания колонны проверяют на совместное действие изгибающего момента и осевой силы. Максимум сжимающего напряжения будет наблюдаться с подветренной стороны:

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{G_m}{F} + \frac{M_n}{W} \leq \sigma_{\text{с.д.}}$$

где G_m — максимальная сила тяжести аппарата (при заполнении его водой, если предусмотрены гидротесты), МН; F — площадь поперечного сечения обечайки, м²; $F = \pi (D_B + S')(S - C_1)$; W — момент сопротивления обечайки, м³;

$$W = \frac{\pi}{4} (D_B + S')^2 (S - C_1).$$

Аналогичным образом выполняются расчеты для стенок опоры аппарата (см. [7, с. 689]).

4.8. ФЛАНЦЫ

Фланцы широко применяются в химической аппаратуре для соединения частей аппаратов, присоединения трубопроводов и других устройств. От правильного выбора их во многом зависит надежность работы аппаратуры и технологических трубопроводов. Фланцы к аппаратам и штуцерам выбирают по ГОСТам и нормам по условному проходу, условному давлению и температуре среды [7, 10, 15].

Условный проход D_y (мм) — номинальный внутренний диаметр аппарата или трубы. Значения условных проходов определены ГОСТ 355—67.

Согласно ГОСТ 356—68, арматура и соединительные трубопроводы должны рассчитываться и изготавливаться не на любое произвольное давление, а на ближайшее условное P_y , больше рабочего P_c , т. е. $P_y > P_c$. Установлен следующий ряд условных давлений: 0,1, 0,25, 0,4, 0,6, 1,0, 1,6, 2,5, 4,0, 6,4, 10,0, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 64, 80, 100 МПа.

Области применения некоторых фланцев арматуры и трубопроводов сведены в табл. 4.6, а аппаратных — в табл. 4.7.

В результате унификации, введения условных давлений и проходов сократилось количество типоразмеров фланцев и они стали взаимозаменяемыми. ГОСТ 1234—67 определяет основные размеры фланцев различных типов на условные давления от 0,1 до 20 МПа и условные проходы от 10 до 3000 мм: наружный диаметр фланца D_n , диаметр болтовой окружности D_b , число z и диаметр отверстий d_o под болты (шпильки).

Табл. 4.6. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФЛАНЦЕВ АРМАТУРЫ




Тип фланца	Литой из серого чугуна (I)	Литой стальной (II)		Стальной с шейкой на резьбе (IV)	Стальной плоский приварной (V)	
	ГОСТ	1235-67 12815-67 12816-67	12820-67 12821-67 12822-67	12823-67 12824-67 12825-67	1245-67 12826-67	1255-67 12827-67 12828-67
Эскиз						
P_y , МПа	0,1; 0,25 0,6 1,0 1,6	1,6	2,5 4,0 6,4	10 16 20	0,1; 0,25, 0,6 0,6; 1,0	0,1; 0,25 0,6 1,0 1,6 2,5
Прогод условный D_y , 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						
(900)						
1000						
1200						
1400						
1600						
(1800)						

- с соединительным выступом
- с выступом или впадиной
- с шпоном или пазом

Примечания. 1. Значения в скобках приведены для обогревающих или охлаждающих рубашек сосудов или аппаратов. 2. Диаметр 450 мм приме-

И СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ

Стальной приварной встык (VI)										Стальной свободный на приварном кольце (VII)				Стальной свободный на отбортовой трубе (VIII)		
12829-67		12832-67								1268-67		1272-67				
12830-67		12833-67								12834-67						
12831-67		12835-67														
0,1; 0,25	0,6	1,0	1,6	2,5	4,0	6,4	10	16	20	0,1; 0,25;	0,6	1,0	1,6	2,5	0,1; 0,25;	0,6
														10		
														20		
														32		
														65		
														100		
														(175)		
														(225)		
														350		
														(450)		
														(700)		
														(900)		
														1400		
														(1800)		

-  без выступа
-  под линзовую прокладку
-  под прокладку обального сечения

няют для люков, а диаметры 1300 и 1500 мм — для кожухотрубчатых теплообменных аппаратов с плавающей головкой.

Табл. 4.7. ТИПЫ АППАРАТНЫХ ФЛАНЦЕВ

D _в , мм	давление условное (P _y) для стальных фланцев, МПа													
	Плоские приварные (ОСТ 26-426-72)				Приварные *встык (ОСТ 26-427-72)						Приварные встык под металлическую прокладку (ОСТ 26-428-72)			
	0,25	0,6	1,0	1,6	0,6	1,0	1,6	2,5	4,0	6,4	6,4	8,0	10,0	16,0
400	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
(450)	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
500	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
(550)	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
600	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
(650)	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
700	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
800	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
900	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
1000	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
1100	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
1200	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
(1300)	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
1450	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
(1500)	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
1600	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
(1700)	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
1800	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
(1900)	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
2000	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
2200	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
2400	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
2600	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
2800	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
3000	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
3200	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
3400	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
3600	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
3800	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///
4000	///	///	///	///		///	///	///	///	///	///	///	///	///

Фланцевое соединение (рис. 4.8) состоит из двух соосно расположенных фланцев, чаще круглых, уплотнительного устройства — привалочных поверхностей и прокладки, зажимаемой между ними, крепежных деталей (болты, шпильки, гайки, шайбы). Согласно ОСТ 26-291—71, болты применяют при

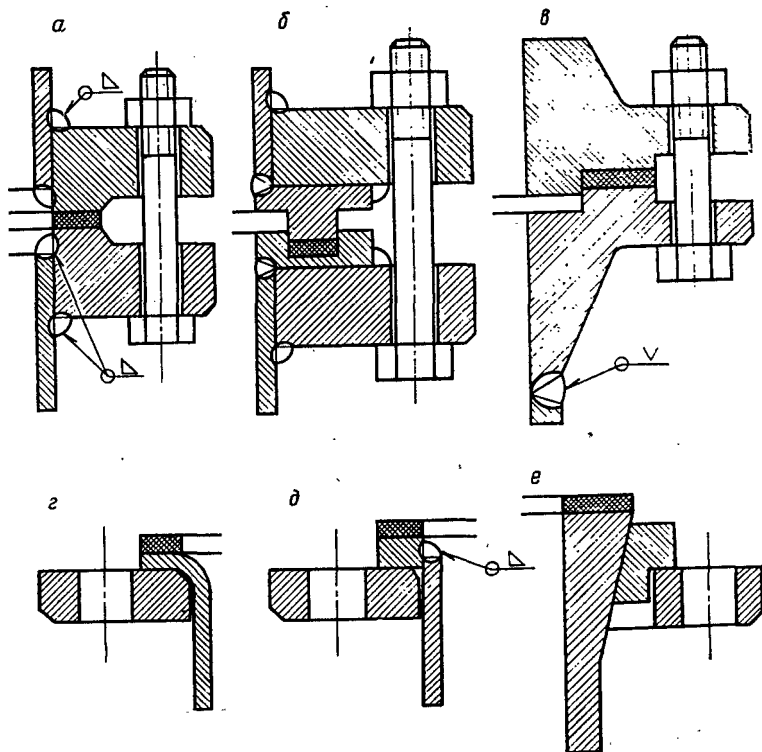


Рис. 4.8. Типы фланцев:

a — плоский приварной; *б* — шип-паз; *в* — выступ-впадина с шейкой; *г* — свободный; *д* — свободный на отбортовке; *е* — свободный с разъемным промежуточным кольцом.

условном давлении до 2,5 МПа и температуре до 300 °С. Шпильки обычно используют при давлении свыше 1,6 МПа.

Облегченные фланцы к стальным сосудам и аппаратам регламентированы ОСТ 26-425—72 и ОСТ 26-433—72. Они изготавливаются с диаметром условного прохода D_y 400—4000 мм (см. табл. 4.7).

В зависимости от материала аппаратуры, условного давления и температуры фланцы изготавливаются либо литыми из серого (t до 300 °С, P_y до 1,6 МПа) или ковкого (t до 400 °С, P_y до 4,0 МПа) чугуна, либо из стали (t до 530 °С, P_y до 20 МПа), либо приварными из различных марок стали.

Для сварной аппаратуры, работающей при давлениях до 2,5 МПа и температуре до 300 °С, применяют плоские стальные приварные фланцы (рис. 4.8, *a*), размеры которых определены ГОСТ 1255—67. Конструкция фланца для аппаратов из легированной стали показана на рис. 4.8, *б*.

Фланцы с шейкой (рис. 4.8, в) по ГОСТ 12820—67 и 12825—67, изготавливаемые из литой углеродистой и легированной стали, рекомендуется применять для ответственных аппаратов, работающих при давлениях 1,6—20 МПа. Шейка повышает прочность фланца и обеспечивает высокое качество сварки с трубой или обечайкой.

Стальные свободные фланцы по ГОСТ 1272—67 (рис. 4.8, г) применяются для штуцеров у аппаратов, изготовленных из меди, алюминия и сплавов на их основе, а также на трубах из керамики, ферросилида и неметаллических материалов.

Стальные свободные фланцы на отбортовке (ГОСТ 1268—67 и 12834—67) применяются для экономии дорогостоящей легированной стали: труба или обечайка аппарата изготавливается из коррозионноустойчивой стали или сплава, а фланец из более дешевой углеродистой стали (рис. 4.8, д). Свободные фланцы с разъемным промежуточным кольцом (рис. 4.8, е) используются для соединения труб и частей аппаратов из хрупких материалов — фарфора, ферросилида, антегмита и т. д.

В аппаратуре высокого давления для присоединения штуцеров и соединения трубопроводов широко используются резьбовые фланцы, соединяемые с трубой резьбой (ГОСТ 9399—75).

Привалочная (уплотнительная) поверхность фланца может быть гладкой (рис. 4.8, а, г, д, е), типа шип-паз (рис. 4.8, б), типа выступ-впадина (рис. 4.8, в), под линзовую прокладку и под кольцевую прокладку овального сечения. Наиболее распространены фланцы с плоскими привалочными поверхностями, но они не всегда обеспечивают необходимую герметичность соединения. При работе с ядовитыми средами, в случае глубокого вакуума, а также при повышенных давлениях используют уплотнения шип-паз. Узкая прокладка обеспечивает высокое удельное давление, а стенки паза препятствуют растеканию прокладки. Фланцы типа выступ-впадина применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить соосность соединяемых деталей.

Герметичность соединения обеспечивается прокладкой, закладываемой между уплотняемыми (привалочными) поверхностями. Материал прокладки зависит от коррозионных свойств среды, температуры и давления. Для этих целей широко используются резина, картон, паранит, асбест, пластические массы, металлы и сплавы. Прокладка должна быть достаточно прочной и эластичной, чтобы при затягивании болтов хорошо уплотнялось соединение, и надежно работать в заданных условиях. Чем выше рабочее давление, тем более жесткий материал необходим для прокладок. Так, картон применяют только для нейтральных сред при температуре до 120 °С и давлении до 0,4 МПа, а резину в кислых средах при

температуре до 90°C и давлении до 1,0 МПа. Паранит (ГОСТ 481—71) рекомендуется использовать при температурах $-200+400^{\circ}\text{C}$ и давлении до 10,0 МПа (табл. 4.8).

Все аппараты снабжают штуцерами или бобышками для подачи исходных веществ и отвода продуктов, а также для присоединения контрольно-измерительных приборов. Размеры штуцеров регламентированы нормами и зависят от диаметра условного прохода D_y , давления в аппарате и материала аппарата. При $D_y \leq 32$ мм используют главным образом резьбовые штуцера, а при $D_y > 10$ мм в основном фланцевые.

Любой аппарат имеет люк с крышкой, предназначенный для монтажа внутренних устройств, осмотра и ремонта. В случае необходимости наблюдения за ходом процесса аппараты снабжают смотровыми окнами диаметром 50—150 мм, которые устанавливают на бобышках. Обычные иллюминаторные стекла можно применять при давлениях до 0,6 МПа и температуре до 150°C . Для промывки стекол к окнам подводят патрубки для подачи воды.

4.9. ОПОРЫ АППАРАТОВ

Химическую аппаратуру устанавливают на фундаменты или несущие конструкции с помощью опор. Однако аппараты с плоским дном, предназначенные для работы под наливом, можно устанавливать непосредственно на фундамент. Допускаемая удельная нагрузка q_d на опорную поверхность не должна превышать следующих величин: для кирпичной кладки (марка 200) — 4,4 МПа, для бетона (марка 300) — 23, для чугуна и стали — 200 МПа. Выбор типа опоры зависит от места установки и типа аппарата, отношения высоты аппарата к диаметру и от массы аппарата [7].

В соответствии с ОСТ 26-467—72 под аппараты колонного типа диаметром 400—6000 мм применяют четыре типа опор: I — цилиндрические с местными стойками; II — цилиндрические с местными стойками под болты; III — цилиндрические с кольцевым опорным поясом; IV — конические с кольцевым опорным поясом.

Цельносварные опорные конструкции (рис. 4.9, а, б) предназначены для цилиндрических вертикальных аппаратов, устанавливаемых на открытом воздухе, при отношении $H:D > 5$. Конические опоры (рис. 4.9, б) рекомендуется использовать для аппаратов с диаметром не менее 1 м. Эти опоры жестко соединены с аппаратом и составляют с ним единое целое, они весьма часто применяются для установки массивных колонных аппаратов высокого давления.

Цилиндрические и конические опоры рассчитываются на совместное действие осевой сжимающей силы, которая опре-

Табл. 4.8. Типы, материалы, области применения и характеристика прокладок

Тип прокладки	Материал прокладки	Рекомендуемая область применения			m	q, МПа	q _д , МПа
		D _y , мм	P _y , МПа	t, °C			
Плоская неметаллическая	резина (ГОСТ 7338—68) твердостью до 75		0,6	от —30	0,50	2	18
	резина (ГОСТ 7338—65) твердостью свыше 75	3000		до +100	1,0	4	20
	картон асбестовый (ГОСТ 2850—75) толщиной 3 мм		1,6	до +500	2,25	20+P	130
	паранит (ГОСТ 481—71) толщиной 1 мм		10	от —200 до +400	2,50	20	130
	фторопласт-4 (ГОСТ 10007—72) толщиной 1—3 мм	1000	вакуум 10	от —200 до +250	2,75	10	40
Плоская металлическая	алюминий, медь и латунь		от 10 до 40	от —200 до +300	4,00 4,75	60 90	
	сталь 05кп (ГОСТ 1050—74)			до +300	5,50	125	
	сталь 08X18N10T (ГОСТ 5632—72)	от 50 до 800			6,50	180	
Плоская асбестовая в металлической оболочке толщиной 0,2—0,3 мм	материал оболочки: алюминий, медь, латунь, монель, мягкая сталь	от 400 до 2200			3,25 3,50 3,50 3,75	38 46 56 53	
	Металлическая прокладка овального или восьмигранного сечения	сталь 05кп монель, сталь с 4—6% хрома коррозионностойкие стали	400* от 400 1600** 300***	6,4— 20 до 6,4— 250	от —200 до +540	5,50 6,00 6,50	125 150 180

* Прокладки овальные; ** прокладки восьмигранного сечения; *** прокладки линзовые.

деляется массой аппарата, изоляции и содержимого, и изгибающего момента от ветрового напора (см. гл. 4, п. 7). Подлежит проверке также величина удельной нагрузки на опорную поверхность.

Опоры (стойки), изображенные на рис. 4.9, в, предназначены для вертикальных аппаратов с эллиптическим или сфе-

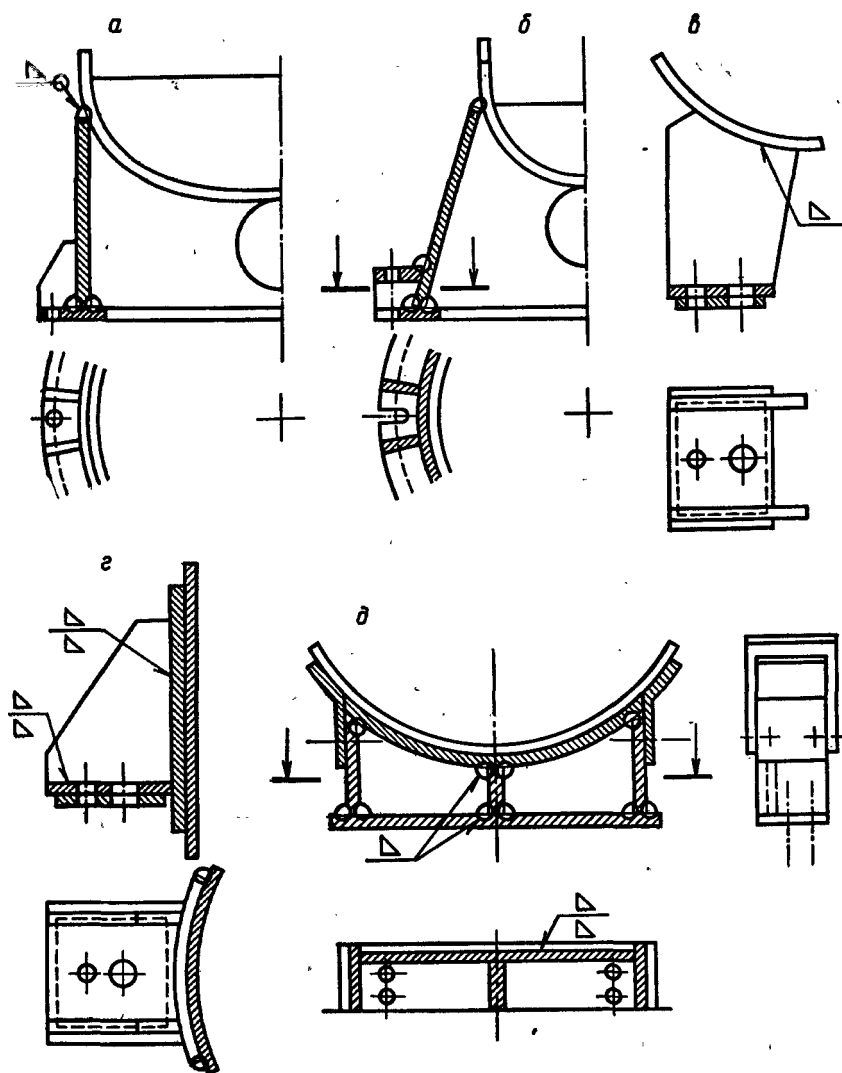


Рис. 4.9. Опоры вертикальных и горизонтальных аппаратов:

а — цилиндрическая с местными косынками (тип I); б — коническая с кольцевым опорным поясом (тип IV); в — сварная стойка; г — сварная лапа; д — опора для горизонтальных аппаратов типа ОГ.

рическим дном, устанавливаемых внутри помещения, а также для аппаратов с отношением $H : D < 5$, монтируемых вне зданий. Число стоек зависит от массы аппарата, но их должно быть не менее трех. Опоры данного типа нормализованы (тип III по ОСТ 26-665—72) и нагрузка на одну стойку может

составлять 0,004—0,25 МН в зависимости от размеров ее элементов.

Опоры типа «лап» (рис. 4.9, з) используются для подвески цилиндрических вертикальных аппаратов на междуэтажных перекрытиях или на специальных опорных конструкциях (этажерках). В соответствии с ОСТ 26-665—72 нагрузка на одну опору может составлять 0,0016—0,25 МН. Таких опор обычно должно быть не менее четырех, но для легких аппаратов допускаются и две опоры.

ОСТ 26-665—72 устанавливает условные обозначения для лап и стоек. Пример условного обозначения лапы типа I исполнения I с допускаемой нагрузкой 0,01 МН (1000 кг) и накладным листом толщиной 8 мм: опора I — 1—1000—8 ОСТ 26-665—72.

Для горизонтальных аппаратов диаметром 0,8—4,0 м рекомендуется применять опоры по ОСТ 26-1265—75 (рис. 4.9, д). Число вертикальных ребер изменяется от 1 до 5 в зависимости от нагрузки (0,17—0,85 МН) и диаметра аппарата. Между опорой и корпусом аппарата устанавливается подкладной лист толщиной 4—16 мм.

Все нормализованные опоры выбирают по максимальной силе тяжести аппарата G_m с учетом внутренних и наружных устройств, изоляции и реакционной смеси или воды, которой заполняют аппарат при гидравлических испытаниях. При этом должно выполняться неравенство

$$\frac{G_m}{z} \leq G_d,$$

где z — число опор; G_d — допустимая нагрузка на одну опору, МН (по ОСТ 26-665—72 или МН 5132—63).

Глава 5. АППАРАТЫ ЕМКОСТНОГО ТИПА

Аппараты емкостного типа, производительность которых зависит от объема реакционного пространства, широко используются в химической промышленности. К данному типу относятся контактные аппараты, в том числе и аппараты высокого давления, аппараты с перемешивающими устройствами и вспомогательная аппаратура — сборники, хранилища, резервуары.

5.1. АППАРАТУРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В основной химической промышленности давления выше 10 МПа (100 кг/см²) принято считать высокими. Повышение давления позволяет увеличить скорость процесса и выход про-

дукта, если реакция сопровождается уменьшением объема реагирующих веществ.

Высокие давления широко используются в азотнотуковой промышленности. Так, синтез аммиака из азота и водорода осуществляется при давлениях 30—60 МПа (300—600 кг/см²), а синтез метанола из оксида углерода и водорода при 20—30 МПа, карбамида из аммиака и углекислого газа при 18—20 МПа.

Основными аппаратами неорганического синтеза являются колонны, предназначенные для ведения непрерывного технологического процесса. Диаметр таких колонн должен быть минимальным, поскольку с ростом его увеличивается толщина стенок корпуса колонны и, следовательно, возрастает расход металла и стоимость аппарата. Диаметр колонн высокого давления обычно не превышает 2,4 м [7, 16, 17]. Для создания необходимого объема аппарата увеличивают его высоту, при этом отношение высоты к диаметру обычно составляет 10 : 1—15 : 1.

Колонны высокого давления (рис. 5.1). Состоят из следующих основных частей: корпуса 1, крышки 2, затвора 3, технологического устройства (насадки) 4 и днища 5. На корпуса аппаратов высокого давления разработан ГОСТ 11879—66, который распространяется на стальные сосуды с внутренним диаметром 400—1400 мм, работающие при давлениях 19,62—68,74 МПа (200—700 кгс/см²) и температуре корпуса —50+400 °С. По конструкции сосуды делятся на пять типов: ГД — с днищем и горловиной, ЦД — с днищем, ГГ — с двумя горловинами, ЦГ — с одной горловиной и ЦЦ — цилиндрические.

По температуре корпуса сосуды подразделяют на три ступени: I — от —50 до +200°, II — 200—300° и III — 300—400 °С. Расчетные давления выбирают из следующего ряда: 200, 320, 500 и 700 кгс/см². Диаметр горловины должен быть равен 400, 500, 600, 800 или 1000 мм, а длина корпуса может изменяться от 3 до 28 м.

Пример условного обозначения стального сосуда с одной горловиной (ЦГ), работающего при температуре корпуса не выше 200 °С (I ступень) и расчетном давлении 200 ат, внутренним диаметром 1,4 м и длиной 16 м: ЦГ — I — 200×1,4×16 ГОСТ 11879—66.

Аппараты высокого давления подлежат инспекции Госгортехнадзора, их испытывают пробным давлением ($P_{пр} = 1,25P$) по специальной инструкции.

Корпуса. Корпус колонны воспринимает основную нагрузку от внутреннего давления и имеет значительную толщину стенок. Стоимость производства корпуса определяет стоимость колонны. Корпуса колонны высокого давления изготов-

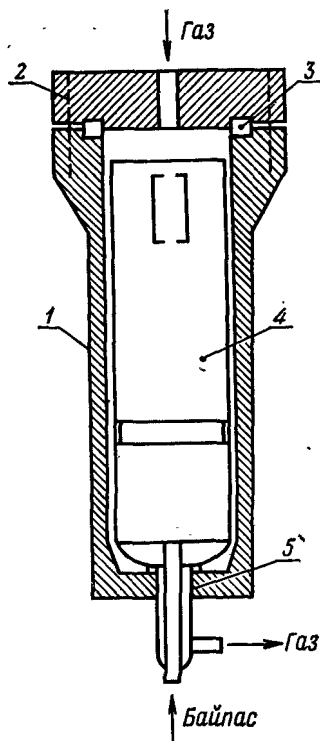


Рис. 5.1. Схема колонны высокого давления.

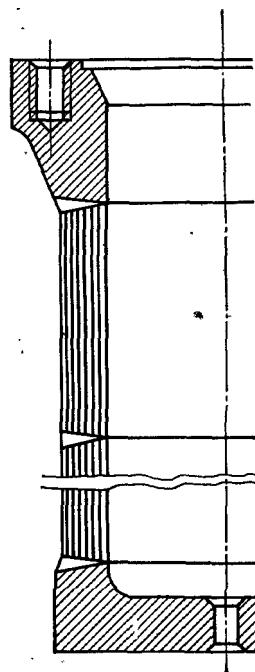


Рис. 5.2. Многослойный корпус с приварными фланцем и дном.

ливают различными методами, например сплошные корпуса из цилиндрической литой заготовки массой 200—350 т. Заготовку прошивают дорном и куют на оправке молотами большой мощности до получения цилиндра нужного диаметра с заданной толщиной стенок.

Штампо-сварные корпуса изготавливают путем штамповки из толстолистовой стали полуобечаек, которые затем сваривают продольным швом в царги (кольца), а из последних — корпус нужной длины. Фланец для присоединения крышки и дна делают ковным и соединяют с корпусом сваркой.

Сплошные корпуса (кованые и штампо-сварные) имеют общий недостаток: внутренние слои металла испытывают значительное напряжение, тогда как наружные нагружены слабо, что приводит к повышенному расходу металла.

Многослойные корпуса изготавливают путем последовательной напрессовки обечаек или полуобечаек и соединяют

их в единое целое сваркой. На внутреннюю цельнотянутую или сварную гильзу с толщиной стенки 12 мм плотно насаживают гидропрессом полуобечайки толщиной 5—6 мм и соединяют продольным швом. Сварные швы зачищают вровень с поверхностью листа и надевают следующий слой. Число швов может достигать 20. Таким путем получают царги длиной 3—4 м, которые сваривают друг с другом в торец до получения корпуса нужной длины. Фланцы и днища соединяют с корпусом автоматической сваркой (рис. 5.2). Данный метод нашел широкое применение в СССР и США.

Многослойные холодные корпуса ($t \leq 200^\circ\text{C}$), работающие при давлениях до 32 МПа, изготавливают из сталей 20Г2С или 25ГС, а при расчетных температурах до 300°C из низколегированных сталей, например 15ХГМ.

Витые (оплетенные) корпуса производят путем наматывания специальной профильной ленты шириной 60—100 мм, нагретой до $700\text{—}800^\circ\text{C}$, на внутреннюю гильзу толщиной 20—30 мм. Лента укладывается по винтовой линии. Каждый последующий слой сдвигается относительно предыдущего на $\frac{1}{3}$ ширины ленты. Выступы одного слоя запрессовываются в пазы другого профильным роликом с гидروприводом, после чего лента охлаждается струей воздуха, а затем водой.

Рулонные корпуса состоят из внутренней сварной гильзы толщиной примерно 10 мм, на которую с натягом намотана стальная лента толщиной 3—4 мм, и внешнего кожуха. Концы ленты закрепляют сваркой. После получения нужной толщины стенки обмотанную заготовку вставляют во внешний кожух толщиной 5—6 мм и заваривают продольный шов. Таким образом получают обечайки (царги) длиной 1,5 м, торцы которых обтачивают на станке и сваривают встык, а затем к концам цилиндра приваривают кованные днища и фланцы.

На изготовление рулонных корпусов затрачивается меньше времени и меньше расходуется металла, чем на изготовление сплошных, используется простое оборудование и достигается высокий уровень механизации работ. Все это обеспечивает низкую стоимость рулонных корпусов (табл. 5.1).

Табл. 5.1. Соотношение стоимости изготовления корпусов высокого давления различными способами

Способ изготовления	Относительная стоимость
Кованные	100
Штампо-сварные	63—80
Многослойные	50—57
Рулонные	42—45

Затворы аппаратов высокого давления. Затвор аппарата служит для герметизации стыка между корпусом колонны и крышкой в рабочем состоянии. Он должен обеспечивать герметичность стыка в рабочем режиме, а также при изменениях температуры и давления, иметь простую легкую в изготовлении конструкцию, допускать многократное использование уплотняющих элементов, обеспечивать быструю сборку и разборку аппарата.

По типу уплотняющего элемента различают два вида затворов. Широкое распространение в аппаратах высокого давления получили затворы с пластичным обтюратором (*прокладкой*) из мягкого металла — меди или алюминия. За счет обжатия при затяжке шпилек или под действием внутреннего давления в аппарате материал переходит в пластичное состояние и заполняет все неровности уплотняемых поверхностей, обеспечивая непроницаемость стыка.

В затворах с упругим обтюратором (*беспрокладочных*) уплотнение достигается за счет сжатия шлифованных поверхностей стальных деталей, причем эти поверхности не испытывают остаточных деформаций. В данном случае уплотняются либо непосредственно крышка и корпус по конусной поверхности, либо между ними закладывается специальное стальное кольцо треугольного, трапециевидного или другого сечения. Полной герметизации в этих затворах не достигается, так как остаются микроскопические зазоры, через которые наблюдается диффузия газов. Затворы с упругим обтюратором широко используются в аппаратах сверхвысокого давления.

По способу создания обжатия обтюратора затворы подразделяются на две группы.

1. В затворах *принудительного уплотнения* усилие обжатия обтюратора создается крепежными шпильками или специальными нажимными винтами. При сборке затвора обтюратор обжимается с усилием, превышающим усилие, необходимое для герметизации аппарата. В рабочем состоянии силы обжатия уменьшаются вследствие действия внутреннего давления на крышку, но остаются достаточными для сохранения непроницаемости стыка.

2. В *самоуплотняющихся затворах* обжатие уплотняемых поверхностей достигается за счет внутреннего давления в аппарате. Затворы с *осевым самоуплотнением* воспринимают полное усилие внутреннего давления газа на крышку аппарата. В затворах с *радиальным самоуплотнением* дополнительное усилие обжатия уплотняемых поверхностей достигается действием внутреннего давления в радиальном направлении на стальное кольцо. Упругое кольцо при этом расширяется и обжимает уплотняемые поверхности, увеличивая герметичность затвора.

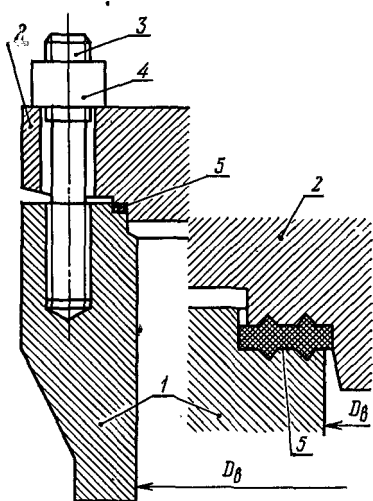


Рис. 5.3. Болтовой затвор принудительного уплотнения с пластичным плоским обтюратором.

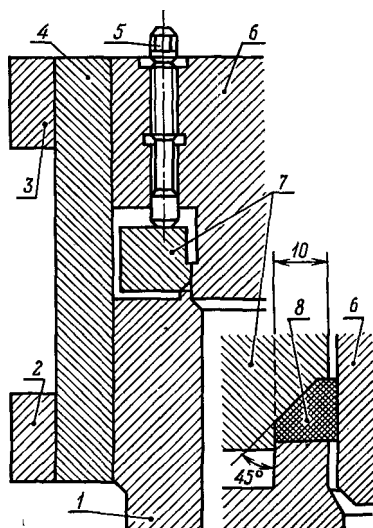


Рис. 5.4. Безболтовой затвор принудительного уплотнения с пластичным треугольным обтюратором, нажимными винтами и разъемной муфтой.

По способу крепления крышки к корпусу затворы подразделяются на болтовые, в которых соединение указанных частей осуществляется шпильками, и безболтовые, в которых крышка крепится к корпусу муфтами. Некоторые из распространенных конструкций затворов рассмотрены ниже.

Болтовой затвор принудительного уплотнения с пластичным плоским обтюратором (рис. 5.3) используется в холодных аппаратах (до 200 °С) небольшого диаметра. Прокладка 5 шириной 6—20 мм и толщиной 4—6 мм зажимается между корпусом 1 и крышкой 2. Кольцевые канавки треугольного сечения увеличивают поверхность контакта с прокладкой. Крепёжные шпильки 3 с гайками 4 служат для обжатия прокладки. Эти же шпильки воспринимают внутреннее давление на крышку аппарата. Достоинством затвора является его простота, а важными недостатками — чувствительность к колебаниям температуры, большая нагрузка на шпильки и трудоемкость их затяжки.

Применение затворов такого типа ограничено условием

$$PD_{\text{ср.п}} < 18 \text{ МН} \cdot \text{м},$$

где P — давление в аппарате, МПа; $D_{\text{ср.п}}$ — средний диаметр прокладки, м.

Безболтовой затвор принудительного уплотнения с пластичным obtюратором трапецеидального сечения, нажимными винтами и разъемной муфтой (затвор ГИАП) представлен на рис. 5.4. Корпус колонны без фланца 1 соединяется с крышкой 6 при помощи разъемной муфты 4, на поверхности касания которых выполнена кольцеобразная нарезка. Резьба упрощает и ускоряет сборку и разборку затвора. Полукольца муфты удерживаются в рабочем положении вспомогательными кольцами 2, 3. Уплотнение между крышкой и корпусом обеспечивается трапецеидальным пластичным obtюратором 8. Нажимные винты 5 и кольцо 7 служат для затяжки obtюратора и обеспечивают герметичность затвора. Внутреннее давление в колонне уменьшает усилие затяжки obtюратора, но благодаря упругости винтов 5 это усилие остается достаточным для сохранения непроницаемости стыка. Достоинство данного затвора — его малая чувствительность к изменению температуры (уплотнение сальникового типа позволяет сохранять герметичность при изменении положения крышки относительно корпуса).

Применение затвора данного типа возможно при давлениях 10—100 МПа и температуре до 540 °С.

Двухконусный радиально-самоуплотняющийся болтовой затвор с пластичным obtюратором (рис. 5.5) нашел широкое применение благодаря относительной простоте конструкции, высокой надежности и малой чувствительности к изменению температуры. В корпусе 1 и крышке 2 проточены конусные уплотняемые поверхности, к которым прилегает кольцо 4 с ко-

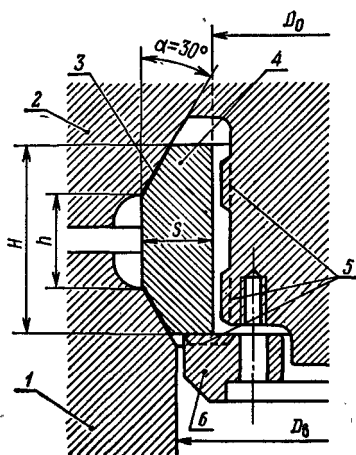


Рис. 5.5. Двухконусный радиально-самоуплотняющийся затвор с пластичным obtюратором.

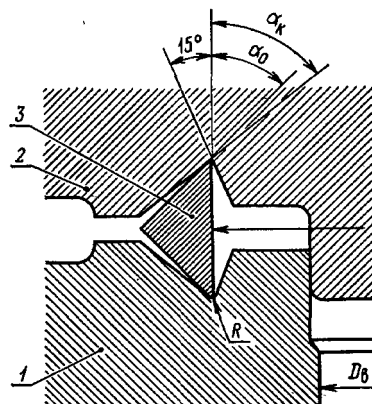


Рис. 5.6. Радиально-самоуплотняющийся затвор с треугольным упругим obtюратором.

ническими срезами на наружной поверхности. Между уплотняемыми поверхностями закладывается пластичный, чаще алюминиевый, обтюратор 3 толщиной 1—1,5 мм. Кольцо крепится к крышке планкой 6, удерживаемой болтами. Предварительное уплотнение затвора достигается затяжкой шпилек (см. рис. 5.3). По мере повышения давления в аппарате кольцо расширяется и заклинивается между корпусом и крышкой, увеличивая сжатие прокладки. Таким образом, с ростом рабочего давления повышаются смятие обтюлятора и герметичность затвора. Чтобы рабочая среда попадала в зазор между плоской поверхностью кольца и крышкой, на поверхности планки и крышки фрезеруются специальные канавки 5 шириной 6—8 мм.

Двухконусный затвор допускает неоднократное использование прокладок. Недостатком его является возникновение распорных усилий, увеличивающих нагрузку на шпильки. Этот затвор принят в качестве типового для холодной и горячей (до 400 °С) аппаратуры высокого давления (до 100 МПа) в пределах $PD_{\text{ср.п}} \leq 55 \text{ МН} \cdot \text{м}$.

Болтовой радиально-самоуплотняющийся затвор с треугольным упругим обтюратором (рис. 5.6) весьма прост по конструкции: в канавки корпуса 1 и крышки 2 закладывается гибкое шлифованное стальное кольцо 3. В сечении обтюратор представляет собой равнобедренный треугольник, устанавливаемый углом наружу. Угол конусности канавок α_n на 1—1,5° больше угла конусности обтюлятора α_o . Высота кольца на 0,6—0,8 мм больше суммарной глубины канавок. Радиус закругления кромок кольца и обтюлятора r составляет 0,8—1,2 мм.

Предварительное уплотнение затвора достигается затяжкой шпилек. Благодаря малой площади контакта уплотняемых поверхностей усилие затяжки в 4—5 раз меньше, чем в других затворах. Под действием внутреннего давления кольцо расширяется и плотно прилегает к коническим поверхностям канавок. Этот затвор (дельта-затвор) обеспечивает герметичность уплотнения, он малочувствителен к изменению температуры и давления, но требует повышенной точности обработки деталей.

В ряде аппаратов повышенной единичной мощности нашёл применение *болтовой затвор с упругим обтюратором восьмиугольного сечения*, который применяют при давлениях 6,4—32 МПа, температуре среды до 540 °С и диаметре горловины аппарата до 1600 мм.

Местные уплотнения. В аппаратах и коммуникациях высокого давления широко используются *линзовые уплотнения*. Так, присоединение штуцера к аппарату выполняется следующим образом (рис. 5.7). В месте контакта с линзой 6 конец

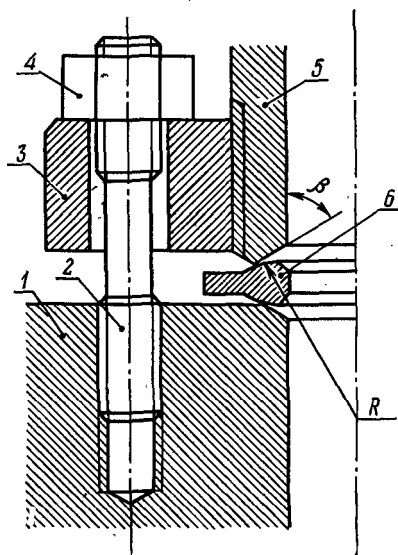


Рис. 5.7. Присоединение трубы к аппарату на линзе.

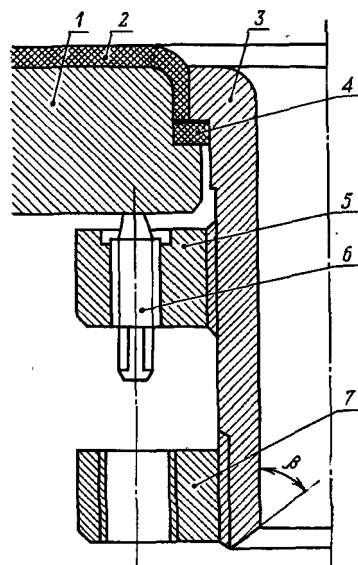


Рис. 5.8. Самоуплотняющийся штуцер.

трубы 5 и крышка 1 протачиваются на конус под углом β 70°. Фланец 3 крепится к крышке шпильками 2 с гайками 4. Торцевая поверхность стальной линзы, соприкасающаяся с конусами, обтачивается по сфере радиусом R . Сочетание сферической поверхности линзы с коническими поверхностями крышки и трубы уменьшает площадь контакта и поэтому требует меньшего усилия для герметизации стыка.

Уплотнительные поверхности протачиваются в соответствии с ГОСТ 9400—63, а линзы изготавливаются по ГОСТ 10493—75 с диаметром условного прохода до 200 мм и на давление до 100 МПа. Рабочая температура может достигать 540 °С.

Для высокотемпературных трубопроводов используют *затворы с разрезной линзой*, что увеличивает надежность уплотнения при изменении температуры.

Одна из конструкций *самоуплотняющегося штуцера* показана на рис. 5.8. Корпус колонны 1 футерован слоем высоколегированной стали 2. Штуцер 3 изготавливают из коррозионно-устойчивого материала. Стык между корпусом колонны и штуцером уплотняют пластичной прокладкой 4. Первоначальное уплотнение штуцера достигается затяжкой упорных шпилек 6. Фланцы 5 и 7 делают из обычной конструкционной стали и крепят на штуцере резьбой. \surd

Насадки. Они необходимы для проведения технологического процесса, их устройство зависит от назначения аппарата. В колоннах синтеза аммиака насадки обычно включают в себя теплообменник для подогрева азотно-водородной смеси, пусковой электроподогреватель и катализаторную коробку. В некоторых типах колонн насадки содержат пакеты котла-утилизатора, предназначенного для получения пара за счет тепла реакции синтеза аммиака.

5.2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ АППАРАТОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ

Расчеты на прочность элементов аппаратов высокого давления выполняют по ОСТ 26-1046—74 «Сосуды и аппараты высокого давления. Нормы и методы расчета на прочность».

Цилиндрические обечайки, работающие под внутренним давлением. Исходными данными для расчета толщины стенки цилиндрической обечайки обычно являются внутренний диаметр, внутреннее давление, перепад температур по толщине стенки ΔT и механические свойства материала сосуда при рабочей температуре стенки — предел текучести σ_T^t или предел прочности при растяжении σ_B^t .

Материал сосуда подбирают в зависимости от температурного режима работы и способа изготовления аппарата, коррозионной активности среды. Так, для цельнокованных корпусов, работающих при $P_c \leq 50$ МПа и $t < 200$ °С, используется сталь 35Г2, а для штампо-сварных корпусов ($P_c \leq 32$ МПа, $t \leq 200$ °С) — 10Г2С1 или 09Г2С. Коэффициент запаса прочности на растяжение n_B в уравнении (4.1) принимают равным 2,2—2,6, а на текучесть n_T — 1,5. Расчеты выполняют либо по максимальным упругим напряжениям, либо по предельным нагрузкам.

При действии на цилиндрическую оболочку внутреннего давления или перепада температур в ней возникают три вида напряжений: тангенциальное σ_t , действующее по касательной к образующей цилиндра; осевое σ_z , направленное вдоль оси цилиндра, и радиальное σ_r , действующее перпендикулярно к окружности цилиндра. Распределение напряжений по толщине стенки описывается уравнением Ляме.

При внутреннем давлении радиальное сжимающее напряжение σ_r равно давлению среды у внутренней поверхности, уменьшаясь до нуля у наружной (рис. 5.9, а).

Осевое напряжение σ_z равномерно распределено по толщине стенки. Оно приводит к появлению дополнительных растягивающих усилий. Его значение определяют по формуле

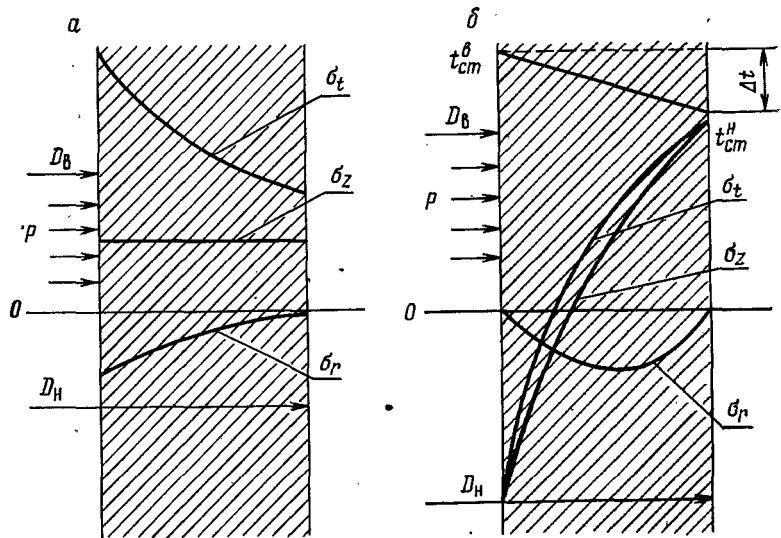


Рис. 5.9. Распределение напряжений в стенке цилиндра: а — от внутреннего давления; б — от внутреннего давления и перепада температур.

$$\sigma_z = P \frac{1}{\beta^2 - 1},$$

где коэффициент толстостенности $\beta = D_n/D_b \pm 2C_k$.

Тангенциальное растягивающее напряжение σ_t имеет наибольшую величину на внутренней поверхности и значительно уменьшается на наружной. Значение напряжения на внутренней поверхности

$$\sigma_t^в = P \frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - 1}, \quad (5.1)$$

а на наружной

$$\sigma_t^н = P \frac{2}{\beta^2 - 1}. \quad (5.2)$$

Из сопоставления уравнений (5.1) и (5.2) видно, что разность напряжений на внутренней и наружной стенках увеличивается с ростом коэффициента толстостенности β .

Сплошные (кованые) корпуса. Толщину стенки кованой обечайки можно рассчитать по уравнению, полученному на основании энергетической теории прочности:

$$S = 0,5D_b(\beta - 1) + C_R + C_1, \quad (5.3)$$

где β — коэффициент толстостенности, который рассчитывают по уравнению

$$\ln \beta = P / \sigma_d \Phi_{\text{ш}}$$

или определяют по графику (рис. 5.10).

Коэффициент прочности продольного сварного шва $\Phi_{\text{ш}}$ для среднелегированных сталей равен 0,85, а для малоуглеродистых и низколегированных 0,95.

Полная толщина стенок корпуса включает поправки на коррозию, отклонение размеров и округление, которые находятся по формуле (4.2).

Составные корпуса. В составных (многослойных) корпусах, собранных с натягом, кольцевые напряжения σ_t в рабочем состоянии распределены по толщине обечайки довольно равномерно, поэтому расчет толщины стенки ведут по максимальному кольцевому напряжению. При соблюдении условия $\sigma_t \leq \sigma_d$ толщину стенки корпуса можно найти по формуле

$$S' = \frac{PD_B}{2\sigma_d}$$

или

$$\beta = \frac{P}{\sigma_d} + 1,$$

где $\sigma_d = \sigma_B^t / 3$.

Обечайки, работающие под наружным давлением. Корпус насадки работает под наружным давлением, так как из-за значительного гидравлического сопротивления слоя катализатора и теплообменника разность давлений на входе в колонну и на выходе из нее составляет 0,4—1,0 МПа. Под наружным давлением находятся чехлы термопар и детали внутренних котлов-утилизаторов, для которых разность внешнего и внутреннего давлений составляет 0,2—32 МПа.

При действии наружного давления знаки σ_t и σ_z меняются на обратные (см. рис. 5.9, а), т. е. на внутренней поверхности цилиндра возникают значительные сжимающие усилия. Знак радиального напряжения σ_r сохраняется, но оно имеет максимальное значение на наружной поверхности. В результате такого распределения напряжений расчет обычно ведут по допустимым напряжениям сжатия на внутренней поверхности цилиндра.

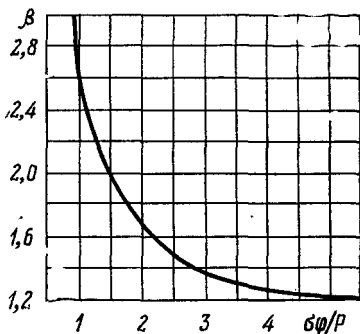


Рис. 5.10. Зависимость коэффициента толстостенности β от фактора σ_{Φ}/P .

Все детали насадки и внутреннего котла-утилизатора работают при температурах 400—600 °С, поэтому они изготавливаются в основном из легированных сталей. Наибольшее применение нашла сталь 12Х18Н10Т, для отдельных деталей используют стали 20Х3МВФ и Х17.

Толщину обечайки насадки можно определить по формуле (4.8).

Учет температурных напряжений. В толстостенных аппаратах при действии радиального теплового потока через стенку возникает перепад температур (рис. 5.9, б), что приводит к появлению температурных напряжений. Распределение напряжений по толщине стенки описывается уравнениями Лоренца. При внутреннем обогреве на внутренней поверхности цилиндра возникают сжимающие усилия, равные сумме напряжений σ_t и σ_z , а на наружной — растягивающие. Радиальное напряжение σ_r незначительно по величине, значение его у поверхностей стенки равно нулю. Перемена направления теплового потока приводит к изменению знаков на обратные: при внешнем обогреве на наружной поверхности обечайки возникают напряжения сжатия, а на внутренней — растяжения.

Величины температурных напряжений учитываются в том случае, если температурный перепад Δt превышает 10 °С, $D_n/D_v \geq 1,1$, а средняя температура стенки составляет для углеродистой стали $t_{ст} \leq 420^\circ$, для легированной $t_{ст} \leq 470^\circ$ и для аустенитной $t_{ст} \leq 550^\circ$ С.

На внутренней поверхности

$$\sigma_t^в = \frac{\alpha^t E^t (t_{ст}^в - t_{ст}^н)}{2(1-\mu)} \left(\frac{1}{\ln \beta} - \frac{2\beta^2}{\beta^2 - 1} \right); \quad (5.4)$$

на наружной

$$\sigma_t^н = \frac{\alpha^t E^t (t_{ст}^в - t_{ст}^н)}{2(1-\mu)} \left(\frac{1}{\ln \beta} - \frac{2}{\beta^2 - 1} \right), \quad (5.5)$$

где α^t — коэффициент линейного расширения, 1/град.

Для аппаратов, работающих под внутренним давлением, при внутреннем обогреве напряжения растяжения на внутренней поверхности стенки частично компенсируются напряжениями сжатия от температурного перепада, что увеличивает запас прочности. При наружном обогреве напряжения растяжения от внутреннего давления и температурного перепада суммируются, поэтому необходима проверка. Суммарное напряжение на внутренней поверхности цилиндра можно определить по уравнению

$$\sigma^в = \frac{1,73P\beta^2}{(\beta^2 - 1)\varphi_{ш}} + \sigma_t^в \leq \frac{\sigma_T^t}{1,1}.$$

При наружном давлении наиболее неблагоприятным при внутреннем обогреве считается случай, когда напряжения сжатия суммируются на наружной поверхности:

$$\sigma_c^H = \frac{P_H (\beta^2 + 1)}{(\beta^2 - 1) \varphi_{III}} - \sigma_t^H \leq \frac{\sigma_T^t}{1,1}.$$

Днища. Плоские днища нередко используются при конструировании корпусов высокого давления (см. рис. 5.2). Расчет их на прочность выполняется по максимальным упругим напряжениям. Толщина толстостенного днища может быть определена по уравнению

$$S = 0,45 D_B \sqrt{P/\sigma_d K_o}; \quad (5.6)$$

$$K_o = \frac{D_B - \sum d_i}{D_B},$$

где K_o — коэффициент ослабления днища отверстиями; $\sum d_i$ — сумма диаметров отверстий в наиболее ослабленном сечении днища.

Уравнение (5.6) справедливо при $\sum d_i \leq 0,6 D_B$ и при конусном переходе от цилиндрического корпуса к плоскому днищу.

Выпуклые сферические и эллиптические днища, работающие под внутренним давлением, рассчитывают по формуле

$$S = \frac{P D_B}{4 K_o \sigma_d - P} \cdot \frac{D_B}{2 h_B} + C, \quad (5.7)$$

где $K_o = 1$ при $d_o/\sqrt{D_B(S-C)} \leq 0,4$;

$$K_o = \frac{2}{1,25 d/\sqrt{D_B(S-C)} + 1,5} \quad \text{при } 0,4 < \frac{d_o}{\sqrt{D_B(S-C)}} < 2,0;$$

$$K_o = \frac{2}{d/\sqrt{D_B(S-C)} + 2} \quad \text{при } \frac{d_o}{\sqrt{D_B(S-C)}} \geq 2,0,$$

где d_o — диаметр наибольшего отверстия, м.

Плоские крышки. Съёмные плоские крышки часто применяются в различных типах колонн и сосудов высокого давления (см. рис. 5.1, 5.4). Они необходимы для размещения насадки в корпусе колонны. Через крышки проходят чехлы термопар, стояки внутренних котлов-утилизаторов, вводы электроподогревателей и трубы основного или байпасного потока азото-водородной смеси.

На крышку действуют силы внутреннего давления среды Q_d и усилия уплотнения затвора R_n , вследствие чего она имеет значительную толщину. Чаще всего проверочный расчет крышки выполняется из условий прочности на изгиб диаметрального сечения, наиболее ослабленного отверстиями.

У аппаратов среднего давления крышки, работающие при температурах до 200 °С, изготавливают из сталей 22К и 35Г2. Толщину крышки H (м) определяют по формуле

$$H = 0,45 \sqrt{\frac{3,8Q(D_6 - D_{\text{ср.п}}) + D_{\text{ср.п}}^3 P}{(D_n - 2d_0 - \sum_{i=1}^n d_i) \sigma_d}} + C, \quad (5.8)$$

где Q — расчетное усилие, МН; d_0 — диаметр отверстий под шпильки, м; D_6 — диаметр окружности, на которой расположены шпильки, м; $D_{\text{ср.п}}$ — средний диаметр уплотнительной поверхности, м; D_n — наружный диаметр крышки, м; d_i — диаметр отверстий в крышках, м.

Значение расчетного усилия для затворов с плоской или восьмиугольной прокладкой находят по формулам

$$Q = Q_d + R_n; \quad (5.9)$$

$$Q_d = 0,785PD_{\text{ср.п}}^2; R_n = \pi D_{\text{ср.п}} b_0 q, \quad (5.10)$$

где b_0 — эффективная ширина прокладки, м; q — удельное давление на прокладку, которое находят по табл. 4.8.

Расчетное усилие для затворов с двухконусным obtюратором вычисляют по формулам

$$Q = Q_d + N; \quad (5.11)$$

$$N = \frac{\pi}{2} D_{\text{ср.п}} \frac{(A + C)}{2} P \operatorname{tg}(\alpha - \rho), \quad (5.12)$$

где N — осевая составляющая равнодействующей внутреннего давления, МН; $(A + C)/2$ — ширина obtюраторного кольца по средней линии уплотнительной поверхности, м (см. рис. 5.5); α — угол конусности obtюратора, равный 30°; ρ — угол трения алюминия по стали, равный 15°. Значения $D_{\text{ср.п}}$ берут из табл. 5.2.

Для затворов с дельтаобразным obtюратором (см. рис. 5.6) расчетное усилие находят по формуле (5.11), в которой

$$N = \frac{\pi}{2} D_{\text{ср}} AP \operatorname{tg}(\alpha_k - \rho),$$

где $D_{\text{ср}}$ — диаметр центра уплотнительной канавки, м; A — высота obtюратора, м; α_k — угол конусности уплотнительных поверхностей корпуса и крышки, равный 48°; ρ — угол трения стали по стали, равный 11°20'.

Шпильки. Шпильки несут основную нагрузку в болтовых затворах. Они противостоят действию внутреннего давления среды и усилию уплотнения затвора. Их изготавливают из среднелегированных сталей. Так, при расчетной температуре до 200 °С для шпилек используют стали 30ХМА, 35ХМА и др.

Табл. 5.2. Размеры затворов, мм

Внутренний диаметр сосуда или горловины D_B	Размеры двухконусного обтюратора				Размеры дельтаобразного обтюратора	
	$D_{ср.п}$	A	$\frac{A+C}{2}$	C	$D_{ср}$	A
200	207	30	28	12	220	14,5
300	314	45	35	18	320	16,5
400	413	60	42	24	425	19,5
500	520	70	49	28	530	21,6
600	616	80	56	32	630	23,6
800	820	100	70	40	830	27,6
1000	1022	120	84	48	1040	30,8
1200	1223	135	95	54	1240	33,8
1400	1424	150	105	60	1450	37
1600	1624	160	112	64	1650	37
1800	1826	170	119	68	—	—
2000	2031	180	126	72	—	—
2200	2233	190	133	76	—	—
2400	2454	200	140	80	—	—

Минимальный диаметр шейки шпильки определяют по формуле

$$d_{ш} = \sqrt[3]{\frac{1,27KQ}{z\sigma_d} + d_o^2} \quad (5.13)$$

где K — коэффициент, учитывающий скручивание шпильки при натяжке (для затворов, изображенных на рис. 5.4 и 5.6, $K=1,2$); Q — суммарная нагрузка на шпильки от внутреннего давления и силы уплотнения затвора; d_o — диаметр отверстия в шпильке; z — число шпилек.

Аналогично рассчитывают диаметр стержня нажимного винта в затворе ГИАП (см. рис. 5.4). В данном случае суммарную нагрузку находят по уравнению (5.9), а d_o равно нулю.

5.3. ЕМКОСТИ, СОСУДЫ И РЕЗЕРВУАРЫ

В основной химической промышленности широко применяются аппараты объемного типа, как правило, без внутренних устройств. Они используются в качестве вспомогательного оборудования. Это обычно горизонтальные или вертикальные цилиндрические емкости, которые подразделяются по назначению следующим образом.

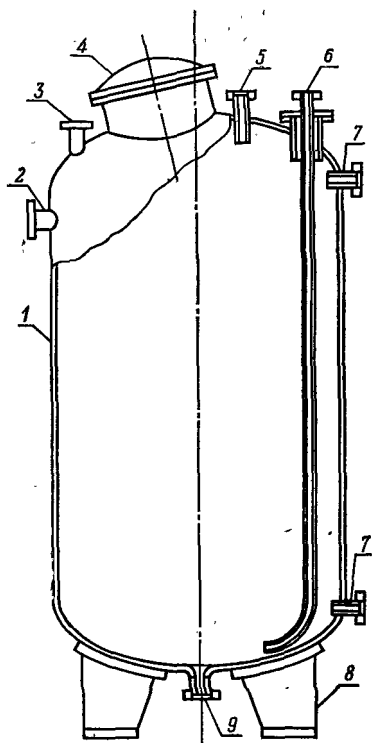


Рис. 5.11. Монжус вертикальный:

1 — корпус; 2 — перелив; 3 — штуцер для установки предохранительного клапана; 4 — люк; 5 — штуцер для подачи сжатого воздуха; 6 — подача кислоты; 7 — штуцера для установки указателя уровня; 8 — лапы; 9 — штуцер для спуска остатков кислоты.

Их используют для перекачивания кислот и других коррозионноактивных растворов без помощи насосов. Сосуд заполняют кислотой до нужного уровня, избыток ее сливают через перелив 2, затем по штуцеру 5 подают сжатый воздух и кислота выдавливается через штуцер 6. Остаток кислоты можно слить через штуцер 9. Монжусы снабжены предохранительным клапаном (штуцер 3), люком 4 для внутреннего осмотра и указателем уровня (штуцера 7).

Мерники — емкости, предназначенные для точного измерения заданного объема жидкости.

Напорные баки — емкости, служащие для создания определенного гидростатического давления жидкости за счет расположения их на определенной высоте. Как правило, они снабжены верхним входным, нижним выходным и переливным штуцерами.

Сепараторы — устройства для разделения газовой и жидкой фаз.

Ресиверы — приемники газов, предназначенные для накопления сжатых газов и уменьшения колебаний давления в сети поршневых компрессоров.

Газозольдеры — приемники газов переменного объема, работающие при давлении, близком к атмосферному. Они служат буферной емкостью между цехами, которые производят и потребляют газы.

Маслоотделители — устройства для очистки газов от капель масла. Устанавливаются на линиях сжатых газов после компрессоров.

Аккумуляторы — приемники жидкостей, находящихся под давлением.

Монжусы (монтежю) — устройства, предназначенные для периодического подъема и перемещения накопленных в них жидкостей под давлением газов (рис. 5.11). Их используют для перекачивания кислот и других коррозионноактивных растворов без помощи насосов. Сосуд заполняют кислотой до нужного уровня, избыток ее сливают через перелив 2, затем по штуцеру 5 подают сжатый воздух и кислота выдавливается через штуцер 6. Остаток кислоты можно слить через штуцер 9. Монжусы снабжены предохранительным клапаном (штуцер 3), люком 4 для внутреннего осмотра и указателем уровня (штуцера 7).

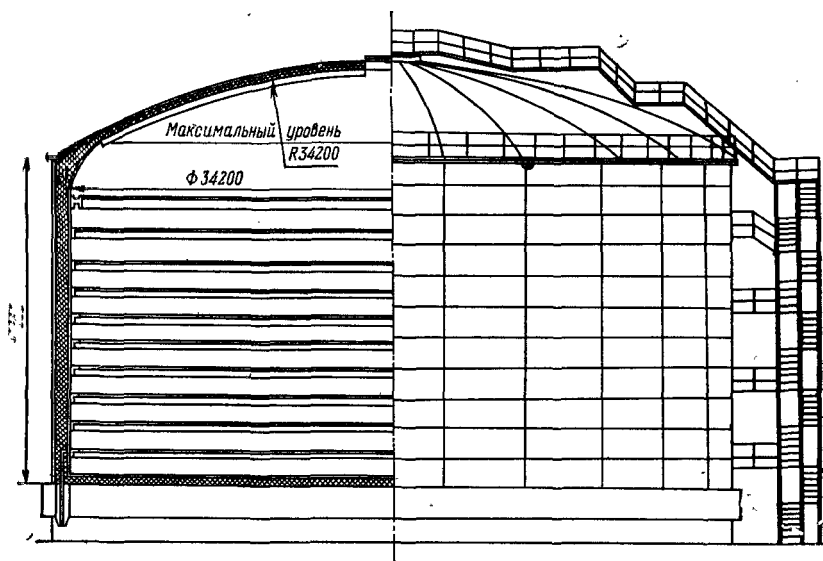


Рис. 5.12. Хранилище жидкого аммиака.

Хранилища (резервуары) — емкости для длительного хранения исходных и конечных жидких веществ. Так, для хранения жидкого аммиака используют изотермические резервуары объемом 20 000 м³ (рис. 5.12). Пространство между наружной отражающей и внутренней стенками (900 мм) заполнено стекловатой и перлитом с объемной массой 100 кг/м³, а пространство между днищами (450 мм) — блоками из пенопласта. Резервуар рассчитан на работу под избыточным давлением 0,01 МПа и вакуумом 500 Па. Внутренняя стенка выполнена из стали 09Г2С толщиной 10—14 мм и усилена ребрами жесткости.

Для хранения серной кислоты используют резервуары емкостью 100, 325 и 560 м³ с кислотоупорной футеровкой соответственно диаметром 5, 2, 9, 12 м и общей высотой 5,075, 5,75 и 6,42 м. Резервуары без футеровки, предназначенные для хранения серной кислоты с концентрацией выше 72 %, имеют объем 85, 610 и 2100 м³. Эти хранилища имеют цилиндрическую форму, плоское днище и коническую крышку. Их устанавливают на ленточные фундаменты для удобства осмотра и ремонта днища.

Сборники — емкости, предназначенные для сбора и хранения жидких продуктов и растворов. Их устанавливают перед насосами. В качестве сборников используют вертикальные или горизонтальные цилиндрические емкости с эллиптическими или плоскими крышками, усиленными ребрами жесткости

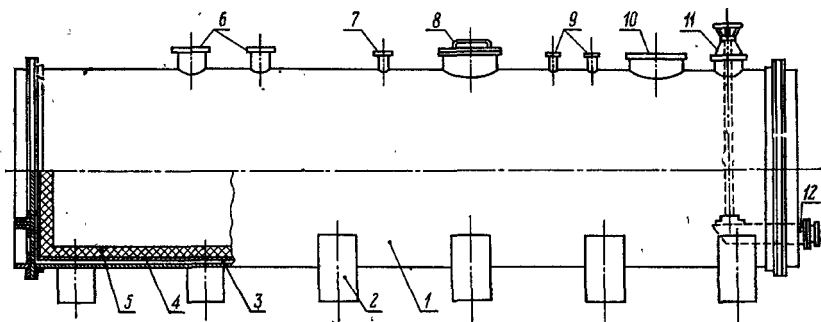


Рис. 5.13. Сборник промывной серной кислоты:

1 — корпус; 2 — опоры; 3 — слой полиизобутилена; 4 — листовой асбест; 5 — кислотоупорный кирпич или плитка; 6 — штуцера для входа кислоты; 7 — воздушник; 8 — люк для осмотра; 9 — штуцера для установки КИП; 10 — люк для установки погружного насоса; 11 — устройство для открывания клапана; 12 — штуцер с клапаном для выхода кислоты.

(рис. 5.13). При высокой коррозионной активности среды сборники футеруют или изготавливают из легированных сталей.

Размеры цилиндрических стальных сварных сосудов и аппаратов с номинальной емкостью 0,01—200 м³, минимальным наружным диаметром 219 мм и максимальным внутренним диаметром 4000 мм регламентированы ГОСТ 9931—69, в соответствии с которым сосуды и аппараты в зависимости от положения оси, формы днища и крышки подразделяются на 13 типов.

Номинальная емкость сосудов и аппаратов установлена ГОСТ 13372—67, диаметр обечайки должен соответствовать ГОСТ 9617—76, длина (высота) цилиндрической обечайки выбирается из ряда значений, рекомендованных ГОСТ 9931—69, а размеры днищ (крышек) должны отвечать требованиям соответствующих стандартов. К I типу относятся неразъемные горизонтальные и вертикальные сосуды с двумя эллиптическими отбортованными днищами (см. рис. 5.11, а). Эти же сосуды, но с отъемными отбортованными крышками отнесены ко II типу (см. рис. 4.1), а горизонтальные емкости с плоскими неотбортованными днищами к XI типу (см. рис. 5.13).

Объем аппаратов можно рассчитать по формуле (1.1), в которой время пребывания τ жидкости задается из технологических соображений: для сборников, мерников и напорных баков 10—90 минут, а для хранилищ 4—336 часов.

Толщину стенки аппаратов, работающих под наливом, находят по формуле (4.4), в которой расчетное давление P (МПа) определяют по высоте жидкости в сосуде:

$$P = H_{ж} \rho g 10^{-6}.$$

Пример. 5.1. Рассчитать толщину обечайки хранилища для моногибридного объемом 2100 м^3 , учитывая, что $D_{\text{в}}=18\,000 \text{ мм}$ и $H_{\text{ж}}=9000 \text{ мм}$. Хранилище без футеровки, прибавка на коррозию — 2 мм , материал ВСтЗпс, $\sigma_{\text{т}}=134 \text{ МПа}$. Коэффициент прочности сварного шва $\varphi=0,95$. Плотность 10% серной кислоты при 30°C $\rho=1826,1 \text{ кг/м}^3$.

Вначале определяем расчетное давление в хранилище:

$$P=9,0 \cdot 1826,1 \cdot 9,81 \cdot 10^{-6}=0,161 \text{ МПа.}$$

Толщина стенки составит

$$S = \frac{18,0 \cdot 0,161}{2 \cdot 134 \cdot 0,95} + 0,002 = 0,01136 + 0,002 = 0,01336 = 14 \text{ мм.}$$

Толщина нижнего пояса хранилища равна 14 мм . Однако в верхней части хранилища, где гидростатическое давление ниже, толщина может быть уменьшена; фактически верхний пояс выполняют из листов толщиной 12 мм .

5.4. АППАРАТЫ С ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Химические аппараты объемного типа (реакторы, кристаллизаторы, растворители и др.) нередко снабжаются мешалками для увеличения коэффициентов массо- и теплопередачи, а также для предотвращения осаждения взвешенных частиц.

По ГОСТ 20680—75 введены обозначения на вертикальные аппараты с механическими перемешивающими устройствами. Этот ГОСТ распространяется на аппараты объемом $0,01—100 \text{ м}^3$ при вязкости среды не более $500 \text{ П}\cdot\text{с}$ и плотности до 2000 кг/м^3 , работающие при температурах $-40+350^\circ\text{C}$ ($233—623^\circ\text{K}$) и условном давлении в аппарате $0,67 \text{ КПа}—6,4 \text{ МПа}$.

Типы аппаратов: 0 — с эллиптическим днищем и эллиптической отъемной крышкой; 1 — с неразъемным корпусом, эллиптическим днищем и крышкой; 2 — с коническим отбортованным днищем ($2\alpha=90^\circ$) и эллиптической отъемной крышкой; 3 — с неразъемным корпусом, коническим отбортованным днищем с углом при вершине $2\alpha=90^\circ$ и эллиптической крышкой; 4 — с эллиптическим днищем и плоской отъемной крышкой; 5 — с неразъемным корпусом, эллиптическим днищем и плоской крышкой; 6 — с коническим неотбортованным днищем ($2\alpha=120^\circ$) и плоской крышкой; 7 — с неразъемным корпусом, коническим днищем ($2\alpha=120^\circ$) и плоской крышкой; 8 — с плоским днищем и плоской крышкой; 9 — с неразъемным корпусом, плоским днищем и плоской крышкой.

Условные обозначения теплообменных устройств: 0 — без теплообменного устройства; 1 — с гладкой приварной рубашкой; 2 — с рубашкой из полутруб; 3 — с рубашкой с вмятинами; 4 — с отъемной рубашкой; 5 — с электроподогревателем.

Условное обозначение аппарата состоит из одиннадцати чисел, которые ставятся перед ГОСТом в следующем порядке:

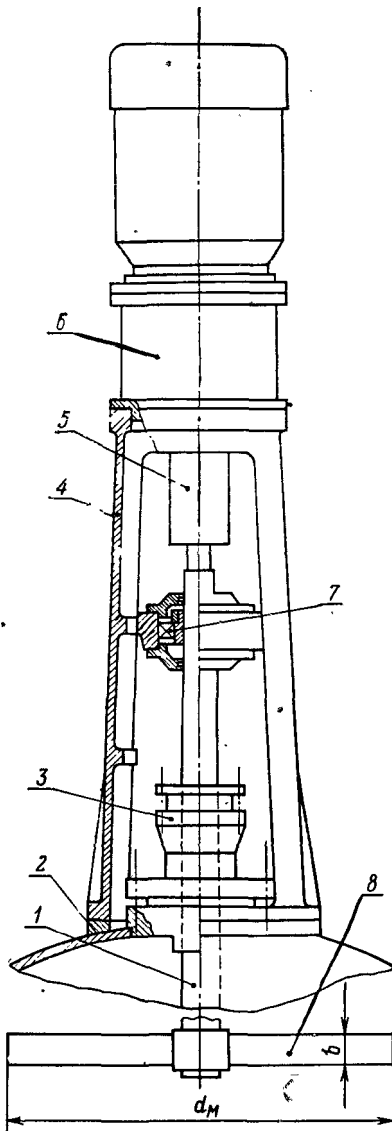


Рис. 5.14. Привод с жестким соединением валов мотор-редуктора и мешалки (исполнение 1).

расчет лопастей мешалки и вала на прочность, а также расчет вала на виброустойчивость [7, 19].

Перемешивающие устройства. Состоят из мотор-редукто-

1) тип аппарата; 2) тип теплообменного устройства; 3) тип мешалки и внутреннего устройства (двузначное число, которое находят по табл. 5.3); 4) число мешалок (если мешалка одна, то число не указывают); 5) объем аппарата, м³; 6) условное давление в аппарате, МПа; 7) условное давление в рубашке, МПа; 8) диаметр аппарата, мм; 9) диаметр мешалки, мм; 10) мощность привода, кВт; 11) угловая скорость мешалки, рад/с.

Пример условного обозначения аппарата с мешалкой: 8.1.37—4.01.02—1600.1100—4,5.3,35 ГОСТ 20680—75 — аппарат с плоским дном и плоской крышкой (8), гладкой приварной рубашкой (1), змеевиком и лопастной мешалкой (37), объем 4 м³, давление в аппарате 0,1 МПа, давление в рубашке 0,2 МПа, диаметр аппарата 1600 мм, диаметр мешалки 1100 мм, мощность привода 4,5 кВт, угловая скорость мешалки 3,35 рад/с.

Тип мешалки и скорость ее вращения зависят от технологических требований и физических свойств перемешиваемой среды. Широко применение получили лопастные, якорные, турбинные и винтовые мешалки.

Обозначения мешалок и внутренних устройств аппаратов с механическими перемешивающими устройствами (ГОСТ 20680—75)

Тип внутреннего устройства аппарата	Обозначение внутренних устройств	Тип мешалки и его обозначение											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		треугольная	винтовая	турбинная открытая	турбинная закрытая	шестилопастная	клетчатая	лопастная	шнековая	якорная	рамная	ленточная	ленточная со скребком
Без внутреннего устройства	0	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Отражательные перегородки	2	02	22	23	24	25	26	27	—	—	—	—	—
Змеевики	3	03	32	33	34	35	36	37	38	39	30	—	—
Отражательные перегородки и змеевик	4	04	42	43	44	45	46	47	48	—	—	—	—
Направляющая труба	5	05	52	—	54	55	—	—	58	—	—	—	—
Направляющая труба и змеевик	6	06	62	—	64	65	—	—	68	—	—	—	—
Отражательные перегородки и барботер	7	07	72	73	74	75	76	77	—	—	—	—	—
Отражательные перегородки, змеевик и барботер	8	81	82	83	84	85	86	87	—	—	—	—	—

ра 6 (рис. 5.14), укрепленного на стойке 4, из муфты 5, уплотнения 3, обеспечивающего герметичность аппарата, вала перемешивающего устройства 1, вращающегося в промежуточном подшипнике 7, и мешалки 8. Стойка крепится к опоре 2 на крышке аппарата.

Приводы к вертикальным перемешивающим устройствам стандартизованы. ОСТ 26-01-1225—75 предусматривает выпуск приводов шести типов, которые отличаются конструкцией, числом опор вала и типом редуктора. Чаще всего применяют индивидуальные приводы со стандартным электродвигателем серий АО2 и ВАО и редуктором типов ВО и МПО2. Мощность электромотора может изменяться от 0,4 до 132 кВт, а скорость вращения вала мешалки от 0,08 до 12,5 об/с (табл. 5.4). Вал мешалки соединяется с редуктором

Табл. 5.4. Характеристика приводов перемешивающих устройств

Тип привода и его обозначение	Исполнение и его обозначение	Назначение	
		Избыточное давление в корпусе не более, МПа	Частота вращения мешалки, рад/с (об/мин)
С жестким соединением вала мотор-редуктора с валом мешалки (1)	Высокий для аппаратов с консольными валами (1)	0,6	0,523—16,8 (5—160)
	Низкий, для аппаратов с концевыми опорами валов мешалок (2)	0,6	0,523—16,8 (5—160)
	Низкий, для аппаратов с консольными валами и с уплотнением типа ТДП по ОСТ 26-01-1243—75 (3)	0,6	0,523—16,8 (5—160)
Со встроенными в мотор-редуктор опорами вала мешалки (2)	Для установки на крышке аппарата (1)	3,2	2,1—33,4 (20—320)
	Для установки под аппаратом (2)	3,2	2,1—33,4 (20—320)
С подвижным соединением вала мотор-редуктора с валом мешалки (3)	С концевой опорой вала мешалки (1)	3,2	0,523—8,39 (5—80)
	С уплотнением типа ТДП по ОСТ 26-01-1243—75 (2)	3,2	0,523—8,39 (5—80)
	С уплотнением типа ТДП по ОСТ 26-01-1243—75 (3)	1,6	0,523—8,39 (5—80)
	Для установки на крышке или под аппаратом (1)	1,6	41,8—78,3 (400—750)
Малогабаритный (5)	С уплотнением типа ТДМ по ОСТ 26-01-1243—75 или гидрозатвором по ОСТ 26-01-1242—75 (1)	1,6	0,67—41,8 (6,3—400)
	С сальниковым уплотнением по ОСТ 26-01-1243—75 (2)	1,6	0,67—41,8 (6,3—400)

Окончание табл. 5.4

Тип привода и его обозначение	Исполнение и его обозначение	Назначение	
		Избыточное давление в корпусе не более, МПа	Частота вращения мешалки, рад/с (об/мин)
С мотор-вариатором (6)	С уплотнением типа ТДМ по ОСТ 26-01-1243—75 или гидрозатвором по ОСТ 26-01-1242—75 (3)	1,6	78,3—157 (750—1500)
	С сальниковым уплотнением по ОСТ 26-01-1243—75 (4)	1,6	78,3—157 (750—150)
	С уплотнением типа ТДМ по ОСТ 26-01-1243—75 или гидрозатвором по ОСТ 26-01-1242—75 (1)	1,6	бесступенчатое регулирование в пределах 0,733—7,33
	С сальниковым уплотнением по ОСТ 26-01-1243—75 (2)	1,6	(7—70) и 4,18—41,8 (40—400)

при помощи зубчатой или продольно-разъемной муфты (ОСТ 26-01-1226—75, ОСТ 26-01-1228—75).

Герметичность аппаратов с перемешивающими устройствами достигается благодаря использованию сальниковых, торцевых или манжетных уплотнений и реже гидрозатворов.

Уплотнения валов. Торцевые уплотнения различных модификаций используются для работы в кислых и слабощелочных жидких и газообразных средах при температурах от -20 до $+250$ °С, избыточном давлении до 1,6 МПа и остаточном давлении (вакуум) до 400 Па. В этих уплотнениях герметичность обеспечивается при контакте двух колец — подвижного и неподвижного. Как правило, неподвижное кольцо изготавливается из более мягких материалов — бронзы, графита, фторопласта и твердой резины (эбонит). В средах с высокой коррозионной активностью и при повышенных температурах подвижные кольца изготавливаются из легированных сталей и керамики, а неподвижные из графита. Трущиеся поверхности шлифуются и тщательно притираются.

Достоинства торцевых уплотнений — незначительная утечка газов, большая надежность и долговечность.

Двойное торцевое уплотнение (ОСТ 26-01-1243—75) состоит из корпуса 2 (рис. 5.15, а), в котором размещены все детали и который обеспечивает масляное или водяное охлаждение трущихся частей. Шпильками 1 устройство крепится к крышке аппарата. Неподвижные графитовые кольца 3 прижимаются к подвижным кольцам 4 пружинами 5. Подвижные стальные кольца соединены с водилом 6, закрепленным на валу перемешивающего устройства. Уплотнение типа ТДП снабжено встроенным опорным подшипником 7. Уловитель 8 устраняет попадание охлаждающей жидкости в аппарат.

Сальниковые уплотнения (ОСТ 26-01-1247—75) используются при давлениях до 1,6 МПа (16 атм) и температуре в аппарате до 70 °С. Эти уплотнения не рекомендуется применять при обработке в аппарате ядовитых и легколетучих веществ, а также при вакууме более 0,04 МПа. Корпус сальника 2 (рис. 5.15, б) крепится на крышке аппарата болтами или шпильками. Нажимная втулка 1 служит для затяжки сальниковой набивки 4 с помощью шпилек. Кольцо 3 необходимо для подачи и распределения смазки, а кольцо 5 (грундбукса) препятствует попаданию набивки в аппарат. Диск 6 является нижней опорой сальниковой набивки. В качестве набивки используют шнуры круглого или квадратного сечения, изготовленные из хлопка, асбеста или фторопласта. Для повышения герметичности и уменьшения трения набивку пропитывают маслами, воском или графитом. При высоких температурах и скоростях вращения вала набивка выполняется из разрезных колец, изготовленных из графита, фторопласта или

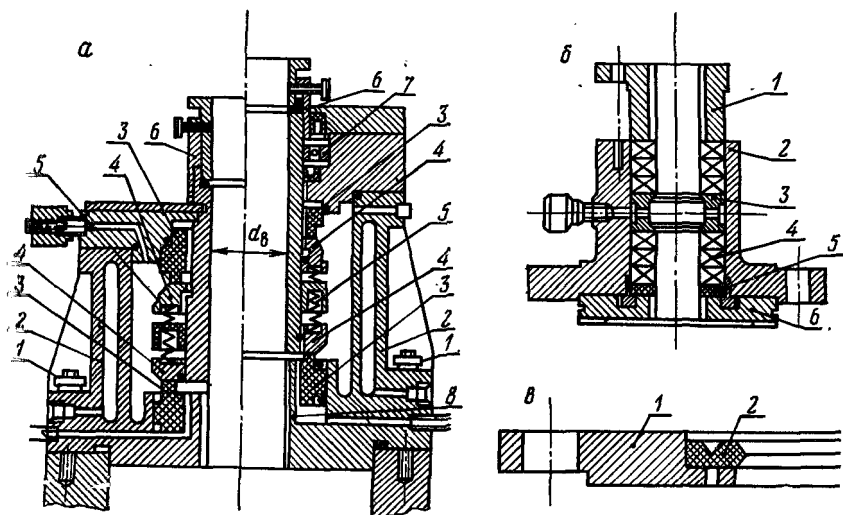


Рис. 5.15. Основные типы уплотнений валов:

a — торцевое типа ТД (слева) и типа ТДП (справа); *б* — сальниковое; *в* — манжетное.

цветных металлов. Сальники в этом случае имеют водяное охлаждение.

Манжетные уплотнения (рис. 5.15, *в*) применяются в аппаратах, работающих под атмосферным давлением, при температуре до 120 °С. Диск *1* крепится к крышке аппарата, а резиновая или фторопластовая манжета *2* служит для уплотнения вала.

Расчет мощности привода. Расчетная мощность N_M (Вт), потребляемая быстроходной мешалкой на перемешивание реакционной среды, при условии примерного равенства высоты слоя жидкости $H_{ж}$ диаметру аппарата D_B ($H_{ж} \approx D_B$) определяется по формуле

$$N_M = K_N \rho_c n^3 d_M^5, \quad (5.14)$$

где d_M — диаметр мешалки, м; ρ_c — плотность перемешиваемой среды, кг/м³; n — частота вращения, об/с; K_N — критерий мощности, зависящий от конструкции мешалки и величины центробежного критерия Рейнольдса: $Re_{ц} = \rho_c n d_M^2 / \mu_c$ [7, 19, 64].

Для лопастных мешалок при $D_B/d_M = 1,5$ в аппаратах без внутренних перегородок критерий мощности изменяется следующим образом:

$Re_{ц}$	2	10	50	100	500	1000	5000
K_N	13,5	3,4	1,2	0,86	0,6	0,48	0,34

Для большинства типов мешалок критерий мощности убывает с ростом центробежного критерия Рейнольдса.

Если высота слоя жидкости в аппарате $H_{ж}$ больше диаметра аппарата $D_{в}$, то мощность привода увеличивается. Коэффициент, учитывающий высоту жидкости в аппарате, рассчитывается по формуле

$$K_H = \left(\frac{H_{ж}}{D_{в}} \right)^{0,5}$$

Мощность, потребляемая на преодоление сил трения в сальниковых уплотнениях с мягкой набивкой N_c (Вт), можно найти по уравнению

$$N_c = 1,48 f n d_b^2 l P, \quad (5.15)$$

где f — коэффициент трения вала по набивке сальника (для ряда распространенных материалов $f=0,2$); n — частота вращения вала, об/с; d_b — диаметр вала, м; l — длина набивки, м; P_c — рабочее давление в аппарате, Па.

Сальниковые уплотнения нормализованы и длина набивки l (мм) зависит от диаметра вала d_b и давления:

$$l = (7,5 - 30) \sqrt{d_b}$$

Суммарная мощность электродвигателя

$$N_{дв} = (N_m + N_c) \frac{\beta_m}{\eta_p \eta_{дв}}, \quad (5.16)$$

где β_m — коэффициент запаса мощности, зависящий от типа и мощности электродвигателя, принимается равным 1,1—2,0; η_p — КПД редуктора, принимается в пределах 0,9—0,96; $\eta_{дв}$ — КПД электродвигателя, зависит от типа и мощности электродвигателя и изменяется в пределах 0,8—0,96.

Расчет условий образования суспензии. В разнообразных массообменных процессах растворения, выщелачивания и кристаллизации в системах Ж—Т необходимо перемешивание для образования однородной суспензии. Перемешивание увеличивает скорость массообмена за счет повышения скорости конвективного переноса в жидкой фазе. Необходимо выбирать минимальную частоту вращения мешалки, достаточную для образования суспензии. Дальнейший рост интенсивности перемешивания мало влияет на массообмен и приводит к бесполезному увеличению мощности привода, так как скорость массообмена пропорциональна частоте вращения мешалки в степени 0,5—1,0, а мощность привода в третьей степени (см. уравнение (5.14)).

Минимальную частоту вращения мешалки n (c^{-1}) можно рассчитать по формуле

$$n = C_2 (\rho_T - \rho_{ж})^{0,5} d_4^{0,5} D_{в}^x / \rho_{ж}^{0,5} d_m^y, \quad (5.17)$$

где d_4 — диаметр частиц твердой фазы, м.

Табл. 5.5. Значение постоянных и показателей степени в уравнении (5.17)

Тип мешалки	C_2	x	y	D_B/d_M
Турбинная закрытого типа	14,7	1,0	2,0	1,5—4,0
Пропеллерная	20,6	1,0	2,0	1,5—5,0
Лопастная с прямыми лопастями	46,4	0,0	1,0	1,33—1,5
Лопастная с наклонными лопастями	27,5	1,0	2,0	1,95—4,0

Формула (5.17) применима при $Re_{ц} = 5 \cdot 10^2 - 13 \cdot 10^5$ и $Ag = 2,4 \cdot 10^1 - 4,1 \cdot 10^{11}$. Величины коэффициентов и показателей степеней для мешалок разного типа сведены в табл. 5.5.

Применение мешалок. Тихоходные мешалки (лопастные, листовые, якорные и рамные) рекомендуются использовать при окружной скорости до 5 м/с и скорости вращения до 1,3 об/с в растворителях, реакторах, кристаллизаторах и других аппаратах, если не требуется высокой интенсивности перемешивания (табл. 5.6).

Якорные мешалки применяют в тех случаях, когда необходимо устранить налипание реакционной массы или осадка на стенки аппарата. Форма мешалки повторяет очертания внутреннего пространства аппарата, что устраняет отложение осадков на стенках и образование застойных зон.

Соотношение размеров мешалки приведено в табл. 5.6.

К *быстроходным мешалкам* относятся турбинные (открытые и закрытые) и винтовые. Их рекомендуется использовать при окружной скорости 2,8—15,7 м/с и скорости вращения 2—10,5 об/с, если необходимо интенсивное перемешивание реакционной среды.

Основные размеры *пропеллерных мешалок* регламентированы ОСТ 26-01-1245—75.

Для *турбинных мешалок* рекомендуется следующее соотношение основных размеров: $d_M = D_B / (3-4)$; $b = 0,2d_M$; $l = 0,25d_M$; диаметр диска $D = 0,75d_M$ (см. табл. 5.6).

Расчет перемешивающих устройств на прочность. Перемешивающие устройства (лопасти мешалки) испытывают значительные изгибающие усилия, особенно в месте присоединения лопасти к ступице. Проверочный расчет лопасти заключается в определении напряжения изгиба, которое должно быть меньше допустимого.

Расчетный изгибающий момент лопасти M_H (Н·м) в месте присоединения ее к ступице рассчитывается по формуле

$$M_H = 0,0813 \frac{N_M}{n}, \quad (5.18)$$

Табл. 5.6. Условия применения мешалок

Тип перемешивающего устройства	Область применения	Вязкость перемешиваемой среды, 10^{-3} Па·с	Соотношение размеров	Окружная скорость конца лопасти, м/с
Лопастное	перемешивание, растворение жидкостей, эмульгирование, медленное растворение твердых веществ, взмучивание твердых осадков, выравнивание температуры среды	1—3 000	$d_M = (0,55-0,7) D_B$ $h_M = (0,1-0,3) d_M$ $b = 0,1 d_M$	1,5—5,0
Якорное	перемешивание вязких и тяжелых жидкостей, предотвращение выпадения осадка на днище и стенках, суспензирование в вязких средах	1—10 000	$d_M = (0,85-0,98) D_B$ $h_M = (0,01-0,06) d_M$ $b = 0,07 d_M$	5—4,5 0,5—5
Листовое	перемешивание, растворение жидкостей малой вязкости, взвешивание твердых веществ, интенсификация теплообмена	1—50	$d_M = 0,5 D_B$ $h_M = (0,1-0,3) d_M$ $b = 0,75 d_M$	0,7—5
Турбинное открытого типа	перемешивание, растворение жидкостей, суспензирование, эмульгирование, выравнивание температур	1—40 000	$d_M = (0,25-0,33) D_B$ $h_M = (0,5-1,0) d_M$ $b = 0,2 d_M$	2,5—9
Турбинное закрытого типа	То же, что в устройствах открытого типа, и растворение газов			2,5—12
Винтовое	Перемешивание, растворение, эмульгирование, взмучивание осадков с массовым содержанием твердых веществ до 10%, выравнивание температур	1—40 000	$d_M = (0,25-0,33) D_B$ $h_M = (0,5-1,0) d_M$	3,6—16

где N_M — расчетная мощность по уравнению (5.14), Вт; n — частота вращения мешалки, c^{-1} .

Напряжение изгиба $\sigma_{из}$ (H/m^2) определяется по формуле

$$\sigma_{из} = \frac{M_{из}}{W}, \quad (5.19)$$

где W — момент сопротивления лопасти, m^3 .

Для лопастных мешалок $W = bS^2/6$. Должно выполняться неравенство $\sigma_{и} < \sigma_{ид}$. Окончательно размеры лопасти принимаются с учетом двухсторонних прибавок на эрозию и коррозию и округляют до ближайшего большего значения.

Изгибающий момент лопасти $M_{и}$ (Н·м) в открытых турбинных устройствах в сечении, удаленном на расстоянии, равном половине диаметра диска, рассчитывается по уравнениям

$$M_{и} = \frac{0,027(X - 0,5D)N_{м}}{X};$$

$$X = 0,75 \frac{(0,5d_{м})^4 - (0,5d_{м} - l)^4}{(0,5d_{м})^3 - (0,5d_{м} - l)^3},$$

где l — длина лопасти, м; D — диаметр диска, м; $N_{м}$ — мощность привода, Вт, по формуле (5.14); X — точка приложения равнодействующего усилия.

Размеры всех элементов перемешивающего устройства принимают по ОСТ 26-01-1245—75 (табл. 5.6). Напряжение изгиба определяют по формуле (5.18).

Расчет вертикального вала. Валы перемешивающих устройств должны проверяться на прочность, жесткость и виброустойчивость по РТМ 26-01-72—75. Совпадение частоты вращения вала с частотой собственных колебаний (резонанс) может привести к полному разрушению перемешивающего устройства, удовлетворяющего условиям прочности и жесткости, поэтому в качестве определяющего условия работоспособности принимается виброустойчивость. Практика показала, что вал, удовлетворяющий условиям виброустойчивости, обладает необходимой прочностью и жесткостью.

Перемешивающее устройство с жестким валом, который вращается с угловой скоростью ω (рад/с), должно удовлетворять условию

$$\omega \leq 0,7\omega_{01}, \quad (5.20)$$

где ω_{01} — первая критическая скорость вала, рад/с.

Условие (5.20) справедливо для сред с динамической вязкостью $\mu_c \leq 0,3H$ с/м² и плотностью $\rho \leq 1500$ кг/м³. Если вязкость или плотность перемешиваемой среды выше указанных пределов, то должно выполняться условие

$$\omega \leq 0,6\omega_{01}. \quad (5.21)$$

Первая критическая скорость вала ω_{01} (рад/с) рассчитывается по формуле

$$\omega_{01} = \frac{\alpha^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad (5.22)$$

где α — корень частотного уравнения, основной тон; L — расчетная длина вала, м; E — модуль упругости материала вала,

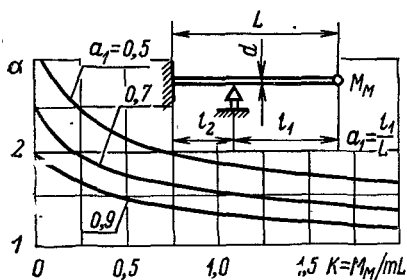


Рис. 5.16. Значение α в уравнении 5.19.

и отношения массы перемешивающего устройства M_m к массе вала mL (рис. 5.16) [7].

Исходными данными для проверочного расчета вала на виброустойчивость являются мощность, потребляемая перемешивающим устройством (см. уравнение (5.14)), угловая скорость вращения вала ω и его линейные размеры. Крутящий момент на валу $M_{кр}$ (Н·м) рассчитывается по формуле

$$M_{кр} = N_m / \omega.$$

Расчетная схема крепления вала выбирается в зависимости от типа привода, конструкции и числа подшипников (опор) на валу [7, с. 740], а линейные размеры вала и его участков от типа и конструкции привода и размеров аппарата.

Минимальный диаметр вала d_b (м) предварительно находят из условий прочности по формуле

$$d_b = 1,71 \sqrt{\frac{M_{кр}}{\tau_d}},$$

где τ_d — допускаемое напряжение на кручение для материала вала, Па.

По диаметру вала определяют массу единицы длины вала:

$$m = 0,785 \rho d_b^2,$$

где ρ — плотность материала вала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Рассчитывают значение коэффициентов, необходимых для определения корня частотного уравнения (см. рис. 5.16 и [7, с. 741]):

$$K = \frac{M_m}{mL}; \quad a = \frac{l}{L}; \quad a_1 = \frac{l_1}{L}; \quad a_2 = \frac{l_2}{L},$$

где M_m — масса перемешивающего устройства, кг; L — общая длина вала, м; l , l_1 и l_2 — длины соответствующих участков вала.

По графику (рис. 5.16 или [7, с. 741]) находят значение корня частотного уравнения α и по уравнению (5.22) рассчитывают

МПа; I — момент инерции поперечного сечения вала, м^4 ; m — масса единицы длины вала, $\text{кг}/\text{м}$.

Для сплошного вала с радиусом r_b (м) момент инерции определяется по уравнению

$$I = 0,5 \pi r_b^4.$$

Корень частотного уравнения α зависит от длины вала, схемы его крепления

тывают критическую скорость вала. Если полученное значение ω_{01} не удовлетворяет условиям (5.20) или (5.21), то увеличивают диаметр вала.

Пример 5.2. Рассчитать мощность привода перемешивающего устройства с рамной мешалкой по следующим данным: внутренний диаметр аппарата с эллиптическим днищем D_B 1,8 м, уровень жидкости $H_{ж}$ 2,2 м, среда коррозионноактивная — 40 %-ная H_3PO_4 , кинематическая вязкость $\mu = 1,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с, плотность ρ 1200 кг/м³, рабочая температура в аппарате 90 °С. Привод типа II с одной промежуточной опорой и сальниковым уплотнением, избыточное давление в аппарате 0,2 МПа.

Принимаем отношение $d_m = 0,9D_B$ (см. табл. 5.6), тогда диаметр мешалки $d_m = 0,9 \cdot 1,8 = 1,62$ м. По ГОСТ 20680—75 ближайший диаметр рамной мешалки 1,6 м.

В соответствии с рекомендациями (см. табл. 5.6) задаемся окружной скоростью v мешалки 3,5 м/с, тогда скорость вращения $n = v/\pi d_m = 3,5/3,14 \cdot 1,6 = 0,685$ об/с. Ближайшее рекомендуемое значение скорости вращения — 0,66 об/с.

Определим центробежный критерий Рейнольдса:

$$Re_{ц} = n d_m^2 / \mu = 0,66 \cdot 1,6^2 / 1,9 \cdot 10^{-6} = 0,86 \cdot 10^6.$$

По графику (31.2) [7] найдем значение $K_N = 0,3$. Рассчитаем мощность привода по формуле (5.14):

$$N_M = K_N \rho n^3 d_m^5 = 0,3 \cdot 1200 \cdot 0,66^3 \cdot 1,6^5 = 1120.$$

Увеличение мощности за счет повышения уровня кислоты

$$K_H = (H_{ж}/D_B)^{0,5} = (2,2/1,8)^{0,5} = 1,1.$$

Полная мощность на валу мешалки

$$N'_M = N K_H = 1,1 \cdot 1120 = 1232.$$

Определим потери мощности в сальниковом уплотнении по формуле (5.15). В соответствии с нормальными диаметрами вала d_B принимаем равным 65 мм, а коэффициент трения $f = 0,2$, длину набивки $l = 105$ мм.

Тогда

$$N_c = 1,48 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,2 \cdot 0,66 \cdot 0,105 \cdot 0,65^2 = 173.$$

Суммарная мощность

$$N'_{дв} = 1232 + 173 = 1405.$$

Рассчитаем мощность двигателя по формуле (5.16), в которой КПД редуктора $\eta_p = 0,95$, КПД двигателя $\eta_{дв} = 0,9$, коэффициент запаса мощности $\beta_M = 1,6$:

$$N_{дв} = N'_{дв} \frac{\beta_M}{\eta_p \eta_{дв}} = 1405 \frac{1,6}{0,95 \cdot 0,9} = 2630 \text{ Вт.}$$

По табл. 32.2 [7] ближайшая мощность мотор-редуктора составляет 3 кВт.

Изгибающий момент у основания лопасти найдем по формуле (5.18):

$$M_H = 0,0813 \frac{N'_M}{n} = 0,0813 \frac{1232}{0,66} = 153 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Расчетный крутящий момент определяем по уравнениям (31.18) и (31.19) [7]:

$$M_{кр} = 0,0542 \frac{[(0,5d_m)^3 - 0,5d_m - b]^3 (h - b) \cdot N'_m}{[(0,5d_m)^4 - (0,5d_m - b)^4] (1 + a) \cdot n}$$

$$a = \frac{b}{h \left[\left(\frac{0,5d_m}{0,5d_m - b} \right)^4 - 1 \right]} = \frac{0,115}{1,6 \left[\left(\frac{0,5 \cdot 1,6}{0,5 \cdot 1,6 - 0,115} \right)^4 - 1 \right]} = 0,0473;$$

$$M_{кр} = 0,0542 \frac{[(0,5 \cdot 1,6)^3 - (0,5 \cdot 1,6 - 0,115)^3] (1,6 - 0,115) \cdot 1232}{[(0,5 \cdot 1,6)^4 - (0,5 \cdot 1,6 - 0,115)^4] [1 + 0,0473] \cdot 0,66} = 157,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Суммарный момент, действующий на лопасть мешалки,

$$M_\Sigma = \sqrt{M_{кр}^2 + 4M_H^2} = \sqrt{157,3^2 + 4 \cdot 153^2} = 343 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Найдем необходимый момент сопротивления лопасти

$$W = \frac{M_\Sigma}{\sigma_{н.д}} = \frac{343}{150 \cdot 10^6} = 2,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Рассчитаем момент сопротивления крестообразного сечения лопасти мешалки по следующим размерам: ширина мешалки b 0,115 м, толщина S 0,025 м, принимая прибавку на коррозию C_k равной 2 мм:

$$W = \frac{(S - 2C_k)(b - 2C_k)^3 + (b - S)(S - 2C_k)^3}{6(b - C_k)} = \frac{(0,025 - 2 \cdot 0,002)(0,115 - 2 \cdot 0,002)^3 + (0,115 - 0,025)(0,025 - 2 \cdot 0,002)^3}{6(0,115 - 2 \cdot 0,002)} = 44,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Фактический момент сопротивления больше необходимого, так как $44,0 \cdot 10^{-6} > 2,29 \cdot 10^{-6}$.

Часть II. ОБЩЕЗАВОДСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Общезаводское оборудование включает в себя большое число машин и аппаратов различного назначения (насосы, компрессоры, конвейеры, фильтры, отстойники, центрифуги, выпарные аппараты и др.). Многие широко используемые машины и аппараты общего назначения, а также методы их расчетов рассматриваются в курсе «Процессы и аппараты», поэтому нет необходимости описывать их в книге. В данном разделе основное внимание уделено устройству трубопроводов и средств регулирования, устанавливаемых на трубопроводах, аппаратам для очистки газов, растворителям, кристаллизаторам и машинам для транспортировки и дозирования сыпучих материалов.

Глава 6. ТРУБОПРОВОДЫ И АРМАТУРА

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

По назначению трубопроводы подразделяются на материальные, предназначенные для транспорта исходных, промежуточных и конечных веществ химического производства, на паропроводы, конденсаторопроводы, водопроводы, трубопроводы сжатого воздуха, вакуумные системы и производственную канализацию [27—29].

Материальные трубопроводы служат для транспортирования потоков всех реагентов данного производства. Например, при получении серной кислоты из чистой серы по трубопроводам перемещают расплавленную серу, воздух, сернистый газ и серный ангидрид, серную кислоту различной концентрации и олеум. Параметры транспортируемых материалов (P , T , C), коррозионная активность, огнеопасность и токсичность изме-

няются в широких пределах, поэтому трубопроводы изготавливают из разнообразных материалов. Требования к коррозионной стойкости, прочности и герметичности трубопроводов (ГОСТ 17365—71) определяются параметрами состояния и коррозионными свойствами транспортируемых материалов.

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

6.1. ТРУБЫ И ФАСОННЫЕ ЧАСТИ ТРУБОПРОВОДОВ

Материал труб выбирают, учитывая коррозионную активность среды (см. гл. 3), ее давление и температуру. Толщину стенок труб принимают по рекомендациям ГОСТов на сортамент труб, в которых указывается предельное допустимое давление, либо по уравнению (4.3). Длина труб, число поворотов, патрубков, вентилях или задвижек зависит от размещения соединяемых аппаратов. Внутренний диаметр трубы $D_{вн}$ (м) находят по формуле

$$D_{вн} = \sqrt{\frac{4w}{v\pi}}, \quad (6.1)$$

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

Увеличение линейной скорости позволяет уменьшить диаметр трубопровода и снизить расход металла, но одновременно с этим возрастают гидравлическое сопротивление и расход энергии на транспортировку.

На основании практических данных рекомендуются следующие линейные скорости. Для газовых систем, работающих при давлении, которое близко к атмосферному и создается вентиляторами или дымососами, скорость газа должна составлять 12—15 м/с; в нагнетательных трубопроводах после газодувок и компрессоров — 15—25; в вакуумных линиях — 40—90; при движении жидкости самотеком — 0,1—0,5; во всасывающих трубопроводах — 0,8—2 и в нагнетательных — 1,5—10 м/с.

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

Фасонные части трубопроводов (отводы, колена, двойники или калачи, тройники, крестовины и переходы) предназначены для изменения направления или диаметра труб, а также для разветвления трубопровода. Их изготавливают, как правило, на специализированных заводах по соответствующим

нормам или ГОСТам. Фасонные части для трубопроводов подбирают по каталогам с учетом диаметра, давления и температуры.

6.2. СОЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Соединения трубопроводов делятся на разъемные и неразъемные. К разъемным относятся соединения труб с помощью фланцев, резьбы, раструбов и специальных устройств. Неразъемные соединения создаются методами сварки, пайки и склеивания. Самое широкое применение нашел метод сварки.

Выбор типа соединения зависит от материала труб и технологических требований. Так, керамические, стеклянные, фторопластовые и антегмитовые трубы можно соединять только с помощью разъемных соединений — фланцев или раструбов; для металлических труб (стальные, алюминиевые, медные, титановые и т. д.) применяются оба вида соединений. Цельносварные трубопроводы предпочтительнее в тех случаях, когда требуется высокая герметичность, а также для транспортировки коррозионноактивных веществ, суспензий и кристаллизующихся растворов. Если же необходима частая промывка и очистка трубопроводов или смена его частей, то рациональнее использовать разъемные соединения.

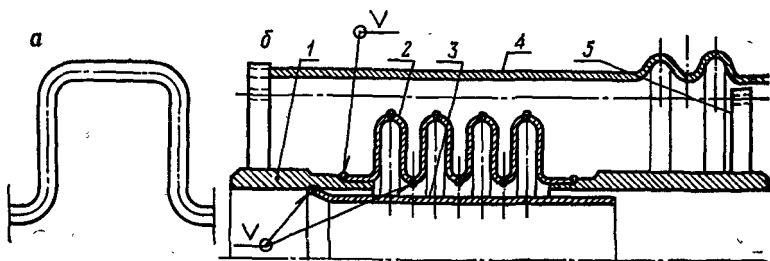
Самое широкое применение нашли фланцевые соединения, основные типы которых описаны в гл. 4.

6.3. КОМПЕНСАТОРЫ

Практически все трубопроводы снабжаются компенсаторами, которые предназначены возмещать изменение длины труб при их нагревании или охлаждении без нарушения герметичности трубопровода. Например, изменение длины труб из углеродистой стали ($\alpha_t = 12,6 \cdot 10^{-6}$ 1/град) трубопровода длиной 300 м при нагреве 20—220 °С составит 756 мм. Очевидно, что без устройств, способных компенсировать такое удлинение, в трубопроводе возникнут значительные напряжения, которые вызовут его искривление или разрушение.

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

Гибкие компенсаторы по конструктивным особенностям подразделяются на радиальные (П-образные, S-образные и т. д.) и осевого типа (линзовые и волнистые). Благодаря сравнительной простоте изготовления и эксплуатации, значительной компенсирующей способности (600—700 мм), надеж-



Р и с. 6.1. Компенсаторы:

а — П-образный; *б* — линзовый (1 — патрубок; 2 — линза; 3 — рубашка; 4 — кожух; 5 — стойка).

ности, возможности применения при высоких температурах и давлениях широко применяются П-образные радиальные компенсаторы (рис. 6.1, *а*). Их недостатком являются значительные габаритные размеры и дополнительное сопротивление движению среды.

Линзовые осевые компенсаторы используются на трубопроводах диаметром 100—1600 мм. Они рассчитываются на давление до 1,6 МПа и изготавливаются по ОСТ 26-02-1206—75. Число линз компенсатора обычно не превышает четырех. Для уменьшения гидравлического сопротивления внутри линз 2 (рис. 6.1, *б*) пропускается рубашка (манжета) 3, каждая линза снабжается спускным штуцером. Компенсирующая способность одной линзы изменяется от 7,5 до 50 мм и уменьшается с увеличением диаметра трубопровода, ростом рабочего давления и температуры среды.

Волнистые компенсаторы типов КВУ и КВО предназначены для работы при давлении до 4 МПа и температуре не выше 450 °С. Гибкие элементы компенсатора изготавливают из стали X18H10T, а другие детали из углеродистой стали. Компенсирующая способность на одну волну составляет 8—20 мм.

6.4. ОПОРЫ ТРУБОПРОВОДОВ

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

Неподвижные опоры служат для жесткого крепления трубопровода, чтобы исключить возможность его перемещения и вращения. Они воспринимают вертикальную нагрузку от массы трубопровода и транспортируемой среды, а также горизонтальную — от температурного расширения труб, гидравлических ударов и вибраций. Неподвижные приварные опоры (рис. 6.2, *а*) изготавливают по ОСТ 26-1265—75 для труб диа-

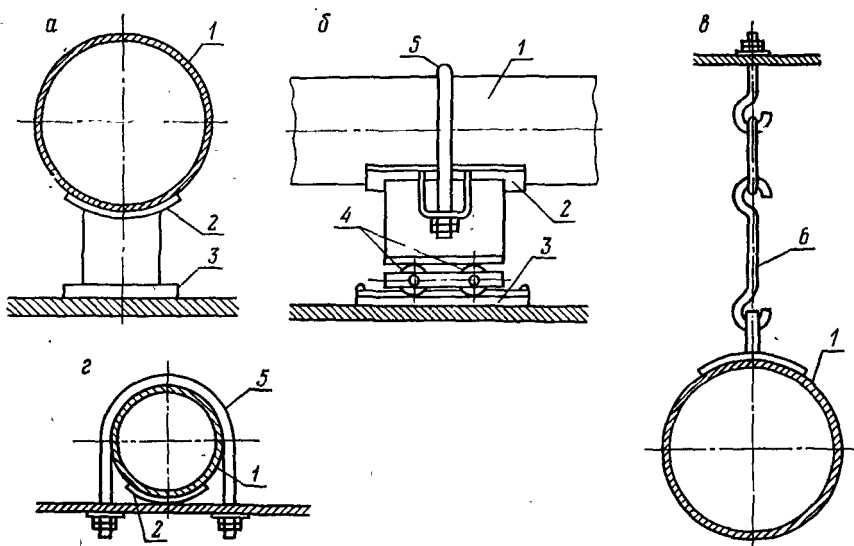


Рис. 6.2. Некоторые виды опор трубопроводов:

a — неподвижная; *б* — подвижная; *в* — подвесная; *г* — направляющий хомут (*1* — труба; *2* — подкладка; *3* — опорная плита; *4* — катки; *5* — хомут; *6* — подвеска).

метром 57—1620 мм. Эти опоры используют при температуре среды не выше 300 °С.

Подвижные опоры воспринимают вертикальную нагрузку от массы трубопровода и не препятствуют осевому перемещению его под действием температурных деформаций. Опоры скользящие удлиненные (рис. 6.2, *б*) изготавливают для трубопроводов диаметром 45—1620 мм и температур продукта от -30 до 300 °С.

При прокладке трубопроводов в цехах и на эстакадах нередко используют *подвесные опоры* (рис. 6.2, *в*) и *направляющие хомуты* (рис. 6.2, *г*).

6.5. АРМАТУРА

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

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

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

Долговечность и надежность работы арматуры любого типа зависит от правильного выбора материала деталей, соприкасающихся с транспортируемым продуктом: корпуса, уплотнительных поверхностей, сальниковых набивок и прокладок. Так, чугунную арматуру можно использовать при давлении не выше 1,3 МПа и температуре до 300 °С; арматуру из углеродистой стали — при любом давлении и температуре не свыше 450 °С. При более высокой температуре среды или высокой коррозионной активности корпуса арматуру изготавливают из легированной стали.

Материал уплотнительных поверхностей также определяется параметрами среды (P , T) и ее коррозионной активностью. Например, резину можно применять на воздухе, в воде, растворах солей, кислот и щелочей при температуре не выше 60 °С и давлении не более 1 МПа. В среде аммиака рекомендуется использовать баббит при давлении до 2,5 МПа и температурах 233—423 °К. При транспортировке корродирующих продуктов используют кислотостойкие и нержавеющие стали при $P \leq 6,4$ МПа и $t \leq 300$ °С.

Арматуру, изготавливаемую на специальных заводах, на схемах и чертежах обозначают шифром, который состоит из букв и цифр. Например, обозначение 15с27нж следует расшифровать так: вентиль запорный (15) со стальным корпусом (с), фланцевый, фигура по каталогу (27), уплотнительные кольца из нержавеющей стали (нж); 15с97нж: вентиль регулирующийся (15), со стальным корпусом (с), с электроприводом (9), фланцевый, угловой, фигура по каталогу (97), уплотнительные кольца из нержавеющей стали (нж); 30нж20бк: задвижка запорная (30), с корпусом из нержавеющей стали (нж), клиновья, фланцевая с выдвижным шпинделем без привода, фигура по каталогу (20), без вставных уплотнительных колец (бк) (ГОСТ 12010—75).

Краны — запорная арматура, открывание и закрывание которой осуществляется поворотом конической или шаровой пробки со сквозным отверстием. Пробка расположена внутри корпуса.

Вентили — запорная и регулирующая арматура (рис. 6.3, а), в которой открытие и закрытие прохода для среды осуществляется перемещением золотника, насаженного на шпиндель. Нижняя поверхность золотника пришлифована к краям отверстия в перегородке — кольцевому седлу. Шпиндель снабжен резьбой, которой он ввернут в неподвижную резьбовую втулку, закрепленную в скобе; при вращении

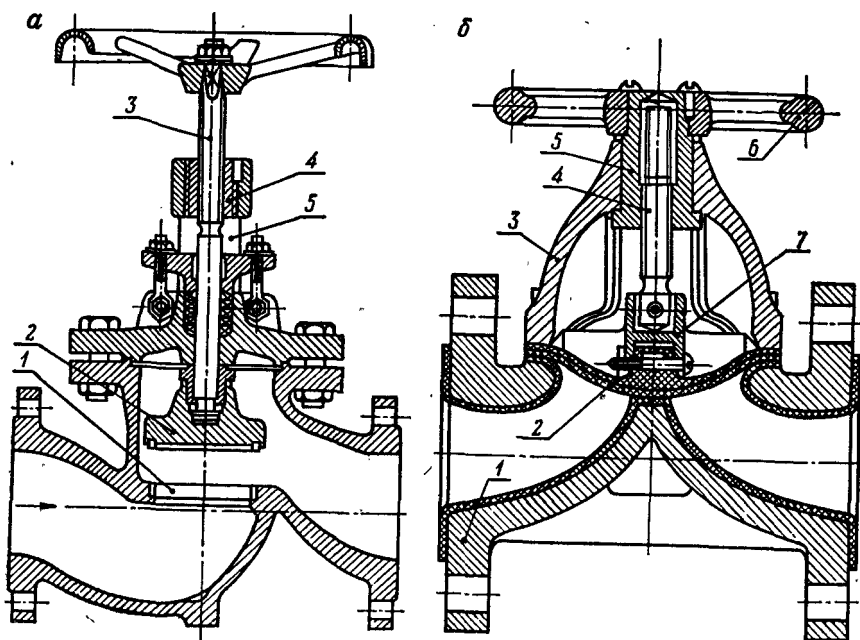


Рис. 6.3. Вентили:

a — золотниковый (1 — седло; 2 — золотник; 3 — шпндель; 4 — втулка; 5 — скоба);
b — диафрагмовый (1 — корпус; 2 — диафрагма; 3 — скоба; 4 — шпндель; 5 — втулка;
 6 — маховик; 7 — крестовина).

шпинделя он поднимается или опускается вместе с золотником.

Диафрагмовые вентили (рис. 6.3, б), как правило, внутри покрыты защитным слоем резины или пластмассы, а отверстие для прохода среды перекрывается гибкой, чаще резиновой, диафрагмой, которая через крестовину и штифт соединена со шпинделем. Последний своей резьбой ввернут во втулку, на которой закреплен маховик. Вращением маховика и втулки достигается подъем или опускание диафрагмы. Втулка вращается в скобе 3, прижимающей края диафрагмы к корпусу.

Все вентили стандартизированы: ГОСТ 18161—72. Вентили запорные муфтовые из ковкого чугуна на $P_y \sim 1,6$ МПа; ГОСТ 18722—73. Вентили запорные муфтовые и фланцевые из серого чугуна на $P_y \sim 1,6$ МПа; ГОСТ 20294—74. Вентили запорные прямоточные фланцевые из коррозионностойкой стали на $P_y \sim 1,6$ МПа и т. д. Диафрагмовые вентили должны соответствовать ГОСТ 9660—71. Их используют при температурах до 60 °С в коррозионно-активных средах.

Задвижки — запорная и регулирующая арматура, в которой проход для среды открывается при подъеме шибера или

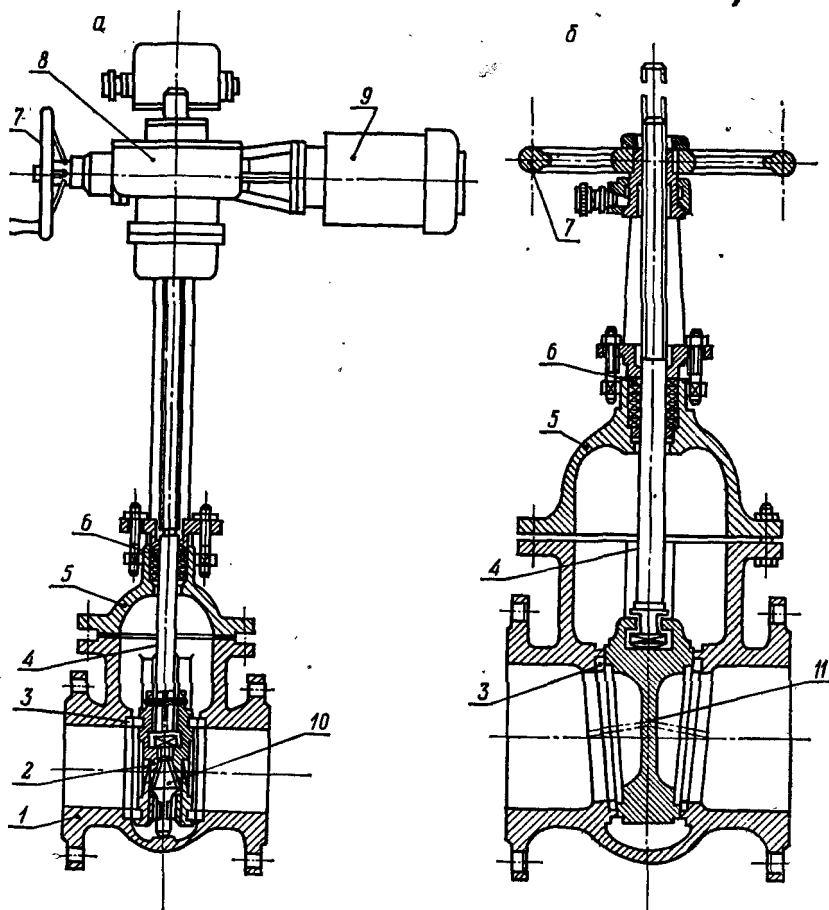
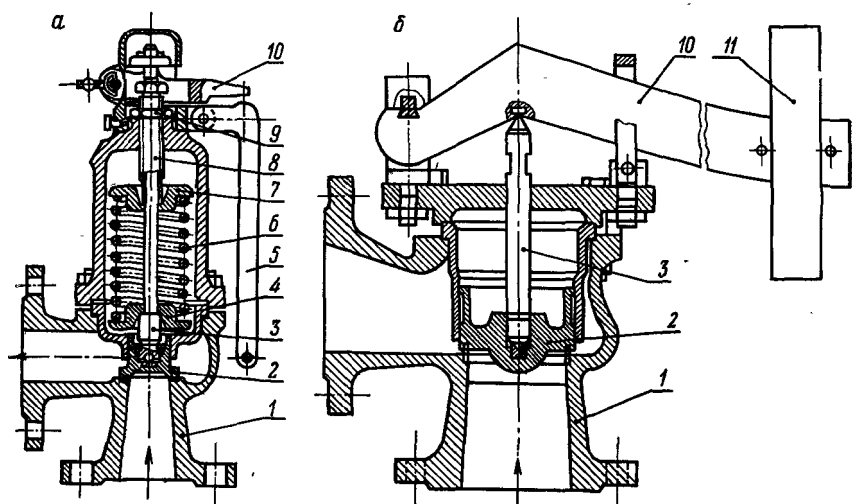


Рис. 6.4. Задвижки:

a — параллельная чугунная с выдвижным шпинделем марки 30ч906бк; *б* — клиновая; *1* — корпус; *2* — тарелки шибера; *3* — уплотнительные кольца; *4* — шпиндель; *5* — крышка; *6* — сальниковое уплотнение; *7* — маховик ручного привода; *8* — редуктор; *9* — электродвигатель; *10* — клин; *11* — диск.

диска. В параллельных задвижках с выдвижным шпинделем (рис. 6.4, *a*), например, типа 30ч906бк, рассчитанных на давление 1,0 МПа (ГОСТ 8437—75), диск состоит из двух тарелок 2, которые при закрывании распираются клином 10 и прижимаются к уплотнительным кольцам 3. Задвижки данного типа изготавливают с диаметром условного прохода до 400 мм. Их выпускают серийно с ручным приводом и электроприводом.

В клиновых задвижках (рис. 6.4, *б*) уплотнительные кольца 3 расположены под углом 5° к оси шпинделя 4, а диск 11



Р и с. 6.5. Клапаны предохранительные:

a — пружинный *б* — грузовой; 1 — корпус; 2 — золотник; 3 — шток; 4 — тарелка нижняя; 5 — рукоятка; 6 — пружина; 7 — тарелка верхняя; 8 — втулка; 9 — контргайка; 10 — рычаг; 11 — груз.

изготовлен в виде клина. При опускании диск плотно прижимается к уплотнительным кольцам. Эти задвижки, как и вся арматура, стандартизированы. Так, клиновые двухдисковые задвижки с выдвигаемым шпинделем фланцевые из ковкого чугуна на $P_y=0,4$ МПа должны соответствовать ГОСТ 12010—75, а клиновые задвижки с невыдвигаемым шпинделем стальные на $P_y \sim 2,5$ МПа — ГОСТ 20336—74.

Клапаны — арматура с запорным или регулирующим органом, перемещающимся возвратно-поступательно вдоль оси уплотнительной поверхности корпуса или поворачивающимся вокруг оси, перпендикулярной оси потока среды.

По назначению их подразделяют на регулирующие, обратные и предохранительные. *Регулирующие клапаны* предназначены для регулирования расхода, давления или уровня газов или жидкостей. Например, конструкция и основные размеры клапанов регулирующих с пневматическим мембранным исполнительным механизмом фланцевые стальные (типа 25с40нж) на $P_y=40$ кгс/см² регламентированы ГОСТ 12891—67.

Обратные клапаны — устройства, перекрывающие проход при обратном движении среды. Как поворотные, так и подъемные обратные клапаны открываются под действием потока среды, движущейся в заданном направлении.

Предохранительные клапаны — это устройства, автоматически открывающиеся при увеличении давления среды выше

заданного. Их используют для защиты трубопроводов и аппаратуры от разрушения в результате повышения давления сверх допустимого. Предохранительные клапаны по конструкции подразделяются на пружинные и грузовые, а по производительности на мало- и полноподъемные. Наибольшее распространение получили малоподъемные клапаны, которые проще по конструкции и не требуют регулировки. Клапаны выпускают из чугуна, углеродистой или нержавеющей стали с D_y 50—150 мм.

В пружинном клапане давлению среды на золотник 2 (рис. 6.5, а) противодействует пружина б, которую подбирают на определенное рабочее давление.

Большое распространение получили грузовые клапаны, в которых золотник 2 (рис. 6.5, б) прижимается штоком 3 к седлу в корпусе 1. Груз 11, размещенный на рычаге 10, создает необходимое усилие на шток. Все клапаны стандартизованы, например типы и основные размеры на клапаны предохранительные рычажно-грузовые фланцевые чугунные на $P_y=1,6$ МПа (типа 1745 бр) регламентируются ГОСТ 5335—75.

Глава 7. МАШИНЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА, ХРАНЕНИЯ И ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

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

7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

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

По особенностям конструкции различают машины непрерывного транспорта с гибким тяговым органом и без него.

Для машин первого типа характерно общее, параллельное движение груза и тягового органа на его рабочей грузонесущей ветви (ленточные, скребковые, пластинчатые конвейеры, элеваторы).

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

Транспортирующие машины с гибким тяговым органом отличаются сложным устройством, наличием большого количества шарнирных соединений или узлов трения. В связи с этим в промышленности нашли применение устройства, лишенные недостатков. Это вибрационные и винтовые конвейеры, а также установки пневмотранспорта, не содержащие каких-либо движущихся частей в зоне транспорта материалов. В машинах без тягового органа транспортируемый материал и рабочие элементы транспортного устройства движутся отдельно, причем последние совершают вращательное или возвратно-поступательное движение, а груз перемещается прямолинейно (винтовые и качающиеся конвейеры, транспортные трубы).

По направлению перемещения транспортируемого материала различают:

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

машины, перемещающие грузы по криволинейному горизонтальному или наклонному пути (скребковые конвейеры);

машины, транспортирующие материалы прямолинейно под большим углом к горизонту, — элеваторы и винтовые конвейеры специального исполнения;

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

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

При выборе типов транспортных устройств необходимо учитывать следующие факторы: 1) величину частиц, физико-химические свойства и температуру транспортируемого материала. Большое значение имеют такие показатели, как

способность материала к слипанию, схватыванию и взаимодействию с компонентами атмосферы, абразивные свойства, хрупкость, объемная масса и угол естественного откоса;

2) необходимую производительность установки;

3) длину и направление пути перемещения материала;

4) экономические показатели транспортных устройств различного типа — капитальные затраты, срок амортизации, расход энергии на транспортировку, степень использования, себестоимость перемещения 1 т материала.

Предварительная оценка пригодности транспортирующих машин для перемещения какого-либо материала осуществляется на основе технических паспортов, в которых указывается производительность, расстояние транспортировки, мощность привода и масса машины.

7.2. ЛЕНТОЧНЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

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

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

По исполнению ленточные конвейеры подразделяются на стационарные, передвижные и переносные. В химической промышленности используются преимущественно стационарные конвейеры. Основные параметры их (ширина ленты, габаритные размеры, скорость движения ленты и т. д.) регламентированы ГОСТ 10624—63.

Достоинства ленточных конвейеров: простота конструкции и высокая надежность в работе, широкий диапазон производительности (2,77—560 кг/с), значительная длина (до 3500 м) и низкий расход электроэнергии. В то же время они имеют и ряд недостатков: непригодны для транспортировки пылящих, горячих ($t > 90^\circ\text{C}$) и сильно налипающих материалов, могут работать лишь при незначительном угле подъема (до $15\text{—}18^\circ$) и прямолинейном перемещении.

Ленточный конвейер (рис. 7.1) состоит из натяжного барабана 1, укрепленного на каркасе 7 в подвижных подшипниках, перемещением которых можно натянуть ленту 4; приводного барабана 5, который обеспечивает движение ленты и вращается электромотором 9 через редуктор 10; каркаса 7, на котором крепятся барабаны и роликовые опоры на грузовой 3 и обратной 8 ветви. Материал загружают на ленту через бункер 2 и разгружают через воронку 6.

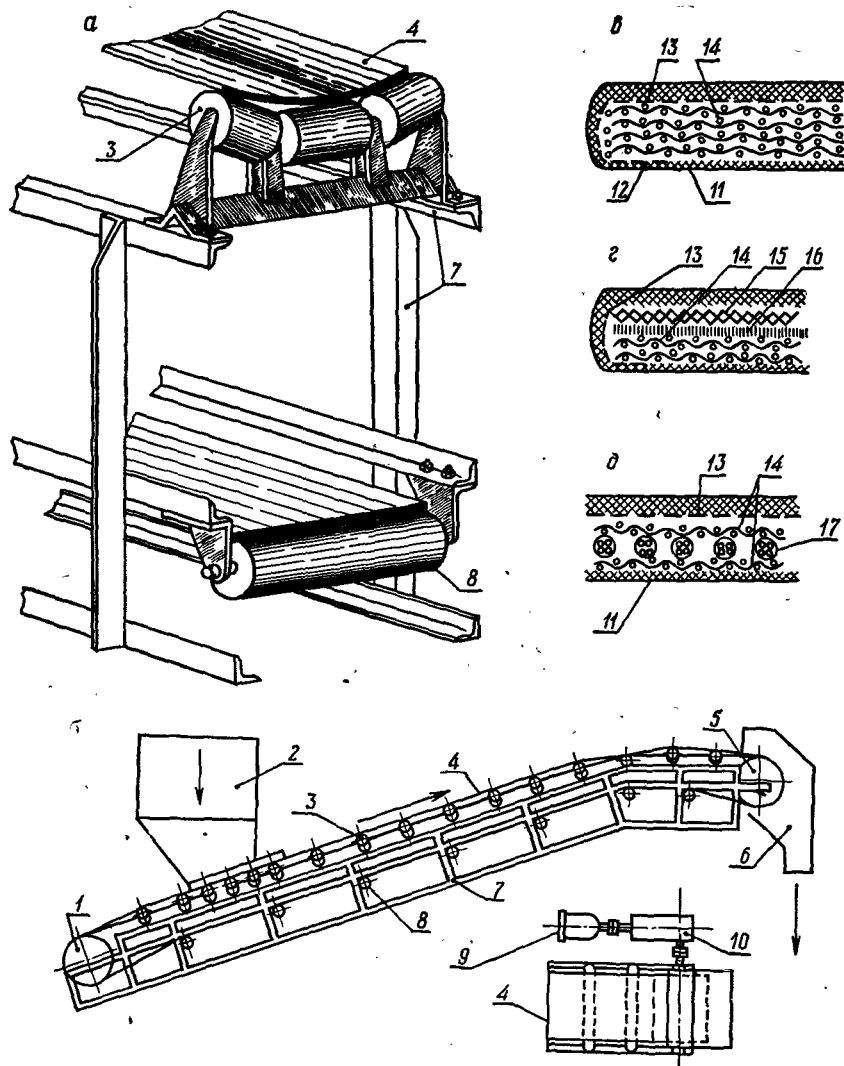


Рис. 7.1. Ленточный конвейер с желобчатой лентой:

a — общий вид; *б* — вид сбоку; *в* — лента общего назначения; *г* — теплоустойчивая лента; *д* — лента высокой прочности; 1 — натяжной барабан; 2 — загрузочный бункер; 3, 8 — ролики; 4 — лента; 5 — приводной барабан; 6 — разгрузочная воронка; 7 — каркас; 9 — электродвигатель; 10 — редуктор; 11 — опорная обкладка; 12 — рабочая обкладка; 13 — защитная ткань; 14 — тканевые прокладки; 15 — металлическая сетка; 16 — асбестовая прокладка; 17 — стальные канатики.

Условное обозначение конвейера включает: тип ленты (Б — из бельтинга, БО — из особо прочного бельтинга, С — из синтетической ткани, Т — резинокросовая лента); ши-

рину ленты, см; диаметр приводного барабана (см) и номер ГОСТа. Например, условное обозначение БО—120100 ГОСТ 10624—63 можно расшифровать так: стационарный ленточный конвейер с лентой, прокладки которой выполнены из особо прочного бельтинга ОПБ, шириной 1200 мм и диаметром ведущего барабана 1000 мм.

Конвейерная лента. Это тяговый и грузонесущий элемент. Она состоит из каркаса (прокладок), который обеспечивает ей необходимую прочность, и резиновых защитных обкладок.

Наибольшее распространение получили ленты из тканевых прокладок, соединяемых между собой тонкими резиновыми прослойками. Эти ленты изготавливают в соответствии с ГОСТ 20—76 шести видов: общего назначения (от -25 до 60°C); морозостойкая — М (от -45 до 60°C); повышенной теплостойкости — ПТ (до 100°C); пищевая — П; теплостойкая — Т (от -25 до 100°C) и негорючая — НШ.

По конструкции ленты подразделяют на пять типов, из них в химической промышленности часто используют следующие: 1 — с двухсторонней резиновой обкладкой и защитной тканевой прокладкой под резиной; 2 — с двухсторонней резиновой обкладкой и 2Р — с двухсторонней резиновой обкладкой и брекерной тканевой прокладкой под резиновой обкладкой. По прочности резину делят на пять классов — А, Б, В, Г и С.

Послойная конвейерная лента с усиленным бортом и двухсторонней резиновой обкладкой типа 1 (рис. 7.1, в) предназначена для транспортировки сильноистирающих, крупнокусковых и абразивных материалов, например известняка, колчедана, огарка или апатитового концентрата. При изготовлении *теплостойкой ленты* (рис. 7.1, г) применяют специальные сорта резины, лента армируется проволочной сеткой и прокладкой из асбестовой ткани. Такая лента предназначена для перемещения горячих материалов с температурой до 90 — 100°C , например колчеданного огарка, солей и удобрений после сушилок. *Ленты высокой прочности* (рис. 7.1, д), используемые для транспортирования крупнокусковых материалов и в конвейерах большой протяженности, усиливаются продольными тросами диаметром $1,2$ — $11,6$ мм, которые изготавливают из высокопрочной стальной проволоки.

По ГОСТ 20—76 ширина прорезиненных лент должна составлять 100 — 3000 мм. Для стационарных конвейеров общего назначения установлен следующий ряд ширины ленты: 300 , 400 , 500 , 650 , 800 , 1000 , 1200 , 1400 , 1600 , 1800 , 2000 мм.

Обкладки. Толщина обкладок (рабочей и опорной) зависит от размера и свойств транспортируемого материала, а также от частоты прохождения ленты через пункты загрузки

и выгрузки. Толщина опорной обкладки, катящейся по роликам, составляет 1,0 мм для неабразивных и 2,0 мм для сильноабразивных материалов. Минимальная толщина рабочей обкладки для неабразивных материалов равна 1,5—2,0 мм, для сильноабразивных, крупнокусковых материалов ее увеличивают до 7,5—10 мм.

Количество прокладок z зависит от ширины и материала ленты и определяется необходимой продольной прочностью. Наибольшее число прокладок по ГОСТ 20—76 равно восьми. Количество их в ленте рассчитывают по формуле

$$z \geq nW_T / B\sigma_n,$$

где n — коэффициент запаса прочности ленты; W_T — наибольшее расчетное натяжение ленты, Н; B — ширина ленты, м; σ_n — предел прочности на разрыв 1 м прокладки по основе, Н/м.

Коэффициент запаса прочности n рекомендуется принимать равным 9 для лент с 2—3 прокладками и 11 для лент с 12—14 прокладками.

Скорость движения ленты зависит от вида транспортируемого материала и по ГОСТ 10624—63 может быть равна 0,5, 0,63, 0,8, 1,0, 1,25, 1,6, 2,0, 2,5, 3,15, 4,0, 5,0, 6,3 м/с. Например, для колчеданного огарка и соды рекомендуемая скорость ленты составляет 0,5—1,0 м/с, для флотационного колчедана, фосфоритной муки, апатитового концентрата, суперфосфата и сульфата аммония — 0,8—1,6; для кокса и фосфорита — 1,0—1,6; для сильвинитовой руды и каменной соли — 1,0—2,5 и для крупнокусковых материалов (например, известняка с величиной кусков до 200 мм) — 1,25—2,0 м/с.

Опорные устройства (роликоопоры). Предназначены для поддержания ленты с грузом на рабочей ветви, а также для уменьшения провисания и износа ленты на обратной ветви. Для плоских лент на грузовой ветви и во всех случаях на обратной ветви применяют однороликовые опорные устройства 8 (см. рис. 7.1), для желобчатой ленты на грузовой ветви используют двух- или трехроликовые 3 и для весьма широких лент — пятироликовые. Диаметр роликов определяется шириной ленты и насыпной массой транспортируемого материала. Так, для материалов с насыпной массой не более 1300 кг/м³ рекомендуются ролики следующих диаметров: 102 мм для лент шириной 400—650 мм, 159 мм для лент шириной 800—1600 мм и 194 мм для лент шириной 1800 мм и более. Угол наклона боковых роликов трехроликовых опор равен 20° для лент с прокладками из бельтинга, 30° — для лент с прокладками из синтетических тканей и 35° — для широких лент.

Роликоопоры крепятся на каркасе, изготавливаемом из проката (уголки и швеллеры) отдельными секциями, размеры которых зависят от ширины ленты.

Каркасы. Каркасы бывают двух типов — нормальные и для конвейеров с двухбарабанной сбрасывающей тележкой. Длина нормальных линейных секций для лент шириной до 1400 мм равна 6,0 м, а для более широких лент 4,0 м.

Угол наклона каркаса (и ленты) определяется углом естественного откоса транспортируемого материала ρ . Рекомендуется принимать угол подъема β по соотношению $\beta \leq (0,65 - 0,7)\rho$, чтобы исключить обратное скатывание груза.

Угол естественного откоса сыпучих грузов зависит от величины частиц и влажности материала, однако обычно он не превышает 50° ($0,873$ рад). Например, для известняка угол естественного откоса равен $35-40^\circ$, для негашеной извести — 50° , кокса — $35-50$, крупной поваренной соли — $35-40$, аммиачной селитры — $37-50$, аммофоса — 37 , гранулированной мочевины — $37-45$, сульфата аммония — $42-54$, суперфосфата — $37-40^\circ$. Угол подъема ленточных конвейеров обычно составляет $12-24^\circ$ ($0,21-0,42$ рад). Для увеличения угла подъема и, следовательно, уменьшения длины конвейера применяют специальные прорезиненные ленты с выступами или поперечными перегородками, при помощи которых можно транспортировать материал при угле подъема до 60° , однако производительность конвейера при этом снижается в 2—3 раза.

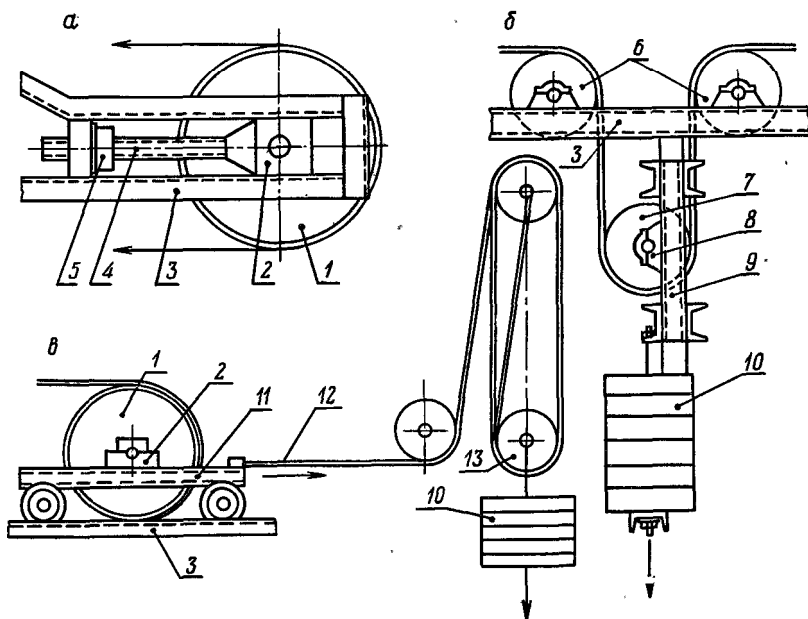
Привод (приводная станция). Сообщает движение ленте с находящимся на ней грузом (рис. 7.1, б). Он состоит из электродвигателя 9, редуктора 10 и приводного барабана 5, укрепленного на каркасе конвейера 7. Длинные конвейеры большой производительности снабжены двумя приводными барабанами, а приводы наклонных конвейеров стопорным устройством, которое препятствует обратному движению ленты под действием силы тяжести находящегося на ней груза при выключенном двигателе.

Диаметр барабана D_6 (мм) зависит от числа прокладок в ленте z , материала прокладок и назначения барабана:

$$D_6 \geq K_{\text{л}} z,$$

где $K_{\text{л}}$ — коэффициент, зависящий от материала прокладок ленты и назначения барабана, изменяющийся от 80 до 200; z — число прокладок.

Например, для приводного барабана и ленты с прокладками из бельтинга 820 $K_{\text{л}}$ равно 125—150, для ленты с прокладками из синтетической ткани — 160—180, а для ленты с прокладками из бельтинга ОПБ — 160—200. Меньшие значения берутся для $z=3-6$, большие для $z=7-12$.



Р и с. 7.2. Натяжные устройства:
a — винтовое; *б* — грузовое у привода; *в* — грузовое хвостовое.

Диаметр барабана, полученный при расчете, округляется до ближайшего большего значения, предусмотренного ГОСТ 10624—63: 200 мм, 250, 320, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250 или 1600 мм. Ширина барабана принимается на 100—200 мм больше ширины ленты.

Натяжные устройства предназначены для устранения провисания ленты между роликками и плотного облегания ею приводного барабана в целях передачи тягового усилия трением. По способу действия они подразделяются на винтовые и грузовые и характеризуются усилием натяжения и величиной хода натяжного устройства. В винтовом натяжном устройстве (рис. 7.2, *a*) концевой барабан 1 закреплен в подвижных подшипниках 2, которые перемещаются относительно каркаса 3 с помощью винта 4 и гайки 5.

В длинных конвейерах используют грузовые натяжные устройства, преимущество которых заключается в постоянстве усилия натяжения. Для уменьшения хода груза последний подвешивают на полиспасте.

Простейшее грузовое натяжное устройство, устанавливаемое обычно у приводного барабана, изображено на рис. 7.2, *б*. Лента на обратной ветви проходит по вспомогательным барабанам 6, укрепленным на каркасе 3, и натяжному бара-

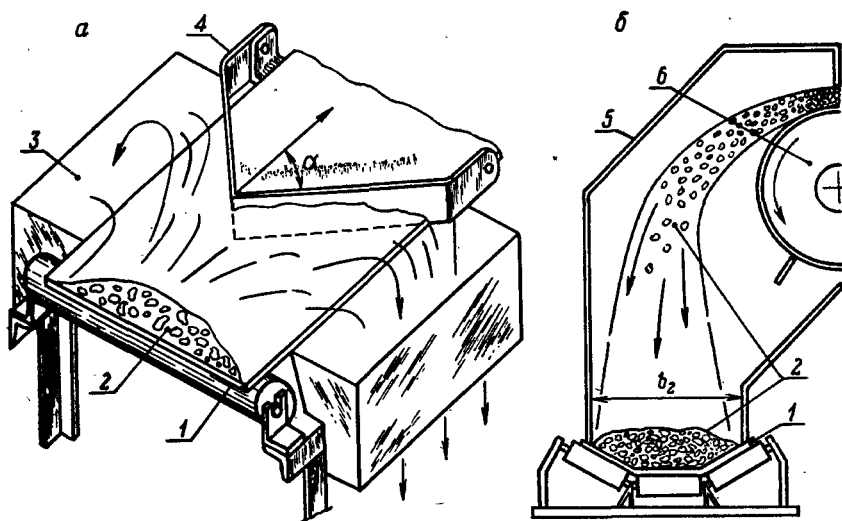


Рис. 7.3. Разгрузочные устройства:
 а — двухсторонний плужковый сбрасыватель; б — разгрузка через конечный барабан.

бану 7, подшипники которого 8 закреплены на каретке 9. Последняя может свободно перемещаться относительно вертикальных стоек. Необходимое натяжение ленты обеспечивает груз 10, подвешенный к каретке.

На длинных конвейерах устанавливают грузовые натяжные устройства с полиспастом (рис. 7.2, в). Концевой барабан 1 закреплен на тележке 11, которая может перемещаться относительно каркаса конвейера 3. Усилие от груза 10 передается тележке 11 с помощью троса 12, проходящего через систему блоков 13.

Разгрузочное устройство. В соответствии с технологическими требованиями транспортируемый материал с конвейера можно разгружать как в конце конвейера, так и в любой промежуточной точке.

Промежуточная разгрузка осуществляется с помощью плужкового сбрасывателя — щита, устанавливаемого под углом 30—45° к направлению движения материала. Одно- или двухсторонний плужковый сбрасыватель (рис. 7.3, а) прост по устройству и может быть установлен в любой точке конвейера.

Транспортируемый материал 2, движущийся вместе с лентой 1, встречается с двухсторонним плужком 4 и, смещаясь к краям ленты, далее через воронку 3 ссыпается в бункер или на другой конвейер. Односторонние плужковые сбрасыватели используют для частичной разгрузки материала с лен-

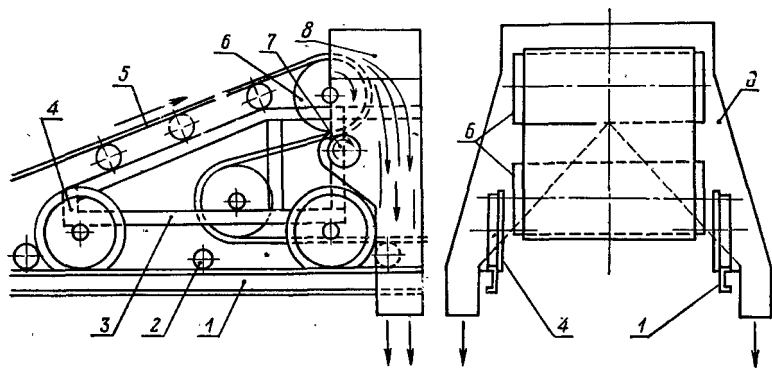


Рис. 7.4. Двухбарабанное разгрузочное устройство:

1 — каркас конвейера; 2 — роlikоопоры; 3 — рама разгрузчика; 4 — колесо ведущее; 5 — лента рабочей ветви; 6 — барабаны; 7 — устройство для очистки ленты; 8 — разгрузочный бункер.

ты. Недостаток плужковых сбрасывателей — повышенное истирание ленты материалом.

Простейший способ разгрузки — через головной барабан. На рис. 7.3, б приведена схема перегрузки сыпучего материала 2, сбрасываемого с головного барабана 6 на поперечный конвейер с желобчатой лентой 1. Перегрузочная воронка 5 устранила разбрасывание и пыление материала, ее размеры регламентированы нормами Союзпроммеханизации. Ширина перегрузочной воронки b_2 обычно на 50—100 мм меньше ширины ленты принимающего конвейера, а ее длина зависит от угла наклона принимающего конвейера и ширины его ленты.

В длинных складах, когда необходима разгрузка материалов по всей длине склада, конвейеры оборудуют универсальным *двухбарабанным разгрузочным устройством* (рис. 7.4), которое непрерывно или периодически перемещается по длине конвейера и сыплет транспортируемый материал в заданных точках. Недостатками его являются громоздкость, большая масса, дополнительный расход энергии и повышенный износ ленты.

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

Производительность конвейера по массе находим по формуле

$$G_p = Fv\gamma_n,$$

Табл. 7.1. Значение коэффициента C

Характеристика конвейера и материала	Форма ленты					
	плоская		желобчатая на трехроликовой опоре			
Угол наклона боковых роликов β°	—		20	30	36	
Угол естественного откоса материала ρ°	15	20	15	20	15	20
Коэффициент C	240	325	470	550	550	625 585 655

где F — площадь поперечного сечения материала на ленте, m^2 (она зависит от ширины B (м) и формы ленты и угла естественного откоса материала ρ , град (или рад); v — линейная скорость движения ленты, м/с.

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

$$B = 1,1 \left(\sqrt{\frac{G_p}{CKv\gamma_n}} + 0,05 \right), \quad (7.1)$$

где G_p — производительность, т/ч; C — коэффициент, зависящий от формы ленты и угла наклона роликов (табл. 7.1); γ_n — насыпная масса, т/м³; K — коэффициент, отражающий зависимость производительности конвейера с гладкой лентой от угла подъема конвейера:

Угол подъема β° ,	до 10	12	14	16	18	20
Коэффициент K	1,0	0,97	0,95	0,92	0,89	0,85

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

Мощность двигателя ленточного конвейера N (кВт) определяют по формуле

$$N = \frac{KLf}{367\eta_\Sigma} [3,6(2q_n + q_p' + q_p'')v + G_p] \pm \frac{G_p H}{367\eta_\Sigma},$$

где K — коэффициент, учитывающий сопротивление на головном и концевом барабанах; f — коэффициент сопротивления движению ленты по роликоопорам, зависящий от условий работы конвейера ($f = 0,018 - 0,04$); q_n — погонная масса ленты, кг/м (приблизительно ее можно определить по выражению $q_n = (25 - 35)B$); q_p' , q_p'' — погонная масса вращающихся частей роликов на рабочей и обратной ветвях ленты, кг/м; находят

по выражению $q_p = G_o/l_p$, где G_o — масса вращающихся частей роликкоопор, кг; l_p — расстояние между роликкоопорами, м; η_Σ — суммарный КПД привода.

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

Пример 7.1. Определить ширину ленты для наклонного ($\beta=18^\circ$) ленточного конвейера производительностью 900 т флотационного колчедана в сутки. Конвейер предназначен для подачи колчедана со склада в бункер печи.

Найдем расчетную производительность с учетом коэффициента неравномерности $K=1,5$:

$$G_p = \frac{900}{24} \cdot 1,5 = 56,2, \text{ т/ч.}$$

Ширину ленты рассчитаем по формуле (7.1), в которой коэффициент C равен 325 для плоской ленты (см. табл. 7.1), коэффициент снижения производительности $K=0,89$, насыпная масса колчедана $\gamma_n=1,9 \text{ т/м}^3$, а скорость ленты — 1 м/с:

$$B = 1,1 \left(\sqrt{\frac{56,2}{325 \cdot 0,89 \cdot 1,0 \cdot 1,9}} \right) + 0,05 = 0,403, \text{ м.}$$

Принимаем резиноканевую послонную ленту типа 2 с четырьмя прокладками из бельтинга Б-820 шириной 500 мм с толщиной рабочей обкладки 3 мм и нерабочей 1 мм. Обозначение: лента Л2—500—4Б—820—3—1 ГОСТ 20—76. Количество прокладок необходимо уточнить расчетом на прочность [30, 31].

7.3. СКРЕБКОВЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

Скребокковые конвейеры сплошного волочения — это машины для непрерывного транспорта сыпучих материалов с помощью скребков, укрепленных на одной или двух тяговых цепях, движущихся по желобу высотой $h_{ж}$ (м) или по трубе.

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

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

Скребокковые конвейеры находят широкое применение в основной химической промышленности для транспортировки разнообразных пылевидных, зернистых и мелкокусковых материалов: колчедана, колчеданного огарка и пыли, суперфос-

фата, аммофоса, хлорида калия, извести и других продуктов. Весьма часто их применяют для перемещения и охлаждения грузов с повышенной температурой.]

Достоинства конвейеров такого типа — простота конструкции, возможность загрузки и выгрузки в любой точке (кроме вертикальных участков), герметичность конвейера, значительный угол подъема (до 90°), возможность одновременно с перемещением груза выполнять технологические операции (охлаждение, нагрев, промывка и др.). Недостатки — повышенный расход энергии, повышенный износ цепи, скребков и желоба, особенно при транспортировке абразивных грузов, измельчение хрупких материалов, малая длина перемещения (до 60—100 м).]

Основными параметрами скребковых конвейеров являются размеры скребков ($B_c \times h_c$), скорость движения цепи (0,16—0,4 м/с), длина транспортирования L и производительность G_p , которая обычно достигает 50—350 т/ч (13,9—97,2 кг/с), в отдельных случаях до 700 т/ч.

Скребковый конвейер (рис. 7.5, а) состоит из желоба 1, укрепленного на станине 2, из натяжной 5 и приводной 8 звездочки, связанной с электродвигателем через редуктор. Транспортируемый материал перемещается по желобу скребками 7, укрепленными на тяговой цепи 6. В конвейерах с высокими скребками (рис. 7.5, б) скребки 7 прикреплены к осям катков 4, которые перемещаются по направляющим путям 3. В конвейерах с низкими скребками катков нет. Рабочая и обратная ветви конвейера размещены в закрытом желобе 1 (рис. 7.5, в); перекося цепи устраняется направляющей шиной 9. При транспортировке горячих материалов (например, огарка) конвейер снабжают системой охлаждения 10, в которую подают воду.

Устройство трубчатого скребкового конвейера (рис. 7.5, г) близко к устройству других скребковых конвейеров: вместо желоба используется труба 11, внутри которой движется тяговая цепь 6 с закрепленными на ней скребками 7. Направление транспортировки в таких конвейерах может изменяться как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости.

В качестве тягового органа используют обычно одну или две пластинчатые втулочно-катковые, втулочные, втулочно-роликовые цепи или специальную вильчатую цепь.

Объемную производительность скребкового конвейера W_k (м³/с) рассчитывают по уравнению

$$W_k = Fv\phi C_2,$$

где F — площадь поперечного сечения желоба (трубы), м²; v — скорость движения скребков, м/с; ϕ — коэффициент заполнения желоба материалом, который для высоких скребков

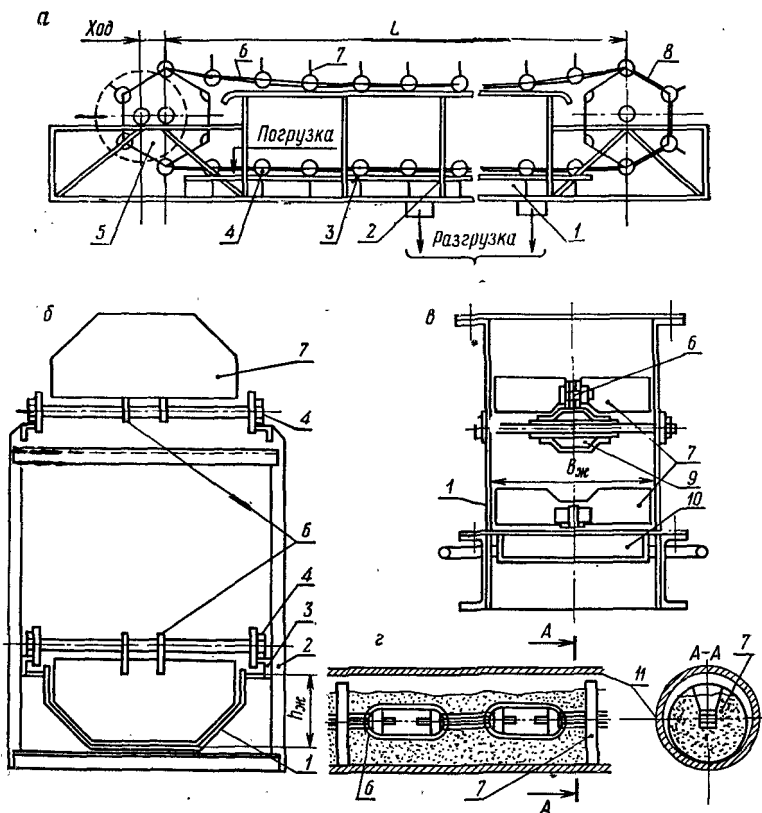


Рис 7.5. Скребокковые конвейеры:

а — вид сбоку; б — конвейер с высокими скребками; в — охлаждаемый конвейер с низкими скребками и направляющей шиной; г — трубчатый конвейер.

равен 0,5—0,6 (при хорошо сыпучих грузах) и 0,7—0,8 (при плохо сыпучих и кусковых грузах), а для конвейеров с низкими скребками — 0,8—0,85; C_2 — коэффициент, учитывающий изменение производительности с увеличением угла подъема конвейера (табл. 7.2).

Табл. 7.2. Средние значения коэффициента C_2

Транспортируемый материал	Угол подъема конвейера β°					
	0	10	20	30	35	40
Легкосыпучий	1	0,85	0,65	0,5	—	—
Плохосыпучий, кусковой	1	1	1	0,75	0,6	0,5

Площадь F (м^2) для прямоугольного желоба

$$F = B_{\text{ж}} h_{\text{ж}} = K h_{\text{ж}}^2,$$

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

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

Производительность по массе G_D (кг/с) вычисляют по выражению

$$G_D = W_{\text{к}} \gamma_{\text{н}},$$

где $\gamma_{\text{н}}$ — насыпная масса груза, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Мощность привода $N_{\text{дв}}$ (КВТ) можно рассчитать по формуле

$$N_{\text{дв}} = \frac{W_{\text{т}} v}{102 \eta_{\Sigma}} \beta_{\text{м}},$$

где $W_{\text{т}}$ — тяговое усилие, Н; v — скорость движения, м/с; η_{Σ} — суммарный КПД привода; $\beta_{\text{м}}$ — коэффициент запаса мощности, зависящий от мощности двигателя.

Методы расчета тягового усилия изложены в специальной литературе [30, 31].

7.4. КОВШОВЫЕ ЭЛЕВАТОРЫ

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

Ковшовой элеватор (рис. 7.6) состоит из вертикально замкнутого тягового органа ленты (или цепи) 3 с закрепленными на нем ковшами 4. Лента огибает нижний натяжной барабан (или звездочку) 2 и верхний приводной барабан 8. Тяговый и грузонесущий элементы размещены в закрытом металлическом кожухе, который состоит из нижней части (башмака) 1, средних секций 6 и верхней части (головки) 7. Натяжение тягового органа чаще всего обеспечивает винто-

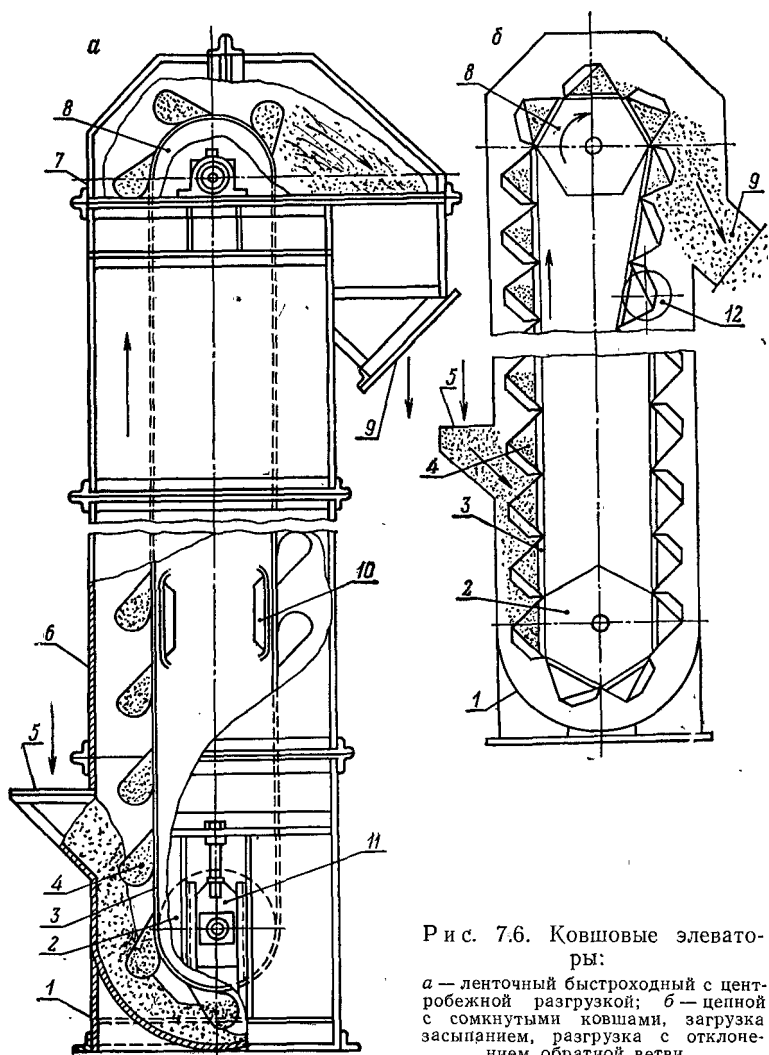


Рис. 7.6. Ковшовые элеваторы:

a — ленточный быстроходный с центробежной разгрузкой; *б* — цепной с сомкнутыми ковшами, загрузка засыпанием, разгрузка с отклонением обратной ветви.

вое 11 или рычажное устройство. Внутри кожуха установлено направляющее устройство 10. Сыпучий материал подается через загрузочный патрубок (носик) 5 в ковши, поднимается и разгружается на верхнем барабане (звездочке) в верхний разгрузочный патрубок 9. Звездочки 12 обеспечивают отклонение цепи при самотечной разгрузке. Привод элеватора осуществляют от электродвигателя через редуктор. Привод снабжен останком — устройством, препятствующим обратному движению ленты (цепи) при выключении двигателя.

Достоинства ковшовых элеваторов — малые габаритные размеры в плане, широкий диапазон производительности (5—600 м³/ч) и значительная высота подъема (до 60 м). Недостатки — возможность остановки при перегрузке и необходимость равномерной подачи груза.

Элеваторы ковшовые вертикальные выпускают по ГОСТ 2036—77 двух типов: ленточные (Л) и цепные (Ц) с ковшами четырех видов (глубокие — Г, мелкие — М, остроугольные — О и скругленные — С), ширина которых изменяется в пределах 100—1000 мм. Скорость движения ковшей может изменяться от 0,4 до 2,5 м/с.

Пример условного обозначения цепного ковшового вертикального элеватора со скругленными ковшами шириной 800 мм: ЦС-800 ГОСТ 2036—77.

В качестве тягового органа используются прорезиненная лента и одна или две цепи.

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

Для расчета ковшовых элеваторов необходимо определить емкость ковша V_k (м³) и мощность привода. Емкость ковша находим по формуле

$$V_k = \frac{G_p S_k}{3,6v\gamma_n\varphi}, \quad (7.2)$$

где G_p — производительность элеватора, т/ч; S_k — шаг ковшей, м; v — скорость движения ковшей, м/с; γ_n — насыпная масса транспортируемого материала, кг/м³; φ — коэффициент заполнения ковшей, зависящий от свойств груза: порошкообразные сухие — 0,8—0,85; порошкообразные и зернистые плохосыпучие — 0,6; мелкокусковые (20—50 мм) — 0,6—0,8; средние и крупнокусковые (50—150 мм) — 0,5—0,6.

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

Табл. 7.3. Значения коэффициента K

Тип элеватора	Производительность $W_K, \text{ м}^3/\text{ч}$			
	до 20	20—40	40—80	80—150
Ленточный	1500	1150	950	750
Цепной	1050	750	650	550

$$N_{\text{дв}} = \frac{G_p H}{367 \eta_{\Sigma}} \left(1,15 + \frac{K}{\gamma_H} \right) \beta_M, \quad (7.3)$$

где H — высота-подъема, м; η_{Σ} — суммарный КПД двигателя и редуктора; K — коэффициент, зависящий от производительности элеватора (табл. 7.3); β_M — коэффициент запаса мощности.

Пример 7.2. Подобрать вертикальный элеватор для подъема 110 т в час гранулированного суперфосфата на высоту 24 м. Расчетная производительность с коэффициентом неравномерности 1,2 составит $G_p = 110 \cdot 1,2 = 132$ т/ч.

По рекомендациям ГОСТ 2036—77 задаемся скоростью движения цепи v 1,0 м/с, шагом ковшей S_K 1,00 м. Насыпная масса суперфосфата γ_H 1000 кг/м³; коэффициент заполнения ковшей для хорошо сыпучих материалов ϕ 0,85.

По формуле (7.2) рассчитаем объем ковшей:

$$V_K = \frac{132 \cdot 1,0}{3,6 \cdot 1,0 \cdot 1000 \cdot 0,85} = 0,432 \text{ м}^3.$$

Выбираем ближайшие по объему ковши типа Г шириной 1000 мм и объемом 45 л.

Обозначение: элеватор ЦГТ — 1000 ГОСТ 2036 — 77.

Мощность привода определяем по формуле (7.3), в которой $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{з}} = 0,9 \cdot 0,96 \cdot 0,90 = 0,777$.

Коэффициент K равен 550 (табл. 7.3), а коэффициент запаса мощности $\beta_M = 1,15$:

$$N_{\text{дв}} = \frac{132 \cdot 24}{367 \cdot 0,777} \left(1,15 + \frac{550}{1000} \right) 1,15 = 20,9 \text{ кВт}.$$

Ближайший по мощности электродвигатель типа АО2 — 81 — 8 имеет мощность 22 кВт и частоту вращения 735 об/мин.

7.5. ВИНТОВЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

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

В корытообразном желобе с цилиндрическим днищем (рис. 7.7) размещается вал с винтом. Сплошной или трубча-

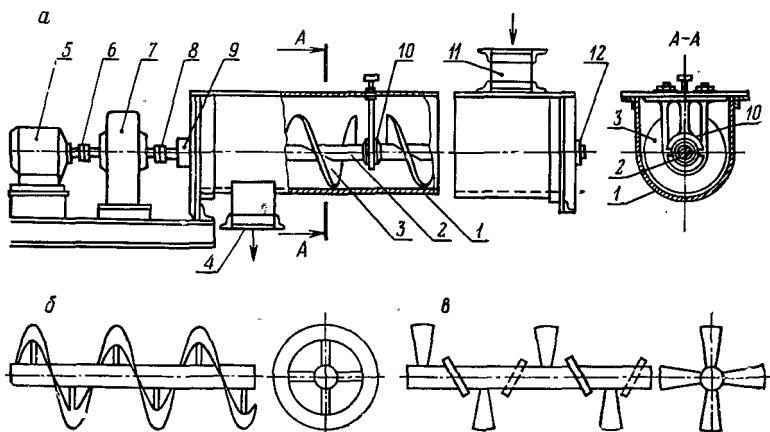


Рис. 7.7. Винтовой конвейер:

1 — желоб (корыто); 2 — вал; 3 — винт (спираль); 4 — разгрузочный штуцер; 5 — электродвигатель; 6, 8 — муфты; 7 — редуктор; 9, 12 — концевые подшипники; 10 — промежуточный подшипник; 11 — загрузочный штуцер.

тый вал вращается электродвигателем через редуктор 7. Вал обычно состоит из отдельных секций и опирается на концевые 9, 12 и промежуточные (подвесные) 10 подшипники. Муфты 6 и 8 соединяют валы электродвигателя, редуктора и шнека. Транспортируемый материал загружается через патрубок 11 и выгружается через затвор 4. Загрузка и выгрузка могут осуществляться в любой точке по длине конвейера.

В зависимости от свойств груза и назначения шнека применяют винты различных типов. Так, для хорошо сыпучих порошкообразных, зернистых и мелкокусковых материалов используют сплошные винты (рис. 7.7, а), при транспортировке влажных налипающих материалов, а также при необходимости перемешивания транспортируемой массы — ленточные (рис. 7.7, б), лопастные (рис. 7.7, в) или фигурные винты. Кроме того, ленточные винты часто применяют в растворителях и кристаллизаторах, а лопастные — в смесителях и сушилках.

Достоинства винтовых конвейеров: герметичность, возможность проведения технологических операций (растворение, кристаллизация, сушка, охлаждение и др.) одновременно с транспортированием, большой угол подъема — до 90° ($1,57$ рад), простота конструкции и надежность, возможность загрузки и разгрузки в любой точке. К недостаткам винтовых конвейеров относятся: повышенный расход энергии, малая длина транспортирования (до 40 м), повышенный износ винта и желоба, истирание и дробление транспортируемого материала, чувствительность к перегрузкам.

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

Конвейеры винтовые стационарные общего назначения изготавливаются в соответствии с ГОСТ 2037—75 со сплошным одно- или двухзаходным винтом диаметром 100—800 мм с постоянным или переменным шагом (80—800 мм). Число оборотов винта может составлять 6—300 об/мин.

Пример условного обозначения: конвейер 80—63 ГОСТ 2037—75 относится к винтовому конвейеру с диаметром однозаходного винта 800 мм (80 см) и постоянным шагом 630 мм (63 см).

Производительность винтовых конвейеров рассчитывают по следующим формулам:

$$W_k = FSn\varphi C_2, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (7.4)$$

$$G_p = FSn\varphi C_2 \gamma_n, \text{ кг/с}, \quad (7.5)$$

где F — площадь поперечного сечения винта, м^2 (для сплошного винта $F = 0,785D_{\text{шн}}^2$, где $D_{\text{шн}}$ — диаметр шнека, м); S — шаг винта, м; n — частота вращения вала, с^{-1} ; φ — коэффициент заполнения конвейера; C_2 — коэффициент, учитывающий снижение производительности с увеличением угла наклона; γ_n — насыпная масса, кг/м^3 .

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

Производительность наклонных винтовых конвейеров зависит от угла подъема и коэффициента C_2 :

Угол подъема β°	0	5	10	15	20
Коэффициент C_2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

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

$$n = A/\sqrt{D_{\text{шн}}}.$$

Табл. 7.4. Значения коэффициентов φ , A и f

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

Рекомендуемые значения коэффициентов A и φ приведены в табл. 7.4.

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

$$N_{дв} = \frac{9,8G_p}{\eta_{\Sigma}} (L_r f + H) \beta_m, \quad (7.6)$$

где η_{Σ} — общий КПД двигателя и редуктора; L_r — горизонтальная проекция пути перемещаемого материала, м; f — коэффициент сопротивления (см. табл. 7.4); H — высота подъема груза, м; β_m — коэффициент запаса мощности.

Пример 7.3. Рассчитать горизонтальный винтовой конвейер для транспортировки апатитового концентрата производительностью 30 т/ч; насыпная масса $\gamma_n = 1700$ кг/м³. Конвейер предназначен для подачи апатита от элеватора к расходному бункеру.

С учетом неравномерности подачи $K = 1,2$ расчетная производительность

$$G_p = 30 \cdot 1,2 = 36 \text{ т/ч (10 кг/с).}$$

По табл. 7.4. находим рекомендуемое значение коэффициента заполнения $\varphi = 0,125$. Для абразивных материалов шаг винта $S = 0,8 D_{шв}$. Предварительно принимаем по ГОСТ 2037—75 скорость вращения винта $n = 0,625$ об/с (37,5 об/мин). Для горизонтального шнека $C_2 = 1$. Запишем формулу (7.5) относительно диаметра шнека:

$$D_{шв} = \sqrt[3]{\frac{G_p}{0,785 \cdot 0,8 \varphi C_2 \lambda_n}} = \sqrt[3]{\frac{10}{0,785 \cdot 0,8 \cdot 0,625 \cdot 0,125 \cdot 1 \cdot 1700}} = 0,494 \text{ м.}$$

По стандарту ближайший диаметр винта составляет 500 мм, а шаг винта 400 мм. Обозначение: конвейер винтовой 50—40 ГОСТ 2037—75.

Проверим выбранную скорость вращения:

$$n = A / \sqrt{D_{шв}} = 0,5 / \sqrt{0,5} = 0,708 \text{ об/с.}$$

Рекомендуемая скорость близка к принятой.

Пример 7.4. Рассчитать мощность привода винтового конвейера по данным предыдущего примера.

Фактическая производительность шнека по формуле (7.5)

$$G_p = 0,785 \cdot 0,5^2 \cdot 0,4 \cdot 0,125 \cdot 0,625 \cdot 1700 = 10,43 \text{ кг/с.}$$

Мощность двигателя определим по формуле (7.6), в которой коэффициент сопротивления $f=4$ (см. табл. 7.4), примем суммарный КПД $\eta_{\Sigma} = 0,85$, коэффициент запаса мощности $\beta_m = 1,25$, а длину $L_T = 12$ м:

$$N_{\text{дв}} = \frac{9,8 \cdot 10,43}{0,85} (12 \cdot 4) 1,25 = 7212 \text{ Вт.}$$

Ближайшим по мощности является электродвигатель АО2—52—6 мощностью 7,5 кВт и скоростью вращения 965 об/мин.

Необходимое передаточное число редуктора $i = 965/37,5 = 25,7$. По этому числу и передаваемой мощности подбираем редуктор типа Ц2=300: мощность на быстроходном валу — 9,3 кВт, передаточное число $i = 24,9$.

7.6. УСТАНОВКИ ПНЕВМОТРАНСПОРТА

Системы пневмотранспорта используют для перемещения различных пылевидных и мелкозернистых материалов: апатитового концентрата, фосфоритной муки, молотых мела и известняка, флотационного колчедана, огарка, соды и многих солей.

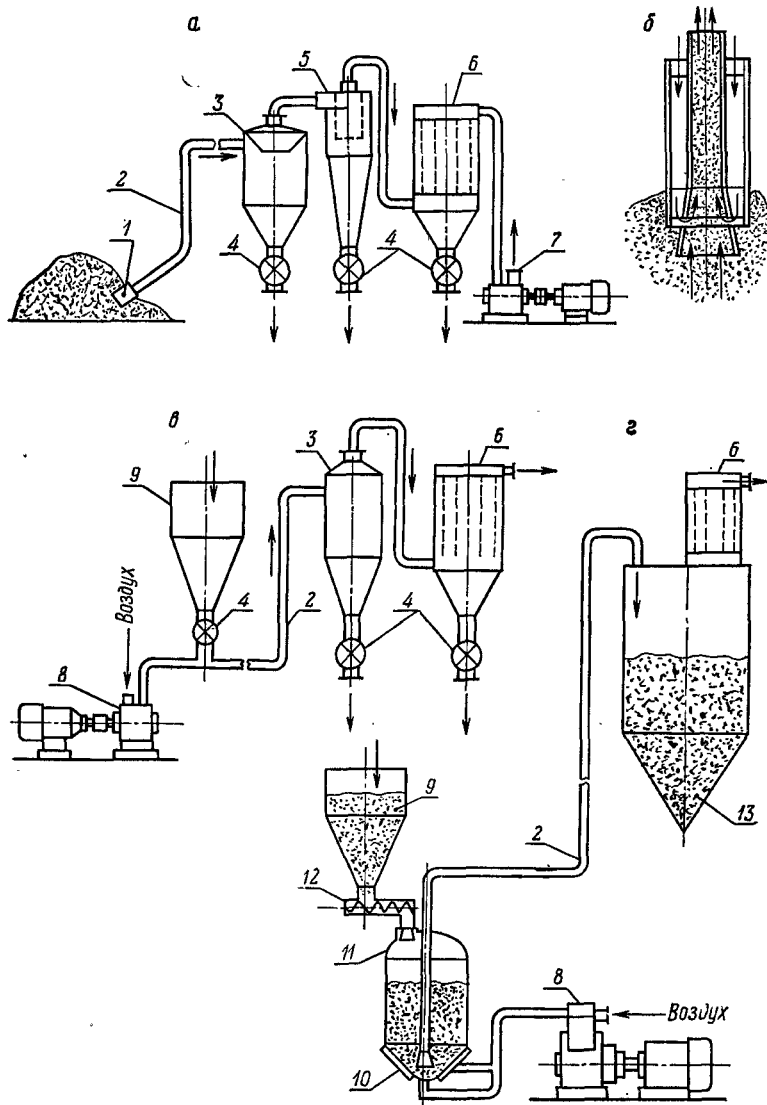
В установках пневмотранспорта пылевидный или зернистый материал перемещается по трубам струей воздуха. К достоинствам таких установок относятся: полная герметичность и надежность в работе; пригодность для транспортировки пылевидных, гигроскопичных и пожароопасных материалов; незначительные потери транспортируемого материала, простота устройства и компактность; высокая скорость транспортирования, возможность выполнения технологических операций (нагрев, сушка, охлаждение) одновременно с перемещением и значительная длина транспортирования (до 1800 м). Недостатки систем пневмотранспорта: непригодны для транспортирования влажных, налипающих, высокоабразивных и кусковых материалов, наблюдается значительный износ труб при перемещении абразивных грузов и повышенный расход электроэнергии [32--34].

Пневматические установки делятся на:

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

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

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



Р и с. 7.8. Установки пневмотранспорта.

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

Любая установка пневмотранспорта состоит из загрузочного устройства, трубопровода, разгрузочного устройства, аппаратов для очистки транспортирующего воздуха, воздухо-

дувной машины — вакуум-насоса, воздуходувки или компрессора.

В установке всасывающего типа (рис. 7.8, а) транспортируемый материал через загрузочное сопло 1 вместе с воздухом засасывается в трубопровод 2. Основное количество материала отделяется в разгрузителе 3 и через шлюзовой затвор 4 (например, секторный питатель) выгружается из системы. Циклон 5 и рукавный фильтр 6 служат для очистки транспортирующего воздуха от пыли, а вакуум-насос 7 засасывает воздух из атмосферы через сопло (рис. 7.8, б) и выбрасывает его в атмосферу. Такие установки удобно использовать для разгрузки вагонов и сбора материала из 2—4 точек в одно место. Расстояние транспортирования обычно составляет 15—20 м, реже 40—60 м.

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

Установки нагнетательного типа (рис. 7.8, в) более экономичны, чем всасывающие. Благодаря большей плотности воздуха в них допускается концентрация твердого материала до 100 кг/кг и выше. Транспортируемый материал из бункера 9 через питатель 4 подается в трубопровод 2, в который поступает воздух из компрессора (воздуходувки) 8. После отделения материала в разгрузителе 3 и очистке от пыли в фильтре 6 воздух выбрасывают в атмосферу. В данном случае компрессор работает на чистом незапыленном воздухе. Перепад давления между концами транспортирующей сети может составлять 0,5—1,3 МПа, а расстояние перемещения груза достигает 1800 м. Нагнетательные установки могут подавать материал из одной точки (склада) в несколько адресов, например транспортировать апатитовый концентрат в несколько цехов.

Установки пневмотранспорта с камерными насосами (рис. 7.8, г) наиболее экономичны, так как в них концентрация транспортируемого материала в воздухе может достигать 500 кг/кг. Эти установки используют для подачи разнообразных материалов на значительную высоту (60—100 м), например для подъема апатитового концентрата от уровня земли в верхнюю часть силосного склада. Из бункера 9 винтовым питателем 12 транспортируемый материал подается в камеру через клапан 11. После заполнения камеры клапан автоматически закрывается и в камеру поступает сжатый воздух от компрессора 8, часть воздуха поступает через аэрирующее устройство 10. Взвесь материала в воздухе по трубопроводу 2 транспортируется в силосный бункер 13, который одно-

Табл. 7.5. Концентрация пыли и скорость воздуха для пневмотранспорта различных материалов

Транспортируемый материал	Истинная плотность, кг/м ³	Наибольшая величина частиц, мкм	Скорость воздуха v_B , м/с	Концентрация пыли $\mu_{\text{п}}$, кг/кг
Апатитовый концентрат	3100	250	20—30	20—30
Кальцинированная сода	2500	400	18—24	15—30
Колчеданный огарок	до 5000	500	15—18	11—25
Кремнефторид натрия	2500	1000	29	3
Песок	2600	1000	20	5
Угольная пыль	до 2100	250	8—15	120
Флотационный колчедан	4600—5200	1000	20—25	1
Фосфоритная мука	3000	250	14—25	30—50

временно служит отделителем. Воздух очищается от пыли в фильтре 6 и выбрасывается в атмосферу. Камерный насос работает периодически, для повышения равномерности подачи, как правило, устанавливаются два попеременно работающих насоса.

Экономичность и надежность работы устройств пневмотранспорта зависит от концентрации транспортируемого материала в воздухе и скорости воздуха в трубопроводе. Допустимая концентрация материала $\mu_{\text{п}}$ (кг/кг воздуха) зависит от плотности и размера частиц, а также от системы пневмотранспорта.

Необходимую скорость транспортирующего воздуха можно принять по табл. 7.5, которая составлена на основании практических данных. Наибольшие значения рекомендуются для установок, работающих в разреженной фазе (всасывающих), а наименьшие — для нагнетательных установок.

Расчет скорости транспортирующего воздуха в трубах изложен в специальных руководствах [32—34].

Техническая производительность установки пневмотранспорта G_T (кг/с) вычисляется по формуле

$$G_T = G_p K_1 K_2,$$

где G_p — заданная средняя производительность по транспортируемому материалу, кг/с; K_1 — коэффициент запаса производительности, принимается в пределах 1,10—1,25 в зависимости от производительности установки; K_2 — коэффициент, учитывающий неравномерность подачи (для установок непрерывного действия с винтовыми или шлюзовыми питателями принимается равным 1, для однокамерных насосов и подъем-

ников — 1,35—2,0, для двухкамерных насосов и подъемников — 1,05—1,10).

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

$$w_B = \frac{G_T}{\mu_n \rho_B}$$

Внутренний диаметр трубопровода $d_{вн}$ (м) определяют по формуле (6.1):

$$d_{вн} = \sqrt{\frac{w_B}{0,785v}}$$

Методы расчета потерь давления в транспортном трубопроводе и аппаратах для очистки воздуха изложены в литературе [3, 8, 9, 49]. Расчет трубопровода на внутреннее давление изложен ранее [см. гл. IV, формула (4.8)]. По расходу воздуха и разности давления в системе подбирают воздуходувную машину.

7.7. БУНКЕРА И ЗАТВОРЫ

Для обеспечения устойчивой работы любой технологической линии необходим запас сырья. Сыпучие материалы хранят в бункерах. В ряде случаев бункера устанавливают для хранения промежуточных веществ в целях согласования работы отдельных машин и аппаратов цеха или установки и, как правило, для хранения сыпучих готовых продуктов перед их расфасовкой или отгрузкой.

Форма бункеров определяется свойствами материала и величиной его частиц. Например, круглые бункера используют для хранения легкосыпучих пылевидных или мелкозернистых веществ (сода, апатитовый концентрат, триполифосфат натрия), а квадратные или прямоугольные — для кусковых и слеживающихся материалов.

Чтобы обеспечить надежное высыпание материала из бункера, угол наклона конусной части бункера должен быть на 5—10° (0,087—0,174 рад) больше угла естественного откоса материала. Чаще всего угол полураствора конуса составляет 30—45° (0,524—0,785 рад). Чтобы устранить образование сводов (подвисание) и облегчить высыпание материала, бункера оборудуют электровибраторами (при хранении кусковых и налипающих веществ) или пористыми плитами, через которые в бункер подают воздух для улучшения текучести порошкообразных материалов, или специальными рыхлителями.

Объем бункера $V_б$ (м³) определяется расходом (подачей) и насыпной массой материала, а также продолжительностью

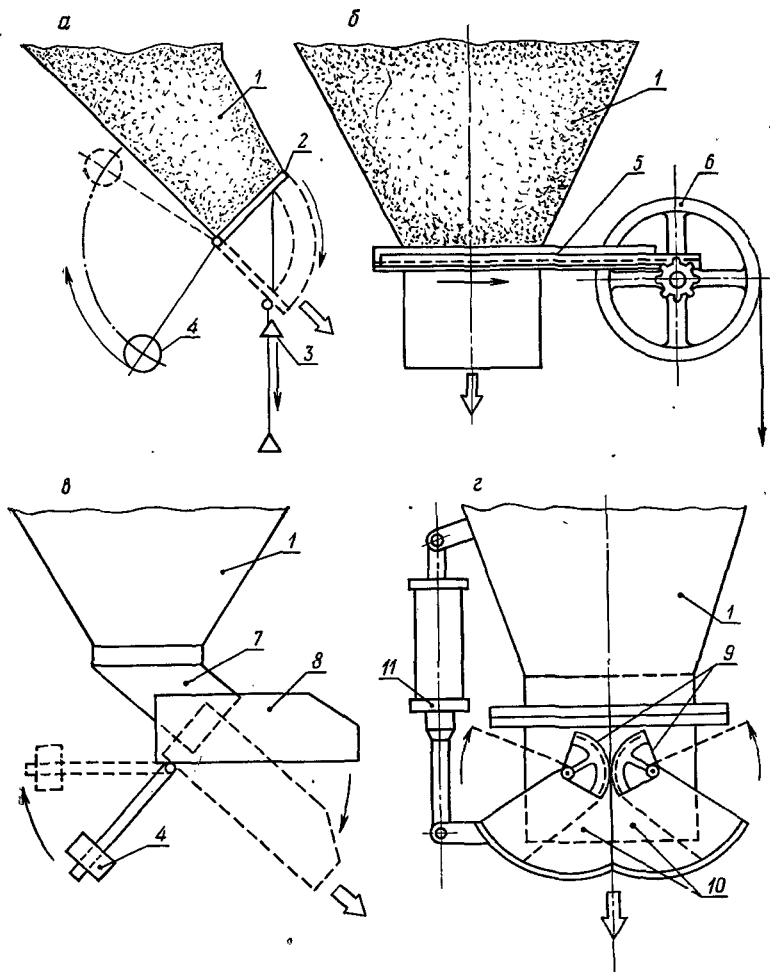


Рис. 7.9. Затворы:

а — откидной клапанный; б — шиберный; в — подпорный лотковый; г — секторный (челюстной).

хранения, которая зависит от технологических требований и может составлять от 30 минут до нескольких суток:

$$V_6 = \frac{G_p \tau}{\gamma_n \varphi},$$

где G_p — расход материала, кг/с (кг/ч); τ — продолжительность хранения, с(ч); γ_n — насыпная масса материала, кг/м³; φ — коэффициент заполнения бункера, обычно равный 0,85—0,9.

Затворы служат для предотвращения самопроизвольного вытекания материала из бункеров. В зависимости от свойств материала, величины его частиц используют затворы различных конструкций — клапанные, шиберные, лотковые или секторные.

Откидной клапанный затвор (рис. 7.9, а) используется в том случае, когда необходимо полное опорожнение бункера, но он непригоден для регулировки подачи материала. Затвор состоит из шарнирно закрепленного на горловине бункера 1, клапана 2, прижимаемого противовесом 4. Затвор открывают вручную при помощи троса с рукояткой 3, клапан поворачивается около шарнира и занимает положение, указанное пунктиром, материал при этом высыпается.

В шиберном затворе (рис. 7.9, б) горловина бункера 1 закрывается плоской плитой 5, которая скользит по пазам и может передвигаться с помощью реечной зубчатой передачи 6 или пневматического цилиндра. Шиберный затвор пригоден для регулировки расхода материала. Его можно устанавливать в горизонтальном, вертикальном или наклонном положении.

Подпорный лотковый затвор (рис. 7.9, в) позволяет перекрывать выпускное отверстие при заполненном бункере и регулировать расход материала изменением угла наклона лотка. К наклонной течке 7 бункера 1 шарнирно прикреплен лоток 8, соединенный с противовесом 4. При горизонтальном положении лотка материал располагается под углом, меньшим угла естественного откоса, и ссыпание невозможно. В крайнем нижнем положении, указанном пунктиром, затвор полностью открыт.

Секторные затворы нашли широкое применение для разнообразных материалов как в системах с ручным, так и с автоматическим управлением. Под устьем бункера шарнирно закреплен один или два сектора, препятствующие высыпанию материала в закрытом положении. Односекторные затворы имеют обычно ручной привод, а двухсекторные (челюстные) — пневматический. Сектора 10 челюстного затвора (рис. 7.9, г) кинематически связаны зубчатой передачей 9, движение секторов обеспечивает пневматический привод 11. Затворы данного типа позволяют регулировать скорость высыпания материала или совсем перекрывать поток его при заполненном бункере.

Затворы для стационарных бункеров регламентированы ОСТ 22-625—73, который предусматривает изготовление затворов с размерами отверстия 250×250 — 1000×1000 мм трех типов: 1) односекторных (исполнение 1 — с цилиндрической заслонкой, 2 — со шторной заслонкой); 2) двухсекторных с

цилиндрическими заслонками; 3) плоских (исполнение 1 — реечные, 2 — винтовые).

Примеры обозначения двухсекторного затвора (см. рис. 7.9, *г*) с размерами отверстия в бункере 400×400 мм: затвор 2—400×400 ОСТ 22—625—73; плоского реечного затвора с размерами отверстия 500×500 мм (см. рис. 7.9, *б*) — затвор 31—500×500 ОСТ 22—625—73.

7.8. ДОЗАТОРЫ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Расход материалов и качество продукции во многих производствах определяются точностью дозирования исходных веществ. В химической промышленности перерабатывается огромное количество веществ, значительно отличающихся по своим свойствам, что и определило разнообразие конструкций дозаторов [35—37].

Выбор типа дозатора определяется главным образом свойствами дозируемого материала: насыпной плотностью (объемной массой), которая может изменяться от 50 до 3000 кг/м³, размером и формой частиц.

Все дозаторы по принципу действия подразделяются на объемные и весовые. Находят применение и объемно-весовые дозаторы, в которых дозируемый материал отмеривается по объему, а затем его масса доводится до нужной величины на массоизмерительном устройстве.

Объемные дозаторы (питатели). Они просты по устройству и в эксплуатации, однако их применение ограничивается низкой точностью дозирования. Так, для пылевидных материалов ($d_{\text{ч}} < 0,1$ мм) влажность может колебаться от 0 до 18%, а вследствие изменения содержания основного вещества и сыпучести материала ошибка в подаче может составлять 10—50%. Дозаторы данного типа часто используют в тех случаях, когда не требуется высокой точности дозирования: при подаче материалов в сушилки, грануляторы, прокаточные печи, грохоты и т. д.

К дозаторам объемного типа относятся ленточные, пластинчатые, винтовые, дисковые, качающиеся и вибрационные дозаторы.

Ленточный питатель (рис. 7.10, *а*) представляет собой короткий ленточный конвейер 1, на котором установлен расходный бункер 2. Высоту слоя материала на ленте регулируют заслонкой (шибер) 3. Количество подаваемого материала можно также регулировать скоростью движения ленты (0,08—0,4 м/с).

В отличие от конвейеров в ленточных питателях материал располагается плоским слоем и его производительность

$$G_p = v B_m h_m \gamma_m,$$

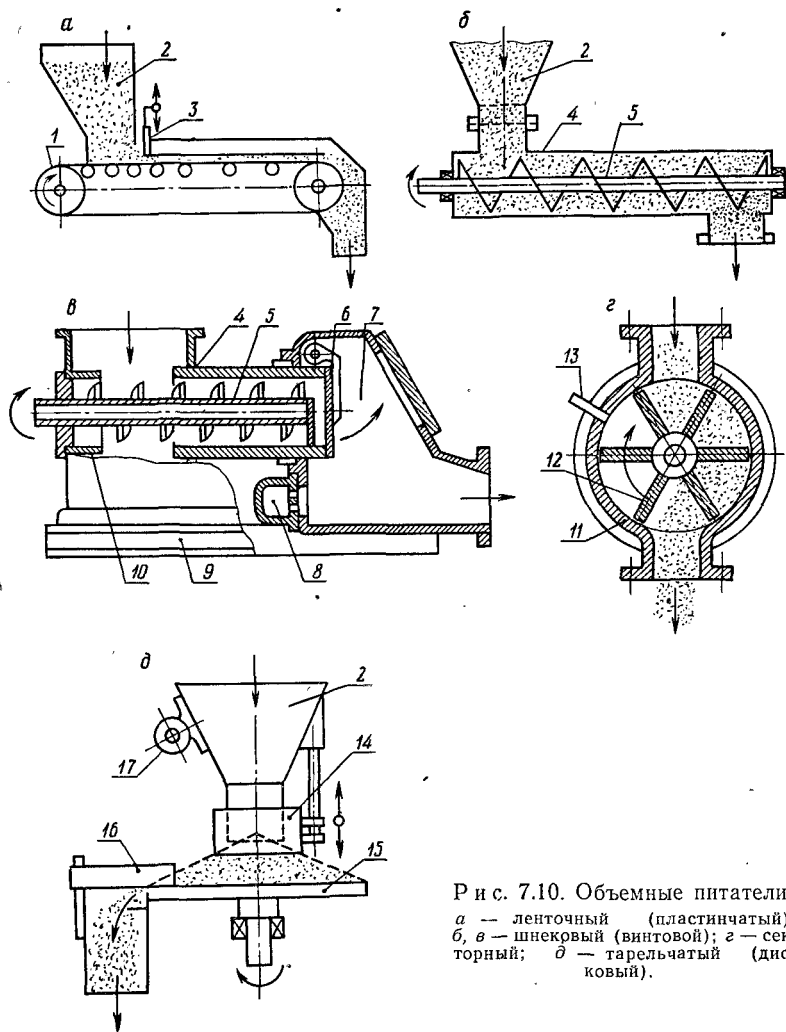


Рис. 7.10. Объемные питатели:
 а — ленточный (пластинчатый);
 б, в — шнековый (винтовой); г — секторный; д — тарельчатый (дисковый).

где B_m , h_m — ширина и высота слоя материала на ленте, м (обычно $B_m = B - 0,1$ м).

Пластинчатые питатели, изготавливаемые по ГОСТ 7421—71, близки по конструкции к ленточным питателям. Их используют для дозировки крупнокусковых и горячих материалов.

Для подачи пылевидных, зернистых, горячих или гигроскопичных материалов нередко применяются *шнековые (винтовые) питатели* (рис. 10.7, б), которые обычно имеют цилиндрический корпус. Из расходного бункера 2 материал сыпается в корпус питателя 4 и винтом 5 перемещается к вы-

Питатели такого типа используют главным образом для дозирования кусковых материалов: извести, известняка, силикатной руды, фосфоритов и т. д.

Производительность качающегося питателя

$$G_p = BhA_k n \gamma_{\text{нф}},$$

где B , h — ширина платформы и высота материала на платформе, м; γ — коэффициент заполнения; A_k , n — амплитуда и частота колебаний.

ГОСТ 7010—75 регламентирует основные технические характеристики качающихся питателей. Их выпускают двух типов: тяжелые (КТ) — для материалов с плотностью до 2600 кг/м³ и легкие (Кл) — для материалов с плотностью до 1200 кг/м³. Ширина платформы может составлять 500, 800, 1000, 1250, 1400 и 1600 мм, а производительность изменяться от 55 до 1000 м³/ч. Условное обозначение качающегося питателя составляется в такой последовательности: 1) тип; 2) ширина платформы (мм), деленная на 100; 3) расположение привода (если привод слева, указывается буква Л); 4) номер стандарта. Например, питатель качающийся легкого типа с лотком шириной 1000 мм и правым расположением привода обозначается так: КЛ10 — ГОСТ 7010—75.

В последнее время в различных производствах широко применяются *вибрационные питатели* (рис. 7.11, б), которые можно использовать для дозирования пылевидных, зернистых и кусковых материалов. Их достоинствами являются надежность работы, простота конструкции и обслуживания.

Под устьем бункера 1 на пружинах 5 подвешен лоток 7 с прикрепленным к нему вибратором 6. Привод вибратора может быть пневматическим, гидравлическим или электрическим. Электромагнитные вибраторы используют чаще, так как количество дозируемого материала удобно регулировать изменением напряжения.

Питатели вибрационные с электромагнитным приводом изготавливают по ГОСТ 11217—66 двух типов: ПЭВ1 — с однократным приводом и ПЭВ2 — с двухтактным приводом, мощностью 0,03—8 кВт и шириной лотка 125—1900 мм, с номинальной производительностью (1,85—500 м³/ч). Пример обозначения: питатель вибрационный с электромагнитным приводом второго типа, с мощностью привода 2 кВт и шириной лотка 950 мм — ПЭВ2 — 2×9,5 ГОСТ 11217—66.

Производительность лоткового вибрационного дозатора можно рассчитать по формуле (7.7). Скорость движения материала по лотку v обычно равна 0,1—0,3 м/с, а коэффициент заполнения лотка φ — 0,6—0,8. Для пылевидных и порошкообразных материалов принимают меньшие значения φ , а для зернистых и кусковых — большие.

Табл. 7.6. Применение питателей для различных материалов

Дозируемый материал	Тип питателя					
	ленточный	качающийся	шлюзовой (секторный)	тарельчатый	электрон-брационный	шнековый
Антрацит, апатитовый концентрат	+	+	+		+	+
Известь		+				+
Колчедан флотационный	+			+		
Мел				+		+
Мука фосфоритная	+					
Сера молотая				+		
Сода кальцинированная			+			+
Соль поваренная	+			+	+	+
Суперфосфат	+					
Уголь каменный молотый					+	+
Цемент				+		+

В табл. 7.6 приведены области практического применения питателей различного типа.

Весовые дозаторы. Дозирование разнообразных материалов (сырья и продукции) по массе широко применяется в различных отраслях народного хозяйства. Весовые дозаторы состоят из следующих основных частей: питателя объемного типа и массоизмерительного устройства.

По принципу действия они подразделяются на *периодические*, обеспечивающие подачу доз заданной массы (от нескольких граммов до 4000 кг) через определенные промежутки времени (обычно длительность цикла взвешивания составляет 20—90 с), и *непрерывные*, которые подают дозируемый материал постоянно, с заданной скоростью.

По степени автоматизации дозаторы периодического действия делятся на *ручные*, *полуавтоматические* и *автоматические*. Однако вследствие больших затрат рабочей силы и малой производительности дозаторы с ручным управлением постепенно заменяются автоматическими. Все дозаторы непрерывного действия автоматические.

По типу передаточных устройств, преобразующих сигнал отклонения массы от заданной в управляющий импульс, весовые дозаторы бывают механическими, электронными и пневматическими. В *механических* дозаторах усилие, вызванное отклонением массы от заданной, системой рычагов передается на затвор (или заслонку), который регулирует поступ-

ление материала на массоизмерительное устройство, и тем самым масса материала выдерживается в заданных пределах. Достоинство механических дозаторов в их автономности, так как все механизмы их работают под действием силы тяжести дозируемого материала. В то же время этим дозаторам присущ ряд недостатков: сложная конструкция, наличие опорных соединений с призмами и рычажных соединений приводят к износу механизма при дозировании пылящих материалов; ручное управление загрузкой и пониженная точность дозирования.

В *пневматических* дозаторах массоизмерительное устройство не содержит опорных узлов с призмами и подушками или электрических контактов, что является их достоинством. Платформа массоизмерительного устройства механически связана со стержнем пневмопреобразователя, в котором изменение массы дозируемого материала сопровождается изменением давления воздуха в камере взвешивания. По давлению воздуха судят о массе дозируемого материала, кроме того, давление является управляющим сигналом для механизмов загрузки и опорожнения.

В электронных массоизмерительных устройствах в качестве датчиков используют индукционные катушки и фотоэлементы, которые соединены с коромыслом обычного рычажного механизма весов, либо электротензометры, которые не требуют применения каких-либо механизмов, так как они непосредственно воспринимают нагрузку измеряемой массы.

Точность весовых дозаторов определяется технологическими требованиями и зависит от производительности дозатора. По паспортным данным ошибка взвешивания большинства дозаторов составляет 0,5—4,0 % от максимальной нагрузки.

Весовые дозаторы периодического действия широко применяются в различных производствах. С их помощью дозируют исходные вещества, например апатитовый концентрат при производстве фосфорной кислоты и суперфосфата, соду при выпуске фосфатов, фторидов и других солей натрия. Эти дозаторы незаменимы при получении многокомпонентных смесей. Так, в производстве хромовых солей на прокалку подают четырехкомпонентную смесь, состоящую из хромовой руды, соды, наполнителя (известняк или доломит) и пыли, выделяемой из дымовых газов прокаточных печей. Соотношение между компонентами зависит от состава руды и режима прокатки. Широко используют весовые дозаторы периодического действия при расфасовке готовой продукции: различных видов удобрений и солей, кормовых фосфатов, катализаторов и сорбентов.

В промышленности нашли применение механические дозаторы с ручным управлением, полуавтоматические дозаторы

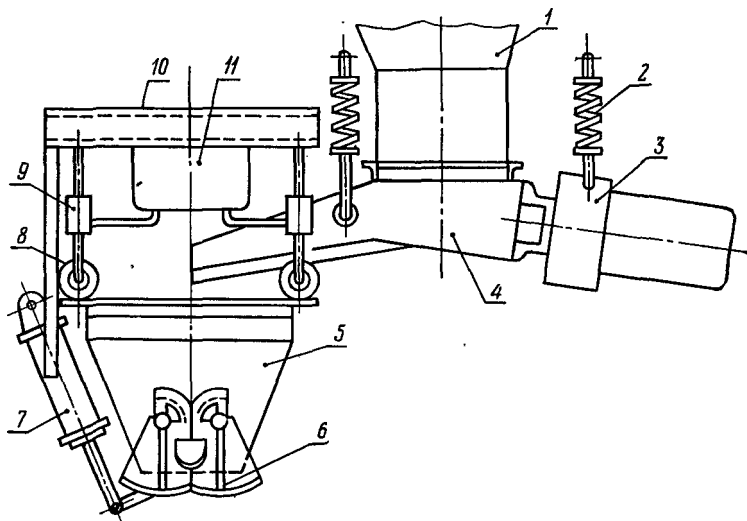


Рис. 7.12. Весовой дозатор периодического действия:
 1 — бункер; 2 — пружинная подвеска; 3 — электровибратор; 4 — лоток; 5 — бункер весов; 6 — секторный затвор; 7 — пневмоцилиндр; 8 — подвеска; 9 — тензодатчик; 10 — рама; 11 — электронный блок управления и регистрации.

с электрическим управлением и автоматические дозаторы периодического действия.

Автоматический весовой дозатор периодического действия типа ДВ-100 (рис. 7.12) состоит из расходного бункера 1 и электровибрационного питателя 3 с лотком 4, которые подвешены на пружинах. Бункер дозатора 5, снабженный затвором 6, подвешен на тросах 8 к раме 10. Массоизмерителем являются тензодатчики 9. Электронное устройство 11 управляет всем циклом взвешивания и регистрирует число отвесов. В начале цикла дозирования электровибратор работает с максимальной амплитудой, благодаря чему дозируемый материал поступает в бункер 5 с максимальной скоростью. После того как масса дозы достигает 80—90 % от заданной, скорость подачи материала снижается для повышения точности взвешивания. При достижении заданной массы электровибратор автоматически отключается, срабатывает клапан и пневмоцилиндр 7 открывает затвор 6. Доза материала заданной массы высыпается из бункера 5 и затвор закрывается. Весь цикл взвешивания продолжается 30—60 с.

Производительность дозатора периодического действия вычисляют по формуле

$$G_p = \frac{m}{\tau},$$

где m — масса одного отвеса, кг; τ — продолжительность цикла взвешивания, с.

Масса дозы и продолжительность цикла взвешивания определяются конструкцией весов и питателя. Значительное снижение времени взвешивания приводит к увеличению погрешности дозатора и быстрому износу механизма.

Весовые дозаторы непрерывного действия получили широкое распространение в основной химической промышленности для дозирования различных сыпучих материалов в непрерывных производствах: апатитового концентрата в производстве простого или двойного суперфосфата и фосфорной кислоты, серы, соды и разнообразных солей.

Производительность весового дозатора непрерывного действия

$$G_D = Fv\gamma_H = qv, \quad (7.8)$$

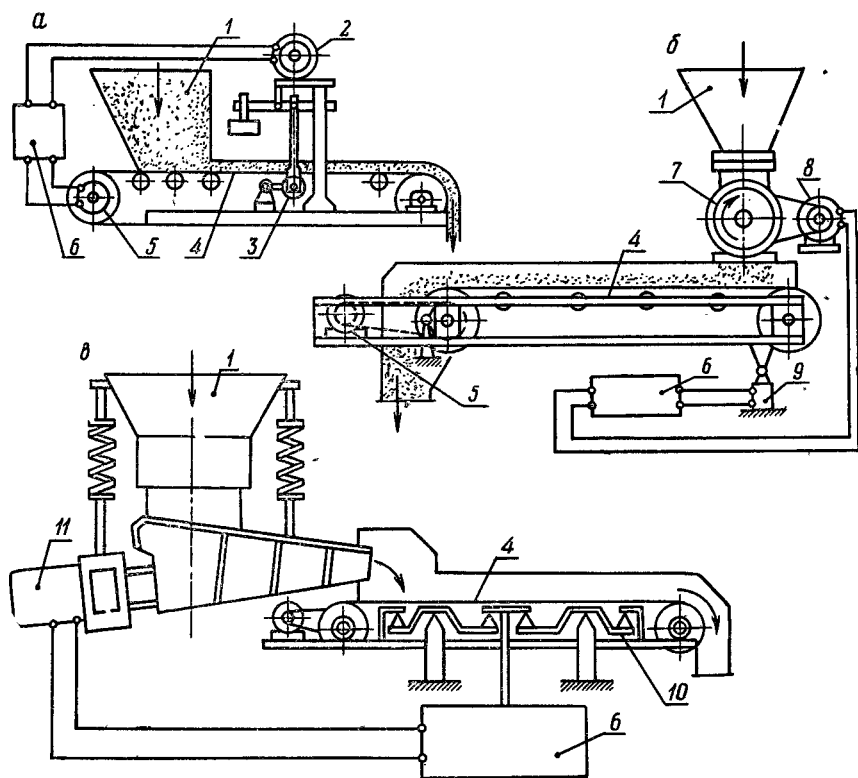
где F — поперечное сечение дозируемого материала, m^2 ; v — линейная скорость движения материала, m/c ; γ_H — насыпная масса дозируемого материала, kg/m^3 ; q — масса дозируемого материала на единицу длины массоизмерительного устройства, kg/m ($q = F\gamma_H$).

Из формулы (7.8) вытекает, что производительность дозатора можно изменять либо за счет регулирования удельной нагрузки q , либо путем изменения линейной скорости v . Скорость движения материала в конвейере массоизмерителя (ленточном или шнековом) обычно составляет 0,08—0,66 m/c . Большие скорости не используют, так как они приводят к уменьшению точности дозирования.

Дозаторы для мелкокусковых и сыпучих материалов изготавливают в соответствии с ГОСТ 16284—70.

Заданную производительность дозатору обеспечивают специальные устройства: 1) регуляторы, изменяющие нагрузку при ее возможных отклонениях от заданного значения путем воздействия на поток материала. Подача материала на массоизмерительное устройство регулируется за счет изменения сечения подаваемого материала или скорости подачи материала питателем; 2) регуляторы, изменяющие скорость движения материала по массоизмерительному устройству, например ленты массоизмерительного конвейера или скорости вращения шнека в винтовом массоизмерителе.

Ленточный весовой дозатор с массоизмерительным роликом и встроенным дозатором (рис. 7.13, а) работает следующим образом. Из бункера питателя 1 материал поступает на ленту 4 и вытягивается ею из-под бункера, а затем через головной барабан конвейера сыпается на переработку. Массоизмерительный ролик 3 связан рычажным механизмом с весами, снабженными циферблатным указателем 2, который



Р и с. 7.13. Весовые ленточные дозаторы непрерывного действия:
а — с массонизмерительным роликом; *б* — с тензометрическим массонизмерителем;
в — с конвейером, установленным на платформе весов.

в свою очередь содержит датчик, фиксирующий отклонение весов от равновесия. Необходимая нагрузка на ленту задается установкой гирь на весах. При изменении нагрузки на ленту (например, уменьшения) ролик поднимается, изменение положения равновесия весов вызывает появление сигнала от датчика. Сигнал усиливается и преобразуется устройством *б* и управляет скоростью вращения электродвигателя *5*. При уменьшении нагрузки скорости вращения двигателя и скорость движения ленты увеличивается так, что количество материала, подаваемого в единицу времени, сохраняется постоянным.

Дозаторы со встроенным питателем (рис. 7.13, *а*) компактны, однако обладают пониженной точностью дозирования, так как усилие вытягивания ленты из-под бункера зависит от свойств материала и степени заполнения бункера. Больше распространение получили весовые дозаторы с отдельным

Табл. 7.7. Характеристика некоторых весовых дозаторов

Тип Дозатора	Величина час- тиц материа- ла, мм	Пронзво- дитель- ность, кг/ч масса дозы, кг	Тип чувствительного элемента	Тип питателя	Габариты, мм	Регулируемый пара- метр
Дозаторы периодического действия						
ВАП-50—352 (ДМУС-50)	до 5	15 000 40—50	коромысло весов	электровибра- ционный	1140×896×1165	масса дозы ре- гулируется уста- новкой гири то же
ВАД-250—278 (ДПО-250)	до 0,5	15 000* 50—250		шнековый	2250×1500×2340	
ДВ-100	до 150	12000 60—100	электротензо- метр	электровибра- ционный	1880×790×1146	масса дозы за- дается в блоке уп- равления
Дозаторы непрерывного действия						
С-31 ЗАЦ	менее 0,5	(20—40)·10 ³	транспорттер- массоизмеритель	шнековый	5325×1675×1890	частота враще- ния шнека
С-864	0,5—70	(5—75)·10 ³	маятниковый элемент	ленточный	2200×970×1070	скорость ленты
ПНВ-2—400—4000	менее 5	40—8000	шпек с маятни- ковой подвеской	шнековый	—	частота враще- ния шнека
ЛДА-130С	до 130 000	до 130 000	траиспорттер-мас- соизмеритель	электровибра- ционный	4795×1650×1900	напряжение виб- ропривода
С-871	до 0,5	(5—25)·10 ³	маятниковый элемент	секторный	1375×1036×1100	частота враще- ния питателя

питателем: секторным (рис. 7.13, б), шнековым, тарельчатым или вибрационным (рис. 7.13, в).

В качестве массоизмерителя можно использовать шарнирно закрепленный конвейер, связанный с индукционным датчиком 9 (рис. 7.13, б). В данном случае скорость движения ленты постоянна, а скорость подачи материала на ленту регулируется изменением скорости вращения секторного 7 или шнекового затвора, приводимого в движение электродвигателем 8.

В ленточных весовых дозаторах типа ЛДА (рис. 7.13, в) ленточный конвейер массоизмерителя находится на платформе весов, а скорость подачи материала на конвейер регулируется электровибратором 11. Заданная нагрузка на конвейер устанавливается на весах, а положение равновесия контролируется индукционным датчиком, который связан с рычажным механизмом весов 10 и вмонтирован в блоке управления 6. Скорость движения ленты 4 сохраняется постоянной. При отклонении массы дозируемого материала на конвейере пропорционально увеличивается или уменьшается напряжение, питающее электровибратор 11, что приводит к изменению скорости подачи материала на конвейер.

Характеристики некоторых серийных весовых дозаторов непрерывного действия приведены в табл. 7.7.

Глава 8. АППАРАТЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

В аппаратах для разделения гетерогенных систем Г — Т, Г — Ж и Ж — Т используют следующие способы: осаждение твердых частиц под действием сил тяжести (гравитационное разделение); осаждение под действием инерционных сил, в частности центробежных; фильтрование через пористую перегородку. Кроме того, для систем Г — Т и Г — Ж применяют осаждение под действием электростатических сил и мокрую очистку при орошении газа жидкостью. В промышленности нашло применение большое число различных по конструкции аппаратов, наиболее распространенные рассматриваются ниже.

8.1. АППАРАТУРА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СИСТЕМ ГАЗ — ЖИДКОСТЬ И ГАЗ — ТВЕРДОЕ

Промышленные газы содержат примеси взвешенных в них твердых или жидких частиц, и относятся к аэрозолям. Аэрозоли делят на три класса — пыли, дымы, туманы.

Пыли — полидисперсные твердые частицы величиной 5—50 мкм и более, диспергированные в газе. Они образуются при механическом измельчении твердых веществ в таких процессах, как дробление, сухой помол, грохочение, сушка, транспортировка и упаковка порошкообразных материалов.

Дымы представляют собой аэрозоли, состоящие из мелкодисперсных твердых частиц величиной 5—0,1 мкм и менее. Они обладают малой скоростью седиментации, высокой устойчивостью и большой оптической плотностью.

Туманы состоят из капелек жидкости величиной 0,3—3,0 мкм, диспергированных в газовой среде. Они образуются при охлаждении газовых смесей ниже точки конденсации паров, например при мокрой очистке газов, абсорбции газов водой или упарке водных растворов в барботажных концентраторах.

Работа газоочистных аппаратов характеризуется такими показателями, как эффективность (степень) очистки, гидравлическое сопротивление аппарата, расход энергии и стоимость очистки газа.

Эффективность очистки газа выражается отношением количества уловленного материала (пыль, дым или туман) к количеству поступившего в газоочистной аппарат материала с газовым потоком G_1 (кг/с):

$$\eta = (G_1 - G_2) / G_1 = 1 - K_n Z_2 / Z_1,$$

где G_2 — массовый расход пыли (тумана) с газом, выходящим из аппарата, кг/с; K_n — коэффициент подсоса, равный отношению расхода газа на выходе из аппарата к расходу газа на входе в аппарат; Z_1, Z_2 — концентрация частиц в газе, соответственно поступающем в аппарат и на выходе из него, кг/м³.

Эффективность очистки газа зависит от гранулометрического состава аэрозоля, поэтому нередко степень очистки газа выражают через фракционную эффективность η_{fi} :

$$\eta_{fi} = (\Phi_{ni} Z_1 K_n Z_2 \Phi_{ki}) / Z_1 \Phi_{ni},$$

где Φ_{ni}, Φ_{ki} — содержание пыли данной фракции соответственно на входе в аппарат и на выходе из него, % ($\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots + \Phi_n = 100\%$).

Общую эффективность очистки можно рассчитать по формуле

$$\eta_2 = (\eta_{f1} \Phi_{n1} + \eta_{f2} \Phi_{n2} + \dots + \eta_{fn} \Phi_{nn}) / 100.$$

Суммарную степень очистки при последовательном включении ряда аппаратов находят по формуле

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n),$$

где η_1 , η_2 , η_n — эффективность очистки в первом, втором и $n = M$ газоочистных аппаратах.

Гидравлическое сопротивление аппарата равно разности полных напоров на входе и на выходе из аппарата. Данный показатель характеризует расход энергии на пропускание газа через аппарат.

Расход электроэнергии отражает суммарные затраты энергии на преодоление гидравлического сопротивления аппарата, на подачу и удаление воды при мокрой очистке и на создание электростатического поля в электрофильтрах, выражается в кВт · ч/1000 м³.

Стоимость очистки газа складывается из затрат на электроэнергию, пар, воду, зарплату персонала, амортизацию оборудования и текущий ремонт; обычно она рассчитывается на 1000 м³/ч.

Различают *сухие* способы очистки газов, при которых исключается контакт газов с жидкостями или конденсация паров жидкостей, и *мокрые*, при которых газы очищают от аэрозолей с использованием жидкостей или добиваются конденсации паров жидкостей при охлаждении.

8.2. АППАРАТЫ ДЛЯ СУХОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ ПЫЛИ

Сухую очистку газа обычно осуществляют в циклонах, роторных фильтрах и электрофильтрах [3, 8].

Циклоны. Эффективность циклонов зависит от величины и плотности частиц, вязкости, плотности и скорости входа газа, а также от линейных размеров циклона и других факторов. Для большинства циклонов она составляет 0,50—0,95.

С помощью батарейных циклонов можно выделить частицы размером 10 мкм и крупнее, а одиночных — 20 мкм и крупнее.

В последнее время получили распространение *вихревые пылеулавливатели (ВПУ)*, разработанные в ФРГ. Аппараты данного типа применяют и в нашей стране. ВПУ выпускают диаметром 200—2000 мм, производительность их 330—30 000 м³/ч. Они отличаются повышенной эффективностью (до 0,98—0,99) для пыли с величиной частиц 2 мкм и выше; при гидравлическом сопротивлении до 5 кПа/м² расход энергии составляет 0,4—1,5 кВт · ч/1000 м³.

В цилиндрическом корпусе 1 (рис. 8.1, а) размещен патрубок подачи запыленного газа 2, снабженный кольцевым лопаточным закручивателем потока типа «розетка» 4 и обтекателем 5. Газовый поток в закручивателе приобретает вращательное движение, благодаря чему частицы пыли отбрасываются к периферии. Одновременно через патрубок 8 по-

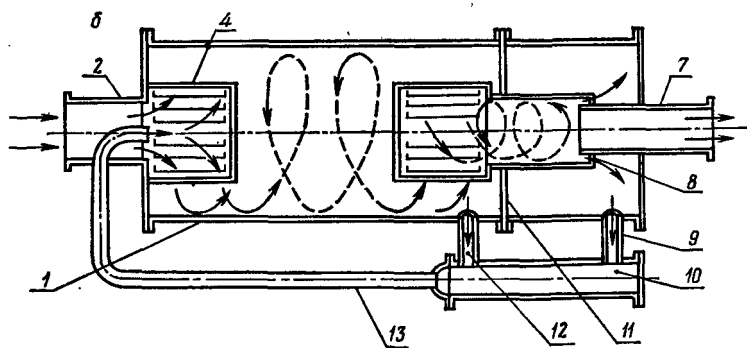
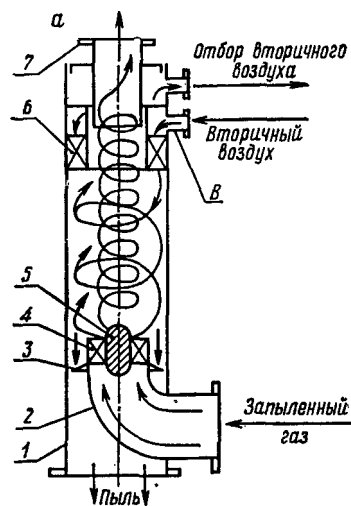


Рис. 8.1. Вихревой пылеулавливатель лопаточного типа (а) и горизонтальный прямоточный циклон (б).

дают вторичный воздух или очищенный от пыли газ, который закручивается кольцевым закручителем 6; вторичный поток спускается вниз до опорной шайбы 3. Пыль отбрасывается к стенке цилиндрического корпуса и в зазор между корпусом 1 и опорной шайбой ссыпается в бункер. Очищенный газ выходит через патрубок 7.

В Белорусском технологическом институте имени С. М. Кирова разработаны (И. М. Плехов, А. И. Ершов и др.) прямоточные центробежные циклоны (сепараторы), пригодные для улавливания сухой пыли и капелек жидкости. В двухступенчатом горизонтальном сепараторе (рис. 8.1, б) запыленный газ, поступающий по патрубку 2, в закручителе 4 приобре-

тает вращательное движение. Под действием центробежной силы частицы отбрасываются к стенке корпуса 1 и транспортируются вдоль нее к разгрузочному штуцеру 12. Газовый поток с оставшейся пылью вновь закручивается вторым завихрителем и поступает в сепарационный патрубок 8, закрепленный в перегородке 11. Благодаря меньшему диаметру патрубка 8 достигается более высокая степень выделения пыли, которая выводится через кольцевой зазор между патрубками 7 и 8. Уловленная пыль выводится через штуцер 9 в бункер 10, из которого воздух отводится по циркуляционной трубе 13 в зону пониженного давления в осевой части завихрителя 4.

Достоинства аппаратов данного типа — достаточно высокая степень выделения пыли (86—94 % при величине частиц менее 10 мкм) и небольшое гидравлическое сопротивление. Коэффициент гидравлического сопротивления равен 33—38 на ступень, тогда как у стандартных циклопов он составляет 85—180.

Рукавные фильтры. Способ очистки газов от пыли путем фильтрования аэрозолей через пористые перегородки широко используется в промышленности. Этот способ обладает следующими достоинствами: 1) более высокой степенью очистки, чем в аппаратах других типов; 2) универсальностью, т. е. способностью улавливать как сухие частицы, так и жидкие частицы из туманов; 3) возможностью улавливать частицы при любом давлении; 4) хорошей степенью очистки при малых концентрациях взвешенных частиц; 5) возможностью очистки газов с высокой температурой; 6) меньшей зависимостью степени очистки от физико-химических свойств улавливаемых частиц и расхода газа.

К недостаткам фильтров для газов относятся: 1) необходимость периодической регенерации или замены фильтрующих перегородок; 2) громоздкость фильтрующих установок; 3) повышенный расход энергии при использовании некоторых видов фильтрующих элементов [40, 41, 43].

Запыленный газ вводится в бункер для сбора пыли, затем, распределяясь по рукавам (рис. 8.2, а), фильтруется через ткань и выходит через верхний штуцер. Вид ткани определяется температурой, свойствами газа и пыли.

По ГОСТ 7715—70 выпускаются *всасывающие фильтры* (марки ФВ), предназначенные для предприятий мельнично-элеваторной и пищевой промышленности. Площадь фильтровальной поверхности в них составляет 30, 45, 60 или 90 м², нагрузка по воздуху — до 2,5 м³/м² · мин, а сопротивление не более 750 Па. Эти фильтры находят применение и в других отраслях промышленности.

Рукавные фильтры для цементной промышленности изготавливают по ГОСТ 20877—75; они используются и в других

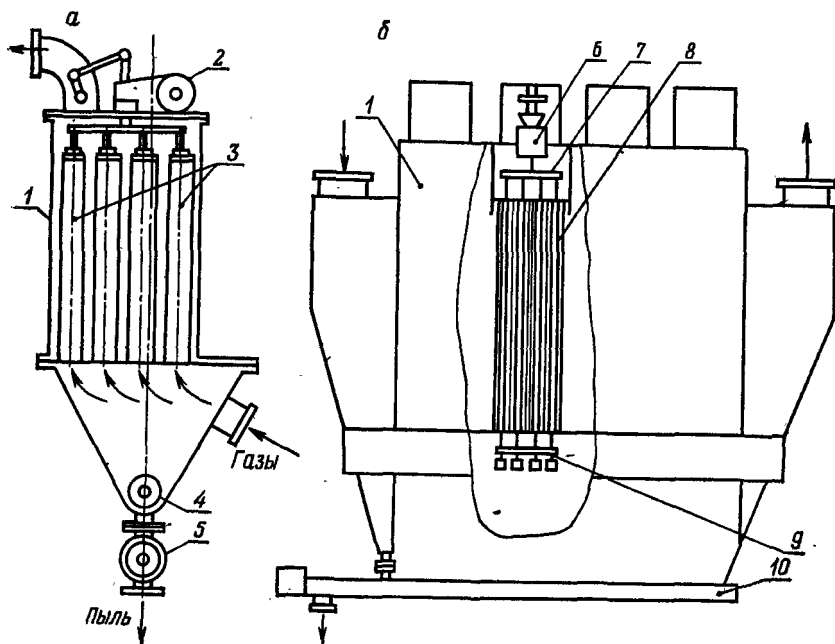


Рис. 8.2. Схемы аппаратов для выделения аэрозолей:
 (а — рукавный фильтр; б — сухой электрофильтр); 1 — корпус; 2 — встряхивающий механизм; 3 — рукава; 4 — шnek; 5 — затвор; 6 — масляная коробка; 7 — коронирующие электроды; 8 — осадительные электроды; 9 — грузы; 10 — конвейер.

отраслях промышленности. Эти фильтры подразделяются на два типа: Р — работающие под разряжением и Н — работающие под давлением.

По принципу регенерации ткани их выпускают в трех исполнениях: П — с обратной покамерной продувкой рукавов воздухом низкого давления от вентилятора; С — с устройством для обратной покамерной продувки рукавов сжатым воздухом; В — с устройством для механического покамерного встряхивания.

Площадь фильтрации определяется габаритами фильтра: при габаритах I, II и III поверхность соответственно равна 50, 100 и 200 м². Длина рукавов составляет 1, 2, 4 или 8 м.

Пример обозначения: фильтр рукавный, работающий под разряжением, с устройством для механического встряхивания рукавов, - площадь фильтрации 100 м² — ФРВ II ГОСТ 20877—75.

Фильтрующий материал (табл. 8.1) выбирают в соответствии с температурой фильтруемого газа и его химической активностью.

Табл. 8.1. Фильтровальные ткани

Ткань	Предельная рабочая температура, °С	Химическая стойкость	Рекомендуемая газовая нагрузка, м³/м²·с	Максимальная остаточная запыленность, мг/м³
Бязь, молескин	80	устойчивы к слабым щелочам	0,083	60
Кирза двухслойная	80	то же	0,017	40
Байка чистощерстяная (ЧШ), ткань ЦМ, сукно фильтровальное № 2	100	устойчивы в слабодокислых газах; нестойки к щелочам	0,017	40
Лавсан	130	устойчив к слабым щелочам и слабым минеральным кислотам	0,017	40
Нитрон	140	устойчив к минеральным кислотам	0,013	40
Четырехмизный сатин (ТСФ), стекло А	300	устойчивы в кислых средах	0,005	80
То же, стекло В	300	устойчивы в нейтральных и слабощелочных средах	0,005	80

Рукавные фильтры широко применяются в основной химической промышленности для очистки воздуха от пыли в системах шнекотранспорта апатитового концентрата, фосфоритной муки, известняка, соды и других солей. Их часто используют для обеспыливания аспирационного воздуха, отсасываемого из установок для измельчения, сухой классификации, транспортировки и расфасовки пылевидных веществ.

Электрофильтры. Предназначены для очистки аэрозолей от взвешенных тонкодисперсных частиц в электростатическом поле. На коронирующие электроды (рис. 8.2, б) подается напряжение 10—100 кВ отрицательной полярности, а осадительные электроды соединяются с землей.

В электрическом поле частицы величиной более 1 мкм приобретают заряд

$$q_m = 4\pi\epsilon_0\delta E_3 r^2,$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума, $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; δ — показатель диэлектрических свойств частицы; E_3 — на-

пряженность электрического поля коронного разряда в области нахождения частицы, в/м; $r_{\text{ч}}$ — радиус частицы, м.

Показатель диэлектрических свойств

$$\delta = 1 + 2(\epsilon - 1)/\epsilon + 2,$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость частиц.

Под действием кулоновских сил заряженная частица будет двигаться к электроду с противоположным зарядом со скоростью $v_{\text{ч}}$ (м/с):

$$v_{\text{ч}} = 0,118 \cdot 10^{-10} E^2 r_{\text{ч}} / \mu,$$

где E — напряженность электрического поля; В/м; μ — вязкость газа, Н · с/м².

Эффективность очистки в пластинчатом электрофилт্রে рассчитывают по формуле

$$\eta = 1 - e^{-v_{\text{ч}} L / H v_{\text{г}}},$$

где L — длина электрода, м; H — расстояние между коронирующими и осадительными электродами, м; $v_{\text{г}}$ — линейная скорость газа в электрофилт্রে, м/с.

Для электрической очистки газа характерны: 1) высокая степень очистки — до 99,9 %; 2) широкий диапазон производительности — до нескольких сот тысяч кубических метров в час; 3) минимальное гидравлическое сопротивление (150—200 Па); 4) широкий диапазон концентраций (0,1—50 г/м³) и величины взвешенных частиц (0,01—100 мкм); 5) возможность осуществления сухой и мокрой очистки. Электрофилтры могут работать при давлении выше и ниже атмосферного и при температурах до 425 °С и выше.

В то же время они обладают и рядом недостатков: 1) не могут улавливать некоторые вещества; 2) высокая стоимость и большие габаритные размеры; 3) зависимость эффективности очистки от режима работы; 4) высокая стоимость очистки [8,42].

Электрофилтры применяют в сернокислотном производстве для очистки обжиговых газов от огарковой пыли и сернокислотного тумана; в производстве хромовых солей — отходящих газов от пыли; в производстве соды — газа известково-обжигательных печей и при концентрировании серной и фосфорной кислот в барботажных концентраторах для очистки отходящих газов. Технические характеристики ряда электрофилтров приведены в табл. 8.2.

8.3. АППАРАТЫ ДЛЯ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ АЭРОЗОЛЕЙ

Мокрая очистка газов применяется во многих производствах благодаря следующим достоинствам: 1) возможности одновременного осуществления процессов охлаждения, кон-

Табл. 8.2. Технические характеристики электрофильгров

Показатели	Средне					Максые				
	ОГ-3-20	СГ-3-30	ОГ-4-8	ОГ-4-16	М-5,4	М-7,0	ШМК-66	ШМК-9,6	МТ-9,5*	
Активное сечение, м ²	20,0	30,0	8,0	16,0	5,4	7,0	6,6	9,6	9,5	
Количество секций	2	2	1	1	—	—	1	1	1	
Количество помп	3	3	4	4	1	1	1	1	1	
Допустимое разреже- ние, Па	300	300	1500	1500	3000	3000	5000	5000	5000	
Гидравлическое сопро- тивление, Па	250	200	150	150	150	150	150	150	150	
Общая активная дли- на коронирующих элект- родов, м	1750	3720	864	1728	242	450	422	595	736	
Габариты, м: длина	14,70	14,70	13,50	14,30	3,45	3,87	4,28	4,90	—	
ширина	8,25	8,63	3,60	5,30	2,74	3,01	4,28	4,90	—	
высота	10,00	13,10	11,45	12,84	12,90	12,90	13,18	13,89	—	
Масса (без кладки), кг	81243	110292	69800	112000	28400	34800	28350	34020	71420	
Конечная запылен- ность, г/м ³	0,1—0,2		0,05—0,1		0,003—0,005		0,003—0,005			
Скорость газов, м/с	0,7—1,1		0,5—0,6		1,0		1,0		1,0	
Удельный ток, А/м	4.10—4		4.10—4		(2,5—3,0)·10—4		(2,5—3,0)·10—4		2.10—4	
Расход электроэнергии на 1000 м ³ /ч, кВт·ч	0,85		1,2		1,0		1,0		0,6	

денсации, абсорбции и газоочистки; 2) достаточно высокой степени очистки; 3) возможности подачи газов с высокой температурой, так как они интенсивно охлаждаются при контакте с водой, и пожаро-взрывобезопасности.

В то же время необходимо учитывать и недостатки мокрых способов очистки: 1) образование суспензии при улавливании пыли, в связи с чем возникает необходимость ее утилизации или обезвреживания; 2) возможность растворения пыли или компонентов газовой смеси и цементации аппаратуры, коммуникаций отложениями; 3) зависимость эффективности очистки от смачиваемости улавливаемой пыли; 4) повышенная коррозионная активность образующейся суспензии или раствора.

В промышленности используют разнообразные конструкции газоочистных мокрых аппаратов: скрубберы (полые, насадочные, центробежные), циклоны, фильтры — барботажные, пенные, турбулентные (или скоростные), механические и ударно-инерционные промыватели [3, 41, 44].

Мокрые циклоны. Для улавливания брызг и капель могут использоваться *циклоны типа ЦН*. При скорости газа в свободном сечении до 3,5 м/с (11—12 м/с во входном патрубке) их эффективность достигает 0,85—0,90. Эффективность улавливания пыли увеличивается при орошении стенок циклона благодаря тому, что мелкие частицы, смоченные водой, не отрываются от стенки поперечными вихревыми потоками. *Циклоны с водяной пленкой типа ЛИОТ* могут применяться для улавливания нецементирующейся пыли при ее содержании до 2 г/м³. Производительность циклонов ЛИОТ составляет 1250—10 000 м³/ч, расход воды — 0,13—0,3 кг/м³, гидравлическое сопротивление — 400—800 Па.

Мокрые центробежные скрубберы ВТИ часто используют для очистки газов от пыли после сушильных установок. Их выпускают диаметром 0,6—1,7 м, высотой 3,83—9,11 м, производительность равна 1,1—11,2 м³/с [52]. Расход воды на орошение G_v (кг/с) зависит от диаметра скруббера D_c :

$$G_v = 0,14\pi D_c.$$

Эффективность мокрых скрубберов ВТИ зависит от скорости газа и фракционного состава пыли. Так, частицы диаметром 8 мкм и плотностью 3000 кг/м³ улавливаются на 65—87 %, а диаметром 50 мкм на 98—100 %.

Мокрые фильтры. Мокрые волокнистые фильтры, предназначенные для выделения мелких брызг, тумана и пыли из влажных газов, применяют в основной химической промышленности сравнительно редко.

Самоочищающийся двухступенчатый волокнистый фильтр для выделения серноокислотного тумана диаметром 5,03 м

обладает производительностью 3,5 м³/с (12500 м³/ч) и эффективностью 0,997 при средней величине частиц тумана 0,3 мкм. При общей высоте фильтрующего слоя 300 мм сопротивление аппарата составляет 3900 Па.

Значительно чаще для улавливания тумана и мелких брызг кислот применяют *мокрые электрофильтры*. Их используют и для извлечения тонкодисперсной пыли, которая плохо улавливается сухими электрофильтрами. Эффективность мокрых фильтров увеличивается при конденсации паров воды: частицы тумана или пылинки служат центрами конденсации и их величина возрастает в несколько раз, что повышает степень очистки.

Принцип действия и устройство мокрых электрофильтров аналогичны сухим (рис. 8.2, б), однако все детали конструкции, соприкасающиеся с газом или уловленным конденсатом, должны выполняться из коррозионностойких материалов. Так, сухие огарковые электрофильтры изготавливают из углеродистых сталей и жаростойкого бетона, а мокрые из свинца, ферросилида и кислотостойкой керамики.

Пенные промыватели работают при скорости газа в горизонтальном сечении аппарата 1,4—2,6 м/с, доля свободного сечения решетки составляет 0,15—0,25 м²/м². Их сопротивление изменяется в пределах 300—1700 Па. Разработаны аппараты с провальными (типа ПГП-ЛТИ) и переливными решетками (ПГС-ЛТИ) с числом тарелок от одной до трех, производительностью 0,58—14,45 м³/с.

Методика расчета всех параметров пенных аппаратов описана в литературе [3, 9].

Скрубберы Вентури относятся к турбулентным промывателям прямооточного типа. Скорость движения газа в горловине составляет 60—150 м/с, поэтому орошающая жидкость интенсивно дробится на мелкие капли. Частицы пыли и тумана улавливаются каплями орошающей жидкости за счет сил инерции, если $d_4 > 0,1$ мкм; для более мелких частиц большое значение имеют диффузионные силы. Увеличение поверхности контакта Г—Ж и относительной скорости движения газа и жидкости повышает эффективность улавливания.

Необходимая скорость газа в горловине скруббера Вентури зависит от размера частиц:

Величина частиц, мкм	1	3—5	>5
Скорость, м/с	100—150	70—100	40—70

Расход воды на орошение составляет 0,5—1,0 л/м³. Скрубберы Вентури, так же как и другие турбулентные промыватели, обладают высоким гидравлическим сопротивлением (до

7—25 кПа), так как в первом приближении эффективность их пропорциональна затратам энергии.

Расчет скрубберов Вентури изложен в работе [52].

8.4. ВЫБОР АППАРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ ПЫЛИ И ТУМАНА

При проектировании систем газоочистки необходимо учитывать: 1) производительность их по газу; 2) технологические параметры (P , T) поступающего газа и его свойства; 3) содержание аэрозоля в газе; 4) свойства и величину частиц аэро-

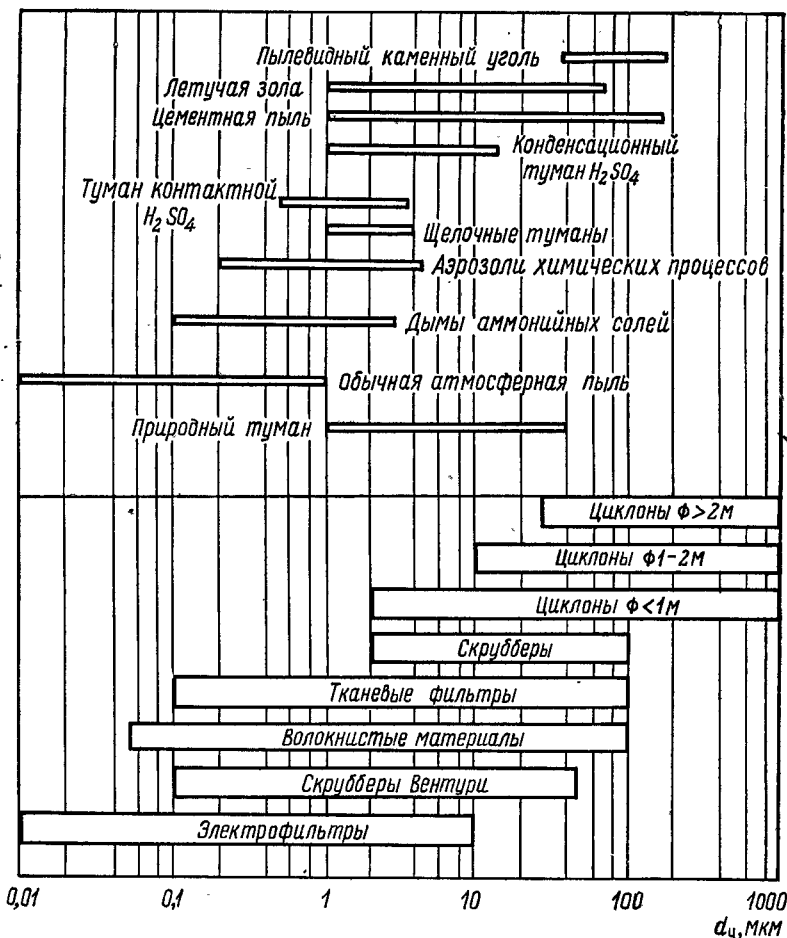


Рис. 8.3. Размеры некоторых аэрозольных частиц и аппараты для их улавливания.

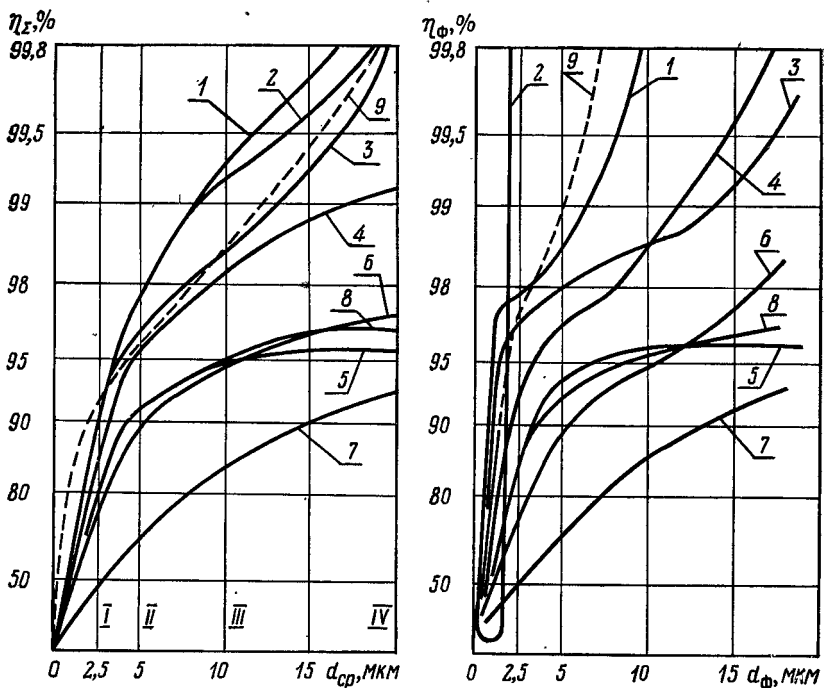


Рис 8.4. Суммарная (η_{Σ}) и фракционная (η_{Φ}) эффективность улавливания эталонной пыли в различных аппаратах:

d_{Σ} — средний диаметр улавливаемых частиц, мкм; d_{Φ} — номинальный диаметр частиц мкм; I — $d=0-5$ мкм, $d_{\text{ср}}=2,5$ мкм; II — $d=0-10$ мкм, $d_{\text{ср}}=5$ мкм; III — $d=0-20$ мкм, $d_{\text{ср}}=10$ мкм; IV — $d=0-40$ мкм, $d_{\text{ср}}=20$ мкм; 1 — скруббер Вентури; 2 — тканевый фильтр; 3 — мокрый электрофильтр; 4 — дезинтегратор; 5 — оросительный скруббер; 6 — мокрый циклон; 7 — циклон; 8 — сухой электрофильтр; 9 — вихревой пылеулавливатель.

золя; 5) требуемую степень очистки; 6) наличие места для монтажа системы очистки; 7) максимально допустимое сопротивление аппарата и 8) экономические показатели установки.

Выбор системы сухой или мокрой очистки газа определяют главным образом технологическими условиями работы. Если допустимо или желательно охлаждение газов и насыщение их водяным паром, то чаще используют аппараты мокрой очистки. Так, для очистки газов от тумана необходимо применять мокрые фильтры или скрубберы. В тех случаях, когда нежелательно снижение температуры газов или недопустимо их увлажнение, предусматривают аппараты сухой очистки.

Значительное влияние на выбор типа газоочистительного аппарата оказывает величина частиц (рис. 8.3). Очевидно, что даже лучшие циклоны не эффективны для очистки воздуха от атмосферной пыли или газов от тумана серной кислоты, вместо них можно использовать тканевые фильтры или для более тон-

Табл. 8.3. Сравнительная характеристика различных пылеулавливателей

Показатели	Циклоны		Скрубберы		Тканевые фильтры	Электрофильтры
	с малым сопротивлением	со средним сопротивлением	со средним сопротивлением	с высоким сопротивлением		
Гидравлическое сопротивление, Па (мм вод. ст.)	100—300 (10—30)	750—1250 (75—125)	750—1500 (75—150)	5000—12500 (500—1250)	750—1500 (75—150)	100—400 (10—40)
Минимальный размер улавливаемых частиц, мкм	30	10	2—5	1—0,1	0,1	1—0,01
Начальное содержание пыли в газе, кг/м ³	0,4	0,1	0,05	0,05	0,02	0,01—0,05
Эффективность	0,60—0,95	0,85—0,90	0,85—0,95	0,9—0,99	0,98—0,99	до 0,99
Максимально допустимая температура (°С) °К	(400) 673	(400) 673	не лимитируется	быстро охлаждается	(250—300) стекло—ткань 523—573	(425) 698
Ориентировочная относительная стоимость очистки*	1—1,5	2—3	2,5—4	7—15	3—7,5	5—15

* За единицу принята стоимость очистки в циклонах с малым сопротивлением.

кой очистки — электрофильтры. Выделение пылевидного каменного угля, цементной пыли или близкой по размерам и свойствам пыли апатитового концентрата целесообразно осуществлять в циклонах, которые обеспечивают грубую очистку. Для более тонкой очистки следует применять двухступенчатые схемы: на второй ступени, после циклонов, могут быть установлены тканевые фильтры или электрофильтры для цементной пыли и тканевые фильтры, скрубберы Вентури или электрофильтры для апатитового концентрата. Однако мокрые методы очистки нельзя использовать для выделения цементной пыли, которая схватывается в присутствии воды.

Эффективность аппаратов различного типа при улавливании кварцевой пыли видна из рис. 8.4. Очевидно, что циклоны обладают низкой степенью улавливания при величине частиц менее 10 мкм. Аппараты мокрого типа имеют более высокую эффективность, чем аналогичные сухие. Эффективность же циклонов, как и других аппаратов центробежного типа, снижается при увеличении их диаметра.

Усредненные показатели типовых аппаратов пылеочистки сведены в табл. 8.3, по данным которой возможен подбор аппаратов в зависимости от величины частиц, запыленности газа, температуры, эффективности и расхода энергии на очистку.

8.5. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ПЫЛЕОЧИСТКИ

Одиночные аппараты, как правило, не обеспечивают нужной степени очистки газов от пыли, поэтому чаще применяют двух- или трехступенчатые схемы.

В системах пневмотранспорта, при очистке воздуха после помола, после воздушной классификации и сушки часто используют системы, состоящие из циклона (или другого пылеосадительного аппарата сухого типа) и рукавного фильтра. Основное количество пыли, обычно 70—85 %, выделяют в циклоне, и воздух (или газы) с содержанием пыли не более 0,02 кг/м³ направляют в рукавный фильтр. Материал для рукавов выбирают в соответствии с температурой и химическими свойствами газов по табл. 8.1.

Отходящие газы сушилок КС, пневмогазовых и распылительных сушилок, кроме пыли, часто содержат вредные примеси — SO₂, HCl, SiF₄. В таких случаях требуется не только выделение пыли, но и поглощение вредных газов. Для очистки этих газов нашли применение комбинированные схемы, включающие аппараты сухого и мокрого типов (рис. 8.5).

Грубую очистку от пыли осуществляют в одиночных циклонах большого размера 3. Для более полного выделения мелкодисперсной пыли газ дополнительно пропускают через батарейные циклоны 4, а для тонкой очистки газа от пыли и

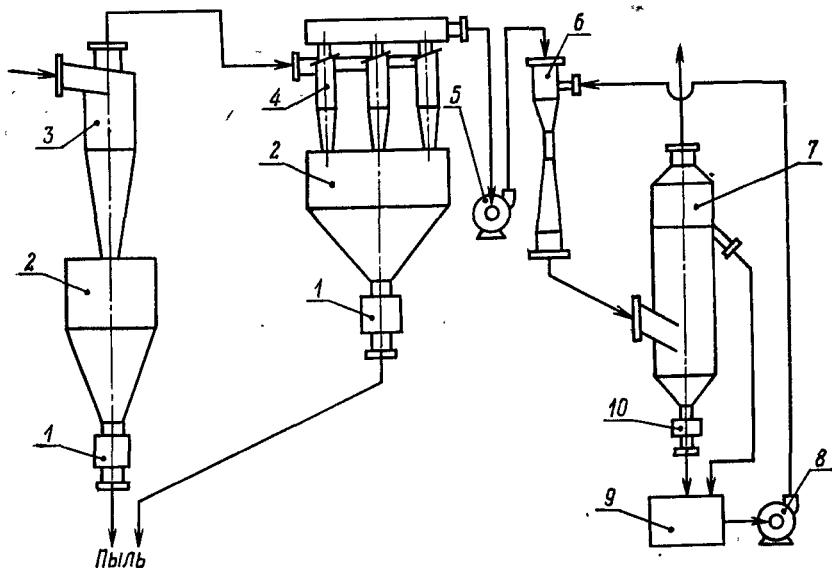


Рис. 8.5. Комбинированная схема очистки газов сушилок:
 1 — пылевой затвор; 2 — бункер для пыли; 3 — циклон; 4 — батарейный циклон;
 5 — вентилятор; 6 — скруббер Вентури; 7 — мокрый циклон; 8 — насос; 9 — бак;
 10 — гидроаккумулятор.

вредных примесей используют скруббер Вентури 6 в блоке с мокрым циклоном 7. Скруббер орошают водой или содовым раствором, которые по мере увеличения концентрации растворенных веществ выводят из системы. На ряде заводов для промывки газов применяют пенные аппараты, турбулентные промыватели или центробежные скрубберы ВТИ.

Трехступенчатая комбинированная схема высокоэффективна: при начальном содержании пыли до $0,200 \text{ кг/м}^3$ выхлопные газы содержат не более $0,1 \text{ г}$ пыли на 1 м^3 .

Рассмотренные схемы пылеочистки не исчерпывают всех вариантов, используемых в промышленности. В каждом конкретном случае необходим творческий подход к выбору системы очистки газов с учетом технологических, экономических и санитарных требований.

8.6. АППАРАТЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СИСТЕМ ЖИДКОСТЬ — ТВЕРДОЕ

Для разделения систем Ж—Т используют отстойники, в которых частицы твердой фазы осаждаются под действием силы тяжести, и фильтры — аппараты для разделения суспензий на жидкую и твердую фазу пропусканием ее через пористую перегородку [3, 45—49].

Табл. 8.4. Характеристика некоторых одноярусных сгустителей с центральным и периферийным приводом

ГОСТ	Марка	Диаметр, м	Глубина, м	Площадь осаднения, м ²	Высота, м	Масса без чана, кг	Продолжительность одного оборота, мин	Мощность привода, кВт
10876—75	Ц-6	6	2,5	28	7,5	5 000	4,0	2,2
	Ц-9	9	3,0	63	8,0	8 000	5,0	3,0
	Ц-12	12	3,0	110	9,0	13 000	6,0	3,0
	Ц-15	15	3,0	175	9,5	17 000	7,5	4,0
	Ц-18	18	3,6	250	10,0	20 000	9,0	4,0
	Ц-30	30	4,0	700	12,5	—	13, 16, 20	7,5
10876—64	П-18	18	3,6	250	6,0	17 000	10,0	3,0
	П-25	25	3,6	500	6,3	33 000	13,0	4,0
	П-30	30	3,6	700	6,5	36 000	16,0	5,5
	П-40	40	4,0	1250	7,0	58 000	26, 32	10,0 7,5
	П-50	50	4,5	2000	8,0	70 000	13, 17	17,0 13,0

Отстойники. Получили широкое распространение в промышленности благодаря простоте их устройства и эксплуатации. Их используют для выделения и промывки глинистых примесей (шламов) из воды и растворов, осаждения мелкодисперсных кристаллических солей и сгущения суспензий перед фильтрацией или центрифугированием.

Отстойники (сгустители) одноярусные выпускаются с периферийным приводом (тип П) по ГОСТ 10876—64 диаметром 4—100 м и с центральным приводом (тип Ц) по ГОСТ 10876—75 диаметром 18—100 м. Отстойники диаметром до 30 м изготавливают с металлическим чаном, они предназначены для установки в закрытых помещениях. Аппараты больших диаметров изготавливают из железобетона. Основные показатели отстойников приведены в табл. 8.4.

Пример условного обозначения сгустителя одноярусного с центральным приводом, диаметр чана 18 м в кислотостойком исполнении: Ц—18К ГОСТ 10876—75. Обозначение включает тип сгустителя, диаметр чана (в м), исполнение (для кислых сред кислотостойкое исполнение — К).

Фильтры. В связи с широким использованием процесса фильтрации и разнообразием свойств разделяемых суспензий разработано много конструкций фильтров периодического и непрерывного действия. В фильтрах непрерывного действия все операции (фильтрование, промывка осадка и его удаление, регенерация ткани) осуществляются одновременно в различных частях аппарата. Отдельный фильтрующий элемент про-

ходит все указанные операции последовательно, как и в фильтре периодического действия.

Из множества конструкций фильтров непрерывного действия широкое распространение получили *барабанные вакуум-фильтры* с наружной фильтрующей поверхностью. Они изготавливаются по ГОСТ 5748—68 и предназначены для разделения суспензий, у которых скорость осаждения наиболее крупных классов, составляющих не менее 20 % от общего количества, не превышает 18 мм/с.

Указанные фильтры выпускают следующих разновидностей: БО — общего назначения, предназначены для суспензий, при фильтрации которых осадок толщиной 5 мм образуется за время, не превышающее 4 мин; БТ — для труднофильтруемых суспензий; БН — для фильтрации с намывным слоем; БЛ — для легкофильтрующихся суспензий; БсхО — со сходящим полотном и др. Поверхность фильтра может составлять 0,25—100 м², диаметр барабана — 0,5—4,2 м, скорость вращения — 0,1—2,0 об/мин. Удельная производительность вакуум-насоса при фильтрации и промывке должна равняться 0,5—2,0 м³/м²·мин, а воздуходувки, подающей воздух на регенерацию ткани, 0,1—0,5 м³/м²·мин.

Материал деталей, соприкасающихся с суспензией и фильтратом, зависит от коррозионной активности среды, поэтому барабанные вакуум-фильтры изготавливают в различном исполнении: из углеродистых сталей — У, гуммированными — Р, из коррозионностойкой стали — К и из низколегированной стали, пригодной для низких температур до —70 °С (203 °К) — Х.

Пример условного обозначения барабанного вакуум-фильтра общего назначения, выполненного из коррозионностойкой стали, с поверхностью фильтрации 100 м² и барабаном диаметром 4,2 м: вакуум-фильтр БОК 100—4,2 ГОСТ 5748—68.

Для разделения труднофильтрующихся и пастообразных суспензий нередко применяют *дисковые вакуум-фильтры*, в которых фильтрующие элементы имеют вид секторов, прикрепленных к общему полуму валу и образующих диски. В отличие от барабанных на дисковых вакуум-фильтрах невозможна промывка и отжим осадка.

По ГОСТ 5747—70 дисковые вакуум-фильтры предназначены для фильтрации суспензий, у которых скорость осаждения твердых частиц преобладающего класса крупности не превышает 18 мм/с и толщина осадка за 3 минуты достигает 8 мм. Эти фильтры изготавливают в обычном исполнении из чугуна, углеродистой стали ДУ и коррозионно-стойких сталей ДК. Поверхность фильтрации составляет 0,3—250 м², диаметр дисков — 0,6—3,75 м, а скорость вращения — 0,1—1,6 об/мин.

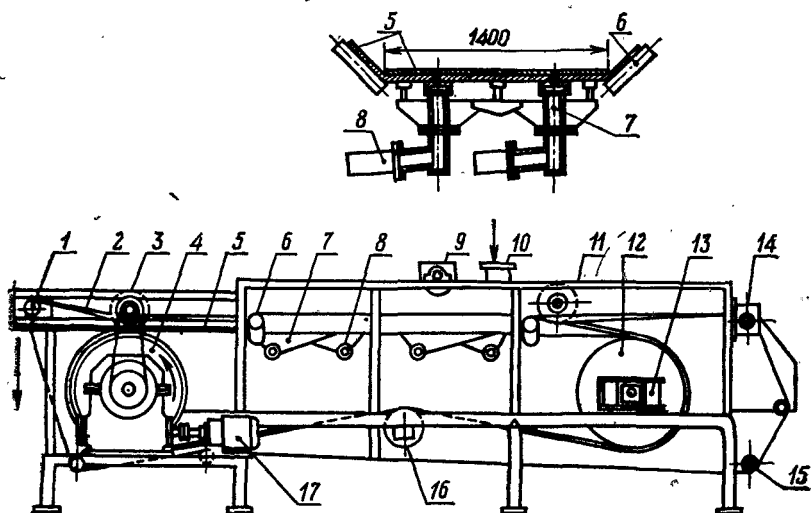


Рис 8.6. Ленточный вакуум-фильтр со сходящей фильтровальной тканью.

Пример условного обозначения дискового вакуум-фильтра, выполненного из углеродистой стали с поверхностью фильтрации 250 м^2 , имеющего диски диаметром $3,75 \text{ м}$: вакуум-фильтр ДУ 250—3,75 ГОСТ 5747—70.

Дисковые вакуум-фильтры применяют для фильтрации кремнегеля, двуоксида титана, оксида алюминия и других пастообразных материалов, например шламов — отхода производства бихромата натрия.

Для фильтрации неоднородных суспензий, если необходима тщательная промывка осадка, используют *карусельные лотковые вакуум-фильтры*. Их выпускают с поверхностью фильтрации $30, 40$ и 80 м^2 .

При фильтрации суспензии сульфата кальция в экстракционной фосфорной кислоте карусельные фильтры работают с удельной нагрузкой $0,139—0,222 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ($500—800 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$), влажность промытого фосфогипса равна $40—50 \%$.

Ленточные вакуум-фильтры предназначены для разделения быстроосаждающихся суспензий с неоднородной величиной частиц твердой фазы. Однако их с успехом можно применять для фильтрования шламов и таких труднофильтруемых веществ, как кремнегель. Достоинством их является возможность двух-, четырехкратной промывки.

Ленточный вакуум-фильтр со сходящей фильтровальной тканью (рис. 8.6) состоит из бесконечной резиноканевой ленты 5, натянутой на ведущий 4 и ведомый (натяжной) 12 барабаны. Верхняя ветвь ленты расположена на горизонтальном

столе, под которым проходят вакуум-камеры 7. В средней части стола находятся наклонные ролики 6, благодаря которым лента приобретает желобчатую форму. Фильтрующая ткань 2 в виде бесконечной ленты в верхней ветви прилегает к резиновой ленте 5, образуя фильтрующую перегородку, и движется синхронно с ней, прижатая роликами 3. Ткань проходит вначале через ролик 1, где осадок ссыпается в бункер, а затем через ролики 15 и выравнивающее устройство 14. В нижней ветви ленты осуществляется промывка ткани. Фильтрат и промывные воды из вакуум-камер выводятся через штуцера 8 в вакуум-сборники. Суспензию подают на ленту через желоб 10, а промывные воды через оросительное устройство 9, укрепленное на каркасе. Электродвигатель 17 приводит в движение приводной барабан 4 и ролик 3. Подвижные подшипники 13 служат для натяжения резиновой ленты, а ролики 16 устраняют провисание фильтрующей ткани.

Ленточные вакуум-фильтры изготавливают по ОСТ 26-01-1269—75 с поверхностью фильтрации 1, 1,6, 2,5, 3,2, 4 и 10 м² в двух исполнениях: из углеродистой (У) и коррозионно-стойкой (К) стали.

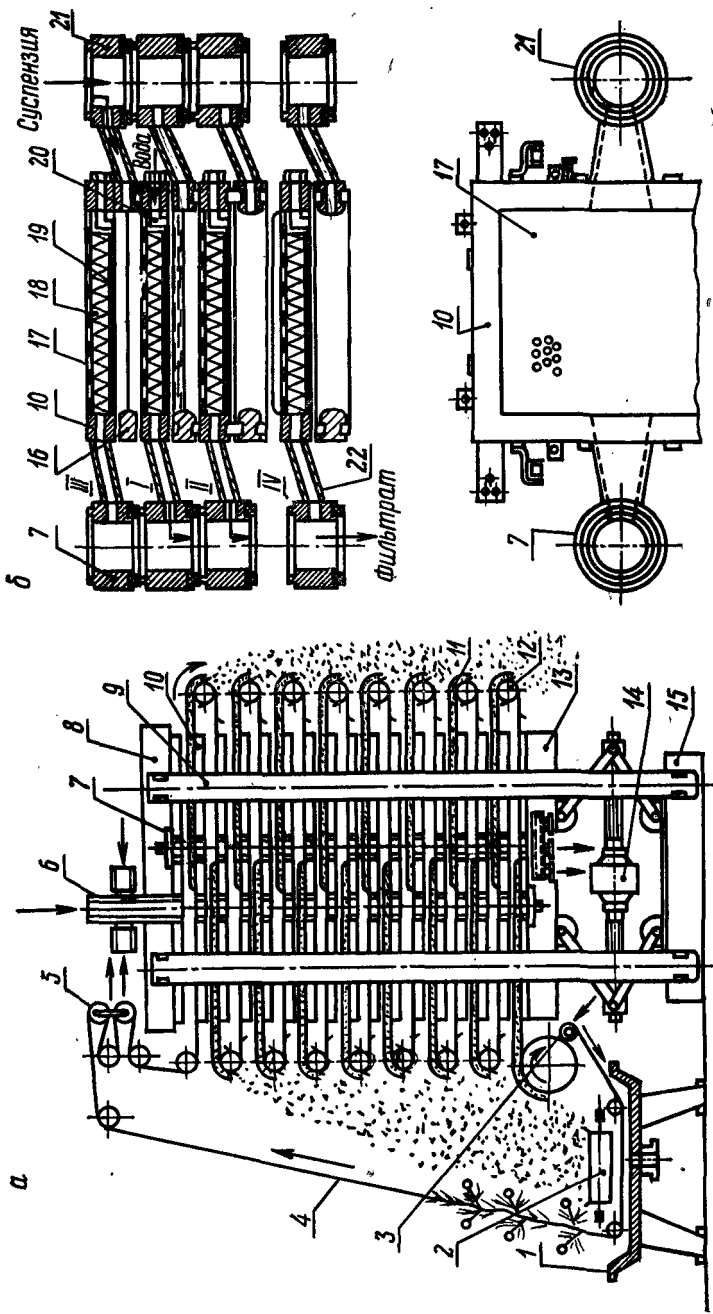
Пример условного обозначения ленточного вакуум-фильтра со сходящей лентой шириной 1,4 м и поверхностью фильтрации 10 м², выполненного из коррозионно-стойкой стали: ленточный вакуум-фильтр Лсх 10—1,4К ОСТ 26-01—1269—75.

Новейшие фильтры данного типа с поверхностью фильтрации 20 м² при отмывке галитового отвала галургической фабрики обладают производительностью 71 кг/с (256 т/ч) при влажности осадка до 7%.

Автоматический камерный фильтр-пресс с механическим зажимом фильтровальных плит создан впервые в Советском Союзе и выпускается под маркой ФПАКМ по ГОСТ 19756—74. Он предназначен для разделения тонкодисперсных суспензий, содержащих 10—500 кг/м³ твердой фазы при давлении 1,17 МПа и температуре 5—80 °С для фильтров с диафрагмой и 5—120 °С для фильтров без диафрагмы.

Фильтр-прессы выпускают в двух исполнениях: I — с диафрагмой для отжима осадка и II — без диафрагмы с подсушкой осадка воздухом. Работа фильтра полностью автоматизирована.

Фильтр-пресс (рис. 8.7) состоит из горизонтальных фильтрующих плит 10, которые могут передвигаться вверх и вниз по направляющим 9 с помощью электромеханического зажима 14. Фильтровальная ткань 4 в виде бесконечной ленты протянута между плитами 10 с помощью роликов 12. Она приводится в движение барабаном с прижимным роликом 3, натяжение ленты обеспечивает устройство 5. В камере 1 фильтрующая ткань регенерируется при промывке водой.



Р и с. 8.7. Фильтр-пресс типа ФПАКМ:

а — схема устройства; б — схема работы фильтрующих плит; 1 — камера регенерации; 2 — течка; 3 — ролик прижимной; 4 — ткань фильтровальная; 5 — натяжное устройство; 6 — коллектор подачи; 7 — коллектор отвода; 8 — плита верхняя упорная; 9 — стяжка; 10 — плиты фильтрующие; 11 — ножи съем. осадка; 12 — ролик; 13 — плита нажимная; 14 — зажим электромеханический; 15 — плата нижняя; 16 — рама; 17 — лист перфорированный; 18 — спираль; 19 — лист перфорированный; 20 — водящие трубки; 21 — напорный коллектор; 22 — от-фильтрат.

При фильтрации пакет фильтрующих плит сжат электро-механическим зажимом, между нажимной плитой 13 и упорной плитой 8. Суспензию подают в коллектор 6, а фильтрат выходит через коллектор 7. Фильтрующая плита состоит из двух частей: верхней плиты 10, снабженной дренажным устройством в виде перфорированного листа 17 и спирали 18, и нижней рамки 16. При сжатии пакета рамка образует камеру фильтрации. Между плитой и рамкой установлена резиновая диафрагма 19, которая отжимает жидкую фазу и прессует осадок при подаче воды под давлением 1,5 МПа через штуцер 20.

Фильтр работает периодически, последовательно осуществляя четыре операции цикла:

I — фильтрование суспензии. Пакет плит сжат зажимом 14, суспензию подают под давлением до 1,1 МПа в коллектор 6, образованный отдельными секциями 21, а фильтрат отводят через патрубки 22 в коллектор 7;

II — отжим жидкой фазы. После получения слоя осадка заданной толщины прекращается подача суспензии и на диафрагмы через штуцера 20 подается вода;

III — просушка осадка после опускания плит;

IV — удаление осадка, передвижение и регенерация ткани. Ткань передвигается барабаном с прижимным роликом 3, осадок снимается ножами 11, ссыпается в бункер и далее в течку 2; ткань промывается водой в камере 1 и очищается скребками или щетками.

Эти фильтр-прессы изготавливают с поверхностью фильтрации 2,5—50 м² из углеродистых сталей для работы в щелочных или нейтральных средах, из легированных сталей или титановых сплавов для фильтрации коррозионноактивных жидкостей.

Пример условного обозначения фильтр-пресса автоматического камерного с электро-механическим зажимом плит первого исполнения (с диафрагмой) с площадью фильтрации 25 м²: 1-ФПАКМ-25 ГОСТ 19756—74.

Центрифуги. Это машины, предназначенные для разделения жидких неоднородных систем (суспензий или эмульсий) под действием центробежных сил, возникающих при вращении суспензий или эмульсий вместе с ротором, внутри которого они находятся. Центрифуги широко используются для проведения процессов фильтрования, отстаивания и осветления.

По режиму работы центрифуги подразделяются на непрерывные и периодические, по расположению оси вращения ротора — на горизонтальные и вертикальные, а по способу выгрузки осадка из ротора — с ручной, вибрационной, инерционной, шнековой выгрузкой или выгрузкой с помощью ножа или поршня.

Условные обозначения жидкостных центрифуг включают девять признаков, которые располагают в таком порядке: 1) конструкция ротора (числитель): одинарный ротор — 1, сдвоенный — 2 (это обозначение распространяется только на центрифуги, имеющие сдвоенные или многокаскадные роторы); 2) число каскадов ротора (знаменатель); 3) буквенное обозначение принципа разделения: фильтрующие — Ф, осадительные — О, осадительные разделяющие — Р, осадительные тарельчатые — Т; 4) буквенное обозначение основного конструктивного признака: маятниковые (подвесные с нижним приводом) — М, подвесные с верхним приводом — П, горизонтальные — Г, вертикальные — В, вертикальные с подпертым валом и упругой верхней опорой — У, вертикальные трубчатые — Т; 5) буквенное обозначение способа выгрузки осадка: ручной через верхний борт — Б, ручной через днище — Д, ручной с разборкой ротора — Р, саморазгружающийся (гравитационный) — С, ножевой — Н, шнековый — Ш, поршневой — П, инерционный — И, вибрационный — В, гидравлический — Г; 6) через тире диаметр ротора (в см); 7) цифровое обозначение исполнения центрифуги: негерметизированная — 1, негерметизированная со взрывозащищенным электрооборудованием — 2, герметизированная взрывозащищенная — 3, герметизированная для работы под давлением — 4, с обогревом или охлаждением — 5, с обогревом или охлаждением со взрывозащищенным электрооборудованием — 6; 8) материал деталей, соприкасающихся с обрабатываемым продуктом: углеродистая сталь — У, легированная сталь — Л, коррозионно-стойкая сталь — К, титан и его сплавы — Т, другие металлы и сплавы — С, пластмассовые покрытия — П, гуммированные покрытия — Г; 9) через тире порядковый номер модели.

Примеры обозначения центрифуг: 1) фильтрующая горизонтальная центрифуга с ножевым съемом осадка и ротором диаметром 2000 мм, негерметизированная, изготовленная из коррозионностойкой стали, первая модель — ФГН-201К — 1 ГОСТ 375—68; 2) фильтрующая, горизонтальная, однороторная, двухкаскадная центрифуга с поршневой выгрузкой осадка и ротором диаметром 800 мм, негерметизированная, из коррозионностойкой стали, первая модель — 1/2 ФГП-801К—1, ГОСТ 6078—75.

Центрифуги типа ФГН нашли применение для отделения кристаллов разнообразных солей от маточного раствора.

Фильтрующая вертикальная центрифуга с инерционной выгрузкой осадка (ФВИ) относится к непрерывно действующим центрифугам (рис. 8.8). Конусный ротор центрифуги установлен под углом к вертикальной оси таким образом, чтобы угол наклона фильтрующей поверхности с одной стороны был меньше угла трения осадка. Под действием центробежных сил оса-

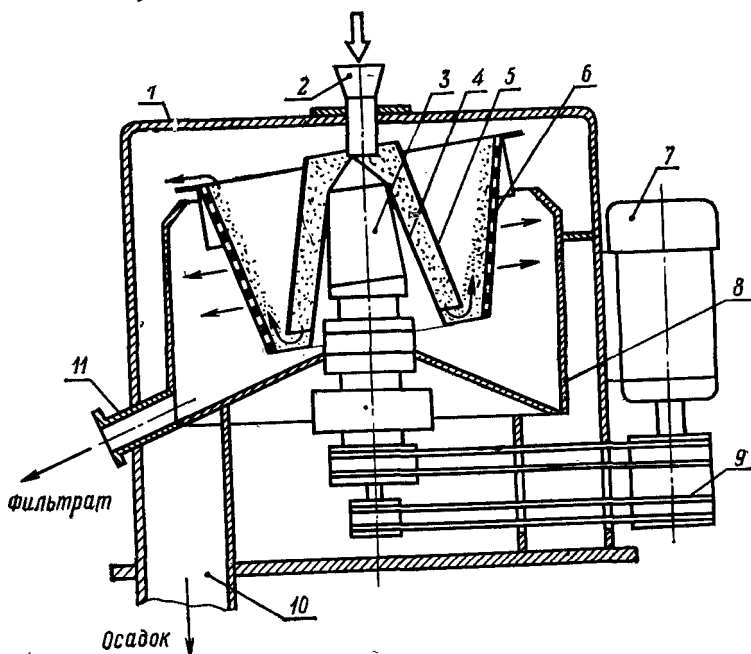


Рис. 8.8. Фильтрующая вертикальная центрифуга с инерционной выгрузкой осадка (ФВИ):

1 — корпус; 2 — патрубок для подачи суспензии; 3 — ротор; 4 — разгонный конус; 5 — загрузочный конус; 6 — коническое сито; 7 — электродвигатель; 8 — внутренний кожух; 9 — шкив; 10 — патрубок для вывода осадка; 11 — патрубок для слива фугата.

док сползает с поверхности ротора и отбрасывается на внутреннюю поверхность кожуха. Для равномерной разгрузки осадка ротор центрифуги поворачивается относительно вертикальной оси вращения привода.

При обезвоживании галитового отвала центрифуга с инерционной выгрузкой типа КТЗ-120 (ФРГ) обладает производительностью 22—30 кг/с (80—100 т/ч) при влажности осадка 7—8%.

Рассмотрим подробнее устройство и работу центрифуги 1/2 ФГП-801К—1 (рис. 8.9). Основными узлами центрифуги являются ротор 5, полый вал 7, привод 9, маслосистема 11, станина 13 и кожухи 1, 3. В чугунной литой станине 13 размещены подшипники 12, в которых установлен вал, шкив клиноременной передачи 8 и маслосистема 11.

На полом валу 7 укреплен ротор центрифуги 5, внутри его проходит шток 6, служащий для передачи возвратно-поступательного движения от поршня маслосистемы 9 к внутреннему барабану ротора, укрепленному на ступице 15. Внутренний

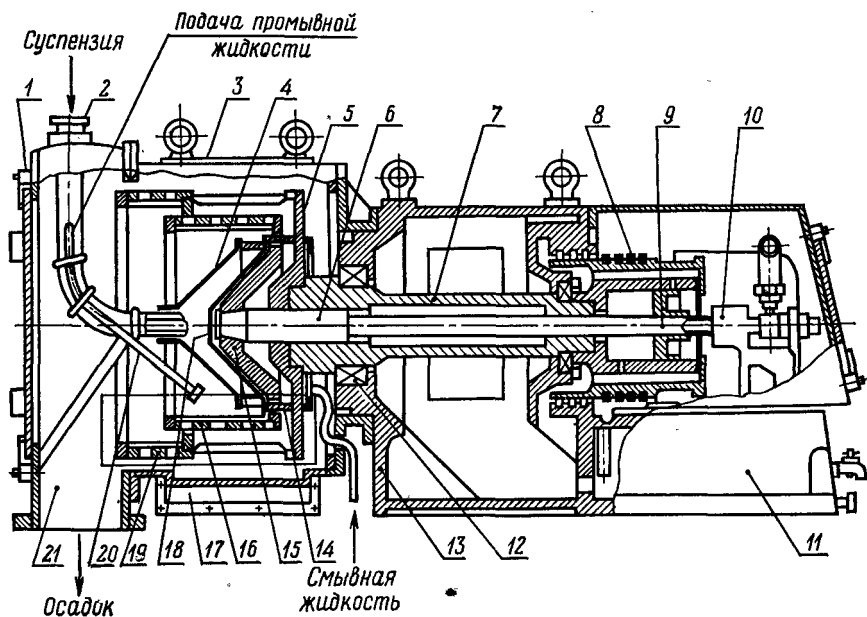


Рис. 8.9. Центрифуга ФГП.

барабан одновременно является толкателем для наружного барабана.

Ротор состоит из двух концентрических барабанов — внутреннего диаметром 800 мм и наружного диаметром 880 мм. На перфорированные обечайки барабанов укладывают щелевые сита 16 и 19. Щели сит шириной 0,3 мм располагаются вдоль образующей барабана, что уменьшает трение между осадком и ситом. К ступице ротора на восьми стойках 14 укреплен защитный конус 18. Стойки свободно проходят через отверстия в ступице внутреннего барабана, поэтому внутренний и наружный барабаны вращаются синхронно и в то же время внутренний барабан может перемещаться относительно наружного барабана на длину до 50 мм с частотой до 25 двойных ходов в минуту. К защитному внутреннему конусу 18 жестко прикреплен наружный конус 4. Эти конусы служат для равномерного распределения суспензий по поверхности сит внутреннего барабана. На внутреннем конусе установлено кольцо, предназначенное для перемещения осадка по внутреннему барабану. Ротор вращается со скоростью 105 рад/с (1000 об/мин).

Маслосистема состоит из маслонасоса, маслоцилиндра, торцевой муфты, расположенной в концевой опоре 10, и системы трубопроводов.

Передний 1 и средний 3 кожухи предназначены для размещения ротора, сбора фильтрата и осадка. На кожухе находятся патрубки для подачи суспензии 2, отвода фильтрата 17, выгрузки осадка 20 и подачи промывной воды 21. В задней части кожуха расположена труба подачи жидкости для промывки ротора (на рисунке не показано).

Суспензия поступает по питающей трубе 2 на фильтрующее сито внутреннего барабана 16 вращающегося ротора. Основная часть жидкости под действием центробежных сил проходит сито и выводится из кожуха в виде фильтрата через патрубок 17, а твердая фаза образует осадок на поверхности сита. При обратном движении внутреннего барабана (вправо) осадок сталкивается кольцом, укрепленным на конусе 14, на фильтрующую поверхность наружного барабана 19, где происходит дальнейшее удаление жидкости. При движении внутреннего барабана вперед (влево) осушенный осадок сталкивается с сита торцевой кромкой внутреннего барабана и удаляется из центрифуги через патрубок 20.

Производительность центрифуг зависит от величины кристаллов. Так, двоякая двухкаскадная фильтрующая центрифуга 2/2 ФГП-1201К-1 при фильтрации кристаллов хлорида калия со средней величиной частиц 0,3 мм достигает производительности 23—28 т/ч.

Характеристики основных базовых моделей центрифуг, используемых в основной химической промышленности, сведены в табл. 8.5. При выборе центрифуг необходимо учитывать свойства осадка, требуемую производительность и допустимую влажность твердого продукта.

Одним из достоинств фильтрующих центрифуг является возможность получения осадка с влажностью 1—6%, что значительно меньше, чем при использовании фильтров (7—15%). Осадок, выделяемый на отстойных центрифугах, как правило, содержит 25—40% влаги.

Недостатки центрифуг: повышенный расход энергии, измельчение кристаллов и сложность ремонта.

Важнейшие параметры, влияющие на выбор типа центрифуги, — величина частиц твердой фазы и содержание их в суспензии. Чем меньше частицы, тем больше должен быть фактор разделения центрифуги. Для разделения суспензий с частицами менее 5 мкм и суспензий, содержащих илстые, сильно уплотняющиеся осадки, применяют отстойные центрифуги. Фильтрующие центрифуги нерационально использовать при малом содержании твердой фазы в суспензии.

Отстойные центрифуги на предприятиях основной химической промышленности применяются редко. Например, отстойная центрифуга ОГШ-802К-5 вполне пригодна для уплотнения глинистых шламов. При содержании в суспензии 20—

Табл. 8.5. Основные характеристики некоторых базовых моделей центрифуг

Тип центрифуги	Условное обозначение	Диаметр ротора, мм	Частота вращения ротора, рад/с (об/мин)	Фактор разделения	Производительность по осадку, т/ч
Фильтрующие горизонтальные с ножевой выгрузкой осадка (ГОСТ 375—68)	ФГН-35	350	367 (3500)	2400	—
	ФГН-90	900	157 (1500)	1130	—
	ФГН-160	1600	79 (750)	500	—
	ФГН-200	2000	70 (670)	500	—
	2ФГН-220	2200	63 (600)	445	—
Фильтрующие подвесные с ножевой выгрузкой осадка	ФПН-100	1000	152 (1450)	1180	—
	ФПН-122	1220	152 (1450)	1440	—
	ФПН-125	1250	152 (1450)	1480	—
Фильтрующие подвесные саморазгружающиеся	ФПС-125	1250	105 (1000)	700	—
Фильтрующие маятниковые	ФМБ-63	630	152 (1450)	740	—
	ФМД-120	1200	100 (950)	600	—
	ФМН-100	1000	105 (1000)	560	—
Фильтрующие горизонтальные с поршневой выгрузкой осадка	ФГП-40	400	168 (1600)	570	1
	ФГП-120	1200	75 (720)	340	10
	1/4ФГП-65	650	107 (1025)	380	6
	1/6ФГП-90	900	79 (750)	285	—
Фильтрующая вертикальная с инерционной выгрузкой	2/2ФГП-120	1200	73 (700)	330	50
	ФВИ-100	1000	183 (1750)	1700	6
Фильтрующие со шнековой выгрузкой осадка	ФГШ-16	160	461 (4400)	1750	0,4
	ФВШ-20	200	419 (4000)	1800	1
	ФВШ-35	350	314 (3000)	1800	5
	ФГШ-40	400	269 (2575)	1500	8
Осадительные со шнековой выгрузкой осадка (ГОСТ 8459—68)	ОГШ-20	200	628 (6000)	4000	0,3
	ОГШ-35	350	445 (4250)	3500	1,0
	ОВШ-35	350	445 (4250)	3500	1,0
	ОГШ-50	500	283 (2700)	2000	1,5
	ОГШ-120	1200	84 (800)	385	14

30 % твердого и скорости вращения 1250 об/мин производительность центрифуги достигает 30 м³/ч по суспензии и 8 т/ч по твердому с влажностью 25—30 %.

Для центрифуг обязательны проверочные расчеты мощности привода [13, 15, 48] и обечайки ротора на прочность по ОСТ 26-01-11—70.

Глава 9. РАСТВОРИТЕЛИ И КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ

Процессы выпарки растворов и кристаллизации солей широко используют в самых разнообразных производствах основной химической промышленности и других отраслях народного хозяйства, что обуславливает многочисленность их конструкций. Методы расчета выпарных аппаратов подробно изложены в курсе «Процессы и аппараты химической промышленности» [3, 10—26, 38—53], поэтому в данной главе они не рассматриваются. Растворители и кристаллизаторы рассмотрены по возможности подробнее, так как в других курсах они описаны недостаточно.

9.1. РАСТВОРИТЕЛИ

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

В малотоннажных производствах в качестве растворителей часто используют один или каскад аппаратов с мешалками, которые работают периодически или непрерывно в режиме полного смешения. Ниже рассмотрены растворители непрерывного действия, применяемые на галургических предприятиях: колонный, трубчатый, шнековый и корытный [54].

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

В *колонном растворителе* (рис. 9.1, а) жидкость подают через патрубок в коническом днище под распределительную решетку. В колонне 3 происходит растворение материала, подаваемого по штуцеру.

Расширенная часть колонны 5, снабженная кольцевым желобом, служит для разделения твердой и жидкой фаз. Благодаря снижению скорости восходящего потока жидкости уменьшается унос мелких частиц. При растворении галитового остатка (отвала) в воде в аппарате данной конструкции была достигнута удельная производительность 120—160 м³ рассола, содержащего 305—310 кг NaCl на 1 м³ объема в час. В полупромышленном колонном аппарате при растворении

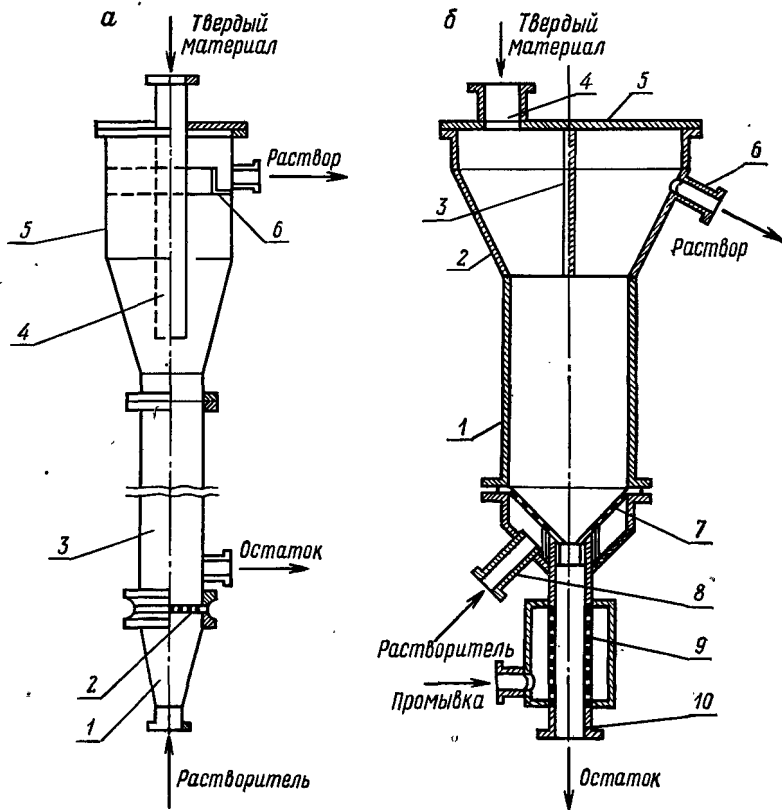


Рис. 9.1. Растворители:

а — колонный (1 — коническое дно; 2 — решетка; 3 — колонна; 4 — штуцер для ввода твердого материала; 5 — расширение; 6 — кольцевой желоб); *б* — колонный аппарат с кипящим слоем и зоной промывки (1 — колонна; 2 — расширение; 3 — перегородка; 4 — штуцер для загрузки; 5 — крышка; 6 — штуцер для вывода раствора; 7 — распределительная решетка; 8 — штуцер для ввода растворителя; 9 — зона промывки; 10 — штуцер для вывода нерастворимого остатка).

сильвинита в маточном растворе удельная производительность по руде достигала $3,54 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{с}$ (табл. 9.1) при степени извлечения KCl 95—98 %.

Растворитель с кипящим слоем, разработанный в ФРГ (рис. 9.1, б), отличается от колонного наличием зоны промывки нерастворимого остатка 9, что повышает извлечение KCl и уменьшает количество насыщенного маточника, выводимого из растворителя с отвалом.

Вертикальный трубчатый растворитель (рис. 9.2) представляет собой ряд труб 4, через которые насосом 7 прокачивают суспензию растворяемого вещества в жидкости. Твердый материал и растворитель поступают в аппарат с мешал-

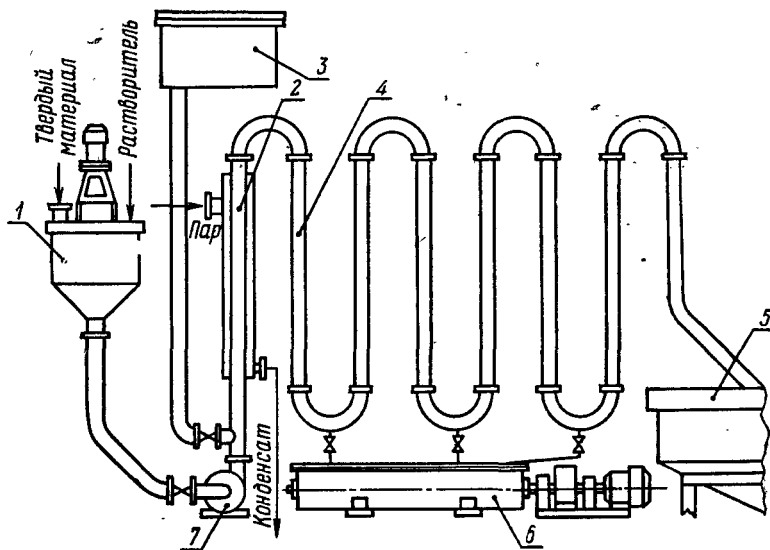


Рис. 9.2. Вертикальный трубчатый растворитель.

кой 1, где готовится суспензия, стекающая к насосу 7. Паровая рубашка 2 служит для подогрева суспензии до нужной температуры. Из растворителя суспензию сливают в сгуститель 5, где отделяют нерастворимый остаток от полученного раствора. В горизонтальную мешалку 6 сливают суспензию при остановках, а из бака 3 подают воду для промывки труб.

Вертикальный трубчатый растворитель испытан на Калушском ПО «Хлорвинил» для растворения сильвинита: при скорости потока 0,55 м/с и отношении Т : Ж в суспензии, равном 1 : 3, достигнута производительность по суспензии 100 м³/ч. Удельная производительность по руде в данном случае составляет 3,5 кг/м³ · с, что близко к показателям колонного растворителя (см. табл. 9.1). Благодаря интенсивному перемешиванию суспензии и истиранию частиц удельная производительность вертикального трубчатого аппарата при растворении глинистых калийных руд Прикарпатья оказалась примерно в два раза выше, чем обычного шнекового растворителя.

Длина труб вертикального растворителя при постоянном времени растворения должна быть примерно в три раза меньше, чем горизонтального. Это обусловлено тем, что в горизонтальных трубах скорость движения суспензии должна быть выше для предотвращения осаждения частиц в трубах.

Горизонтальный трубчатый растворитель, представляющий собой две ступени длиной по 160 м и диаметром 350 мм,

Табл. 9.1. Эксплуатационные показатели работы растворителей

Тип аппарата	Процесс	Удельная производительность по руде, кг/м ³ ·с	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т
Шнековый	растворение калийных руд Прикарпатья	0,20—0,39	0,3
Барабанный		20	2,8
Вертикальный трубчатый		0,56	0,44
Шнековый	растворение Верхнекамских силвинитов в маточнике	0,78—0,90	—
Колонный		1,18—3,54*	—
Колонный	растворение галитового отвала в воде	10—13,8**	—
Горизонтальный трубчатый		то же	до 25**

* По данным испытания модельной установки, выполненного ВНИИГ;

** Рассчитано авторами по литературным данным [54].

используют на калийном предприятии Верра (ГДР) для растворения галита в воде. Производительность его достигает 800 м³ суспензии в час. Благодаря высокой скорости движения суспензии удельная производительность такого аппарата весьма значительна.

Для растворения и выщелачивания крупнокусковых материалов иногда используют *барабанные растворители*. За счет соударения кусков друг с другом и с корпусом аппарата происходит самоизмельчение твердого материала и интенсифицируется процесс растворения. При растворении Прикарпатских калийных руд удельная производительность барабанных растворителей приближается к шнековым (см. табл. 9.1). Существенный недостаток таких аппаратов — высокий расход электроэнергии.

Барабанный растворитель представляет собой горизонтальный цилиндрический барабан, закрытый с торцов крышками, в которых расположены центральные отверстия для подачи растворителя и растворяемого материала и выхода раствора и нерастворимого остатка. Бандажами, укрепленными на корпусе, барабан опирается на ролики и приводится в движение электродвигателем через редуктор и венцовую шестерню. На внутренней поверхности барабана размещены лопасти для лучшего перемешивания фаз, они располагаются либо по образующей цилиндра, либо по винтовой линии.

Аналогичный по конструкции аппарат применяют в содовом производстве для гашения комовой извести и получения

известкового молока. В данном случае разгрузочный конец барабана оборудован цилиндрическим грохотом для отделения крупных кусков от суспензии. Удельная производительность гасителя по извести равна $0,12—0,18 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{с}$.

Для интенсификации растворения или выщелачивания полезно совместить процессы измельчения и растворения, используя в качестве растворителя мельницу мокрого помола. В производствах монокромата натрия, бариевых солей и на некоторых других предприятиях выщелачивание горячего спека, получаемого при прокатке руд, осуществляют в однокамерных шаровых мельницах мокрого помола.

На калийных заводах, выпускающих хлорид калия галургическим методом, на карналлитовых фабриках и при переработке полиминеральных калийных руд в качестве стандартного принят *корытный шнековый растворитель*.

Аппарат представляет собой корыто с полукруглым дном высотой $4,14—4,58 \text{ м}$, шириной в верхней части $2,5—3,8 \text{ м}$ и длиной $22,5 \text{ м}$. Оно разделено вертикальными перегородками, не достигающими до дна, на шесть секций. По дну корыта проходит ленточный шнек диаметром $1,93—2,8 \text{ м}$. Кроме спирали, на валу шнека укреплены горизонтальные лопасти для лучшего перемешивания суспензии в каждой секции. Перегородки уменьшают продольное перемешивание раствора. Растворяемый материал (сильвинит) загружают через штуцер в крышке аппарата, спиральными лопастями материал передвигается вдоль корпуса аппарата и поступает в приемный карман наклонного элеватора. Перфорированные ковши элеватора выгружают нерастворимый остаток (галитовый отвал) во второй растворитель или мешалку.

Шнековые растворители могут работать как при параллельном движении раствора и руды, так и при их противотоке. Производительность шнековых растворителей по руде составляет $400—700 \text{ т/ч}$, а удельная производительность по руде в расчете на полный объем $1,1 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{с}$. Для достижения высокой степени извлечения KCl (95 %) необходимо последовательно устанавливать два растворителя.

Существенный недостаток шнекового растворителя — значительный унос солевого шлама (содержание его в насыщенном растворе составляет $200—300 \text{ кг/м}^3$), что обусловлено интенсивным перемешиванием суспензии в растворителе и большой скоростью отвода раствора. Этот недостаток устранен в конструкции корытного растворителя с отстойной камерой, разработанной Калушским филиалом ВНИИГ.

Корытообразный корпус аппарата 1 (рис. 9.3) разделен вертикальными перегородками 3, достигающими до вала мешалки, на шесть отсеков. Через весь корпус проходит трубчатый вал 5, опирающийся на два подшипника, вынесенные из кор-

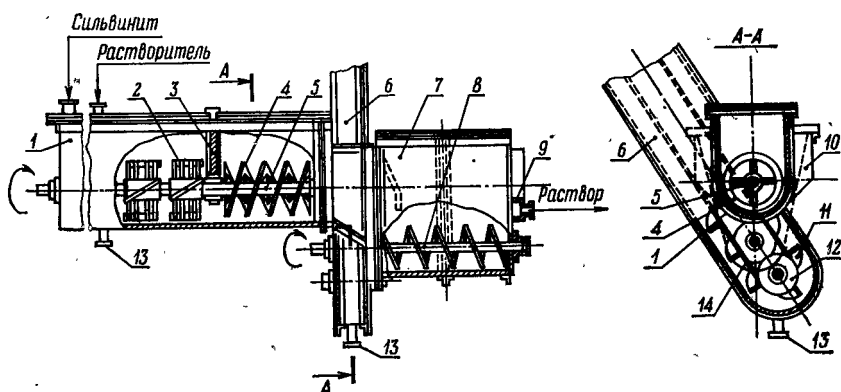


Рис. 9.3. Шнековый растворитель с отстойной камерой:

1 — корпус; 2 — лопастная секция мешалки; 3 — перегородка; 4 — шнековая секция; 5 — трубчатый вал мешалки; 6 — элеватор; 7 — отстойная камера; 8 — шнек; 9 — штуцер для вывода раствора; 10 — лоток для отвода раствора; 11 — ковши элеватора; 12 — барабан элеватора; 13 — штуцер для опорожнения аппарата; 14 — цепи.

пуса растворителя, что увеличивает срок их службы. В пяти секциях на валу закреплены рамные мешалки, обеспечивающие интенсивное перемешивание суспензии, а последняя секция снабжена шнеком 4, перемещающим твердую фазу в отстойную камеру 7. В последней раствор переливается через борта в карманы 10 и выводится из растворителя по штуцеру 9. Благодаря малой скорости движения жидкости основное количество мелких частиц соли осаждается на дно и шнеком 8 солевой шлам вместе с нерастворимым остатком подается в приямок наклонного элеватора 6. Перфорированные ковши 11, укрепленные на цепях 14, отделяют твердую фазу от раствора и выгружают смесь нерастворимого остатка с соевым шламом на дальнейшую обработку. В наклонном элеваторе твердую фазу, как правило, промывают конденсатом или горячей водой из расчета 30 кг на 1 т руды в целях уменьшения потерь насыщенного раствора. Для поддержания необходимой температуры в растворители подают до 50 кг острого пара на 1 т руды.

Детали растворителей подвержены значительной коррозии и эрозии вследствие высокой коррозионной активности хлоридных растворов при повышенных температурах и высоком содержании твердой фазы. Для защиты от преждевременного разрушения и обеспечения ресурса работы 8000 часов до среднего ремонта корпус растворителя, вал и шнек футеруют диабазовой замазкой. Вал обычно изготавливают из стали 12ХНЗА, а перемешивающее устройство (спиральные лопасти и скребки), ковши и цепи элеватора из легированных сталей,

например из стали ОХ23Н28М3ДЗТ, которая обладает хорошей устойчивостью в данной среде.

Пример 9.1. Технологический расчёт шнекового растворителя. Исходные данные: производительность по руде — 102,8 кг/с (370 т/ч); расход шелока 0,1703 м³/с (613 м³/ч); время пребывания в одном растворителе 480 с (8 мин). Растворитель корытный шнековый, наружный диаметр шнека $D_{ш.н}$ 1,93 м, внутренний диаметр шнека $D_{ш.в}$ 1,53 м, длина шнека L 19 м, радиус закругления днища 1,0 м, ширина по крышке 2,5 м, общая высота до крышки 4,14 м. Частота вращения шнека n 0,167 с⁻¹ (10 об/мин), шаг спирали S 1,0 м. Полный объем растворителя без кармана элеватора V_p 183 м³.

Расход суспензии при коэффициенте неравномерности 1,1 и средней плотности руды 2000 кг/м³ определяем по формуле

$$\omega_c = 1,1 \left(\frac{102,8}{2000} + 0,1703 \right) = 0,2435, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Объем суспензии в растворителе при времени пребывания $\tau = 480$ с

$$V_c = \omega_c \tau = 0,2435 \cdot 480 = 116,7, \text{ м}^3.$$

Степень заполнения растворителя суспензией

$$\varphi_c = \frac{V_c}{V_p} = \frac{116,7}{183} = 0,638$$

находится в допустимых пределах.

Проверим производительность ленточного шнека G_p (кг/с) по руде по формуле (7.5). Площадь поперечного сечения ленточного шнека

$$F = 0,785 (D_{ш.н}^2 - D_{ш.в}^2) = 0,785 (1,93^2 - 1,53^2) = 1,086 \text{ м}^2.$$

Коэффициент заполнения конвейера рудой φ примем, учитывая интенсивное перемешивание суспензии горизонтальными лопастями, равным 0,8; коэффициент C_2 для горизонтального шнека равен 1. Насыпная масса сильвинита $\gamma_n = 1140$ кг/м³. В результате интенсивного перемешивания суспензии условная насыпная масса сильвинита $\gamma_{н.у}$ (кг/м³) будет составлять при содержании твердой фазы в суспензии $102,8 \cdot 1,1 = 113,08$ кг в 0,2435 м³:

$$\gamma_{н.у} = G_p / \omega_c = 113,08 / 0,2435 = 464,4.$$

Принимаем среднюю насыпную массу сильвинита равной 800 кг/м³.

Производительность шнека составит

$$G_p = F S n \varphi C_2 \gamma_n = 1,086 \cdot 1 \cdot 0,167 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 800 = 116,07 \text{ кг/с}.$$

Таким образом, шнек обеспечивает перемещение загружаемого количества руды.

Мощность привода на валу шнека N_p (кВт) определяем по формуле

$$N_p = C D_{ш.н}^4 L n^3,$$

где C — коэффициент, равный 60,5.

Таким образом, получим

$$N_p = 60,5 \cdot 1,93^4 \cdot 19 \cdot 0,167^3 = 73,5, \text{ кВт}.$$

С учетом потерь на трение в сальниках ($\eta_c = 0,9$) и в подшипниках скольжения ($\eta_n = 0,92$) мощность на валу шнека составит

$$N'_p = \frac{N_p}{\eta_c \eta_n} = \frac{73,5}{0,9 \cdot 0,92} = 88,8, \text{ кВт}.$$

Мощность электродвигателя

$$N_{дв} = \frac{N'_p \beta_m}{\eta_p \eta_s \eta_{дв}},$$

где β_m — коэффициент запаса мощности на пусковой период, равный 1,2; η_p — КПД редуктора, равный 0,96; η_z — КПД зубчатой передачи, равный 0,95; $\eta_{дв}$ — КПД двигателя, равный 0,96.

Следовательно,

$$N_{дв} = \frac{88,8 \cdot 1,2}{0,96 \cdot 0,95 \cdot 0,96} = 121,5, \text{ кВт.}$$

Принимаем к установке электродвигатель типа А101-4М мощностью 125 кВт; скорость вращения $n_{дв} = 24,5 \text{ с}^{-1}$ (1470 об/мин).

Общее передаточное число $i_o = n_{дв} : n = 24,5 : 0,167 = 147$. Принимаем к установке редуктор типа ЦД2-115М, передаточное число $i_p = 50$, передаваемая мощность 131 кВт при $n = 25 \text{ с}^{-1}$.

Передаточное число зубчатой передачи

$$i_z = i_o / i_p = 147 : 50 = 2,94.$$

Пример 9.2. Расчет ковша наклонного элеватора. С учетом образования солевого шлама производительность элеватора по сухому веществу принимаем равной расходу сильвинита, т. е. 102,8 кг/с. При влажности солевого отвала 12 % расход шлама $G_p = 102,8 / 0,88 = 116,82 \text{ кг/с}$. Насыпная масса влажного отвала $\gamma_n = 1500 \text{ кг/м}^3$.

Объем ковша элеватора определяем по формуле

$$V_k = \frac{G_p S_k}{v \varphi \gamma_n} = \frac{116,82 \cdot 0,63}{0,6 \cdot 0,75 \cdot 1500} = 109,03 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3,$$

где S_k — шаг ковшей, принимаем 0,63 м; v — линейная скорость движения цепи (0,6 м/с); φ — коэффициент заполнения ковшей, равный 0,75.

Пример 9.3. Расчет вала шнекового растворителя. Рассматриваемый аппарат не является стандартным, поэтому основные и наиболее нагруженные детали (вал шнека, стойки горизонтальных мешалок и спираль шнека) подлежат проверочному расчету на механическую прочность. Исходные данные в примере 9.1

Диаметр вала d_b шнека принимаем равным 0,2 м, материал — сортовая сталь 12Х1МФ, для которой $\sigma_b = 900$, $\sigma_t = 750 \text{ МПа}$. Масса рассматриваемого участка вала с лопастями и спиралью G_b составляет 2000 кг (0,02 МН), а масса муфты G_m 780 кг (0,0078 МН). Муфта расположена на расстоянии $l_1 = 1,2 \text{ м}$ от промежуточного подшипника.

Расчет выполнен для наиболее нагруженного участка вала, длиной l 3,2 м, на который действует крутящий момент привода $M_{кр}$ (МН · м) и изгибающие моменты от осевой силы $N'_{ос}$, приложенной к спирали, собственной массы вала, спирали лопастей и муфты.

Крутящий момент на валу

$$M_{кр} = 10^{-4} \cdot 1,594 N'_p / n = 10^{-4} \cdot 1,594 \cdot 88,8 / 0,167 = 0,0848.$$

Общее осевое усилие $N_{ос}$ (МН), действующее на весь вал,

$$N_{ос} = \frac{2M_{кр}}{K_p D_{шн} \text{tg}(\alpha_{ср} + \rho_t)}; \alpha_{ср} = \text{arctg} \frac{S_{ш}}{\pi D_{шн}},$$

где K_p — коэффициент, учитывающий значение радиуса, на котором действует сила (для ленточного шнека с $D_{шн}$ 1,93 м и $D_{шв}$ 1,53 м произведение $K_p D_{шн}$ можно принять равным 1,73); ρ_t — угол трения перемещаемого материала, для сильвинита он равен 31° .

$$\alpha_{\text{ср}} = \text{arctg} \frac{1,0}{3,14 \cdot 1,93} = 9^{\circ}20'; N_{\text{ос}} = \frac{2 \cdot 0,0848}{1,73 \cdot 0,8491} = 0,1158.$$

Осевая нагрузка $N'_{\text{ос}}$ (МН), действующая на участок вала длиной l 3,2 м и приложенная к спирали, составит

$$N'_{\text{ос}} = N_{\text{ос}} l / L = 0,1158 \cdot 3,2 / 19 = 0,0195.$$

Окружное усилие $P'_{\text{ок}}$ (МН), действующее на участок вала,

$$P'_{\text{ок}} = \frac{2M_{\text{кр}}l}{K_{\text{р}} D_{\text{шн}} L} = \frac{2 \cdot 0,0848 \cdot 3,2}{1,73 \cdot 19} = 0,01652.$$

Радиальное усилие T' (МН), приложенное к валу,

$$T' = N'_{\text{ос}} \text{tg}(\alpha_{\text{ср}} \mp \rho_{\text{т}}) = 0,0195 \cdot 0,8491 = 0,01656.$$

Определим окружное усилие муфты $P_{\text{м}}$ (МН), вызванное нарушением соосности частей вала:

$$P_{\text{м}} = 0,25 M_{\text{кр}} / R_{\text{м.б}} = 0,25 \cdot 0,0848 / 0,24 = 0,0883,$$

где $R_{\text{м.б}}$ — радиус окружности, на которой расположены болты, равный 0,24 м.

Суммарное усилие от массы муфты и окружного усилия муфты

$$G_{\text{м}} + P_{\text{м}} = 0,0078 + 0,0883 = 0,0961 \text{ МН.}$$

Суммарное усилие от общей массы вала с лопастями и спиралью и окружного усилия

$$G_{\text{в}} + P'_{\text{ок}} = 0,02 + 0,01652 = 0,03652 \text{ МН}$$

приложено в середине пролета.

Для определения реакции опор R_{x} (МН) составим уравнение суммы моментов M_{Σ} (МН · м) относительно крайней опоры:

$$M_{\Sigma} = 0 = R_{\text{x}} l \mp T' \frac{l}{2} \mp N'_{\text{ос}} \frac{K_{\text{р}} D_{\text{шн}}}{2} - (P'_{\text{ок}} - G_{\text{в}}) \frac{l}{2} - (P_{\text{м}} \mp G_{\text{м}})(l - l_1).$$

Следовательно, реакция опоры

$$R_{\text{x}} = (P'_{\text{ок}} + G_{\text{в}}) \frac{1}{2} \mp (P_{\text{м}} + G_{\text{м}}) \frac{l - l_1}{l} - T' \frac{1}{2} - N'_{\text{ос}} \frac{K_{\text{р}} D_{\text{шн}}}{2l};$$

$$R_{\text{x}} = \frac{0,03652}{2} \mp \frac{0,0961}{3,2} (3,2 - 1,2) - \frac{0,01656}{2} - 0,0195 \frac{1,73}{2 \cdot 3,2} = 0,0618.$$

Наиболее опасное сечение в середине пролета вала. Изгибающий момент в этом сечении составит

$$M_{\text{н}} = R_{\text{x}} l / 2 = 0,0618 \cdot 3,2 / 2 = 0,0989 \text{ МН} \cdot \text{м.}$$

Расчетный момент $M_{\text{р}}$ (МН · м) для опасного сечения вала

$$M_{\text{р}} = \sqrt{M_{\text{н}}^2 \mp M_{\text{кр}}^2} = \sqrt{0,0989^2 \mp 0,0848^2} = 0,1303.$$

Определим суммарное напряжение от кручения и изгиба:

$$\sigma_{\Sigma} = M_p / W = M_p \cdot 32 / \pi d^3 = 0,1303 \cdot 32 / 3,14 \cdot 0,2^3 = 165,9 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение τ_d (МПа) для стали марки 12Х1МФ найдем по соотношению

$$\tau_d = \min 0,6 \left\{ \frac{\sigma_B}{n_B}; \frac{\sigma_T}{n_T} \right\} = \min 0,6 \left\{ \frac{900}{2,5}; \frac{750}{1,5} \right\} = \min \{216; 300\},$$

где n_B и n_T — коэффициенты запаса прочности на растяжение и текучесть (см. гл. 4, п. 1). Следовательно, $\tau_d = 216$. Суммарное напряжение меньше допускаемого ($165,9 < 216$); диаметр вала выбран правильно.

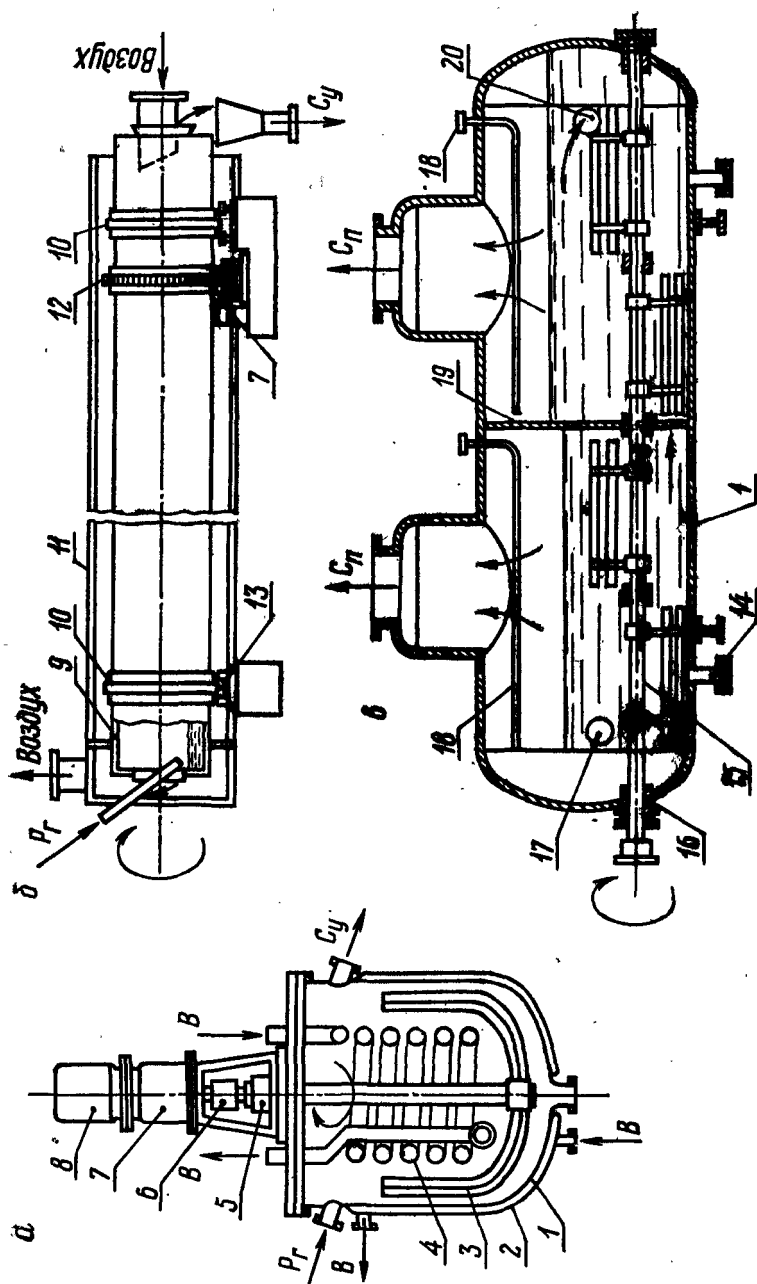
9.2. КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ

Процессы кристаллизации широко используются в основной химической технологии для выделения солей определенного химического состава из насыщенных растворов и очистки их от примесей. Разнообразие веществ, получаемых кристаллизацией из водных растворов или расплавов, значительное отличие их свойств и большая разница в требованиях к кристаллическим продуктам предопределили многочисленность конструкций кристаллизаторов [55—57].

Аппараты для изогидрической кристаллизации. К изогидрическим кристаллизаторам относят аппараты, в которых кристаллизация соли осуществляется за счет уменьшения растворимости при охлаждении, а удаление растворителя незначительно. Простейшим аппаратом такого типа является *механический кристаллизатор с мешалкой*, снабженный рубашкой или змеевиком (рис. 9.4, а).

Механическое перемешивание интенсифицирует массо- и теплообмен в аппарате, уменьшает инкрустацию теплопередающих поверхностей кристаллами, но слишком интенсивное перемешивание приводит к измельчению кристаллов. Аппараты данного типа применяют главным образом в малотоннажных производствах реактивов и технических солей. Одиночные аппараты используют в установках периодического действия, а в непрерывнодействующих системах применяют от трех до шести аппаратов, расположенных каскадно и работающих последовательно. Кристаллизаторы чаще охлаждают водой, но в ряде производств, где необходимо охлаждение до 263—283 °К (например, хлорида аммония и некоторых нитратов), растворами, обладающими низкими температурами замерзания.

Конструкции механических кристаллизаторов различны: днище аппаратов может быть плоским, эллиптическим или коническим, а мешалка якорной, лопастной или пропеллерной, число рядов змеевиков — 1—4.



Р и с. 9.4. Кристаллизаторы для изогидрической кристаллизации:

a — вертикальный с рубашкой-змеевиком; *б* — барабанный вращающийся воздушного охлаждения; *в* — горизонтальный вакуум-кристаллизатор; *1* — корпус; *2* — рубашка; *3* — якорная мешалка; *4* — змеевик; *5* — уплотнение; *6* — муфта; *7* — редуктор; *8* — электродвигатель; *9* — вращающийся барабан; *10* — бадаж; *11* — кожух; *12* — венцовая шестерня; *13* — ролик; *14* — донный штуцер; *15* — вал с лопастной мешалкой; *16* — сальник; *17* — штуцер подачи раствора; *18* — промывочное устройство; *19* — перегородка; *20* — штуцер выхода суспензии.

В некоторых производствах нашли применение шнековые кристаллизаторы, отличающиеся от винтовых конвейеров (см. рис. 7.7) наличием охлаждающей рубашки на корпусе и использованием ленточных шнеков.

Барабанные кристаллизаторы (рис. 9.4, б) с воздушным или водяным охлаждением по устройству весьма близки. Вращающийся барабан 9 бандажами 10 опирается на ролики 13 и приводится во вращение электродвигателем через редуктор 7 и венцовую шестерню 12 со скоростью 1—2 рад/с. Барабан устанавливают с небольшим наклоном (0,01—0,03 рад) к разгрузочному концу. Горячий раствор P_T подают в верхний конец барабана, а образующаяся суспензия C_y сливается в воронку. В барабанных кристаллизаторах с воздушным охлаждением над раствором пропускают воздух со скоростью до 1,5 м/с, раствор охлаждается главным образом за счет испарения воды. Чтобы уменьшить кристаллизацию соли на внутренней поверхности барабана, стремятся снизить теплотери через стенки. Для этого барабан снаружи изолируют или помещают его в обогреваемый кожух. Кроме того, внутри барабана расположена цепь (или балка из уголка), закрепленная шарнирно и предназначенная для удаления кристаллов (на рисунке не показана). При вращении барабана цепь скользит по его внутренней поверхности и сбивает слой соли.

В соответствии с ОСТ 26—01—77—78 кристаллизаторы барабанные воздушного охлаждения изготавливают диаметром 0,6, 0,8, 1,0 м с номинальным объемом ванны соответственно 0,2, 0,5, 1,20 м³. Скорость вращения барабана равна 1,43—1,87 рад/с (14—18 об/мин).

Барабанные кристаллизаторы с водяным охлаждением обладают большей производительностью, чем с воздушным, благодаря интенсивному отводу тепла, но в них образуются более мелкие кристаллы, чем в аппаратах с воздушным охлаждением. Они отличаются по способу подачи охлаждающей воды. Вращающийся барабан снабжен двойными стенками, между которыми пропускают воду. Исходный раствор подают по штуцеру с одного конца барабана и выводят суспензию C_y с другого. Высота слоя раствора в барабане обычно составляет 100—200 мм. Механизм привода барабана аналогичен описанному ранее.

В нашей стране по ОСТ 26—01—77—78 изготавливают кристаллизаторы водяного охлаждения с двойными стенками диаметром 0,6—1,6 м (отношение длины барабана к диаметру 10—12) и поверхностью охлаждения 10—80 м². Скорость вращения барабана составляет 1—2 рад/с. Для уменьшения инкрустации охлаждающей поверхности солью внутри барабана обязательно помещают шарнирно-закрепленную цепь.

Барабанные кристаллизаторы Кестнера не имеют двойных стенок. Барабан между бандажом и венцовой шестерней орошается водой, которая стекает по поверхности барабана тонкой пленкой и собирается в корыто, расположенное под барабаном. Аппарат данного типа более прост по конструкции, однако его эксплуатация осложнена выделением паров воды в цехе.

Для кристаллизации растворов высокой концентрации и расплавов применяют *вращающиеся барабанные кристаллизаторы с внутренним водяным охлаждением (вальцовые)*, которые позволяют получать твердый продукт в виде чешуек.

Вальцовые кристаллизаторы изготавливают с поверхностью охлаждения 2—16 м²; скорость вращения барабана зависит от свойств кристаллов и составляет 0,4—2,0 рад/с. Аппараты данного типа используют для кристаллизации азотнокислого кальция, едкого натра, фторида-бифторида аммония, хлорида магния и в ряде других производств. Недостатком вальцовых кристаллизаторов является загрязнение продукта примесями, содержащимися в исходном растворе.

В связи с низкой производительностью поверхностных кристаллизаторов, обусловленной зарастанием теплопередающей поверхности кристаллами, были разработаны вакуум-кристаллизаторы, которые получили широкое распространение для кристаллизации различных солей; их производительность определяется скоростью самоиспарения воды под пониженным давлением. Основное их достоинство — отсутствие теплопередающей поверхности.

Простейшим вакуум-кристаллизатором является *герметичный вертикальный аппарат с мешалкой* (см. рис. 9.4, а), которая необходима для поддержания твердой фазы во взвешенном состоянии. В периодически действующих установках используют единичные кристаллизаторы, а в системах непрерывного действия применяют по 3—6 аппаратов в каскаде.

Увеличение числа ступеней охлаждения (числа кристаллизаторов) способствует получению крупных кристаллов, поэтому нередко используются системы, включающие от 14 до 21 ступени.

Горизонтальные вакуум-кристаллизаторы, разделенные внутренними перегородками на два, три или четыре отсека (рис. 9.4, в), нашли применение для кристаллизации хлорида калия. Горизонтальное положение корпуса увеличивает поверхность испарения раствора, благодаря чему возрастает производительность кристаллизатора по испаряемой воде и, следовательно, по количеству кристаллов. Раствор или суспензия перетекает из аппарата в аппарат и из одной ступени в другую за счет разности давлений. Горизонтальная лопастная мешалка устраняет выпадение кристаллов на дно аппарата; от-

ложения соли на стенках периодически смывают горячей водой.

Аппараты данного типа изготавливают диаметром 3,0 и 3,6 м и длиной 9,0 м; мешалка вращается со скоростью 1,67 рад/с (0,267 об/с); степень заполнения корпуса раствором составляет 0,3—0,6, а напряженность парового пространства по испаряемой влаге изменяется по ступеням от 0,04 до 0,17 кг/м³·с и в среднем равна 0,06 кг/м³·с.

Вакуум-кристаллизаторы с регулируемым ростом кристаллов используют для получения крупнокристаллических продуктов. В таких аппаратах создается циркуляция раствора с тем, чтобы не возникали условия для значительного пересыщения раствора и образования новых центров кристаллизации, а свежий раствор смешивают с большим количеством суспензии, содержащей кристаллы продукта. Кристаллизаторы данного типа снабжены отстойной зоной, а иногда и классификатором, благодаря чему получают наиболее крупные кристаллы.

Предложено много конструкций аппаратов данного типа [55, 56]. Ниже дано описание вакуум-кристаллизаторов, применяемых в нашей стране. В кристаллизаторе со струйным насосом, разработанном в Советском Союзе, циркуляция раствора обеспечивается внешним центробежным насосом (рис. 9.5, а). Горячий раствор P_r подают во внешнюю циркуляционную трубу, где он смешивается с большим количеством циркулирующего раствора и насосом подается во внутреннюю циркуляционную трубу. Благодаря инъекции из конического днища в трубу подсасывается большое количество суспензии и смесь поднимается в зону вскипания, где за счет охлаждения и испарения воды раствор пересыщается и создаются условия для роста кристаллов. Суспензия по кольцевому зазору опускается в конусную часть, где кристаллы осаждаются на дно, а осветленный маточник поступает в кольцевой коллектор и через растворитель мелочи вновь возвращается в насос. Маточник M выводит из аппарата через «фонарь», а суспензию кристаллов C_y из конуса.

В вакуум-кристаллизаторе с осевым насосом нет внешней циркуляционной трубы, а выделение нужной фракции кристаллов осуществляют в классификаторе (рис. 9.5, б), куда подают маточный раствор.

Если необходимо получить крупнокристаллический продукт (например, хлорид калия, карбамид и некоторые сульфаты), то применяют кристаллизаторы с регулируемым ростом кристаллов. По удельной производительности эти аппараты значительно уступают обычным вакуум-кристаллизаторам (см. табл. 9.2).

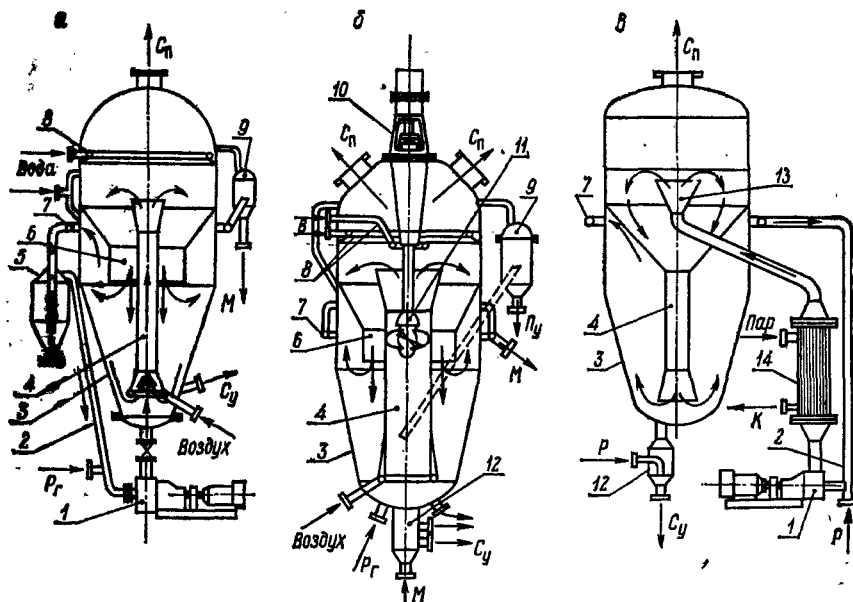


Рис. 9.5. Кристаллизаторы с регулируемым ростом кристаллов:

а — со струйным насосом; б — с осевым насосом; в — изотермический кристаллизатор с принудительной циркуляцией и выносным подогревателем:
 1 — насос; 2 — внешняя циркуляционная труба; 3 — цилиндрический корпус с коническим дном; 4 — внутренняя циркуляционная труба; 5 — растворитель мелочи; 6 — конусная перегородка; 7 — кольцевой коллектор; 8 — кольцевое промывное устройство; 9 — устройство для отвода маточника; 10 — электродвигатель с редуктором; 11 — осевой насос; 12 — классификатор; 13 — распределительный конус; 14 — выносной подогреватель.

Выпарные (изотермические) кристаллизаторы используют для кристаллизации солей, растворимость которых мало изменяется с температурой или увеличивается при понижении температуры, например хлорида натрия, сульфатов аммония, натрия и марганца. В ряде случаев в качестве кристаллизаторов применяют выпарные аппараты, чаще с принудительной циркуляцией.

Изотермический кристаллизатор типа «Кристалл» с выносной греющей камерой и принудительной циркуляцией используют для получения крупнокристаллического сульфата аммония (рис. 9.5, в). Свежий раствор (P) подают в центробежный насос, где он смешивается с большим количеством циркулирующего раствора. Смесь нагревают в выносном подогревателе на $1-2^\circ$ выше точки кипения, при этом мелкие кристаллы растворяются. В зоне кипения благодаря испарению воды раствор пересыщается и происходит частичная кристаллизация соли. Соковый пар ($C_{п}$) направляют на конденсацию. По внутренней циркуляционной трубе пересыщенный раствор поступает в сепарационную часть, где проходит через слой кри-

Табл. 9.2. Сравнительные данные для различных кристаллизаторов

Тип кристаллизатора	Кристаллизуемое вещество	Средняя величина кристаллов, мм	Удельная производительность по кристаллам, $10^3 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$	Коэффициент теплопередачи, $\text{Вт/м}^2 \times \text{град}$
Изогидрические кристаллизаторы				
Механический с рубашкой или змеевиком, охлаждение водяное	динатрийфосфат, соль мажеф, диаммонийфосфат, моноцинкфосфат	до 0,3	13,0—24,4	150—250
Барабанный с водяным охлаждением	сульфат меди		12,4—21,3	90—115
Барабанный с воздушным охлаждением	сульфат меди,		зимой 1,8—7,1, летом—1,0—3,6	6—25
	сульфат железа (II)	0,5	9,0	76
Шнековый с водяным охлаждением	тринатрийфосфат сульфаты	— 0,4—0,6	28,0—38,0 106,0—142,0	60—150 60—150
Качающиеся с воздушным охлаждением		от 3,0—5,0 до 10,0—25,0	2,8—4,2	6—12
Вакуум-кристаллизаторы				
Горизонтальный с мешалкой	хлорид калия	0,05—0,25	41,7—69,5	—
Вертикальный с мешалкой	фосфаты натрия	—	130,0—208,0	—
Вертикальный со струйным насосом	хлорид калия	0,6—1,2	6,0—10,0	—
Типа «Кристалл»	карбамид	1,0—2,0	6,0—8,0	—
Кристаллизаторы для расплавов				
Вальцовый с водяным охлаждением	нитрат аммония, фторид-бифторид аммония, хлорид магния	чешуйки » »	0,310* 0,61*	250—350 250—350 —
Шнековый с воздушным охлаждением	карбамид		330	—
Изотермические кристаллизаторы				
Циркуляционные	хлорид натрия	0,35—0,7	14,0	—
Типа «Кристалл»	сульфат аммония	1,5—3,0	5,0	—

* Удельная производительность дана в $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$.

сталлов. Осветленный маточник (M) из верхней части отстойной зоны поступает в кольцевой коллектор. Суспензию кристаллов (C_y) отбирают из конуса и отделяют нужную фракцию в классификаторе. В аппарате данного типа получают сульфат аммония с величиной частиц 1—3 мм.

Выбор типа кристаллизатора. При подборе типа кристаллизатора необходимо учитывать следующие факторы: 1) зависимость растворимости от температуры; 2) требования к величине и качеству кристаллов; 3) физико-химические свойства раствора — коррозионную активность, наличие примесей и способность к образованию пересыщенных растворов.

Вещества с обратной растворимостью (например, сульфаты натрия и аммония) бесполезно кристаллизовать в изогидрических аппаратах. Для более полного выделения этих веществ из раствора необходимо удалить растворитель и использовать изотермические (выпарные) кристаллизаторы.

Производительность выпарных кристаллизаторов зависит от скорости испарения воды и, следовательно, от коэффициента теплопередачи в подогревателе, который изменяется в широких пределах (см. табл. 9.2). Последний определяется режимом работы и ограничивается условиями роста кристаллов. При получении крупных кристаллов недопустимо большое пересыщение, и кристаллизаторы работают с низкой удельной производительностью.

Для кристаллизации солей, растворимость которых резко уменьшается с понижением температуры (например $AlK(SO_4)_2$, $Ba(NO_3)_2$, $Ba(OH)_2$, H_3BO_3 , $K_2Cr_2O_7$, фосфаты натрия), желателно применять изогидрические кристаллизаторы различных видов.

Самые крупные кристаллы можно вырастить в качающихся кристаллизаторах, однако удельная производительность и коэффициент теплопередачи их минимальны (табл. 9.2), и поэтому они непригодны для крупнотоннажных производств.

Механические вертикальные кристаллизаторы с рубашкой или змеевиком (охлаждательными) находят широкое применение в производствах различных солей — фосфатов, нитратов, хлоридов, сульфатов. Их производительность зависит от скорости отвода тепла, которая определяется в свою очередь свойствами кристаллизуемого вещества и требованиями к качеству кристаллов: резкое охлаждение (большое пересыщение) вызывает образование очень мелких кристаллов; при медленном охлаждении можно получить крупные кристаллы, но тогда уменьшается производительность аппаратов. Необходимое время пребывания и скорость охлаждения устанавливают опытным путем.

Общий недостаток всех охлаждающих кристаллизаторов (кроме валковых) — зарастание теплопередающей поверхно-

сти кристаллами, приводящее к резкому уменьшению производительности. Перемешивание суспензии и устройство специальных мешалок уменьшает инкрустацию, но не устраняет ее, поэтому необходима периодическая остановка аппарата на промывку.

В последние годы широко распространены вакуум-кристаллизаторы различных модификаций. В них возможно получение многих солей с величиной кристаллов 0,1—0,5 мм, что удовлетворяет большинство потребителей. Отсутствие теплопередающих поверхностей обеспечивает длительную работу без остановок на промывку при постоянной производительности. Если не предъявляются требований к величине кристаллов, то во многих случаях рационально использовать вакуум-кристаллизаторы, обладающие довольно высокой удельной производительностью — 0,04—0,2 кг/м³·с (см. табл. 9.2).

Специальные условия кристаллизации требуются для растворов, склонных к пересыщению. Так, пересыщенные растворы концентрацией до 15 % AlF_3 могут существовать длительное время, не кристаллизуясь. Процесс кристаллизации фторида алюминия проводят с затравкой при температуре 90—100 °С: вследствие малой равновесной растворимости (1,65 % AlF_3 при 100 °С) большая часть фторида алюминия кристаллизуется. Повышение температуры резко уменьшает продолжительность кристаллизации, однако в производственных условиях она составляет 6—8 часов.

Во многих случаях необходимо получение твердого продукта с минимальным содержанием воды, например хромового ангидрида, бихромата натрия, сульфида натрия, мочевины, бифторида аммония, нитрата кальция, аммиачной селитры, хлорида магния и др. Применение обычных механических или вакуум-кристаллизаторов в данном случае нерационально из-за высокой растворимости соединений при низких температурах или вследствие схватывания твердого вещества в монолит. Для кристаллизации таких веществ обычно применяют вальцовые или шнековые кристаллизаторы, в которых получают гранулированные продукты. Производительность данных кристаллизаторов зависит от коэффициента теплопередачи и поверхности охлаждения. В среднем коэффициент теплопередачи вальцовых кристаллизаторов выше, чем механических.

9.3. РАСЧЕТ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ

Технологический расчет кристаллизаторов, основанный на определении скорости охлаждения и общей продолжительности кристаллизации по свойствам раствора и необходимой ве-

личине кристаллов, невозможен в связи с недостаточной изученностью процессов образования и роста кристаллов. Основные показатели, определяющие геометрические размеры аппаратов — скорость охлаждения и продолжительность кристаллизации, принимают на основе опытных данных.

Величину теплообменной поверхности F (м^2) любых аппаратов поверхностного типа (механические с рубашкой или змеевиком, барабанные, вальцовые и выпарные) определяют обычным теплотехническим расчетом по количеству передаваемого тепла Q (Дж), коэффициенту теплопередачи K ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$) и разности температур теплоносителя и хладагента ($\Delta T, ^\circ$):

$$F = Q/K\Delta T.$$

Объем кристаллизаторов поверхностного типа, кроме аппаратов типа «Кристалл», в большинстве случаев принимают без расчета.

Производительность вальцового кристаллизатора G_p ($\text{кг}/\text{с}$) можно рассчитать по формуле

$$G_p = \frac{\delta F \rho_{\text{кр}}}{\tau_{\text{об}}} = \frac{\delta F \rho_{\text{кр}} \omega}{2\pi} = \frac{F \rho_{\text{кр}} \omega}{2\pi} \sqrt{\frac{2\lambda_{\text{кр}}(t_{\text{кр}} - t_c) 2\pi\varphi}{L_{\text{кр}} \rho_{\text{кр}} \omega}}, \quad (9.1)$$

где δ — толщина слоя кристаллов на поверхности вальцов, м ; F — поверхность вальцов, м^2 ; $\rho_{\text{кр}}$ — плотность кристаллов, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\tau_{\text{об}}$ — продолжительность одного оборота барабана, с ; ω — угловая скорость вращения барабана, $\text{рад}/\text{с}$; $\lambda_{\text{кр}}$ — коэффициент теплопроводности кристаллов, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$; φ — коэффициент, учитывающий продолжительность охлаждения; зависит от уровня расплава в корыте и расположения ножа, равен 0,85—0,92; $L_{\text{кр}}$ — теплота кристаллизации соли, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{моль}$; $t_{\text{кр}}$, t_c — температуры кристаллов и охлаждающей среды.

Технологический расчет вакуум-кристаллизаторов заключается в определении их объема V_a (м^3) в соответствии с расходом раствора ω ($\text{м}^3/\text{с}$) и необходимым временем пребывания $\tau_{\text{пр}}$:

$$V_a = \omega \tau_{\text{пр}} / \varphi, \quad (9.2)$$

где φ — коэффициент заполнения кристаллизатора раствором, для разных типов кристаллизаторов изменяется от 0,4 до 0,8.

Продолжительность кристаллизации $\tau_{\text{пр}}$ зависит от свойств кристаллизующего вещества и требуемой величины кристаллов, определяется опытным путем.

Диаметр вертикальных вакуум-кристаллизаторов D_v (м) рассчитывают по допустимой скорости паров v_n ($\text{м}/\text{с}$):

$$F_c = 0,785 D_v^2 = G_n / v_n = G_n \sqrt[3]{\rho_n / 4,26}; \quad (9.3)$$

$$D_B = 0,887 \left(G_{\Pi}^3 \sqrt{\rho_{\Pi}} \right)^{0,5}, \quad (9.4)$$

где F_c — площадь поперечного сечения аппарата, m^2 ; G_{Π} — расход парогазовой смеси, $кг/с$; ρ_{Π} — плотность парогазовой смеси в условиях испарения, $кг/м^3$.

Аналогичным образом определяют диаметр испарителей выпарных кристаллизаторов. Высоту парового пространства обычно принимают не менее 1 м.

Коэффициент очистки паров $K_{оч}$ от брызг раствора можно рассчитать по формуле, полученной В. Г. Пономаренко с соавторами:

$$K_{оч} = \frac{C_{\Pi}}{C_p} = 17,6 \cdot 10^6 \frac{g h_{\Pi}}{v_{\Pi}^2} \left[\frac{\sigma_p}{(h_1 + h_2) P} \right]^{0,916}, \quad (9.5)$$

где C_{Π} , C_p — концентрация солей соответственно в парах и растворе, $кг/м^3$; $g = 9,81$ $м/с^2$; h_{Π} — высота парового пространства, $м$; σ_p — поверхностное натяжение раствора, $Н/м$; P — давление над раствором, $Па$; h_1 — глубина закипания, $м$; h_2 — максимальная высота подъема парожидкостной смеси, $м$.

Расчеты кристаллизаторов на прочность. Многие виды кристаллизаторов не стандартизированы, поэтому основные элементы их конструкции подлежат расчету на прочность и устойчивость. Необходимо рассчитывать толщину обечайки, крышки, днища и рубашки, мощность привода мешалки, вал мешалки на вибростойкость, сечение элементов перемешивающего устройства, диаметр штуцеров для раствора, суспензии и пара.

Пример 9.4. Выполнить расчет основных элементов вакуум-кристаллизатора для следующих условий: рабочая температура $90^\circ C$, рабочее давление $2,63$ $кПа$, среда коррозионноактивная — растворы хлоридов калия и натрия. Материал $08X17H13M2T$, $\sigma^* = 152$ $МПа$, $E = 2,0 \cdot 10^5$ $МПа$. Диаметр обечайки D_B $5,0$ $м$, высота $5,05$ $м$, крышка полусферовая, днище коническое высотой $4,76$ $м$, диаметр отверстия в днище $1,4$ $м$. Все отверстия укреплены.

Расчет обечайки на внешнее давление. Условное расчетное давление принимаем равным $0,1$ $МПа$. Расчетная длина обечайки с учетом крышки составит

$$l_p = 5,05 + 2,5/3 = 5,88, \text{ м.}$$

Проверяем применимость формулы (4.8) по условию

$$0,052 \sqrt[6]{\frac{P}{E \cdot 10^{-6}}} \leq \frac{l}{D_B} \leq 7,68 \sqrt[6]{\frac{10^{-6} E}{P}}.$$

Принимаем толщину обечайки равной $0,016$ $м$.

Глубинный показатель коррозии (проницаемость) стали $08X17H13M2T$ равен $0,1$ $мм/год$. При сроке службы 10 лет прибавка на коррозию C составит $1,0$ $мм$. Тогда

$$0,052 \sqrt[6]{\frac{0,1}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}}} \leq \frac{5,88}{5,0} \leq 7,68 \sqrt[6]{\frac{2 \cdot 10^5 \cdot 10^{-6}}{0,1}};$$

$$0,891 < 1,176 < 8,550.$$

Условие выполняется, поэтому толщину обечайки находим по формуле (4.8):

$$S = 0,47 \cdot \frac{5,88}{100} \left(\frac{0,1}{0,2} \cdot 1,176 \right)^{0,4} \nabla 1,0 = 22,3 \nabla 1,0 = 23,3, \text{ мм.}$$

Расчетная толщина обечайки больше принятой, поэтому необходимо укрепить ее ребрами жесткости. В качестве ребер жесткости принимаем двутавр № 10. $F = 12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $I = 198 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$; $e = 0,05 \text{ м}$; $b = 0,055 \text{ м}$. Ребра жесткости устанавливаем на расстоянии 1,8 м.

Рассчитываем допускаемое наружное давление для участка обечайки между кольцами по формуле (4.9):

$$P'_{\text{н.д}} = 6,49 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{5000}{1800} \left[\frac{100(16-1)}{5000} \right]^2 \sqrt{\frac{100(16-1)}{5000}} = 0,158, \text{ МПа}$$

Проверяем условие применимости формул для обечайек, укрепленных ребрами жесткости, по ГОСТ 14249-73:

$$0,5 \leq \frac{L}{D_B} < 7,68 \sqrt{\frac{D_B}{100K(S-C)}};$$

$$K^2 = \frac{l_{\text{эф}}}{l} + \frac{10,92}{l(S-C)^2} \left[I + e^2 \frac{Fl_{\text{эф}}(S-C)}{F + l_{\text{эф}}(S-C)} \right];$$

$$l_{\text{эф}} = l - \frac{I}{I + \frac{l(S-C)^3}{36}} \left[l - b - 1,1 \sqrt{D_B(S-C)} \right];$$

$$l_{\text{эф}} = 1,8 - \frac{198 \cdot 10^{-8}}{198 \cdot 10^{-8} + \frac{1,8(0,016 - 0,001)^3}{36}} \left[1,8 - 0,055 - \right. \\ \left. - 1,1 \sqrt{5,0(0,016 - 0,001)} \right] = 0,468, \text{ м};$$

$$K^2 = \frac{0,468}{1,8} + \frac{10,92}{1,8(0,016 - 0,001)^2} \left[198 \cdot 10^{-8} + \right. \\ \left. \nabla 0,05^2 \frac{12 \cdot 10^{-4} \cdot 0,468(0,016 - 0,001)}{12 \cdot 10^{-4} \nabla 0,468(0,016 - 0,001)} \right];$$

$$K^2 = 8,423; K = 2,91; \sqrt{K} = 1,71.$$

Проверяем условие применимости формулы (11) из ГОСТ 14249-73:

$$0,5 \leq \frac{5,88}{5,0} < 7,68 \sqrt{\frac{5,0}{100 \cdot 2,91 \cdot 0,015}}.$$

Условие выполняется, так как $0,5 < 1,176 < 8,225$.

Рассчитаем $P'_{\text{н.д}}$ для обечайки в целом по уравнению (11):

$$P''_{\text{н.д}} = 6,49 \cdot 10^{-6} \cdot 1,91 \cdot 10^5 \frac{2,91 \cdot 1,71 \cdot 5,0}{5,88} \left[\frac{100 \cdot 0,015}{5,0} \right]^2 \times \\ \times \sqrt{\frac{100 \cdot 0,015}{5,0}} = 0,258, \text{ МПа.}$$

Допускаемое наружное давление больше фактического ($0,258 > 0,1$), следовательно, кольца выбраны с запасом.

Проверяем второе условие применимости формулы (11) по ГОСТ 14249—73:

$$\frac{1,3PD_B l}{F + (S - C)l} \leq \sigma_T = \frac{1,3 \cdot 0,1 \cdot 5,0 \cdot 1,8}{12 \cdot 10^{-4} + 0,015 \cdot 1,8} \leq 201.$$

Условие выполняется, так как $41,489 < 201$. Предел текучести σ_T принят по материалу колец ВстЗкп равным 201 МПа.

Полушаровая крышка радиусом $R = 2,5$ м работает под действием наружного давления $P_n = 0,1$ МПа и осевой силы, обусловленной массой крышки 4530 кг и массой трубопроводов 2470 кг, опирающихся на крышку. Суммарное осевое усилие $N = 70$ кН.

Условие устойчивости крышки при отсутствии изгибающего момента

$$\frac{N}{N_d} + \frac{P_n}{P_{нд}} \leq 1. \quad (4.9)$$

Принимаем толщину крышки равной 10 мм, в том числе прибавка на коррозию — 1 мм.

Допускаемая осевая сжимающая сила

$$N_d = \pi D_B (S - C) \varphi_c \sigma^* \quad (4.10)$$

при

$$\frac{D_B}{2(S - C)} > 0,18 \frac{E}{\sigma_T}; \quad \varphi_c = \frac{0,75 K_c}{\frac{\sigma_T}{E} \cdot 2(S - C)}; \quad (4.11)$$

$$\frac{5,0}{2 \cdot 0,009} = 277 > 0,18 \frac{2 \cdot 10^5}{195} = 184,6; \quad K_c = 0,14 \quad (\text{см. табл. 4.6});$$

$$\varphi_c = \frac{0,75 \cdot 0,14}{195 \cdot \frac{5,0}{2 \cdot 10^5}} = \frac{0,75 \cdot 0,14}{0,2697} = 0,389;$$

$$N_d = 3,14 \cdot 5,0 \cdot 0,009 \cdot 0,389 \cdot 152 = 8,47, \text{ МН.}$$

Определяем допускаемое наружное давление по формулам (2.91) из ГОСТ 14 249 — 73:

$$P'_{н.д} = 9 \cdot 10^{-6} E \left[\frac{(S - C) \cdot 100}{K_3 R} \right]^2;$$

$$P''_{н.д} = \frac{2\sigma_d (S_1 - C)}{\beta R}, \quad \text{где } \beta = 1 + \sigma K_3^2 \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{R}{S - C}.$$

Для полушаровой крышки $K_3 = 1$ и $R = 2,5$ м, тогда

$$P'_{н.д} = 9 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \left[\frac{0,009 \cdot 100}{2,5} \right]^2 = 0,232, \text{ МПа};$$

$$P''_{н.д} = 0,357 \text{ МПа,}$$

поэтому за допускаемое давление принимаем меньшее значение.

Проверяем условие устойчивости крышки по формуле (4.18):

$$\frac{0,07}{8,47} + \frac{0,1}{0,232} = 0,439.$$

Крышка устойчива, так как $0,439 < 1$.

Конический переход от диаметра 5,0 м к диаметру 1,4 м работает при внешнем давлении $P_H = 0,1$ м. В целях уменьшения расхода легированной стали принимаем толщину конического перехода равной толщине цилиндрической обечайки, а переход усиливаем кольцами жесткости из стали ВСтЗпс таврового сечения, площадь $F = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, момент инерции

$$I = 180 \text{ см}^4 = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4, \quad b = 0,01, \quad e = 0,0788 \text{ м}.$$

Расчет ведем по допускаемому давлению $P_{H.д.}$, как и для коротких цилиндрических обечаек.

Расчетный диаметр

$$D'_p = \frac{0,9D_1 + 0,1D_0}{\cos \alpha}.$$

Расчет выполним для I участка конического перехода высотой 1,36 м и диаметром в узкой части 3,95 м. Расчетный диаметр ее равен

$$D'_p = \frac{0,9 \cdot 5,0 + 0,1 \cdot 3,95}{0,937} = 5,23, \text{ м}.$$

Для I участка конической обечайки между торoidalным переходом и кольцом жесткости допускаемое давление находим по следующим формулам из ГОСТ 14 249 — 73:

$$\xi_1 = 1,5 \frac{E}{\sigma_T} + 1,53 \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{D_B}{S - C} \left(\frac{L}{S - C} \right)^2;$$

$$P_{H.д.} = \frac{2E(S - C)}{D_B \xi_1};$$

$$\xi_1 = 1,5 \frac{1,91 \cdot 10^5}{201} + 1,53 \frac{201}{1,91 \cdot 10^5} \cdot \frac{5,23}{0,009} \left(\frac{1,36}{0,009} \right)^2 = 3,592 \cdot 10^3;$$

$$P_{H.д.} = \frac{2 \cdot 1,91 \cdot 10^5 \cdot 0,009}{5,23 \cdot 3,592 \cdot 10^3} = 0,183, \text{ МПа, где } D_B = D_p.$$

Участок обечайки устойчив, так как $0,183 > 0,1$.

Выполним проверочный расчет для конической обечайки в целом по формулам (11) из ГОСТ 14 249 — 73 для цилиндрических обечаек:

$$l_{\text{эф}} = l - \frac{I}{I + \frac{l(S - C)^3}{36}} \left[l - b - 1,1 \sqrt{D_B(S - C)} \right];$$

$$l_{\text{эф}} = 1,36 - \frac{1,8 \cdot 10^{-6}}{1,8 \cdot 10^{-6} + \frac{1,36 \cdot 0,009^3}{36}} \left[1,36 - 0,01 - 1,1 \sqrt{5,23 \cdot 0,009} \right] = 0,27 \text{ м};$$

$$K^2 = \frac{l_{\text{эф}}}{l} + \frac{10,92}{l(S - C)^3} \left[I + l^2 \frac{Fl_{\text{эф}}(S - C)}{F + l_{\text{эф}}(S - C)} \right];$$

$$K^2 = \frac{0,27}{1,36} + \frac{10,92}{1,36 \cdot 0,009^3} \left[1,8 \cdot 10^{-6} + \right.$$

$$\left[0,0788^2 \frac{1,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,27 \cdot 0,009}{1,9 \cdot 10^{-3} + 0,27 \cdot 0,009} \right] = 92,8;$$

$$K = 9,64; \sqrt{K} = 3,11; K \sqrt{K} = 30.$$

Допускаемое давление определяем по формуле

$$P'_{н.д} = 6,49 \cdot 10^{-6} E \frac{K \sqrt{K} D_B}{L} \left[\frac{100(S-C)}{D_B} \right]^2 \sqrt{\frac{100(S-C)}{D_B}}.$$

Для конической обечайки в целом $D_B = D_p = 4,95$ м; $L = 4,76$ м.

$$P'_{н.д} = 6,49 \cdot 10^{-6} \cdot 1,91 \cdot 10^5 \cdot \frac{30 \cdot 4,95}{4,76} \left[\frac{0,9}{4,95} \right]^2 \sqrt{\frac{0,9}{4,95}} = 0,55 \text{ МПа.}$$

Коническая обечайка устойчива, так как $0,55 > 0,1$.

Часть III. СПЕЦИАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Глава 10. АППАРАТУРА ДЛЯ СИНТЕЗА АММИАКА И КАРБАМИДА

Аммиак и карбамид получают при высоких давлениях (14—60 МПа), что определяет конструкцию корпуса реактора и затвора, которые должны противостоять действию внутреннего давления (см. гл. 5). Устройство насадки зависит от агрегатного состояния реагирующих веществ и технологического режима процесса. Так, синтез аммиака осуществляют на железном катализаторе при температурах 400—550 °С в реакторах с фильтрующим слоем, снабженных внутренним или выносным теплообменником. Карбамид синтезируют в жидкой фазе без участия катализаторов, причем необходимая температура достигается за счет тепла реакции. В данном случае используют реакторы объемного типа без теплообменников.

10.1. АППАРАТУРА ДЛЯ СИНТЕЗА АММИАКА

В настоящее время в азотной промышленности используется более десяти типов колонн, отличающихся устройством насадки. Разнообразие конструкций насадок обусловлено стремлением конструкторов создать колонну, в наибольшей мере удовлетворяющую предъявляемым к ней требованиям. Конструкция колонны должна обеспечивать:

- 1) максимальную производительность аппарата за счет создания оптимального температурного режима в катализаторной коробке и рационального использования внутреннего объема колонны, обеспечивающего размещение наибольшего количества катализатора; автотермичность работы колонны и стабильность температурного режима;
- 2) надежность работы насадки в течение длительного времени, что обеспечивается рациональной конструкцией ее узлов и правильным выбором материалов;
- 3) удобство и простоту монтажа насадки (т. е. соединения отдельных ее частей), загрузки катализатора и установки насадки в корпус колонны.

Основное назначение насадки в колонне синтеза — получение аммиака.

Существующие насадки можно разделить на трубчатые, полочные и радиальные.

Трубчатые насадки снабжаются простыми или двойными теплообменными трубками, расположенными в слое катализатора. По трубкам газ движется параллельно или противотоком к направлению движения газа в слое катализатора. Насадки данного типа имеют один или два байпаса для регулировки температурного режима. Теплообменные трубки позволяют поддерживать температуру в слое катализатора в оптимальных пределах, но в то же время они усложняют конструкцию насадки, загрузку и выгрузку катализатора и уменьшают количество загружаемого катализатора [17, 58].

Трубчатая насадка (рис. 10.1, а) снабжена двойными противоточными трубками (трубками Фильда). Благодаря относительной простоте конструкции и надежности этот тип насадки получил широкое распространение.

Основной поток газа — азотоводородная смесь (АВС) — вводится через центральное отверстие крышки. Через это же отверстие подводится электрический ток к пусковому подогревателю 9 по стержню 8. Газ, обтекая насадку по кольцевому зазору между корпусом и насадкой, поступает в межтрубное пространство теплообменника 3.

Температуру газа на входе в слой катализатора регулируют подачей части холодной АВС по байпасу 12, минуя теплообменник. Катализаторная коробка центральной трубой 10 опирается на теплообменник. Обечайки катализаторной коробки и теплообменника соединены линзовым или дисковым компенсатором 4.

В трубчатых насадках основной поток холодной АВС проходит в пространстве между корпусом 2 и обечайкой катализаторной коробки. Катализаторная коробка покрыта слоем изоляции 7, благодаря чему температура корпуса колонны не превышает 80 °С. Нагрузку насадки воспринимает опорная труба 11; труба 10 соединена с теплообменником безболтовым шарниром, в котором сочленены две притертые сферические поверхности, уплотняемые под действием массы катализаторной коробки. Реакция синтеза аммиака сопровождается значительным выделением тепла (44,5 кДж/моль или 2617,6 кДж/кг). При полном использовании этого тепла можно получить около 1 т водяного пара на тонну аммиака.

Известно несколько конструкций колонн, насадка которых снабжена внутренними котлами-утилизаторами змеевикового или трубчатого типа. Котлы-утилизаторы располагаются на выходе из катализаторной коробки (по ходу газа) между катализаторной коробкой и теплообменником, между слоями катализатора или вне колонны. Например, в *полочной колонне* (рис. 10.1, б) между слоями катализатора размещены па-

кеты 14 змеевикового котла-утилизатора, а последний по ходу газа IV слой 16 снабжен простыми противоточными трубками. В данном случае котел служит не только для использования тепла реакции, но и позволяет регулировать температурный режим насадки.

Свежая азотоводородная смесь подается через отверстие в днище 1 корпуса колонны 2 и попадает в трубки теплообменника 3, где подогревается газом, выходящим из колонны, затем проходит противоточные трубки 13, расположенные в слое катализатора 16. Далее она поступает в кольцевой зазор между корпусом колонны и обечайкой насадки. В отличие от колонн других типов в данной конструкции насадку обтекает горячий газ с температурой 420—480 °С, поэтому катализаторная коробка не изолирована, а корпус колонны и крышка внутри защищены слоем изоляции от действия высоких температур. Три слоя катализатора насадки не имеют теплообменных устройств и работают в адиабатическом режиме — температура газовой смеси увеличивается по мере образования аммиака за счет тепла реакции.

Газ после первого слоя катализатора обтекает пакеты котла-утилизатора и охлаждается с 520 до 440 °С. Вода в секции котла-утилизатора подводится и выводится по стоякам 15, которые проходят через крышку колонны. Регулируя расход воды, можно изменять температуру газа, поступающего на второй слой катализатора. Аналогичные секции котла-утилизатора размещены после второго и третьего слоев катализатора. Насадка указанной конструкции позволяет регулировать температурный режим в колонне и получать до 0,8 т пара на 1 т аммиака. Недостаток ее — сложность монтажа из-за большого количества коммуникаций и вследствие этого длительные остановки для ремонта и смены катализатора.

Уплотнение между корпусом и крышкой колонны достигается за счет использования затворов с пластической деформацией: типа ГИАП (см. рис. 5.4) или самоуплотняющегося двухконусного (см. рис. 5.5).

Обечайка катализаторной коробки полочной колонны работает при температуре 400—560 °С и внешнем давлении, так как из-за значительного сопротивления прохождению газа давление на выходе из колонны на 0,5—3,0 МПа ниже, чем на входе. Как правило, все детали катализаторной коробки и теплообменника изготавливают из легированных сталей типа Х18Н10Т.

В теплообменных устройствах обычно используют трубки диаметром 12—38 мм и длиной 3—8 м. Наиболее нагруженной деталью насадки является центральная труба, которая воспринимает значительную осевую нагрузку, обусловленную массой теплообменника и катализаторной коробки.

Штуцера для газов присоединяются к крышке, днищу или

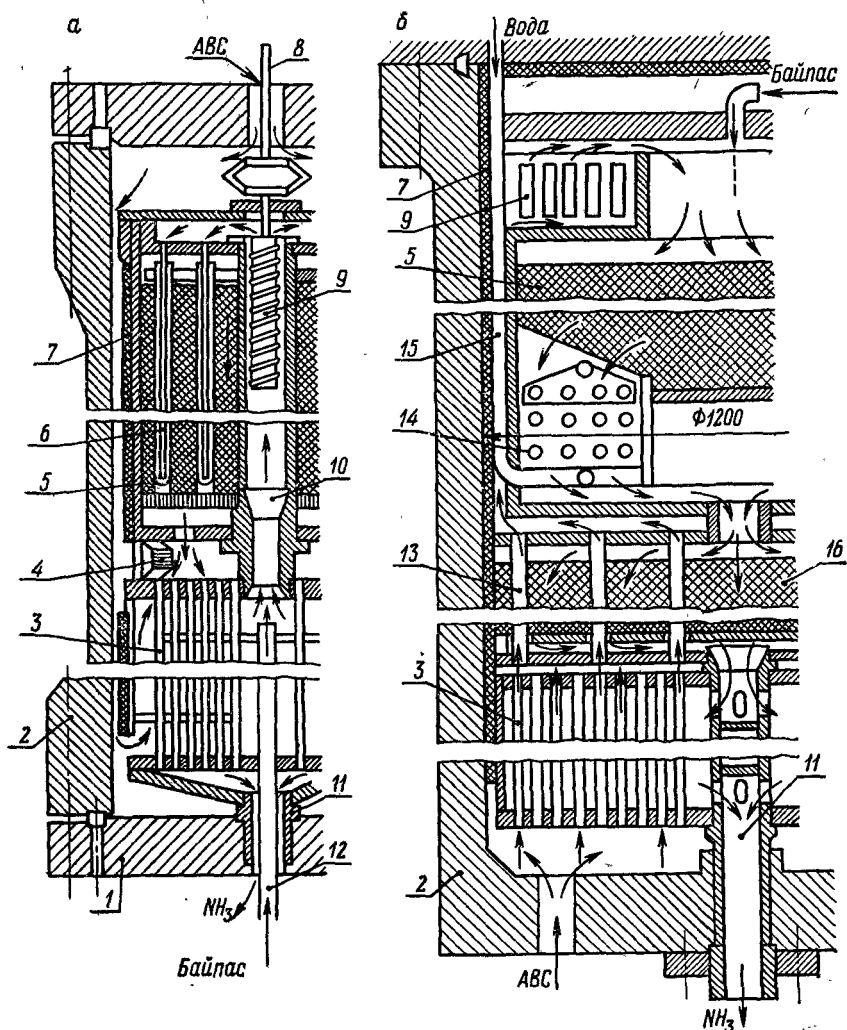


Рис. 10.1. Колонны синтеза аммиака:

а — с двойными теплообменными трубками; б — полочная с котлом-утилизатором; 1 — днище; 2 — корпус; 3 — теплообменник; 4 — компенсатор; 5 — катализатор; 6 — трубка Финлянда; 7 — изоляция; 8 — электроввод; 9 — электроподогреватель; 10 — центральная труба; 11 — опорная труба; 12 — байпас; 13 — противоточные трубки; 14 — пакеты труб котла; 15 — стоек; 16 — слой катализатора.

корпусу колонны шпильками и уплотняются линзами (см. рис. 5.7), а штуцера малого диаметра для термопар или подачи воды могут уплотняться плоской пластичной прокладкой.

Намного проще устройство полочной колонны без теплообменников (между слоями катализатора и выносным котлом-

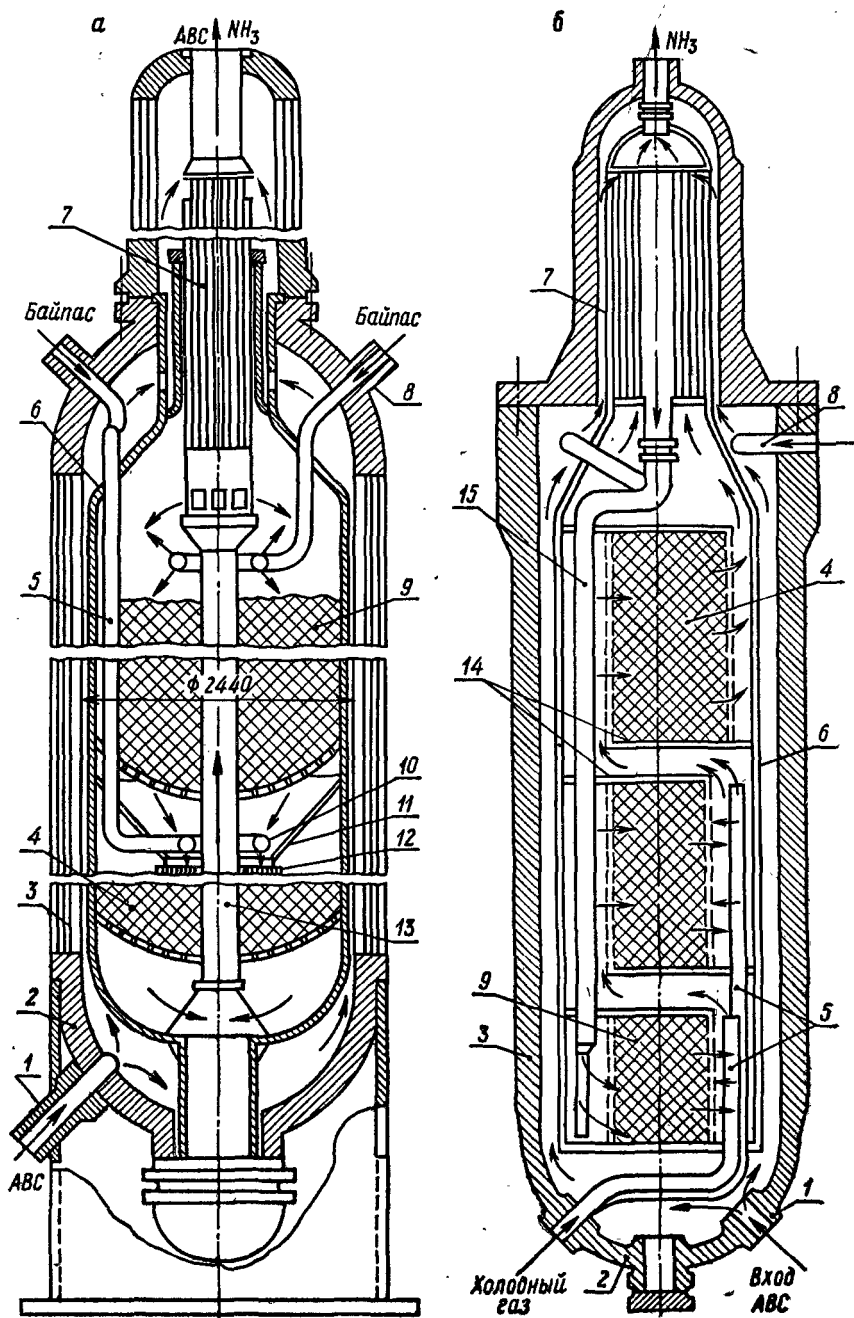


Рис. 10.2. Колонны синтеза аммиака большой производительности:
 а — вертикальная; б — горизонтальная.

утилизатором (рис. 10.2, а). Температурный режим в ней регулируется за счет подачи холодного газа по байпасам перед каждым слоем катализатора.

АВС вводится в колонну по патрубку 1, расположенному в полушаровом днище 2, проходит по кольцевому зазору между корпусом колонны 3 и обечайкой катализаторной коробки 6. Далее она поступает в межтрубное пространство теплообменника 7. Температуру АВС перед первым слоем катализатора 9 регулируют подачей холодного газа по байпасу 8. После первого слоя газ выходит с температурой 520 °С и охлаждается до 450 °С за счет смешения с холодной АВС, поступающей по байпасу 5. Аналогичным образом регулируют температуру газа при входе на третий и четвертый слои.

После прохождения четвертого слоя катализатора 4 газ по центральной трубе 13 входит в трубки теплообменника и с температурой 330 °С выходит из колонны в наружный котел-утилизатор.

Большой объем катализатора (36—43 м³) обеспечивает высокую производительность колонны — 1360 т аммиака в сутки.

Температурный режим в полочных колоннах значительно отличается от оптимального, так как каждый слой работает без отвода тепла. Однако высокая степень заполнения колонны катализатором компенсирует недостатки температурного режима, поэтому колонны данного типа получили широкое распространение.

Корпуса аппаратов высокого давления диаметром более 1 м изготавливают рулонированными, а днища и крышки — цельнокованными. Корпус полочной колонны большой мощности работает при повышенной температуре (до 250 °С); для уменьшения потерь тепла он снаружи изолирован слоем шлаковаты толщиной 90—120 мм. Основной вход газа 1 и байпасы 5, 8 присоединяются к корпусу на сварке. Катализаторная коробка неразъемная, при ремонте из колонны извлекают только теплообменник. Обечайка катализаторной коробки работает под наружным давлением, так как разность давлений на входе в колонну (в кольцевом зазоре) и на выходе из теплообменника достигает 1,2 МПа, и под растягивающим усилием от массы катализатора. Центральная труба 13 не только служит для отвода газа, но и является конструктивным элементом, увеличивающим жесткость и устойчивость обечайки. Снаружи обечайка катализаторной коробки усилена продольными ребрами.

Для уплотнения стыка между горловиной корпуса колонны и корпусом теплообменника применяют затворы с упругой деформацией, чаще затвор с восьмигранной прокладкой.

Перед каждым слоем катализатора расположено устройство для смешения основного потока газа с холодным байпас-

ным, состоящее из кольцевого коллектора 10, на поверхности которого расположено 180 отверстий диаметром 9,5 мм, конуса 11 с отверстием для прохода газа диаметром 1200 мм и распределительной плиты 12 диаметром 1475 мм, на которой размещены отверстия диаметром 16 мм с шагом 32 мм.

Горизонтальная колонна фирмы Келлог (рис. 10.2, б) обладает следующими достоинствами: ремонт колонны можно выполнять без использования кранов большой грузоподъемности, облегчена смена катализатора, так как насадка полностью выкатывается из неподвижного корпуса в сторону теплообменника, для чего на насадке предусмотрены ролики.

АВС входит по штуцеру 1, приваренному к днищу 2, проходит в кольцевой зазор между корпусом 3 и обечайкой катализаторной коробки 6 и нагревается в теплообменнике 7. Затем по трубе 15 она поступает на первый слой катализатора 9. Температуру АВС перед первым слоем регулируют подачей холодного газа по байпасу 8. Температуру газов перед вторым и третьим слоями катализатора регулируют подачей холодной АВС по байпасам 5. Газ после выхода из последнего слоя катализатора 4 поступает в трубки теплообменника 7 и выводится из колонны.

Газы проходят через катализатор сверху вниз, перпендикулярно оси колонны и направляются перегородками 14 в верхнюю часть следующего слоя. Равномерное распределение газа обеспечивают два перфорированных листа, отверстия в которых не совпадают. В данной колонне высота слоя катализатора меньше, чем в вертикальной колонне, что позволяет использовать более мелкий катализатор и повысить производительность колонны при сохранении гидравлического сопротивления.

Значительный интерес представляют реакторы с радиальным ходом газа, для которых характерно уменьшение перепада давления в колонне, высоты и массы реактора, количества необходимого катализатора благодаря использованию мелкозернистого катализатора с величиной частиц 2—4 мм. Например, обычная колонна с аксиальным (осевым) движением газа и колонна с радиальным потоком газа производительностью 1360 т NH_3 в сутки и диаметром 2,4 м при объемной скорости 25 000 ч^{-1} имеют следующие показатели:

Колонны	Перепад давления, МПа		Расход энергии на циркуляцию, кВтч/т NH_3	Объем катализатора, м ³	Высота реактора, м	Масса реактора, т
	общий	в катализаторной коробке				
Аксиальная	3,0	1,2	100	40	20	700
Радиальная	1,82	0,02	60	30	16,5	580

Из этих данных следует, что использование радиальной колонны позволяет снизить расход энергии и использовать колонну синтеза меньшего размера. В то же время в радиальных колоннах трудно компенсировать усадку катализатора, необходимо предусматривать устройства для равномерного распределения газа по слою катализатора, сложно отводить тепло реакции от катализатора. Для устранения указанных недостатков предложены другие конструкции колонн с радиальным движением газа.

Первый радиальный реактор для синтеза аммиака, предложенный П. А. Гинзбургом, был изготовлен и испытан на Новомосковском АТЗ в 1939 г., а промышленный реактор эксплуатировался на Чирчикском заводе. В настоящее время в мире работает 30 реакторов радиального типа, мощность которых составляет 150—1360 т NH_3 в сутки. Конструкции колонны данного типа разрабатываются в ряде стран. Так, промышленные реакторы радиального типа выпускают ЧССР, Дания (фирма Топсе) и другие страны.

Двухслойный радиальный реактор (рис. 10.3) снабжен встроенным теплообменником и двумя байпасами для регулирования температурного режима, каждый слой катализатора работает в адиабатическом режиме.

Основной поток АВС вводят по штуцеру 12. АВС обтекает катализаторную коробку и по зазору между корпусом 3 и обечайкой катализаторной коробки 5 поступает в межтрубное пространство теплообменника 4. Подогретая АВС по трубе 6 поступает в центральную часть первого слоя катализатора 10. Температуру после теплообменника регулируют подачей АВС по байпасу 1. Катализатор загружен между перфорированными обечайками 7 и 8. Цилиндрическая перегородка 9 снабжена соплами для равномерного распределения газа по высоте слоя. Слои катализатора разделены перегородкой 13, устраняющей осевое движение газа. Для охлаждения газа после первого слоя катализатора по байпасу 11 подают АВС, которая поступает в кольцевой зазор между обечайкой 5 и распределительной перегородкой 9. Во втором слое катализатора 14 газы движутся от периферии к центру и далее горячий газ поступает в трубки теплообменника. Охлажденная смесь, содержащая 16,2% NH_3 , выводится из колонны по штуцеру 15. В данной колонне нагрузку насадки воспринимает опорная труба 2.

В патентной литературе описано несколько конструкций реакторов смешанного типа, в которых первый или первый и второй слои работают при аксиальном движении газа, а последующие — при радиальном. Опыт эксплуатации радиальных колонн свидетельствует о том, что в этих реакторах производительность на 10—30% выше, а сопротивление проходу

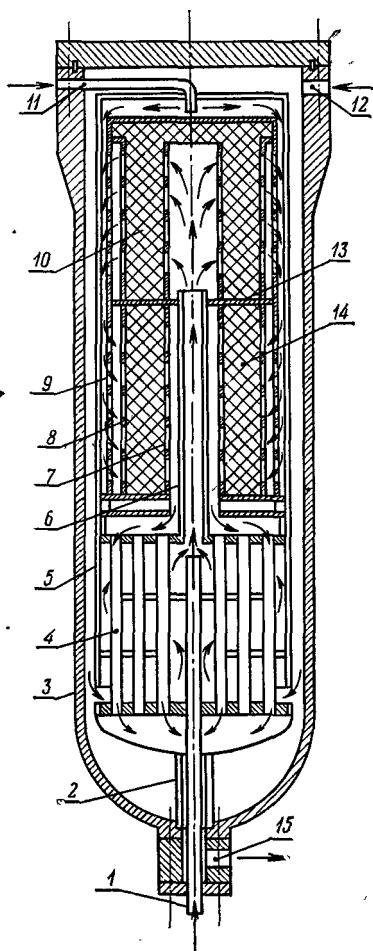


Рис. 10.3. Радиальная колонна синтеза аммиака.

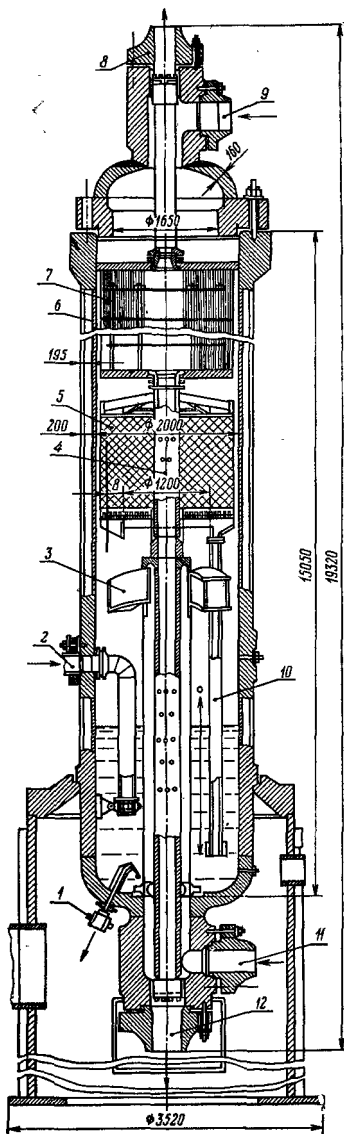


Рис. 10.4. Колонна конденсации.

газа ниже, расход энергии на циркуляцию снижается примерно на 30—50 % по сравнению с аксиальными колоннами.

Колонна конденсации (рис. 10.4) предназначена для сжижения и выделения аммиака из газа, прошедшего колонну синтеза. Смесь аммиака и непрореагировавших газов входит в колонну 6 через верхний штуцер 8 и поступает в межтрубное

пространство теплообменника 7, где охлаждается с 20—40° до 10—29°С газами, выходящими из нижней части колонны. По центральной трубе 4 и штуцеру 12 газовая смесь выходит из колонны в аммиачный холодильник, где охлаждается до 5—10°С для повышения степени конденсации аммиака. Охлажденная смесь газов и жидкого аммиака вводится в колонну через штуцер 11 и по кольцевому пространству между трубами поступает в тангенциальное сопло 3. Вращение потока газа улучшает выделение капель аммиака. Жидкий аммиак собирается в нижней части колонны и выводится по штуцеру 1. Для дополнительной очистки от капель аммиака газ пропускают через насадку 5, жидкий аммиак стекает по трубе 10.

По штуцеру 2 в колонну вводят свежую азотоводородную смесь, которая барботирует через слой жидкого аммиака для дополнительной очистки от паров воды и углекислого газа. Газовая смесь, содержащая до 3,8% аммиака, проходит трубки теплообменника и с температурой 35°С через штуцер 9 направляется в колонну синтеза.

Пример 10.1. Рассчитать толщину рулонированного корпуса колонны синтеза аммиака (см. рис. 10.2) диаметром D_B 2,4 м, внутренняя гильза которого выполнена из двухслойной стали 20К и 12Х18Н10Т толщиной $S_{цо}$ 15 мм, а спиральные слои из стали 30ХМА. Предельная рабочая температура корпуса 250°С, давление 32 МПа (320 кгс/см²). По ГОСТ 11879—66 расчетное давление равно 320 ат (32 МПа), а температура II ступени 300°С.

Определим допускаемое натяжение для спиральных слоев:

$$\sigma_d^c = \min \left\{ \frac{\sigma_B}{n_B}; \frac{\sigma_T}{n_T} \right\} = \left\{ \frac{600}{2,6}; \frac{400}{1,5} \right\} = \{230; 266,6\} = 230, \text{ МПа.}$$

Рассчитаем толщину спиральных слоев S_c (м), допуская, что корпус выполнен из стали 30ХМА без учета толщины центральной обечайки. Расчетный диаметр аппарата

$$D_p = D_B + 2S_{цо} = 2,4 + 2 \cdot 0,015 = 2,43 \text{ м.}$$

Коэффициент толстостенности

$$\ln \beta = \frac{P}{\sigma_d^c \varphi} = \frac{32}{230 \cdot 1} = 0,1391; \beta = 1,149.$$

Толщину спиральных слоев находим по формуле

$$S = 0,5D_p (\beta - 1) = 0,5 \cdot 2,43 (1,149 - 1) = 0,181 \text{ м.}$$

Определяем допускаемое напряжение для рулонированного корпуса:

$$\sigma_d^p = 0,9 \frac{\sigma_d^c S_c + \sigma_d^{цо} S_{цо}}{S_c + S_{цо}} = 0,9 \frac{230 \cdot 0,181 + 119 \cdot 0,015}{0,181 + 0,015} = 199,3 \text{ МПа.}$$

Коэффициент толстостенности

$$\ln \beta' = P / \sigma_d^p \varphi = 32 / 199,3 \cdot 1 = 0,1606; \beta' = 1,174.$$

Общая толщина обечайки

$$S = 0,5D_B (\beta' - 1) + S_{\text{цо}} + S_T = 0,5 \cdot 2,4 (1,174 - 1) + 0,015 + 0,01 = 0,22 \text{ м,}$$

где S_T — прибавка по технологическим причинам, равная 0,01 м.

Пример 10.2. Проверить толщину полушарового днища S_1 колонны в условиях предыдущего примера. Материал днища — сталь 20Х2МА, $\sigma_d = 173$ МПа.

Расчет днища выполняем по формулам (5.7). Исполнительная толщина днища 180 мм, прибавки по технологическим причинам 10 мм. В днище отверстия диаметром 500 мм.

Находим условие применимости формулы для расчета K_0 :

$$\frac{d_i}{\sqrt{D_B (S_1 - C)}} = \frac{0,5}{\sqrt{2,4 (0,18 - 0,01)}} = \frac{0,5}{0,639} = 0,783.$$

Коэффициент ослабления днища отверстиями

$$K_0 = \frac{2}{1,5 + 1,25d_i / \sqrt{D_B (S_1 - C)}} = \\ = \frac{2}{1,5 + 1,25 \cdot 0,5 / 0,639} = \frac{2}{2,479} = 0,807.$$

Толщина днища

$$S_1 = \frac{32 \cdot 2,4}{4 \cdot 0,807 \cdot 173 - 32} \cdot \frac{2,4}{1,2 \cdot 2} + 0,01 = 0,146 + 0,01 = 0,156 \text{ м.}$$

Расчетная толщина днища меньше фактической.

Пример 10.3. Рассчитать шпильки фланцевого соединения корпуса теплообменника с корпусом колонны по следующим данным: расчетное давление P 32 МПа, расчетная температура 300 °С, внутренний диаметр горловины и корпуса теплообменника 1000 мм (см. рис. 10.2, а), прокладка восьмиугольного сечения шириной b 32 мм из стали 20Х2МА, средний диаметр прокладки $D_{\text{ср.п}}$ 1160 мм. Количество шпилек z — 20 шт., материал шпилек 35Х.

Равнодействующая внутреннего давления

$$Q_d = 0,785PD_{\text{ср.п}}^2 = 0,785 \cdot 32 \cdot 1,16^2 = 33,63 \text{ МН.}$$

Реакцию прокладки определим по формуле

$$R_n = \pi D_{\text{ср.п}} m b_0 P^2 = 3,14 \cdot 1,16 \cdot 6 \cdot 0,004 \cdot 32 \cdot 2 = 5,58 \text{ МН,}$$

где $b_0 = b/8 = 32/8 = 4$ мм, а $m = 6$ (см. табл. 4.8).

Усилие в шпильках при уплотнении затвора при $q = 150$ МПа (см. табл. 4.8)

$$R'_n = \pi D_{\text{ср.п}} b_0 q = 3,14 \cdot 1,16 \cdot 0,004 \cdot 150 = 2,18 \text{ МН.}$$

Таким образом, усилие 5,58 МН обеспечивает герметичность затвора.

Общая нагрузка на шпильки в работающем аппарате

$$Q = Q_d + R_n = 33,63 + 5,58 = 39,21 \text{ МН.}$$

Допускаемое напряжение материала шпилек стали 35Х по пределу текучести при 300 °С $\sigma_d = 220$ МПа. Диаметр шпилек $d_{\text{ш}}$ рассчитываем по формуле (5.13), принимая диаметр отверстия в шпильке $d_o = 18$ мм:

$$d_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{1,27 \cdot 1,2 \cdot 3,291}{220 \cdot 20}} + 0,018^2 = \sqrt{0,013914} = 0,118 \text{ м.}$$

Принимаем шпильки с резьбой М 130×6, диаметр шейки шпильки 118 мм.

10.2. АППАРАТУРА СИНТЕЗА КАРБАМИДА

Синтез карбамида осуществляется при температуре 170—200 °С и давлении 14,0—21,0 МПа, однако в некоторых системах используются и более высокие давления (28,8—30,0 МПа). Необходимая температура процесса достигается за счет тепла реакции, поэтому нет необходимости в теплообменных устройствах.

Колонна (рис. 10.5) работает как аппарат идеального вытеснения. Цилиндрический корпус колонны 4, полушаровое днище 2 и крышка 5 защищены изнутри слоем коррозионно-устойчивой высоколегированной стали 3 марки 08X18H12M3T или 06X23H28M3Д3T толщиной 6 мм. Внутри колонна снабжена несколькими перегородками, которые необходимы для лучшего перемешивания реагентов и устранения циркуляции реакционной смеси (на рисунке не показаны). Смещение аммиака, углекислого газа и раствора углеаммонийных солей осуществляется в выносном смесителе, здесь же практически завершается первая стадия процесса — образование карбамата аммония. Реакционная смесь поступает в колонну по самоуплотняющемуся штуцеру 1. Дегидратация карбамата аммония и образование карбамида происходит в колонне, плав из которой выводится по патрубку 6.

Для контроля сохранности футеровки на внутренней поверхности корпуса проточены кольцевые и продольные пазы глубиной 5 мм, в которые через отверстия в корпусе диаметром 6—8 мм по-

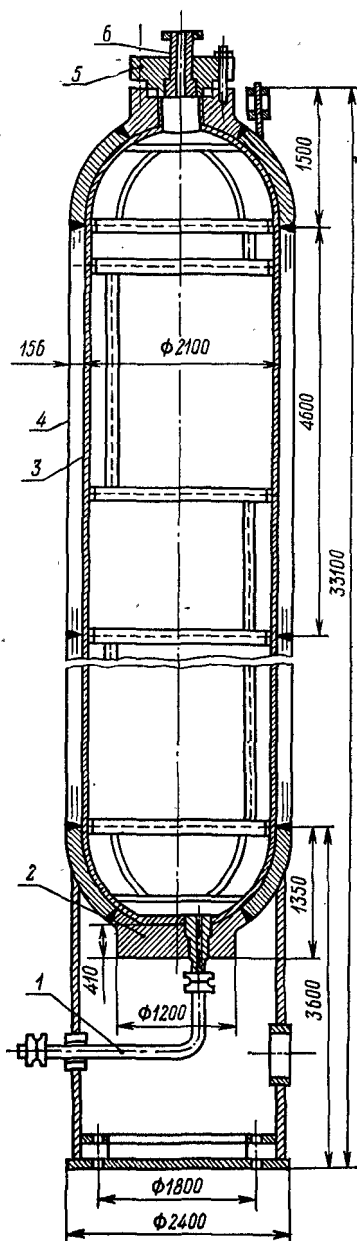


Рис. 10.5. Колонна синтеза карбамида.

дают азот; на выходе азот анализируют на содержание углекислого газа.

В новых системах, работающих при 14 МПа, используют колонны диаметром 2500 мм с высотой цилиндрической части 24 000 мм и объемом 125 м³. Устройство колонны почти не отличается от описанной выше.

Пример 10.4. Выполнить проверочный расчет колонны синтеза карбамида по следующим данным: максимальное рабочее давление P_0 19 МПа, расчетное давление P 20 МПа, максимальная рабочая температура 180 °С, расчетная температура 200 °С. Колонна ЦД-1—200×1,2 ГОСТ 11879—66 с внутренним диаметром 1200 мм, корпус цельнокованный из стали 22К, нормативное допускаемое напряжение 136 МПа. Внутри колонна футерована сталью 08Х17Н16М3Т толщиной 5 мм.

Толщину цилиндрической обечайки рассчитаем по формуле (5.3):

$$S = 0,5 D_v (\beta - 1) + C_R + C_I.$$

Принимаем коэффициент $\varphi_{ш} = 1$, а прибавку на коррозию $C_R = 0$. Прибавка по технологическим причинам C_I равна 5 мм.

Коэффициент толстостенности

$$\ln \beta = \frac{P}{\sigma_d \varphi} = \frac{20}{136 \cdot 1} = 0,1472; \beta = 1,158;$$

толщина корпуса

$$S = 0,5 \cdot 1200 (1,158 - 1) + 5 = 99,7, \text{ мм.}$$

Исполнительная толщина обечайки 110 мм.

Пример 10.5. Выполнить проверочный расчет затвора с самоуплотняющимся двухконусным obtюратором (см. рис. 5.6) в условиях предыдущего примера. Прокладка из алюминия, шпильки z (16 шт.) — из стали 40Х18Н8Г8НФБ, $\sigma^* = 225$ МПа с резьбой М 120×6 и центральным отверстием $d_0 = 18$ мм. По табл. 5.2 $D_{ср.п} = 1223$ мм, $(A+C)/2 = 95$ мм.

Равнодействующая внутреннего давления

$$Q_d = 0,785 P D_{ср.п}^2 = 0,785 \cdot 20 \cdot 1,223^2 = 23,4, \text{ МН.}$$

Осевую составляющую внутреннего давления на затвор определяем по формуле (5.12), где $\rho = 15^\circ$:

$$N = \frac{3,14}{2} \cdot 1,223 \cdot 0,095 \cdot 20 \operatorname{tg} (30 - 15) = 1,082, \text{ МН.}$$

Суммарное усилие на шпильки

$$Q = 23,4 + 1,082 = 24,482, \text{ МН.}$$

Общее поперечное сечение шпилек

$$F = 0,785z (d_{ш}^2 - d_0^2) = 0,785 \cdot 16 (0,108^2 - 0,018^2) = 0,1413 \text{ м}^2.$$

Определим напряжение в шпильках:

$$\sigma = \frac{Q}{F} = \frac{24,482}{0,1413} = 173,6 \text{ МПа} < 225 \text{ МПа.}$$

Напряжение в шпильках меньше допустимого.

Пример 10.6. Рассчитать толщину плоской крышки, используя данные примеров 10.4 и 10.5. Материал крышки 22К. Диаметр окружности, на

которой расположены шпильки, D_6 1345 мм, диаметр фланца $D_ф$ 1560 мм. В крышке имеется отверстие для выхода пара $d_1 = 160$ мм, для термометра $d_2 = 60$ мм; диаметр отверстий под шпильки 124 мм.

Допускаемое напряжение на изгиб для материала крышки

$$\sigma_{и.д} = \sigma_T^t / n_T = 204 / 3,5 = 58,2 \text{ МПа.}$$

Толщину крышки определим по формуле (5.8):

$$h_{кр} = 0,5 \sqrt{\frac{3,8 \cdot 24,482 (1,345 - 1,223) + 1,223^3 \cdot 20}{(1,560 - 2 \cdot 0,124 - 0,220) \cdot 58,2}} =$$

$$= 0,5 \sqrt{0,646} = 0,4, \text{ м.}$$

Расчетная толщина крышки соответствует фактической.

Глава 11. РЕАКТОРЫ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ

Реакторы относятся к основным аппаратам химических предприятий, определяющим производительность технологических линий. Вследствие большого разнообразия условий проведения химических процессов по фазовому состоянию реагентов, температуре и давлению значительно отличаются и конструкции реакторов, большинство которых относится к специальным видам оборудования, предназначенного только для определенного производства.

Реакторы классифицируют по агрегатному состоянию реагирующих веществ, температурному режиму, режиму движения реакционной среды и непрерывности операций. Классификация аппаратов по режиму движения среды и непрерывности операции рассмотрена в гл. 1.

В зависимости от агрегатного состояния реагентов выделяют следующие типы реакторов: а) контактные аппараты (конверторы), предназначены для проведения реакций в газовой фазе с участием твердых катализаторов; б) реакторы жидкофазных процессов — для проведения химических процессов в системе жидкость — твердое; в) газожидкостные — аппараты для проведения реакций в системах газ — жидкость [62—64].

Реакторы, предназначенные для проведения некаталитических химических процессов при высоких температурах (обычно выше 600 °С) в системах газ — твердое и жидкость — твердое, называются печами. Ниже рассмотрены разновидности реакторов, используемых в основной химической промышленности.

11.1. КОНТАКТНЫЕ АППАРАТЫ

По особенностям конструкции различают трубчатые, шахтные, полочные, радиальные контактные аппараты (конверторы) и контактные аппараты с кипящим слоем.

Примером трубчатого контактного аппарата с катализатором в межтрубном пространстве является колонна синтеза аммиака (см. рис. 10.1, а). Трубчатые контактные аппараты с катализатором в трубках используют для конверсии метана водяным паром: процесс идет с поглощением тепла, поэтому в межтрубном пространстве сжигают топливо. Полочные контактные аппараты применяют в ряде производств, в том числе и для синтеза аммиака.

Шахтные конверторы работают в адиабатическом или политермическом режиме, их используют для каталитической конверсии метана смесью кислорода и водяного пара, гидрирования сернистых соединений и окиси углерода (метанирование), конверсии окиси углерода водяным паром. Достоинством радиальных контактных аппаратов является меньшая скорость прохождения газов через слой катализатора и меньшее гидравлическое сопротивление, чем в трубчатых или шахтных реакторах. Они нашли применение для конверсии оксида углерода водяным паром, синтеза аммиака и окисления аммиака. Аппараты с кипящим слоем катализатора широко используют в нефтехимической промышленности, в основной химической промышленности они осваиваются для окисления сернистого газа.

Шахтные, трубчатые, полочные и радиальные реакторы работают в режиме, приближающемся к полному вытеснению (РИВ), а аппараты с кипящим слоем — в режиме полного смешения (РИС) (см. гл. 1).

Конверторы для получения водорода. При переработке метана на водород или азотоводородную смесь используют трубчатые, шахтные и радиальные контактные аппараты. Для конверсии метана смесью водяного пара и воздуха применяют шахтные конверторы (рис. 11.1, а).

По штуцеру 8 подают $36,5 \text{ м}^3/\text{с}$ газа после конверсии метана водяным паром, содержащего 9—10 % CH_4 (в пересчете на сухой), и $25,9 \text{ м}^3/\text{с}$ водяного пара с температурой 850°C . По штуцеру 7 подают паровоздушную смесь ($13,75 \text{ м}^3/\text{с}$ воздуха и $1,4 \text{ м}^3/\text{с}$ пара) с температурой 480°C . Смеситель 9 обеспечивает хорошее перемешивание потоков. За счет реакции кислорода с метаном и водородом температура в верхней части реактора увеличивается до 1245°C . В конвертор загружают $6,5 \text{ м}^3$ алюмохромового катализатора (верхний слой) и 32 м^3 никелевого катализатора (нижний слой). За счет протекания эндотермических реакций температура на выходе из реактора снижается до 1000°C . Конвертированный газ выходит через штуцер 13 и поступает в котел-утилизатор.

Корпус конвертора 5, работающего при давлении 3,5—3,6 МПа, изготовлен из сталей 16ГС и 12ХМ. Изнутри он защищен от действия высоких температур футеровкой из жа-

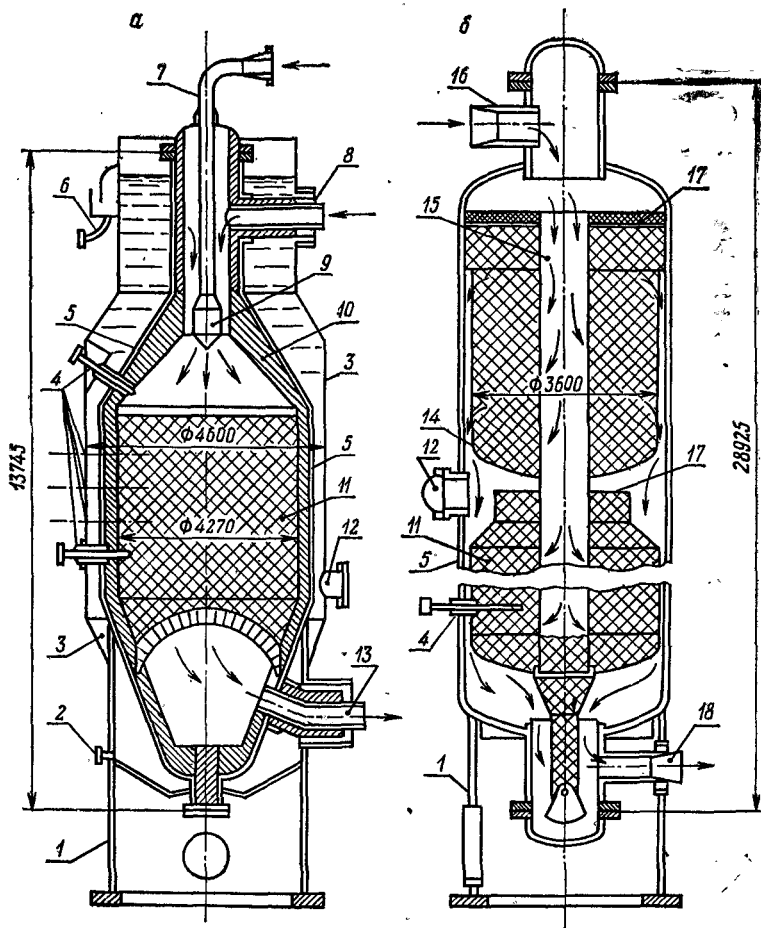


Рис. 11.1. Конверторы для получения водорода:
 а — шахтный; б — радиальный.

ростойкого бетона и огнестойкого кирпича 10, а снаружи охлаждается водой, подаваемой в рубашку 3 по штуцеру 2 и выводимой по штуцеру 6. Температура в контактном аппарате контролируется термопарами 4. Аппарат устанавливают вне здания; на фундаменте он закреплен цилиндрической опорой 1.

Для конверсии окиси углерода водяным паром широко используют *радиальные контактные аппараты* (рис. 11.1, б). Конвертер окиси углерода первой ступени — аппарат колонного типа. На три его слоя, работающих параллельно, загружают

172 м³ катализатора. Через конвертор проходит 51,5 м³/с газов, содержащих 12,4—30 % СО и 29,4 м³/с водяного пара. Парогазовая смесь с температурой 373 °С поступает по штуцеру 16 и проходит далее в перфорированную центральную трубу 15, из которой газ распределяется по слоям катализатора 11. Конвертированный газ проходит в зазорах между корпусом 5 и катализаторной корзиной 14 и выводится из аппарата по штуцеру 18 с температурой 430—450 °С. Центральная труба 15 служит распределителем газа по корзинам, дополнительной опорой для корзин и используется для выгрузки катализатора. Перегородки 17 устраняют проскок газа. Люк 12 необходим для осмотра и ремонта аппарата. Благодаря малой толщине слоя катализатора (~1,3 м) аппарат имеет незначительное гидравлическое сопротивление.

Контактные аппараты для окисления аммиака. Процесс окисления аммиака протекает с большой скоростью. Продолжительность контакта аммиачно-воздушной смеси с платиновым катализатором при температуре 800—920 °С составляет примерно $2 \cdot 10^{-4}$ с, тогда как при конверсии метана паровоздушной смесью (см. рис. 11.1, а) около 2 с. В настоящее время основным катализатором для окисления аммиака является платина и ее сплавы с родием и палладием, которые используются в виде сеток из проволок толщиной 0,06—0,09 мм. В зависимости от рабочего давления количество сеток в контактном аппарате изменяется от 1 до 16. Предложены и неплатиновые катализаторы, однако они не обеспечивают необходимого выхода окиси азота и используются только в комбинации с платиновыми сетками.

Контактные аппараты с горизонтальным расположением сеток применяют в системах, работающих под обычным ($P \sim 0,12$ МПа) и под повышенным давлением ($P = 0,35$ —1,5 МПа).

В типовой системе УКЛ-7—71 (мощность 120 000 т азотной кислоты в год), работающей под давлением 0,73 МПа, используют контактные аппараты с диаметром сеток 1600 мм (рис. 11.2, а). Аммиачно-воздушная смесь, содержащая 10,5—11 % NH₃, вводится по штуцеру 1, затем по кольцевому зазору между корпусом 2 и внутренним цилиндром, переходящим в конус 3, поднимается в верхнюю часть аппарата. Решетки 5 установлены для равномерного распределения газа по сечению аппарата. Катализаторные сетки 6 (12 штук) закреплены между фланцами и опираются на колосниковое устройство 7. Температуру контролируют при помощи терморпары 8. Слой фарфоровых или кварцевых колец 9 служит аккумулятором тепла и облегчает равномерное распределение газа. Ниже засыпают слой поглотительной массы 10 для улавливания платины. Изображенный на рисунке аппарат в отличие от стандартного

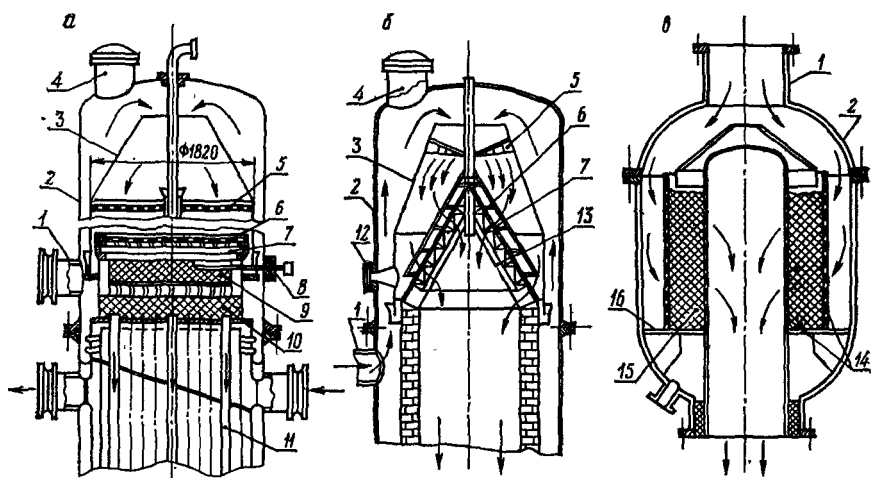


Рис. 11.2. Контактные аппараты для окисления аммиака:
 а — с горизонтальными сетками; б — с коническими сетками; в — с цилиндрическими сетками.

имеет подогреватель хвостовых газов 11, устанавливаемый над котлом-утилизатором. Подогрев хвостовых газов увеличивает мощность рекуперационной турбины и снижает расход природного газа. Аппарат снабжен взрывной пластиной 4, рассчитанной на предельное давление — 1 МПа.

Основные элементы контактного аппарата для окисления аммиака выполнены из стали 08X18H10T, внутренний цилиндр и конус 3 из никеля, а колосниковое устройство из нержавеющей стали (X15H60).

Разработана конструкция конвертора с двухступенчатым катализатором, в котором количество платиновых сеток уменьшено в 2 раза, а ниже расположен слой неплатинового катализатора.

В нашей стране разработан контактный аппарат с расположением платиновых сеток по конической поверхности (рис. 11.2, б) с углом при вершине 60 или 90°. В нем за счет увеличения поверхности сеток уменьшается скорость газов через катализатор, что увеличивает выход окиси азота на 1,5—2% при том же количестве платины. Смотровое окно 12 служит для наблюдения за состоянием катализатора, а опоры 13 необходимы для размещения колосникового устройства.

Для аппаратов большой единичной мощности более рациональной является конструкция с радиальным движением газа (рис. 11.2, в), разработанная в ЧССР. В корпусе 2 небольшого диаметра размещены перфорированные цилиндры 14, между которыми располагается либо насадка из колец 15,

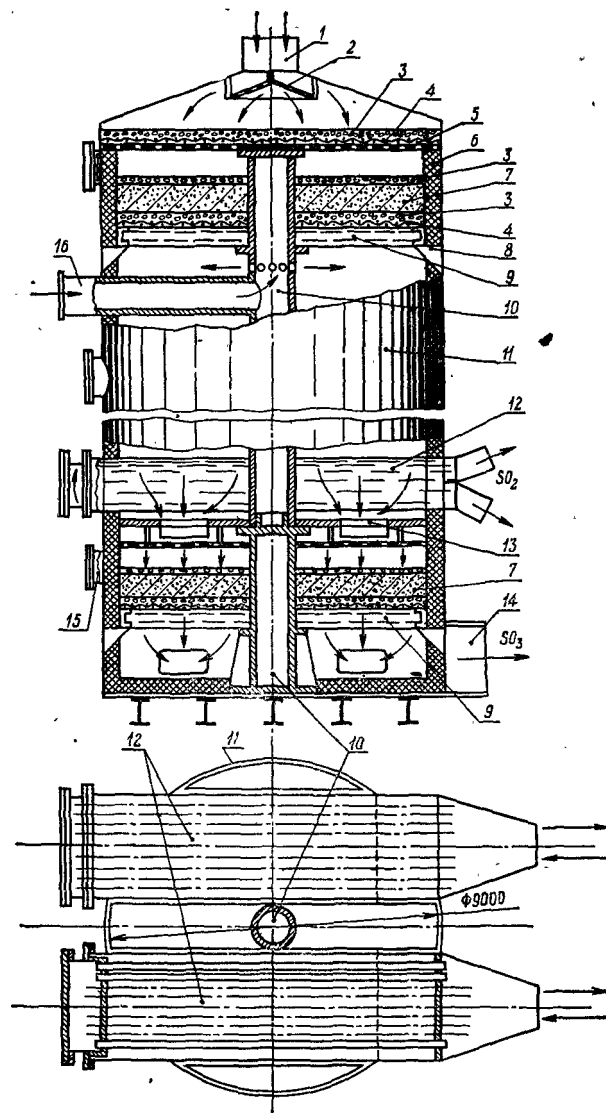


Рис. 11.3. Контактный аппарат с фильтрующим слоем для окисления сернистого газа.

либо неплатиновый катализатор, платиновые сетки натягиваются по внешней поверхности кольца. Перегородка 16 устраняет прямой проскок газа. За счет увеличения высоты возмож-

но размещение катализаторных сеток с большой поверхностью, что позволяет уменьшить скорость газа и повысить выход окиси азота.

Контактные аппараты для окисления сернистого газа. Для производства серной кислоты контактными способом применяют полочные 4- и 5-слойные конверторы производительностью 60—1515 т кислоты в сутки (0,694—17,52 кг/с). На каждом слое катализатора двуокись серы окисляется в адиабатическом режиме; между слоями газ охлаждают в теплообменниках или за счет подачи холодного газа и воздуха [8].

В типовом аппарате К-58—5 (рис. 11.3), который предназначен для окисления сернистого газа, полученного обжигом колчедана, в цилиндрическом корпусе 11 размещено пять полок 9. Сернистый газ с температурой 390—440 °С (в зависимости от вида катализатора) вводят через штуцер 1. Конус 2 способствует равномерному распределению газа по сечению аппарата. Равномерность распределения газа обеспечивается слоем дробленого кварца 3, лежащего на сетке 4 и решетке 5. Сетки укладывают на каждой полке, поверх них насыпают слой кварца, выше слоя катализатора 7 также располагают слой кварца, чтобы устранить выдувание катализатора газовым потоком. После первого слоя газ охлаждается до 450—460 °С за счет подачи холодного газа или воздуха по штуцеру 16.

Полка 9 состоит из восьми секторов, каждый из которых сварен из швеллеров и полосовой стали. Сектора опираются на выступы, имеющиеся на центральной колонне 10, и на кольцо из уголка 8, приваренное к внутренней поверхности обечайки 11. В целях уменьшения потерь тепла контактный аппарат изнутри футерован слоем листового асбеста и огнеупорным кирпичом 6, последний укладывают на кислотостойкий цемент. Снаружи аппарат изолирован стекловатой и покрыт кожухом из алюминия.

После второго слоя газ обычно выводят для охлаждения в выносной теплообменник. После третьего и четвертого слоев газ охлаждается во встроенных горизонтальных теплообменниках 12. Охлаждающий агент — холодный сернистый газ движется по трубкам, а охлаждаемый газ проходит по межтрубному пространству, обтекая трубки. Горизонтальное расположение теплообменников облегчает их ремонт. Ниже теплообменников расположено распределительное устройство 13, включающее завихрители и решетку. Газы выходят из аппарата по штуцеру 14. Люки 15 необходимы для осмотра и ремонта аппарата.

Контактный аппарат производительностью 540 т в сутки (6,52 кг/с) имеет диаметр 9 м и общую высоту 20,5 м, в него загружают 164,7 м³ катализатора. Общая поверхность внут-

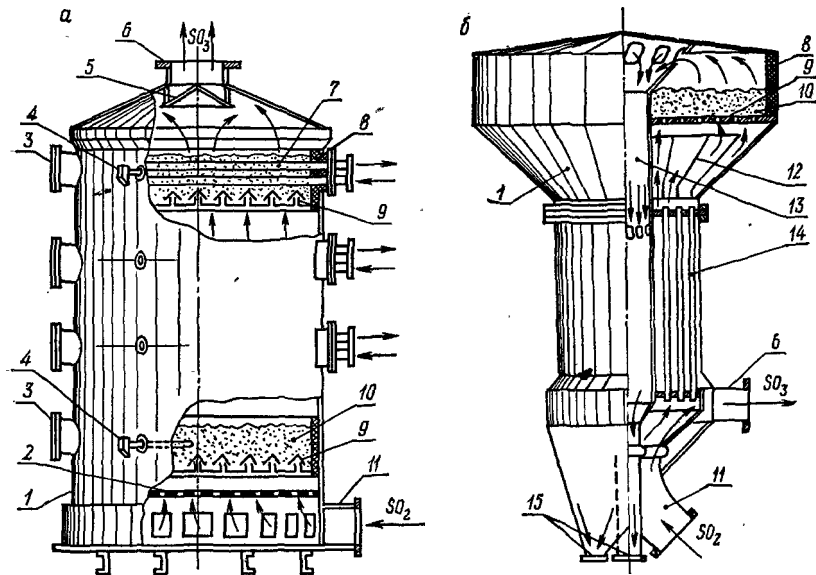


Рис. 11.4. Контактные аппараты с кипящим слоем:
 а — четырехслойный; б — однослойный.

ренных теплообменников составляет 3550 м², а внешнего после пятого слоя — 2960 м².

Контактные аппараты мощностью 1030 т в сутки (11,93 кг/с) рассчитаны на переработку 136 000 м³/ч (37,8 м³/с) газа, содержащего 7,5 % SO₂. Внутренний диаметр их равен 12 м, высота 28,1 м, общее количество катализатора — 324 м³. Поверхность выносного теплообменника после второго слоя составляет 4400 м², а внешнего после пятого слоя — 8800 м². Газы после третьего и четвертого слоев охлаждаются в выносных экономайзерах.

Основные детали контактных аппаратов для окисления диоксида серы изготавливают из углеродистых сталей, поверхность которых алитируют для уменьшения коррозии. Центральную колонну, как правило, отливают из чугуна. Полки первого и второго слоев, где температура достигает 600—550 °С, изготавливают из легированных сталей.

В настоящее время промышленность осваивает контактные аппараты с кипящим слоем, которые обладают высокой интенсивностью тепло- и массообмена между фазами, постоянством температуры по слою, возможностью перерабатывать запыленные и высококонцентрированные газы, легкостью автоматизации процесса. Используют как однослойные, так и многослойные реакторы [59].

Многослойные аппараты (рис. 11.4, а) применяют для достижения высокой степени окисления сернистого газа. Сернистый газ поступает через штуцер 11 под распределительную решетку 2 и вводится в кипящий слой катализатора 10 через тоннельные колпачки 9. Температуру в кипящем слое измеряют термомпарой 4. В зоне кипящего слоя корпус аппарата 1 защищен футеровкой 8. В верхних слоях размещены горизонтальные теплообменники 7. Отбойный конус 5 уменьшает унос катализатора. Люки 3 служат для загрузки катализатора и ремонта аппарата. Окисленный газ выводится по штуцеру 6.

Однослойные аппараты используют в системах двойного контактирования. До 70 % сернистого газа окисляется в контактном аппарате КС, после чего газ направляется на абсорбцию серного ангидрида. Газ, не содержащий трехоксида серы, поступает в контактный аппарат с тремя фильтрующими слоями.

В промышленных условиях испытано несколько конструкций однослойных контактных аппаратов мощностью до 360 т в сутки и диаметром до 9 м. На рис. 11.4, б изображен конвертор, предназначенный для работы на запыленном газе. Холодный сернистый газ вводится по штуцеру 11 в трубки вертикального теплообменника 14, где подогревается до 390—420 °С и поступает под распределительную решетку 9. Диффузор 12 обеспечивает распределение газа по сечению аппарата. В зоне кипящего слоя 10 корпус аппарата 1 футерован огнеупорным кирпичом 8. После слоя катализатора газ поступает в центральную трубу 13, которая является инерционным пылеотделителем; из трубы газ поступает в межтрубное пространство теплообменника и выходит по штуцеру 6; уловленную пыль выпускают по штуцерам 15.

Основной недостаток аппаратов КС — истирание катализатора. Пыль с газом уносится в систему абсорбции, вследствие чего невозможно получить чистую кислоту.

В связи с необходимостью создания систем с единичной мощностью 2000—3000 т моногидрата в сутки (до 34,7 кг/с) разрабатываются контактные аппараты для работы под давлением.

Пример 11.1. Выполнить проверочный расчет корпуса контактного аппарата К-58—5 по следующим данным: внутренний диаметр $D_n = 9000$ мм, толщина обечайки $S = 12$ мм, материал корпуса ВСтЗпс, $\sigma^* = 140$ МПа, $E^{150^\circ} = 1,86 \cdot 10^5$ МПа, расчетная температура 150 °С, габаритная высота $H = 20,5$ м, рабочее давление в аппарате 0,02 МПа, масса аппарата 340 т, масса футеровки и изоляции 160 т, объем катализатора 164,7 м³. Аппарат установлен на открытой площадке.

Проверим обечайку на устойчивость в рабочих условиях при совместном действии внутреннего давления и осевой нагрузки по формуле (4.18).

Масса катализатора при насыпной плотности 670 кг/м³

$$G_k = \rho_k V_k = 670 \cdot 164,7 = 110\,500 \text{ кг} = 110,5 \text{ т.}$$

Общая осевая нагрузка

$$N = 340 + 160 + 110,5 = 610,5 \text{ т} = 6,105 \text{ МН.}$$

Она распределяется между центральной колонной и обечайкой: на обечайку действует 70 % общей нагрузки, или 4,27 МН.

Допускаемую осевую нагрузку рассчитаем по формуле (4.10). Коэффициент уменьшения допускаемых напряжений φ_c находим по формулам (4.11):

$$\frac{D_B}{2(S - C_K)} > 0,18 \frac{E^t}{\sigma_T};$$

$$\frac{9,0}{2(0,012 - 0,002)} > 0,18 \frac{1,86 \cdot 10^5}{197}; 450 > 169,5;$$

$$\varphi_c = \frac{\sigma_T}{E} \cdot \frac{D_B}{2(S - C_K)} = \frac{197}{1,86 \cdot 10^5} \cdot \frac{0,75 K_c}{2(0,012 - 0,002)} = 0,221.$$

Здесь σ_T при 150°C для стали марки Ст3 равно 197 МПа.

Допускаемая осевая нагрузка

$$N_d = \pi D_B (S - C_K) \varphi_c \sigma^* = 3,14 \cdot 9,0 \cdot 0,010 \cdot 0,221 \cdot 140 = 6,25 \text{ МН.}$$

Допускаемое внутреннее давление $P_{в.д}$ рассчитаем по уравнению (4.5):

$$P_{в.д} = \frac{2\varphi_{ш} \sigma (S - C)}{D_B \div S - C} = \frac{2 \cdot 0,9 \cdot 131 \cdot 0,01}{9,01} = 0,262 \text{ МПа,}$$

где σ — допускаемое напряжение при 150°C, равное 131 МПа; $\varphi_{ш}$ — коэффициент прочности сварного шва, равный 0,9.

Условие устойчивости обечайки

$$\frac{N}{N_d} \div \frac{P}{P_{в.д}} < 1; \frac{4,27}{6,25} + \frac{0,02}{0,262} = 0,682 \div 0,0762 = 0,7582.$$

Обечайка устойчива, так как $0,7582 < 1,0$.

Обечайку испытывают наливом воды, при этом давление в аппарате

$$P = H \rho 10^{-5} = 20,5 \cdot 1000 \cdot 10^{-5} = 0,205 \text{ МПа.}$$

Испытательное давление меньше допустимого.

Пример 11.2. Выполнить проверочный расчет полки контактного аппарата по следующим данным: рабочая температура полки 430°C, высота слоя катализатора h_k 0,7 м, насыпная масса катализатора γ_n 760 кг/м³, общая высота слоя кварца 0,1 м, насыпная масса кварца 1500 кг/м³, сопротивление слоя ΔP 1700 Па. Каждый сектор полки опирается на два швеллера № 22а с моментом сопротивления 217,6 см³, диаметр аппарата D_B 9 м, расстояние между опорным кольцом и центральной колонной (см. рис. 11.3) 3,97 м.

Определяем изгибающий момент M_H (МН·м), действующий на один швеллер сектора:

$$M_H = q l^2 / 8,$$

где q — удельная нагрузка на погонный метр балки, МН/м (включает в себя собственную массу полки и сетки 300 кг, массу катализатора и давление потока газа).

Как указывалось, полка разделена на восемь секторов, поверхность одного сектора $\frac{1}{8}$

$$F = 0,785 D_B^2 / 8 = 7,94 \text{ м}^2.$$

Масса катализатора и кварца на секторе

$$G = 7,94(760 \cdot 0,7 + 0,1 \cdot 1500) = 5420 \text{ кг} = 54200 \text{ Н.}$$

Нагрузка от давления газа на сектор

$$N = \Delta PF = 1700 \cdot 7,94 = 13500 \text{ Н.}$$

Общая нагрузка на сектор

$$Q = 3000 + 54 \cdot 200 + 13 \cdot 500 = 70 \cdot 700 \text{ Н} = 0,0707 \text{ МН.}$$

Рабочая температура после слоя катализатора равна 430°C , принимаем расчетную температуру равной 480°C (см. гл. 4, п. 1).

Удельная нагрузка на 1 пог. м швеллера

$$q = Q/l = 0,0707/3,97 \cdot 2 = 0,0089, \text{ МН/м.}$$

Максимальный изгибающий момент

$$M_{\text{н}} = ql^2/8 = 0,0089 \cdot 3,97^2/8 = 0,0176 \text{ МН} \cdot \text{м.}$$

Швеллер изготовлен из стали 12ХМ с нормативной допускаемой нагрузкой при 480°C ; $\sigma^* = 114 \text{ МПа}$.

Определим необходимый момент сопротивления

$$W = 0,0176 : 114 = M_{\text{н}} : \sigma^* = 1,545 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^3.$$

Фактический момент сопротивления ($2,176 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$) больше расчетного. Прочность полки достаточна.

11.2. РЕАКТОРЫ ГАЗОФАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ

Газовые некаталитические процессы (синтез хлорида водорода, высокотемпературная кислородная конверсия метана и окисление окиси азота в двуокись) в неорганической технологии используют редко. Такие процессы, как синтез окиси азота из воздуха и синтез цианистого водорода из метана и азота, осуществляемые в низкотемпературной плазме при $3000\text{--}5000^\circ\text{K}$, находятся в стадии разработки или полупромышленных испытаний.

Реактор для окисления окиси азота (рис. 11.5) представляет собой цилиндрический сосуд 3, в верхней части которого расположена корзина 4 с фильтром для улавливания платины. Нитрозные газы поступают в реактор по штуцеру 5 и выходят через штуцер 2. При помощи стоек 1 аппарат крепится к фундаменту.

Степень окисления окиси азота зависит от температуры, давления, концентрации NO и O_2 и от времени пребывания в окислителе. Так, при давлении $0,7 \text{ МПа}$ и времени пребывания в окислителе 11—14 с степень окисления NO увеличивается с 25 до 80 %. Одновременно за счет тепла реакции возрастает температура с 260 до 320°C .

11.3. РЕАКТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИДКОСТЬ — ГАЗ

Химические процессы между газами и жидкостями лежат в основе производства азотной, фосфорной и кремнефтористоводородной кислот, нитрата, фосфата и сульфата аммония,

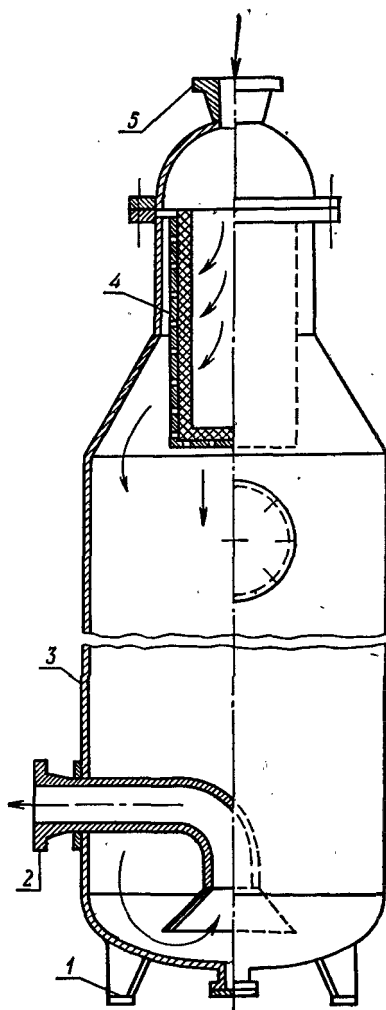


Рис. 11.5. Окислитель.

бикарбоната натрия, а также некоторых других солей. Ниже рассмотрены конструкции реакторов, используемых при получении аммонийных солей.

Нитрат аммония — один из основных видов азотных удобрений получают нейтрализацией слабой азотной кислоты (48—60 % HNO_3) аммиаком. В системах АС-72 производительностью 1360 т в сутки (15,73 кг/с) используют два аппарата ИТН (использователь тепла нейтрализации), дополненные четырьмя тарелками для промывки сокового пара (рис. 11.6). Газообразный аммиак, подогретый до 120—160 °С, по трубопроводу 7 поступает в кольцевой барботер 1, обеспечивающий дробление аммиака. Азотную кислоту с температурой 75—80 °С по штуцеру 6 подают в распределитель 3, и во внутреннем цилиндре 4 реакционной части аппарата 2 происходит реакция нейтрализации, тепло которой расходуется на испарение воды. Раствор аммиачной селитры через отверстия под крышкой внутреннего цилиндра выходит в сепарационную часть аппарата 15 и непрерывно циркулирует между внутренним цилиндром и сепарационной частью. Раствор нитрата аммония с концентрацией 92—94 % выводят из аппарата по штуцеру 16 на дальнейшую упарку.

Соковый пар для очистки от брызг раствора и азотной кислоты последовательно промывают на тарелках 9 раствором аммиачной селитры, подаваемым по штуцеру 8, 14, и конденсатом сокового пара, который подают по штуцеру 13. Промывные растворы стекают в реакционную часть. Соковый пар проходит ситчатый отбойник 12, где улавливаются капли жидкости, и через штуцер 11 выходит из аппарата. Реактор устанавливают на перекрытие опорами 5; люки 10 служат для внутреннего осмотра и ремонта.

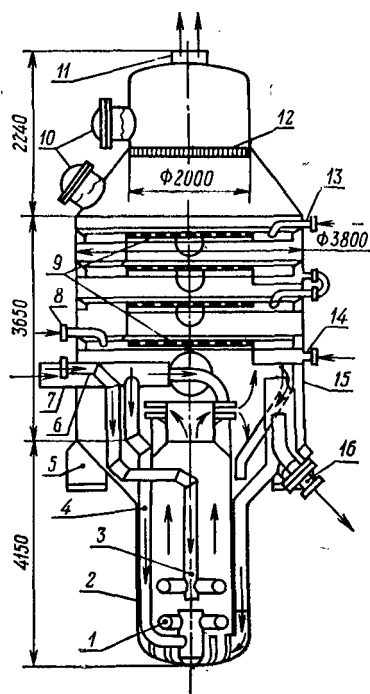


Рис. 11.6. Аппарат ИТН.

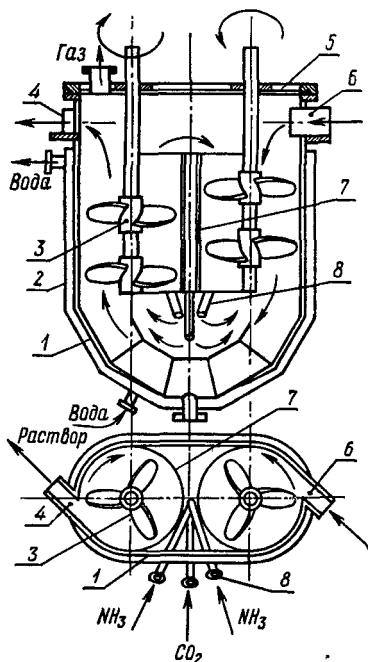


Рис. 11.7. U-образный реактор.

Аппарат работает под давлением 0,02 МПа, температура в реакционной части составляет 180 °С. Основные части аппарата изготавливают из стали 08Х18Н10Т, отдельные детали, подвергшиеся сильному коррозионному воздействию среды, — из титана.

В производстве сложных удобрений, получаемых азотно-кислотным разложением фосфатов, для нейтрализации смеси фосфорной и азотной кислот используют *U-образные реакторы* (рис. 11.7). Реактор 1 недоходящей до дна перегородкой 7 разделен на два сообщающихся отсека, в которых установлены двухъярусные пропеллерные мешалки 3, вращающиеся в разные стороны со скоростью 3,33 об/с (20,93 рад/с). Интенсивное перемешивание ускоряет взаимодействие аммиака с кислотами. Смесь кислот вводится по желобу 6 и вытекает из аппарата по желобу 4, газы подают в реактор по штуцерам 8. Аппарат снабжен водяной рубашкой 2 для отвода тепла нейтрализации и крышкой 5.

Ортофосфат аммония (аммофос) получают нейтрализацией экстракционной фосфорной кислоты аммиаком. В настоящее время на многих заводах применяют *сатураторы* — ци-

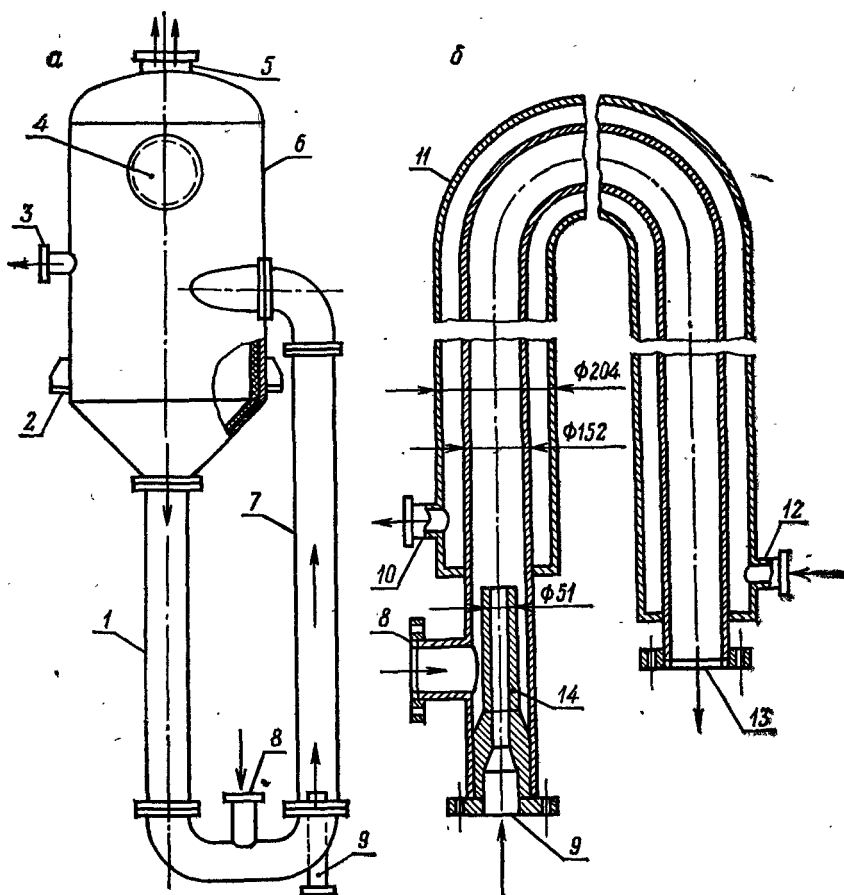
линдрические вертикальные аппараты с мешалкой и барботером для подачи аммиака. Их недостаток в малой интенсивности процесса.

Разработано несколько новых реакторов для получения аммофоса, например горизонтальный цилиндрический аппарат с двумя турбинными мешалками, разделенный вертикальной перегородкой на два отсека. Благодаря интенсивному перемешиванию достигается хорошее поглощение аммиака. В связи с высокой коррозионной активностью среды основные детали реактора изготавливают из легированных сталей 08X18H10T и 10X17H13M2T. Недостатки указанного реактора: сложность конструкции, повышенный расход энергии на перемешивание и большой расход легированных сталей.

Значительно проще устройство аппарата САИ — скоростного аммонизатора испарителя (рис. 11.8, а), состоящего из реакционной трубы 7, циркуляционной трубы 1 и испарителя 6. Фосфорную кислоту, подогретую в выносном теплообменнике соковым паром до 60—80 °С, подают в штуцер 8, а газобразный аммиак по штуцеру 9 через сопло в нижнюю часть реакционной трубы. За счет разности плотностей парожидкостной эмульсии в реакционной трубе и раствора в циркуляционной скорость потока в первой трубе достигает 0,7 м/с, парожидкостная эмульсия выбрасывается в испаритель 6, где отделяется аммофосная пульпа от сокового пара, температура пульпы составляет 110 °С. Пульпу выводят по штуцеру 3, а соковый пар по штуцеру 5 в теплообменник-конденсатор. Испаритель крепится лапами 2. Люк 4 служит для осмотра и ремонта аппарата.

Аппарат САИ обладает рядом достоинств: простота конструкции; высокая интенсивность процесса — суммарное время пребывания в реакционной зоне составляет 2—9 минут, высокая концентрация пульпы — содержание влаги составляет 36—40 %; отсутствие перемешивающих устройств; меньший расход энергии; возможность работы под давлением и под вакуумом. По практическим данным, потери аммиака с паром не превышают 0,2 %. Аппарат может быть изготовлен из дешевых углеродистых сталей и защищен от коррозионного воздействия пульпы футеровкой.

Недостаток указанной системы: необходимость теплообменника-конденсатора для подогрева фосфорной кислоты. Экстракционная фосфорная кислота обладает высокой коррозионной активностью, а примеси гипса и кремнегеля отлагаются на теплопередающей поверхности, что снижает коэффициент теплопередачи. Производительность реактора САИ достигает 100 т пульпы в час или 16—17 кг аммофоса в секунду.



Р и с. 11.8. Реакторы для получения фосфатов аммония:
 а — САИ; б — П-образный трубчатый.

Нейтрализацию полифосфорных кислот аммиаком в производстве жидких удобрений осуществляют в трубчатых реакторах П-образной, Г-образной или подковообразной формы, которые чаще всего снабжены охлаждающей рубашкой для уменьшения коррозии металла.

П-образный трубчатый реактор (рис. 11.8, б) собирается из 3—4 отдельных секций длиной 0,75—2,0 м каждая. Охлаждающую рубашку 11 имеет только первая секция, воду подают по штуцеру 12 и она выходит по штуцеру 10. Экстракционную полифосфорную кислоту с концентрацией 68—72 % P_2O_5 и температурой 70—120 °С вводят по штуцеру 8, а газообразный аммиак, подогретый до 90—200 °, по штуцеру 9. Распре-

делитель 14 служит для лучшего перемешивания аммиака с кислотой, на его поверхности расположено 9—20 отверстий диаметром 3—5 мм. Температура в реакционной зоне зависит от степени распределения аммиака: при использовании трубчатого распределителя без перфорации она повышается до 200—230 °С, а при использовании распределителя с 12 отверстиями диаметром 5 мм и центральным отверстием 12 мм температура в реакторе достигает 275—285 °С. Плав полифосфатов аммония выводят через штуцер 13 на растворение.

Производительность описанного реактора длиной 6,5 м составляет 20,5 т/ч (5,7 кг/с) жидкого удобрения, содержащего 10 % N и 34 % P₂O₅. Для улучшения турбулизации реакционной смеси аммиак обычно подают под давлением до 1,5 МПа.

Все детали, соприкасающиеся с кислотой или плавом, изготавливают из легированных сталей 06ХН28МДТ, ХН65МВ, 10Х17НВМ2Т, хастеллоя или углеродистого графита.

Трубчатые реакторы просты по устройству и обладают высокой производительностью, однако они требуют периодической чистки от осадков, постоянно отлагающихся на внутренней поверхности.

11.4. РЕАКТОРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ЖИДКОСТЬ — ТВЕРДОЕ

Некаталитические химические процессы в гетерогенных системах Ж — Т широко используются в неорганических производствах. Например, эти процессы являются основными при получении фторида алюминия, различных фосфатов натрия, простого и двойного суперфосфата, экстракционной фосфорной кислоты и других продуктов. Для проведения данных процессов применяются вертикальные аппараты с перемешивающими устройствами, а в некоторых производствах аппараты других типов.

На ряде заводов фторид алюминия из 10—12 % H₂SiF₆ и Al(OH)₃ получают в *стандартных вертикальных аппаратах с перемешивающим устройством*. На рис. 11.9 изображен аппарат 8007—12,5—2400.1250—7,5.3,3 ГОСТ 20680—75 с приводом типа II, мотор-редуктором МП02 с электродвигателем А02—51—4 мощностью 7,5 кВт и скоростью вращения 24,3 с⁻¹ (1460 об/мин).

Вертикальный цилиндрический сосуд 1 с плоской крышкой 9 и плоским отбортованным днищем 12 (тип 80) объемом 12,5 м³ изнутри футерован 2 для защиты от коррозии. Лопастная мешалка 10 (тип 07) приводится в движение мотор-редуктором 6, скорость вращения мешалки 3,3 рад/с (32 об/мин). Аппарат работает под наливом, поэтому для уплотнения вала использовано манжетное уплотнение 7 (см. рис. 5.15, в). Лапы 3 служат для крепления аппарата на междуэтажном пе-

рекрытии. Кремнефтористоводородную кислоту заливают в аппарат по штуцеру 16; прямоугольный штуцер 5 предназначен для загрузки гидроксида алюминия. Необходимую температуру (90—95 °С) поддерживают подачей острого пара по штуцеру 8. После окончания реакции суспензию кремнекислоты в растворе фторида алюминия сливают через штуцер 11. Аппарат оборудован штуцерами для перелива 4, установки приборов КИП 13, подачи суспензии кремнекислоты 14 и для отсоса газов 17. Люк 15 служит для внутреннего осмотра и ремонта аппарата.

Основные детали реактора изготовлены из стали ВСтЗпс (ГОСТ 380—71), вал, мешалка и барботажная труба — из легированной стали 03Х21Н21М4ГБ (ГОСТ 5632—72). Крышка гуммирована.

В производстве экстракционной фосфорной кислоты используют реакторы значительного объема (до 1400 м³), так как годовая мощность технологических линий составляет 55—280 000 т Р₂О₅ (1,9—9,5 кг/с Р₂О₅), а время пребывания реакционной смеси в реакторе 4—8 часов.

В установках малой производительности применяют вертикальные цилиндрические реакторы, снабженные одной или несколькими лопастными (турбинными) мешалками, объемом 30—440 м³. Они могут иметь вертикальные перегородки, делящие его на ряд отсеков. Технологические линии высокой производительности (110—280 000 т Р₂О₅ в год) оборудованы реакторами с полезным объемом 740—1400 м³.

Реактор большого объема (рис. 11.10, а) представляет

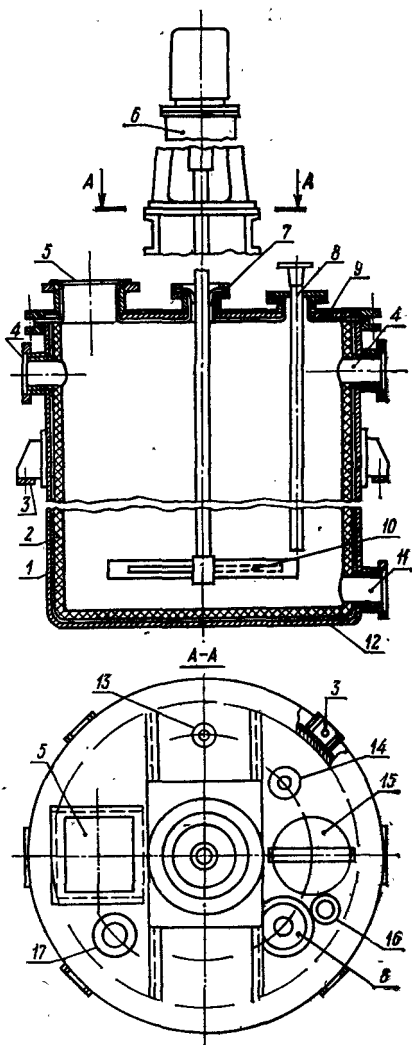


Рис. 11.9. Реактор для получения фтористого алюминия.

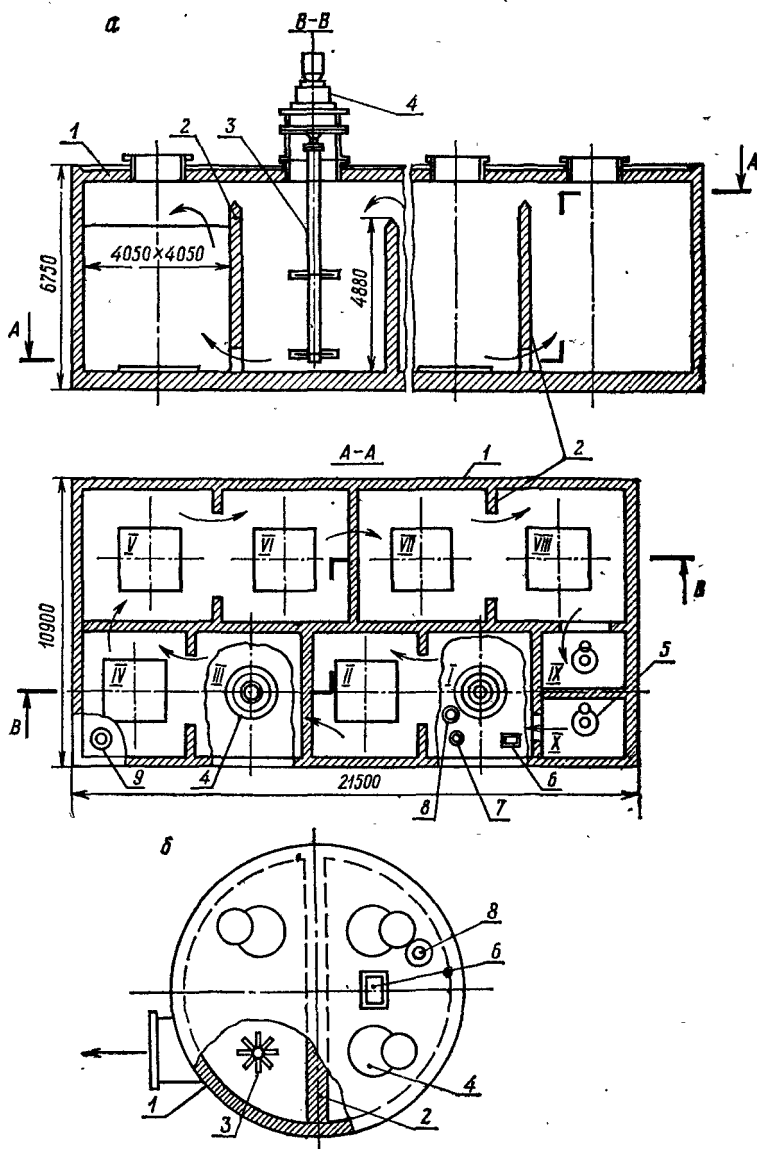


Рис. 11.10. Экстракторы:
 а — прямоугольный многосекционный; б — круглый.

собой прямоугольную емкость из железобетона 1, разделенную вертикальными перегородками 2 на десять отсеков, восемь из которых являются реакционными и снабжены мешалками 3 с приводом 4, а отсеки IX и X служат промежуточными

ми емкостями, в которых установлены погружные насосы 5. Полезный объем отсеков 80—122 м³.

Характерная особенность данного реактора — синусоидальное движение реакционной суспензии: апатитовый концентрат (штуцер 6), серную кислоту (штуцер 7), раствор разбавления (штуцер 8) и охлажденную пульпу после испарителя из отсека X вводят в отсек I сверху, суспензия перетекает в отсек II через отверстие, расположенное у дна реактора, и далее в отсек III переливается через стенку высотой 4,88 м.

Из отсека IX погружной насос подает суспензию в вакуум-испаритель, из которого она сливается в отсек X. Часть суспензии сливается в начале процесса в отсек I, а часть погружным насосом 5 подается на фильтрацию. По штуцеру 9 фторсодержащие газы подают на очистку. Для предотвращения осаждения апатитового концентрата и гипса необходимо интенсивное перемешивание суспензии. Оно обеспечивается шестилопастными двухъярусными мешалками 3, вращающимися со скоростью 1,00—1,33 об/с.

При потоке суспензии 167,6 м³/ч (243 т/ч; $\rho=1450$ кг/м³) время ее пребывания в экстракторе с рабочим объемом 780 м³ составляет 4,67 часа.

Материал корпуса и крышки — железобетон; толщина днища 350 мм, а крышки 300 мм, толщина стенок в нижней части 350 мм, в верхней — 250 мм. Для защиты от коррозии корпус и перегородки футерованы резиной ($\sigma=2-5$ мм) и углеграфитовым кирпичом в один или два слоя ($\sigma=60-120$ мм). Днище защищено от эрозии слоем кислотоупорного кирпича или листовой кислотоупорной стали. Вал мешалки и лопасти изготовлены из хастеллоя или стали 06X23H28M3ДЗТ. Верхняя часть вала защищена резиной. В ряде случаев используют трехслойную футеровку, состоящую из слоя углеграфитового кирпича ($\delta=60$ мм), кислотоупорного кирпича ($\delta=113$ мм) и резины ($\delta=4,5$ мм).

Экстракторы малого объема используют в технологических линиях производительностью 10—30 000 т Р₂О₅ в год (рис. 11.10, б). Металлический цилиндрический корпус 1 изнутри футерован резиной, кислотоупорным кирпичом и угольными блоками. Перегородкой 2 аппарат разделен на два отсека. Экстрактор объемом 30 м³ снабжен четырьмя открытыми турбинными шестилопастными мешалками диаметром 700 мм, вращающимися со скоростью 1,93 об/с; на каждом валу расположено по две мешалки.

Условное обозначение: аппарат 80.03.4—30—4600.700—10.12 ГОСТ 20680—75, привод от электродвигателя А0-62—4 мощностью 10 кВт, число оборотов 1500 об/мин; редуктор ВД-III 10/116—1500.

Табл. 11. 1. Характеристика экстракторов

Производительность		Концентрация кислоты, % P_2O_5	Рабочий объем реактора, m^3	Время пребывания в экстракторе, ч	Удельная производительность, $kg P_2O_5 / m^3 \cdot ч$	Сырье
тыс. т P_2O_5 / год	т P_2O_5 / ч					
68	9,4	23—25	850	4—5	9—11	фосфориты Каратау
55	6,9	28—32	440	7	15—16	апатитовый концентрат
110	13,9	28—32	740	7	18—19	»
140	19,6	28—32	900	7	20—22	»
280	41,7	42—48	1400	7—8	26—30	»

В табл. 11.1 приведена характеристика некоторых экстракторов, используемых на ряде заводов. С увеличением объема реактора возрастает удельная производительность и уменьшается расход энергии на перемешивание. Так, в экстракторах объемом 30—440 m^3 расход энергии составляет 52—56 кВт/ч P_2O_5 , а в реакторах объемом 740 m^3 и выше он снижается до 38—45 кВт/ч P_2O_5 . Для перемешивания суспензии используют, как правило, двухъярусные лопастные мешалки диаметром 1,5—2,0 м с частотой вращения 0,53—1,33 об/с или открытые турбинные мешалки диаметром 0,5—0,7 м с частотой вращения 1,5—2,0 об/с.

Пример 11.3. Определить мощность привода перемешивающего устройства экстрактора по следующим данным: мешалка двухъярусная, в каждом ярусе шесть лопастей диаметром d_m 1,6 м и высотой B 0,16 м; частота вращения n 1,33 об/с (80 об/мин), плотность суспензии ρ 1450 kg/m^3 , вязкость суспензии μ 3,9 мПа·с.

Рассчитаем центробежный критерий

$$Re_{ц} = \frac{\rho n d_m^2}{\mu} = \frac{1450 \cdot 1,33 \cdot 1,6^2}{3,9 \cdot 10^{-3}} = 1,237 \cdot 10^6.$$

По графику 31.1 [7] находим $K_N = 0,18$. Так как на валу имеется шесть пар лопастей, $K_N = 0,18 \times 6 = 1,08$. Мощность на валу мешалки рассчитаем по формуле (5.14):

$$N_m = K_N \rho n^3 d_m^5 = 1,08 \cdot 1450 \cdot 1,33^3 \cdot 1,6^5 = 38,64, \text{ кВт.}$$

Мешалка приводится во вращение от электродвигателя с КПД $\eta_{дв} = 0,9$ через редуктор с КПД $\eta_p = 0,94$. Коэффициент запаса мощности β_m принимаем равным 1,2; мощность двигателя

$$N_{дв} = \frac{N_m \beta_m}{\eta_{\Sigma}} = \frac{38,64 \cdot 1,2}{0,9 \cdot 0,94} = 54,81, \text{ кВт.}$$

Ближайшая мощность электродвигателя — 55 кВт.

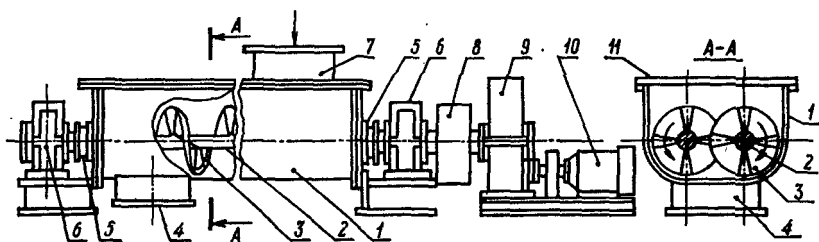


Рис. 11.11. Двухвальный шнек.

Пример 11.4. Выполнить проверочный расчет лопасти перемешивающего устройства по данным предыдущего примера, если лопасти изготовлены из листовой стали 06Х23Н28М3Д3Т толщиной h 12 мм, нормативное допускаемое напряжение σ^* 180 МПа, прибавка на коррозию C_k 1 мм.

Изгибающий момент в месте заделки лопасти определим по уравнению

$$M_n = 0,0813 \frac{N_m}{nz} = 0,0813 \frac{38,64}{6 \cdot 1,33} = 394, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где z — число пар лопастей, равное 6.

Момент сопротивления лопасти

$$W = \frac{Bh^2}{6} = \frac{0,158 \cdot 0,01^2}{6} = 2,64 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^3.$$

Напряжение в лопасти

$$\sigma_n = \frac{M_n}{W} = \frac{394}{2,64 \cdot 10^{-6}} = 149,6, \text{ МПа}.$$

Толщина лопасти достаточна, так как фактическое напряжение меньше допустимого: $149,6 < 180$.

Двухвальные шнеки (рис. 11.11) используют в качестве реакторов, смесителей и грануляторов в тех случаях, когда перерабатываются смеси с высоким содержанием твердой фазы. Так, в данных аппаратах получают монокальцийфосфат действием фосфорной кислоты на известняк, смешивают сульфат фосфат с нейтрализующими добавками и гранулируют удобрения.

В корытообразном кожухе 1 размещены два вала 2, на которых укреплены сплошные винты 3 или лопасти, расположенные по винтовой линии. Валы вращаются навстречу друг другу в выносных подшипниках 6 и приводятся в движение электродвигателем 10 через редуктор 9 и зубчатую передачу 8. Исходные вещества подают через штуцер 7, а готовый продукт сыпается по штуцеру 4. Валы уплотнены сальниками 5. Кожух закрыт крышкой 11.

Как правило, все детали, соприкасающиеся с реакционной смесью (вал, винт или лопасти, кожух), изготавливают из легированных сталей.

Пример 11.5. Рассчитать производительность и мощность привода двухвального шнекового смесителя по следующим данным: диаметр лопаток D 0,8 м, средняя ширина b 0,12 м, длина лопаток 0,25 м, скорость вращения валов n 1,0 об/с (60 об/мин), угол установки лопаток $\alpha=45^\circ$ (0,785 рад), насыпная плотность суперфосфата γ_n 1000 кг/м³, длина смесителя 1,5 м. Общее число лопастей на валу — 8 шт.

Производительность лопастного шнека G_p (кг/с) можно рассчитать по уравнению

$$G_p = 0,785 (D^2 - d^2) b n K_p K_b \varphi \sin \alpha \gamma_n,$$

где d — диаметр окружности, описываемый внутренними концами лопастей, равный $d = D - 2l = 0,8 - 0,25 \cdot 2 = 0,3$ м; K_p — коэффициент разрыхления, равный в среднем 0,6; K_b — коэффициент, учитывающий возврат материала, равный 0,7—0,8.

Принимаем $K_b = 0,8$ и коэффициент заполнения $\varphi = 0,6$, тогда производительность двух шнеков составит

$$G_p = 0,785 (0,8^2 - 0,3^2) \cdot 0,12 \cdot 1,06 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 1000 \cdot 2 = 14,92 \text{ кг/с, или } 53,7 \text{ т/ч.}$$

В лопастном шнеке энергия расходуется главным образом на транспортировку материала и на разрезание его лопастями. Мощность привода на горизонтальное перемещение материала по формуле (7.6):

$$N_{\tau} = 9,8 \cdot 10^{-3} G_p L f = 9,8 \cdot 10^{-3} \cdot 14,92 \cdot 1,5 \cdot 2,5 = 0,548, \text{ кВт,}$$

где f — коэффициент сопротивления, для суперфосфата равный 2,5 (табл. 7.4).

Расход энергии на перемешивание (резание) суперфосфата N_p (Вт) найдем по уравнению

$$N_p = f_p b z \pi n \frac{D^2 - d^2}{8} \sin \alpha,$$

где f_p — коэффициент сопротивления резанию, равный для слежавшегося суперфосфата $2,5 \cdot 10^5$ Н/м²; z — число лопастей.

На двух валах находится 16 лопастей, с учетом коэффициента заполнения в любой момент будет работать $z' = z \varphi = 16 \cdot 0,6 = 9,6 \sim 10$ лопастей.

Мощность привода на перемешивание

$$N_p = 2,5 \cdot 10^5 \cdot 0,12 \cdot 10 \cdot 1 \frac{0,8^2 - 0,3^2}{8} \cdot 0,5 = 10310, \text{ Вт.}$$

Суммарная мощность $N = N_{\tau} + N_p = 548 + 10310 = 10858$ Вт. Шнек приводится в движение электродвигателем с КПД $\eta_{д} = 0,9$ через редуктор с КПД $\eta_p = 0,94$ и зубчатую передачу $\eta_a = 0,95$. Для учета потерь мощности в сальниках и подшипниках введем коэффициент 0,92. Коэффициент запаса мощности $\beta_m = 1,2$. Следовательно, мощность двигателя смесителя

$$N_{дв} = \frac{N \beta_m}{\eta_{\Sigma}} = \frac{10,858 \cdot 1,2}{0,9 \cdot 0,94 \cdot 0,92} = 16,7, \text{ кВт.}$$

Простой и двойной суперфосфат по камерному и камернопоточному способу получают во *вращающихся реакторах непрерывного действия*. Суперфосфатная камера (рис. 11.12) представляет собой бетонный цилиндр с металлическим кожухом 2 диаметром 7,1 м и высотой 2,58 м, вращающийся вокруг неподвижной чугунной трубы 3, которая служит точкой для выгрузки суперфосфата. Ко дну цилиндра прикреплено кольцо из двутавра 4, к которому крепится червячное колесо. Коль-

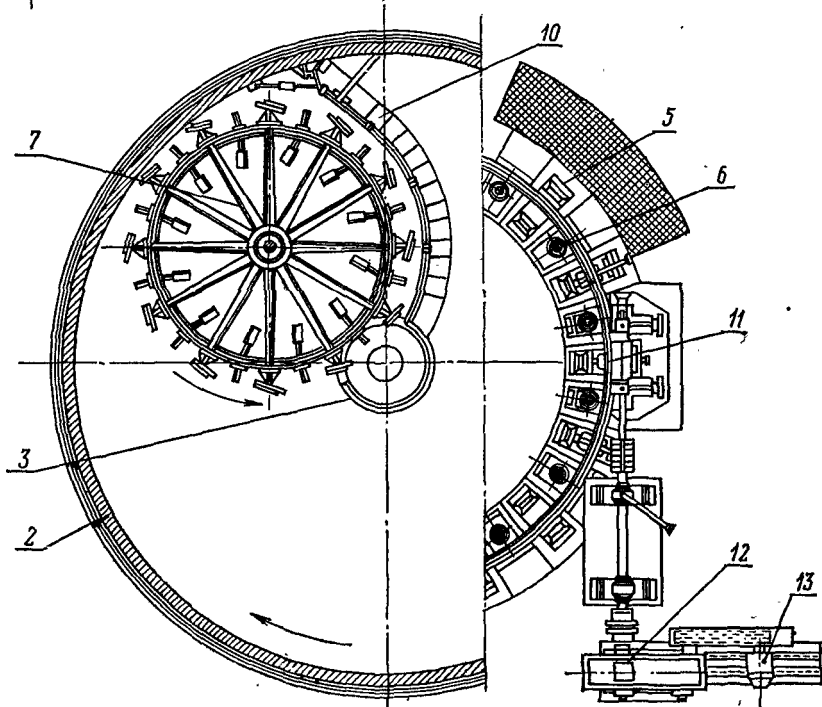
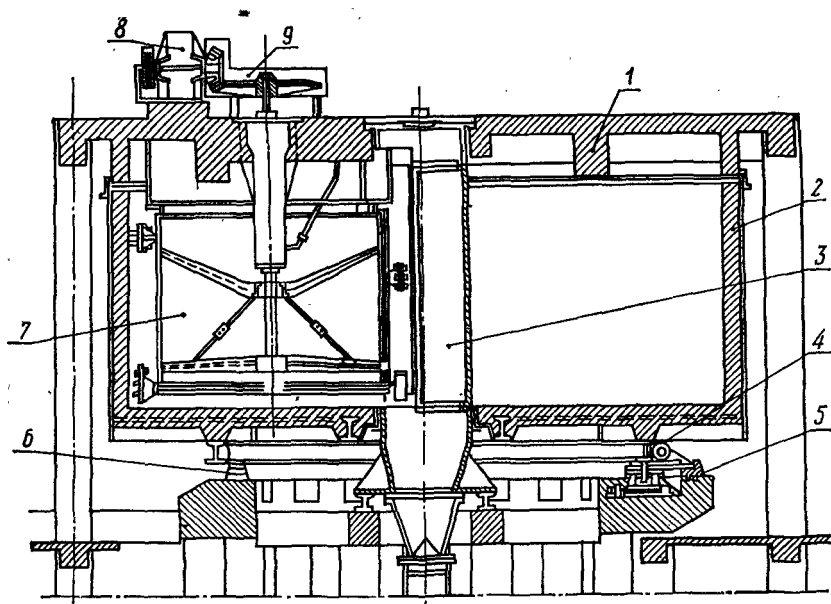


Рис. 11.12. Суперфосфатная камера непрерывного действия.

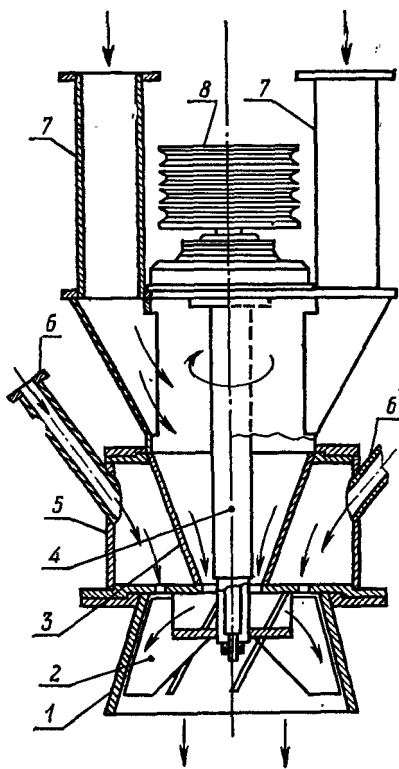


Рис. 11.13. Турбинный смеситель.

цо опирается на 16 опорных роликов 5, с внутренней стороны оно центрируется 16 упорными роликами 6. Камера закрыта неподвижной железобетонной крышкой 1. К последней прикреплена карусель (фреза) 7 диаметром 2,68 м, приводимая в движение электродвигателем через клиноременную передачу, редуктор 8 и коническую передачу 9. Внутреннее пространство камеры разделено неподвижной перегородкой 10 на две части. Стык между перегородкой и внутренней поверхностью камеры уплотнен резиновым листом. Камера вращается электродвигателем 13 через редуктор 12 и червячную передачу 11 со скоростью один оборот за 1—2 часа.

На боковой поверхности фрезы по винтовой линии расположено 12 ножей и один нож установлен для вырезки суперфосфата на дне камеры. Кроме того, на карусели укреплено 24 скребка, предназначенных для транспортировки вырезанного

суперфосфата в выгрузную течку. Скорость вращения карусели $0,0678-0,1667 \text{ с}^{-1}$ (6,5—10 об/мин).

Для защиты от коррозии внутренняя поверхность камеры и крышки покрыта слоем кислотоупорной замазки. В стыке между камерой и крышкой установлено уплотнение лабиринтного типа.

При производстве суперфосфата камерным способом из апатитового концентрата применяют смесители, в которых фосфатное сырье и кислота интенсивно перемешиваются в течение 6—9 минут. Смеситель снабжен 3—4 двухъярусными лопастными мешалками диаметром 700 мм и высотой 100 мм. Лопасты установлены под углом 30—45°. Для защиты от коррозии и эрозии вал и лопасти покрыты кислотоупорной замазкой толщиной 10—20 мм.

Легкоразлагаемое сырье (например, оболочные фосфориты) перерабатывают на двойной суперфосфат камерно-поточным методом и в таком случае можно использовать скоростной

турбинный смеситель (рис. 11.13). Кислота поступает в смеситель по штуцерам 6 в емкость, образованную обечайкой 5 и коническим днищем бункера 3, и через отверстия в днище стекает на лопатки турбинной мешалки 2. Фосфатное сырье подают по штуцерам 7 в бункер, далее оно ссыпается на турбинную мешалку, лопасти которой установлены под углом 45° . Мешалка укреплена на валу 4 и приводится в движение электродвигателем через редуктор и клиноремennую передачу 8. Смещение исходных веществ продолжается 3—5 секунд. Из корпуса 1 пульпа стекает в камеру. Детали, соприкасающиеся с кислотой или пульпой, изготавливают из легированных сталей.

Пример 11.6. Рассчитать мощность привода фрезы суперфосфатной камеры (карусели) по следующим данным; диаметр описываемой окружности D 3,12 м, угол обхвата карусели α_0 150° , скорость вращения 0,167 об/с (10 об/мин). Карусель приводится в движение через клиноремennую передачу, редуктор и зубчатую передачу. Максимальная высота заполнения камеры h_a 2,2 м. На поверхности фрезы расположено 12 ножей. Максимальная поверхность вырезаемого суперфосфата

$$F = \pi D h_a \frac{\alpha_0}{360} = 3,14 \cdot 3,12 \cdot 2,2 \frac{150}{360} = 8,98, \text{ м}^2.$$

По практическим данным, удельная мощность привода карусели составляет 0,6 кВт/м². Следовательно, мощность на валу карусели

$$N = 8,98 \cdot 0,6 = 5,388, \text{ кВт}.$$

При работе фрезы энергия расходуется на вырезание суперфосфата и его транспортировку в центральную трубу, являющуюся выгрузной точкой. Определим мощность, затрачиваемую на вырезание суперфосфата. Для этого необходимо рассчитать толщину срезаемого слоя суперфосфата δ (м).

Производительность камеры 50 т/ч, или 13,89 кг/с. При плотности суперфосфата 1290 кг/м³ объемная производительность

$$\omega = G_p / \rho = 13,89 / 1290 = 0,01077, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Из 12 ножей в зоне вырезки находится $z = 12 \cdot 150 / 360 = 5$ шт. Ширина резцов каждого ножа $b = 0,1$ м. Толщину вырезаемого слоя δ найдем по формуле

$$\delta = \frac{\omega}{\pi D n z b} = \frac{0,01077}{3,14 \cdot 3,12 \cdot 0,167 \cdot 5 \cdot 0,1} = 13,2 \cdot 10^{-3}, \text{ м}.$$

Ножи карусели испытывают следующие нагрузки: 1) силу сопротивления внедрению ножа P_0 (Н); $P_0 = K_2 F'$, где K_2 — удельное сопротивление внедрению ножа, кН/м²; F' — проекция площадки затупления на плоскость передвижения ножа, м²; 2) силу сопротивления резанию P_p (Н); $P_p = K_p F = K_p B z \delta$, где K_p — коэффициент сопротивления резанию; 3) силу трения ножей о материал $P_{тр}$ (Н); $P_{тр} = P_c f$, где f — коэффициент трения ножа по суперфосфату.

Суммарное усилие

$$P_{\Sigma} = P_c \cdot f + P_p + P_{тр} = K_2 F' (1 + f) + K_p B z \delta;$$

$$F' = B z 2 r_n,$$

где r_n — радиус заточки ножа; примем его равным 1 мм.

Коэффициент сопротивления резанию K_p составляет 130—250 кН/м², примем его равным в среднем 200 кПа. Коэффициент сопротивления внедрению ножа K_2 может изменяться от 330 до 450 кПа, принимаем среднее значение — 390 кПа; а коэффициент трения f равен единице. Таким образом, общее усилие

$$P_{\Sigma} = 390 \cdot 0,1 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 2 \div 200 \cdot 0,1 \cdot 5 \cdot 13,2 \cdot 10^{-3} = 2,1 \text{ кПа.}$$

Мощность на валу карусели рассчитаем по формуле

$$N_k = P_{\Sigma} v = P_{\Sigma} \pi D n = 2,1 \cdot 3,14 \cdot 3,12 \cdot 0,167 = 3,436, \text{ кВт.}$$

Расход энергии на транспорт суперфосфата N_T (кВт) найдем по формуле (7.6):

$$N_T = 9,8 \cdot 10^{-3} G_p L f, \text{ кВт.}$$

Средняя длина транспортирования равна длине дуги обхвата карусели

$$L = \pi D_k \alpha / 360 = 3,14 \cdot 2,60 \cdot 150 / 360 = 3,4, \text{ м.}$$

Мощность, расходуемая на транспортировку суперфосфата, при $f=2,5$ (см. табл. 7.4)

$$N_T = 9,8 \cdot 13,88 \cdot 3,4 \cdot 2,5 = 1156,9, \text{ Вт.}$$

Мощность на валу карусели

$$N = N_p + N_T = 3436 + 1156,9 = 4592,9, \text{ Вт.}$$

Для расчета мощности двигателя принимаем полученную ранее величину — 5,388 кВт. Полагая КПД электромотора $\eta_{дв} = 0,9$, КПД клиноременной передачи $\eta_k = 0,85$, КПД редуктора $\eta_p = 0,94$, КПД зубчатой передачи $\eta_a = 0,92$ и коэффициент запаса мощности $\beta_m = 1,2$, рассчитаем мощность электродвигателя:

$$N_{дв} = \frac{N \beta_m}{\eta_{\Sigma}} = \frac{5,388 \cdot 1,2}{0,9 \cdot 0,85 \cdot 0,94 \cdot 0,92} = 9,77, \text{ кВт.}$$

Принимаем к установке электродвигатель А02—62—8 с номинальной мощностью 10 кВт, скоростью вращения 725 об/мин и редуктор РЦД-350 с номинальной передаваемой мощностью при среднем режиме работы 16,8 кВт с передаточным числом $i=10$. При передаточном числе конической передачи $i=3$ необходима клиноременная передача с $i=725/10 \cdot 10 \cdot 3 = 2,42$.

11.5. ПЕЧИ

Аппараты, предназначенные для проведения высокотемпературных некаталитических процессов, называются печами. В печах осуществляются тепло- и массообменные процессы при температурах выше 700 °К: прокалка карбонатов (CaCO_3 , MgCO_3 и т. д.) и гидроокисей ($\text{Al}(\text{OH})_3$) в целях получения углекислого газа или окислов; окисление — обжиг хромовых руд для получения соединений Cr^{6+} , обжиг сульфидных руд или серы в целях получения сернистого газа или окислов металлов; восстановление — нагревание природных фосфатов или сульфатов с восстановителем для получения соответственного элементарного фосфора или сульфидов (Na_2S , BaS); дегидратация — удаление кристаллизационной или конституционной воды при нагревании, например получение триполифосфата натрия из смеси одно- и двухзамещенного фосфатов; спека-

ние — термическая обработка смеси исходных веществ для получения новых соединений или композиций; синтез — получение соединений из элементов, например окислов азота из азота и кислорода [62, 65—71].

Печи классифицируют по теплотехническим особенностям, конструкции и технологическому назначению. Классификация по теплотехническим особенностям включает:

1) тепловые эффекты процесса, осуществляемого в печи: а) экзотермические, в которых необходимая температура печи достигается за счет тепла химической реакции, без затраты топлива; б) эндотермические, требующие затраты тепловой или электрической энергии для поддержания заданной температуры;

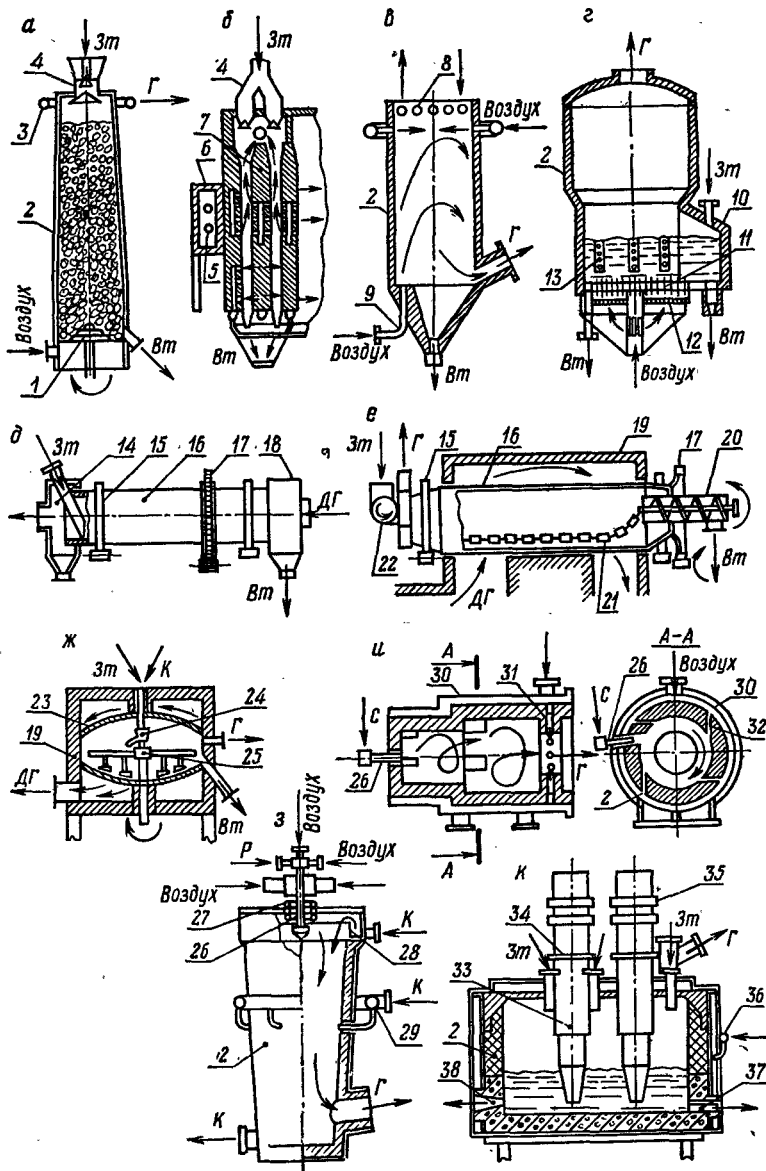
2) способ подвода тепла в печь с эндотермическим процессом: а) печи с внутренним обогревом, в которых тепло вводится в реакционное пространство и б) печи с наружным обогревом, в которых тепло подводят через стенку;

По виду источника тепла печи подразделяют на реакционные, в которых тепло выделяется за счет химических реакций (взаимодействие хлора с водородом, окисление сульфидов и фосфора), топливные, работающие на газообразном, жидком или твердом топливе, и электрические, подразделяемые в свою очередь на дуговые, сопротивления, индукционные и плазменные.

Виды печей. По конструктивным особенностям выделяют следующие виды печей. *Шахтные*, реакционное пространство которых представляет собой вертикальную шахту. Обрабатываемый материал загружают сверху и он опускается под действием силы тяжести (рис. 11.14, а, б).

Разновидностью шахтной печи является *щелевая печь* (рис. 11.14, б), реакционное пространство которой представляет собой двенадцать щелей между боковыми стенками и кернами 7 шириной 0,812 м, длиной 3,248 м и высотой 10,735 м. По высоте камеры разделены на четыре зоны: 1) верхняя — зона подсушки и подогрева, где материал нагревается до 550 °С за счет тепла дымовых газов, движущихся противоток; 2) ниже — зона прокалики, где материал (фосфорит) нагревается до 1000—1050 °С дымовыми газами, поступающими из топки б через каналы в стенках и кернах; 3) зона выдержки высотой 2,555 м, в которой заканчивается разложение карбонатов и которая служит запорной зоной; 4) внизу печи — зона охлаждения высотой 2,79 м, здесь прокаленный фосфорит охлаждается до 130 °С воздухом, движущимся поперечно движению материала.

Печь снабжена двумя топками, рассчитанными на сжигание газа в горелках. Дымовые газы и воздух после очистки от пыли выбрасываются в атмосферу.



При общем полезном объеме 319,2 м³ производительность щелевой печи в режиме сушки фосфорита составляет 23,6 кг/с (85 т/ч).

В распылительных (аэрофонанных печах) сжигаемый твердый материал взвешен в потоке газа и движется вместе с ним (рис. 11.14, в). Цилиндрический корпус 2 и коническое днище печи изнутри футерованы огнеупорным кирпичом, плоская крышка снабжена экраном 8, который охлаждается водой. Экран устраняет налипание колчедана на крышку. Основной поток воздуха со взвешенным пылевидным колчеданом поступает через сопло 9, в верхней части печи вводят вторичный воздух по радиальным или тангенциальным соплам. Доля вторичного воздуха составляет 41—55 % от его общего расхода. Процесс обжига флотационного колчедана ведут при температуре 700—1000 °С, огарок содержит 2,0 % серы, что соответствует 94—97 % степеней выгорания. Обжиговый газ содержит 8—11 % SO₂ и до 180 г/м³ пыли.

Диаметр распылительных печей для обжига флотационного колчедана равен 3,5—4,25 м, высота цилиндрической части 7,0—10,5 м. Интенсивность таких печей составляет 0,0825—0,1156 кг/м³ · с (800—1000 кг/м³ в сутки). Их достоинства: простота устройства и высокая интенсивность процесса. Недостатки распылительных печей заключаются в следующем: пригодны только для обжига сухого тонкоразмолотого флотационного колчедана, вследствие чего необходима сушка колчедана, получаемый газ имеет большую запыленность, а огарок высокую температуру.

В печах с кипящим слоем (КС) обрабатываемый твердый материал образует на распределительной решетке (поддоне) 11 псевдооживленный слой (рис. 11.14, г). В кипящем слое достигается высокая скорость тепло- и массообмена. Избыток тепла отводят с помощью охлаждающих элементов 13.

Рис. 11.14. Основные типы печей:

а — шахтная; б — шахтная щелевая; в — распылительная (аэрофонанная); г — кипящего слоя; д, е — вращающиеся барабанные с внутренним и наружным обогревом; ж — муфельная; з — вертикальная камерная; и — циклонная камерная; к — электродуговая спротивления; В — подача воздуха; 3т — загрузка твердых материалов; Вт — выгрузка твердых материалов; Г — вывод газов; ДГ — дымовые газы; К — подача кислоты; Р — подача фосфора; С — подача серы; 1 — разгрузочное устройство, улита; 2 — корпус с внутренней футеровкой; 3 — коллектор углекислого газа; 4 — загрузочное устройство; 5 — горелки; 6 — выносная топка; 7 — кери; 8 — экран; 9 — сопло для подачи пылевидного колчедана; 10 — загрузочная камера; 11 — под печи с соплами для подачи воздуха; 12 — воздухораспределительная решетка; 13 — охлаждающие элементы; 14 — загрузочная камера; 15 — бандаж; 16 — барабан; 17 — шестерня; 18 — разгрузочная камера (головка); 19 — каркас топки с футеровкой; 20 — разгрузочный шнек; 21 — цепь; 22 — забрасыватель; 23 — свод муфеля; 24 — распределитель кислоты; 25 — перемешивающее устройство; 26 — форсунка; 27 — охлаждающий змеевик; 28 — переливная чаша; 29 — коллектор кислоты; 30 — кожух; 31 — пережим с соплами для воздуха; 32 — тангенциальные каналы для воздуха; 33 — самоспекающийся электрод; 34 — электроддержатель; 35 — устройство для перепуска электродов; 36 — коллектор воды; 37 — летка для феррофосфора; 38 — летка для шлака.

Реакционный объем барабанных вращающихся печей (рис. 11.14, д) представляет собой горизонтальный или слабо-наклоненный (до 7°) цилиндр 16, внутри которого перемещается обрабатываемый материал.

В промышленности используют барабанные вращающиеся печи как с внутренним, так и с наружным обогревом (рис. 11.14, е). Последний вид печей применяют в производствах плавиковой кислоты, минеральных пигментов и кальцинированной соды.

Барабан печи для кальцинации бикарбоната 16 диаметром 2,8 м, длиной 24,5 м и толщиной стенок 32 мм помещен в нагревательной камере и омывается дымовыми газами. Он опирается бандажами 15 на ролики и приводится в движение от электродвигателя через редуктор и венцовую шестерню 17. Бикарбонат загружается в печь забрасывателем 22 на слой готовой соды, что устраняет его схватывание. Внутри барабана размещена тяжелая цель 21, снабженная ножами и предназначенная для устранения налипания соды на стенки барабана. Кальцинированная сода выгружается из барабана шнеком 20, а углекислый газ и водяные пары выходят из барабана через штуцер в головке печи. Барабан указанных размеров имеет производительность 215 т в сутки (24,9 кг/с).

В муфельных печах (рис. 11.14, ж) реакционное пространство чечевицеобразной формы образовано сводом 23 и подом муфеля, внутри которого расположено перемешивающее устройство 25. Это печи косвенного нагрева — муфель расположен в топке 19, их используют для получения сульфатов калия и натрия взаимодействием хлоридов с серной кислотой, окиси свинца из металла и ряда других веществ.

Муфельные печи для производства сульфата натрия (сульфата калия) и хлорида водорода изготавливают диаметром 4,25 и 5,50 м. Толщина пода печи равна 120 мм, а свода 30 мм. Последний выкладывают из шамотного кирпича или карборундовых блоков. Перемешивающее устройство работает при температуре до 750°C , в среде серной кислоты, хлорида водорода и кислых солей, поэтому его детали изготавливают из коррозионноустойчивых материалов, например крестовину-мешалки из высокохромистого чугуна, гребки из ферросилида или высокохромистого чугуна, а наконечники (зубья) из керамики или карборунда. Мешалка вращается со скоростью $n=0,75-1,25$ об/мин, мощность привода 4,5—6,8 кВт. Для обеспечения герметичности печь заключена в металлический кожух, который внутри футерован шамотным и глиняным (красным) кирпичом. Муфель обогревают дымовыми газами с температурой над сводом 1200° и под муфелем 800°C .

Достоинство муфельной печи — возможность получения хлорида водорода с концентрацией 30—50%. Недостатки:

низкая производительность — 0,116 кг/с (10 т/сут.) при диаметре 4,25 м и 0,139—0,162 кг/с (12—14 т/сут.) при диаметре 5,5 м; плохое использование тепла, так как газы выходят из печи с температурой 800 °С; значительное коррозионное разрушение пода печи и перемешивающего устройства.

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

Камерная вертикальная печь для сжигания фосфора имеет форму усеченного конуса, установленного основанием вверх (рис. 11.14, з). Фосфор распыляется с помощью пневматической форсунки 26. Для отвода тепла горения фосфора и защиты корпуса от воздействия горячих паров пятиоксида фосфора внутренние стенки печи орошают кислотой, которую подают в переливную чашу 28. Для поддержания необходимой концентрации кислоты в переливную чашу подают воду. Кроме того, часть кислоты подают в коллектор 29 и распыляют с помощью форсунок в объеме печи. Таким образом, в печи горит фосфор и испаряется вода, частично идут процессы абсорбции пятиоксида фосфора и образования фосфорной кислоты. Кислота с температурой 80 °С и концентрацией 75 % отводится на охлаждение, а смесь газов, паров воды и пятиоксида фосфора поступает в башню гидратации на абсорбцию фосфорного ангидрида.

Металлический кожух печи внутри футерован слоем полиизобутилена, диэбазовой плитки и кислотоупорного кирпича. Крышка печи изготовлена из кислотоупорной стали и охлаждается водой, протекающей по змеевикам. Печь диаметром 5,3 м в верхней части, 4,5 м в нижней и общей высотой 11,8 м рассчитана на сжигание 0,693 кг/с (2500 кг/ч) фосфора. Тепловая напряженность печи составляет 170 кВт/м³.

Камерная циклонная печь отличается от предыдущей организованным движением газа за счет ввода воздуха, необходимого для горения, по тангенциальным каналам. Газовый поток вращается вокруг продольной оси аппарата, что интенсифицирует смешение, диффузию и испарение, тем самым увеличивая скорость химических процессов.

В последние годы циклонные печи получили широкое распространение. Их используют в котельных агрегатах для сжигания газообразного и жидкого топлива, в химической промышленности для сжигания серы и отходов производства (сточные воды, шламы, газы). Печи данного типа испытаны в процессе сжигания фосфора и обесфторивания природных

фосфатов. Достоинства циклонных печей: высокая интенсивность процесса и, следовательно, малая занимаемая площадь и объем, высокая полнота сжигания, возможность работы с малым избытком воздуха, низкое аэродинамическое сопротивление.

Двухкамерные циклонные печи для сжигания серы (рис. 11.14, и) изготавливают производительностью 100, 150 и 240 т в сутки (1,156, 1,736, 2,775 кг/с), причем фактическая производительность может в 1,25 раза превышать расчетную, а тепловая нагрузка достигает 4,5 МВт/м³ (табл. 11.2). Серу распыляют с помощью механических форсунок 26, а воздух подают в зазор между кожухом 30 и обечайкой внутреннего корпуса, что уменьшает потери тепла в окружающую среду. По тангенциальным каналам (соплам) 32 воздух со скоростью 30—70 м/с поступает в форкамеру и камеру сжигания. Расход воздуха регулируется заслонками, установленными в каналах. Форкамера (диаметр 0,9 м, длина 1,15 м) служит в основном для испарения серы. Камера сжигания (диаметр 1,4 м, длина 4,15 м) снабжена пережимом (диаметр отверстия 0,9 м, ширина 0,250 м) для лучшего перемешивания воздуха и паров серы. Внутри пережима расположены радиальные каналы, по которым проходит часть воздуха для охлаждения пережима. Кроме того, воздух поступает в печь по осевому отверстию в передней стенке, снабженному закручивающим аппаратом и регистром.

Кожух и корпус печи изготавливают из углеродистой стали. Если температура корпуса выше 500 °С, то используют легированные стали. Корпус печи футерован листовым асбестом толщиной 5—10 мм и огнеупорным кирпичом, общая толщина футеровки 230 мм. Аэродинамическое сопротивление печи зависит от нагрузки и составляет 1700—3500 Па.

В руднотермических (электродуговых сопротивления) печах обрабатываемые вещества нагреваются и плавятся в ванне печи за счет пропускания электрического тока через шихту и расплав. Печи этого типа используют для производства элементарного фосфора и карбида кальция.

Электродуговая печь для восстановления фосфора из фосфоритов (рис. 11.14, к) состоит из вертикального цилиндрического корпуса (ванны) 2, через крышку которого проходят три самоспекающихся электрода 33, десяти течек для загрузки шихты и двух патрубков для отвода газов. В обечайке корпуса размещено три летки: две — для слива шлака 38 и одна — для слива феррофосфора 37. Корпус, крышка и днище печи охлаждаются водой. Корпус печи изготовлен из листовой стали толщиной 25 мм и усилен двутаврами, на которые опирается металлическая крышка. Корпус печи выше угольных блоков футерован шамотным кирпичом толщиной 0,925 м на вы-

Табл. 11.2. Сравнительная характеристика различных печей

Тип печи	Обрабатываемый материал	Величина час-тунд, мм	Процесс	Время пребывания фазы	Температура, °С	Тепловая нагрузка, кВт/м ²	Удельная производительность, кг/м ² ·ч	
Шахтная	известняк } кокс }	30—150	кальцинация	4—18 ч (тв.)	1100—1200	35—56	23—46*	
		10—15	восстановление	5—7 ч (тв.)	800—1000	180—230	270—340	
Аэрофонтанная	сульфат натрия } кокс }	до 1,0	обжиг	6—10 с (газ)	800—1000	53—67	33—42	
КС	колчедан } фосфорит }	до 1,0	обжиг	6—10 с (газ)	700—850	59—116	37—75	
		1—5	обесфторивание	1—2 ч (тв.)	1200—1250	195—300	180—210	
Барabanная вращающаяся	хромит } доломит } сода }	до 0,08	окисление	1—1,5 ч (тв.)	1100—1250	40—60	34—50	
		до 0,3	восстановление	1—2,0 ч (тв.)	1000—1100	30—40	12—15**	
		до 3,0						20—30
		5—15	обесфторивание	4—8 ч (тв.)	1400—1500	45—72	7—11	
			вытеснение	1—2 ч (тв.)	220—300		~30**	
Камерная	плавиковый шпат, серная кислота } бикарбонат }	до 0,15	кальцинация	1—2 ч (тв.)	~150	30—35***	35—40**	
			сжигание	4—10 с (газ)	1300—1800	80—200	12—30	
			сжигание	4—5 с (газ)	1100—1200	~100	~40	
Циклонная	сера } фосфорит }	до 1,0	сжигание	3·10—3 с (газ)	1200—1300	3600—4500	1400	
			обесфторивание	0,07 с (газ)	1550—1600	~6000	1000	
Руднотермическая	фосфорит } кварцит } кокс }	10—50	восстановление	8—12 ч (тв.)	1600—1800	150—180	8—10 фосфора 90—110 шихты	

* По извести, содержащей 85% СаО; ** в кг/м²·ч; *** в кВт/м².

соту 2,6 м. Свод печи выполнен из бетона, пространство между сводом и крышкой заполнено песком. Днище печи плоское (толщина 32 мм), к нему приварены швеллера, образующие каналы, по которым пропускают воду для охлаждения. Крышку изготавливают из нержавеющей стали, она состоит из трех секторов, соединяемых между собой фланцами. Сектора электрически изолированы друг от друга и корпуса печи. Электрический ток подводят к электродам 33 с помощью электродержателей 34, а механизм перепуска 35 служит для изменения положения электродов в печи.

Днище печи и боковые стенки в зоне расплава на высоту 1,65 м футерованы угольными блоками (толщина днища 1,1 м, боковых стенок 0,925 м). Между футеровкой, днищем и корпусом печи имеется зазор (60 мм), заполненный подовой массой.

Печи данного типа обозначаются следующим образом: метод нагрева — руднотермический (Р), форма ванны — круглая (К), герметичность ванны — закрытая (З), мощность печи — в мегаваттах (МВт), назначение печи — фосфорная (Ф), буква М добавляется для модернизированных моделей. В Советском Союзе используют печи РКЗ-48Ф, РКЗ-48Ф-М1 и РКЗ-72Ф, разрабатываются печи большей мощности. Печь РКЗ-48Ф-М1 (диаметр ванны 8,5 м, глубина 4,9 м, мощность 48 МВт) снабжена тремя электродами диаметром 1,4 м и рассчитана на получение 2,5 т фосфора в час.

Полочно-гребковые, ретортные, туннельные и карусельные печи в неорганических производствах используют значительно реже, чем рассмотренные выше.

Шахтные пересыпные печи, работающие на твердом топливе, применяют в содовой промышленности для одновременного получения извести и углекислого газа. В таких отраслях промышленности, как металлургическая, строительных материалов и пищевая, где не нужен углекислый газ, часто используют шахтные печи на газовом топливе. Кроме того, их применяют для окислительной прокалики, восстановления и хлорирования гранулированных шихт с величиной частиц 5—50 мм.

Устройство шахтных печей. Известняк и кокс загружают в печь с помощью *загрузочного механизма* (рис. 11.15), состоящего из двух конусов, которые открываются поочередно. Нижний конус (распределительный) 2 в плане имеет спиральную форму и снабжен изогнутым стальным листом — отбойником 1. Для равномерного распределения шихты по сечению печи распределительный конус после каждой загрузки поворачивается на 60° вместе с воронкой 13, которая опирается на ролики 7, закрепленные в подшипниках 8, и приводится в движение электродвигателем через редуктор и зубчатые шестерни 14 и 9. Для уменьшения выброса газов стык между воронкой и

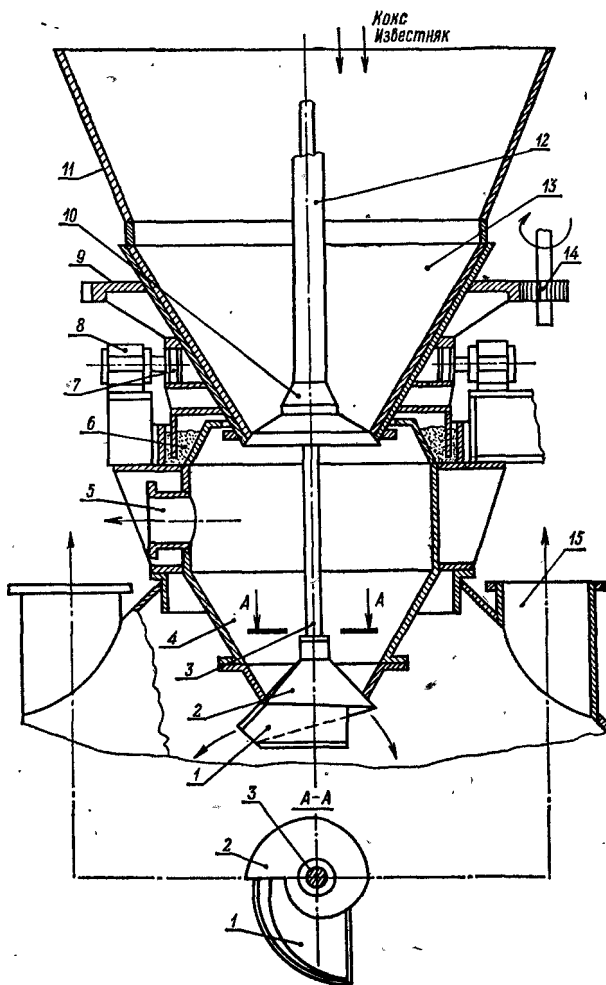


Рис. 11.15. Загрузочное устройство шахтной печи.

промежуточным бункером 4 снабжен лабиринтным уплотнением 6. Газы из бункера отсасываются по штуцерау 5.

Кокс и известняк загружают в бункер 11, откуда они попадают в воронку 13. При открывании клапана 10, связанного с тягой 12, шихта сыпается в промежуточный бункер, а после закрытия клапана 10 опускается нижний конус, укрепленный на штоке 3, и порция шихты падает в печь. Газы из печи выходят по штуцерам 15.

Разгрузочное устройство состоит из улиты, кольцевого транспортера, течки и лопастного выгрузателя, по конструк-

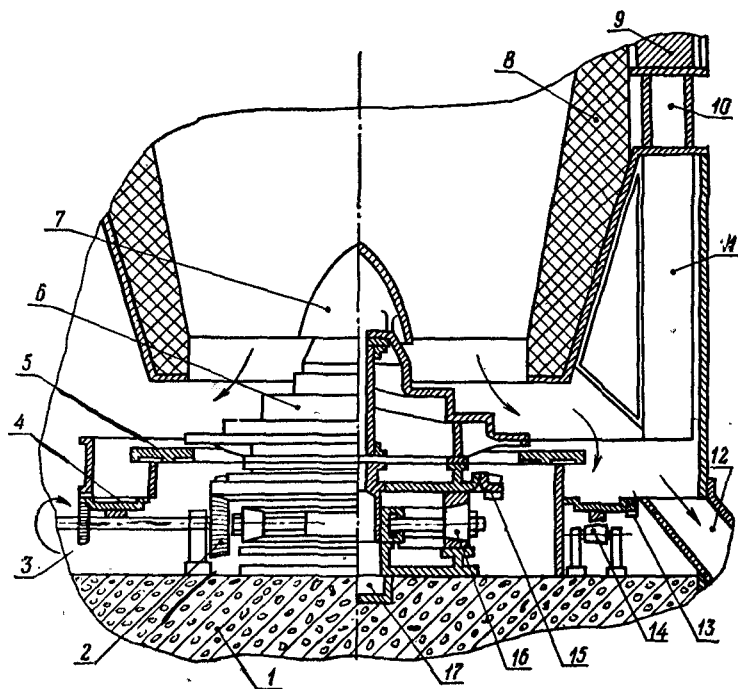


Рис. 11.16. Устройство для выгрузки извести из шахтной печи.

ции аналогичного барабанному питателю (см. рис. 7.10, г). Улита 6 (рис. 11.16) имеет спиральную форму с наклонными плоскостями. Над ней установлен съемный колпак 7, под который по центральной трубе поступает воздух, подаваемый вентилятором в камеру 17. Остальное количество воздуха подают вторым вентилятором между улитой и кожухом печи. Улита опирается на восемь конических катков 16 и приводится в движение от электродвигателя через червячный редуктор, шестерню 2 и венцовую шестерню 15 со скоростью 0,5—2,0 об/ч. Благодаря вращению улиты обожженная известь выгружается равномерно по всему сечению печи. Она сыпается на кольцевой стол 5 и далее на кольцевой транспортер 4. Последний опирается на катки 14 и приводится в движение зубчатой передачей, образованной шестернями 3 и 13. По течке 12 известь поступает в один или два лопастных выгрузателя, установленных для уменьшения потерь воздуха из печи.

Улита и колпак разгрузочного устройства отлиты из чугуна СЧ16-36. Улита состоит из двух половин, скрепленных болтами. Кольцевые рельсы, катки, шестерни и бандажы изготавливают из углеродистых сталей. Корпус шахтной печи ци-

цилиндрической или цилиндрической формы сварен из листовой стали толщиной 12 мм, внутри он футерован шамотным или хромомagneзитовым кирпичом 8 толщиной 340 мм и красным (глиняным) кирпичом 9 толщиной 230 мм. Зазоры между слоями футеровки шириной 25 мм и между вторым слоем и корпусом печи шириной 60 мм заполнены шамотной крошкой. Они необходимы для уменьшения температурных напряжений, возникающих в кладке из-за различия температуры по толщине футеровки, а шамотная крошка уменьшает потери тепла.

Корпус и футеровка опираются на чугунное кольцо 10, расположенное на восьми чугунных колоннах 11, которые установлены на бетонный фундамент 1.

Для обжига известняка и мела используют шахтные печи с внутренним диаметром 3,5—6,2 м и высотой 12,9—22,5 м, производительность их равна 75—310 т извести в сутки (в пересчете на 85 % CaO), а удельная производительность 23—46 кг/м³·ч (см. табл. 11.2). Удельный расход тепла изменяется от 4340 до 5493 кДж/кг извести.

Шахтные печи достаточно просты по устройству, пригодны для обжига мелкокусковых (5—15 мм) и крупнокусковых (100—150 мм) материалов, обладают хорошим тепловым КПД (до 75 %) и невысоким аэродинамическим сопротивлением (до 3 кПа). Недостатки шахтных печей: низкие удельная производительность и тепловая нагрузка — обусловлены особенностями их устройства и теплового режима.

Устройство печей с кипящим слоем. Печи КС применяют для обжига сульфидных руд и колчедана, термической обработки фосфоритов и антрацита, сжигания сточных вод и шламов. Число слоев печей КС изменяется от одного до трех, но наибольшее распространение получили однослойные печи. Они проще по конструкции и обладают меньшим аэродинамическим сопротивлением.

Производительность типовых однослойных печей КС для обжига колчедана (рис. 11.14, г) равна 1,156, 2,312 и 5,22 кг/с (100, 200 и 450 т/сут) стандартного колчедана, содержащего 45 % S. Подовая интенсивность обычно составляет 8—10 т/м²·сут (0,0926—1,156 кг/м²·с), а удельная производительность достигает 37—45 кг/м³·ч (см. табл. 11.2).

По тепловой нагрузке и удельной производительности печи КС почти не отличаются от печей пылевидного обжига. Они получили широкое распространение благодаря тому, что могут стабильно работать при изменении величины частиц и влажности колчедана, не требуют сушки колчедана; вследствие большого времени пребывания колчедана (до 30 мин) обладают значительной инерцией, что позволяет получать газ постоянного состава с высокой концентрацией SO₂ (13—15 %) и высокой степенью выгорания серы (97—98 %). Недостатки

Табл. 11.3. Техническая характеристика печей КС для обжига флотационного колчедана

Показатели	Единицы измерения	КС-200	КС-450	ДКСМ-130	
				нижняя зона	верхняя зона
Производительность	т/сут	200	450	130	
Площадь дутьевого пода:	м ²				
общая		20,1	51	12,3	
провальной части форкамеры		1,04	2,7	2,0	
Подовая интенсивность	т/м ² ·сут	10	8,8	11,3	
Удельная производительность	кг/м ³ ·ч	37,7	41,6	56,2	
Диаметр цилиндрической части:	м				
нижней узкой		4,750	8,144	4,620	4,800
верхней высокой		6,200	8,840		
Внутренний объем	м ³	222	450	49,23	47,30
Расход воздуха	тыс. м ³ /ч	19—20	43—45	13,4	
Время пребывания газа в печи	с	9,5	9,0	2,8	5,0
Общее сопротивление	кПа	12,3—13,5	14,5—17,0	6,35	5,20
Количество дутьевых сопел	шт.	847	2691	920*	
Живое сечение сопел	%	2,08	2,30	2,11	
Поверхность охлаждающих элементов	м ²	32	77		

* Отверстия диаметром 23 мм.

печей данного типа: большой унос огарка (до 90 %) и высокое аэродинамическое сопротивление печи (11—17 кПа). Технические характеристики печей КС приведены в табл. 11.3.

Специалисты Научно-исследовательского института по удобрениям и инсектофунгицидам имени Я. В. Самойлова (НИУИФ) разработали конструкцию печи с двумя кипящими слоями типа ДКСМ, которая обладает следующими достоинствами: более высокой удельной производительностью, чем однослойные, компактностью и меньшим выходом мышьяка в газовую фазу. В печи объединены в один агрегат собственно печь КС, котел-утилизатор и первая ступень очистки газа от пыли. На втором слое газ охлаждают до 440—450°С, после

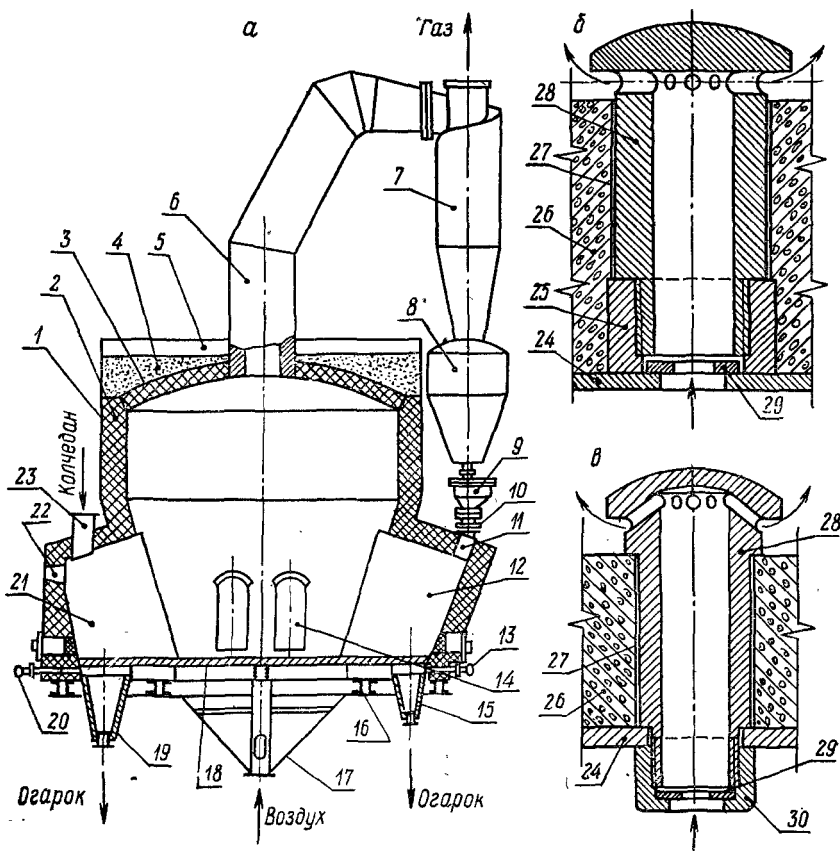


Рис. 11.17. Печь с двумя кипящими слоями типа КСЦВ для обжига колчедана:

a — общий вид; *б, в* — виды сопел для распределения воздуха.

прохождения циклонов он содержит 20—25 г/м³ пыли, что позволяет направлять его прямо в огарковый электрофильтр.

Печь типа КСЦВ (с кипящим слоем и циклоном возврата) (рис. 11.17, *a*) снабжена циклоном 7 для очистки обжигового газа от огарковой пыли, в результате чего устраняется забивание пылью котла-утилизатора, увеличивается степень выгорания серы и подовая интенсивность печи.

Металлический корпус печи 1 защищен от действия высоких температур двухслойной футеровкой 2. Внутренний слой выполнен из шамотного кирпича, а наружный из легковесного шамота или диатомового кирпича. Зазор между корпусом и футеровкой (ширина 10—20 мм) и между сводом 3 и крышкой 5 заполнен асбестом или шамотной крошкой 4. Огарковая

пыль из циклона ссыпается в бункер 8 и далее через затвор 9 и течку 11 попадает в камеру возврата огарка 12. Между затвором и течкой размещен компенсатор 10.

Под 18 печи выполнен из жаростойкого бетона 26, на поду размещены сопла (грибки) 28 для распределения воздуха (рис. 11,17, б). К металлической плите 24 приварены бобышки 25, в которые закреплены грибки. Между бетоном и грибками расположен слой бумаги 27. Грибок может крепиться к плите гайкой 30 (рис. 11,17, в). Шайбами 29 регулируется расход воздуха по отдельным грибкам.

Форкамера 21 и камера возврата огарка снабжены провальной решеткой. Здесь воздушные сопла размещены на прямоугольных трубах, установленных с зазором 30—70 мм, через которые огарок сыпается в бункера 19 и 15. Воздух в форкамеры поступает из коллекторов 20 и 13. В окнах 14 установлены охлаждающие элементы. Воздух для горения подают в конус 17, из которого он поступает в сопла провальной решетки.

Колчедан подается в печь по патрубку 23, а в люке 22 устанавливаются горелки для разогрева печи перед пуском. Печь опирается на раму 16, изготовленную из швеллеров.

Технологический и аэродинамический расчет печи описан в литературе [66].

Устройство барабанных вращающихся печей. Эти печи используют для процессов окисления, кальцинации, восстановления, обесфторивания, прокалки и разложения. По тепловой нагрузке и удельной производительности они уступают печам других типов (табл. 11.2). Как правило, у них большие тепловые потери и высокая металлоемкость. Широкая область использования барабанных печей объясняется следующими их достоинствами: надежностью в работе, возможностью использования любого вида топлива и обработки веществ любого гранулометрического состава от пылевидных до кусковых, обработки расплавов и смесей твердых веществ с расплавами при параллельном токе или противотоке материала и греющих газов. Барабанные вращающиеся аппараты используют также в качестве сушилок, холодильников, грануляторов, растворителей, кристаллизаторов и транспортных труб.

Барабанная вращающаяся печь (рис. 11.18) состоит из барабана 6, опирающегося бандажами 5 на опорные ролики 12 (опорная станция). Барабан приводится в движение электродвигателем 11 через редуктор и венцовую шестерню 7 (приводная станция). Продольное смещение барабана устраняется упорными роликами 10 (опорно-упорная станция).

Загрузку печи осуществляют через течку 2, укрепленную в коробе 1, а выгрузку через разгрузочный короб 8. Стыки

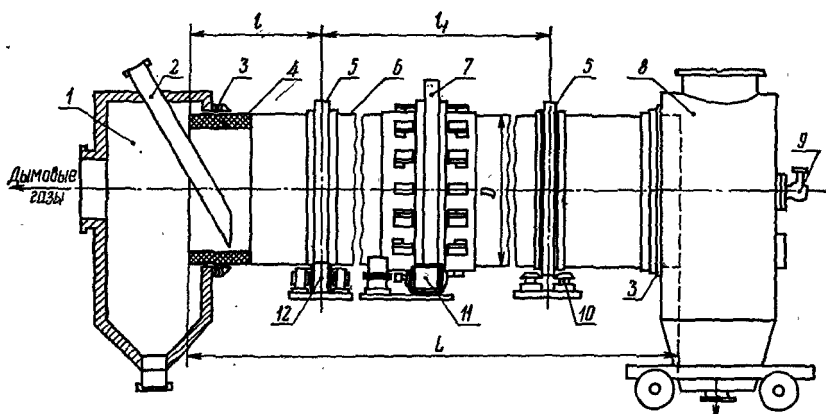


Рис. 11.18. Барабанная вращающаяся печь.

между вращающимся барабаном и неподвижными коробами герметизируют уплотнениями 3.

Печь внутри футерована огнеупорами 4. Толщина футеровки и сорт огнеупоров определяются температурой и химической активностью среды. Дымовые газы для обогрева печи либо поступают из отдельной топки, либо их получают сжиганием топлива в самой печи. В последнем случае в откатной головке печи размещают форсунки, или горелки, 9 для сжигания топлива. В головке печи (топке) размещены смотровые окна, люки и автоматика для контроля горения факела.

Основные размеры барабанных вращающихся печей сведены в табл. 11.4.

Для процесса обесфторивания природных фосфатов используют более крупные печи — диаметром 3,6 м и длиной 100 м.

Рассмотрим устройство основных узлов барабанных печей. Бандажи 4 (рис. 11.19, а) крепят к барабану 1 с помощью чугунных башмаков 3. Корпус печи укрепляют кольцами 2.

Венцовая шестерня 7 (рис. 11.19, б) укреплена на упругих пластинах 6, которые присоединены к барабану 1 на подкладках 5. Такое крепление устраняет дополнительные напряжения от изменений линейных размеров барабана при нагревании. Шестерню изготавливают из чугуна или углеродистой стали. Твердость материала венцовой шестерни должна быть выше, чем ведущей малой шестерни.

Опорные ролики 12 (рис. 11.19, в) располагаются под углом 60°. Они вращаются в подшипниках 11, укрепленных на станине 10. Ширина роликов обычно на 30 мм больше ширины бандажа. Число опор зависит от длины барабана (см. табл. 11.4), расстояние между опорами — 20 м.

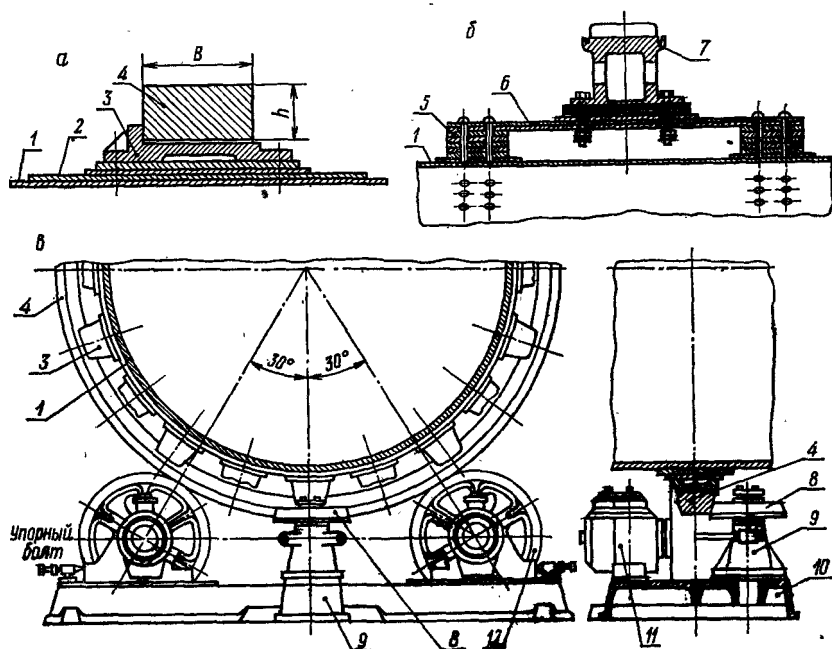


Рис. 11.19. Узлы барабанной вращающейся печи:
 а — крепление банджа; б — крепление венцовой шестерни; в — опорно-упорная станция.

Барабан печи устанавливают горизонтально или с наклоном до 3° , осевое смещение его устраняется упорными роликами 8, вращающимися в подшипниках 9.

Барабан печи изготавливают из углеродистых сталей, его толщина зависит от диаметра барабана (см. табл. 11.3). Однако барабаны печей с наружным обогревом, работающие в коррозионной среде (например, при разложении плавикового шпата серной кислотой), изготавливают из легированных сталей 08X18N10T или 06X23N28M3ДЗТ, что увеличивает срок их службы.

Для уменьшения выброса дымовых газов из печи и подсоса воздуха в печь используют лабиринтное, аэродинамическое, торцевое и сальниковое уплотнения.

Лабиринтное уплотнение (рис. 11.20, а) состоит из неподвижных 5 и подвижных 4 колец. Подвижные кольца приварены к диску 3, который прикреплен к уголку 2, вращающемуся вместе с барабаном 1, а неподвижные — к диску 6, который крепится к коробке или головке печи. Изменение направления движения газа в лабиринте увеличивает сопротивление, тем самым уменьшая подсос воздуха.

Табл. 11.4. Основные размеры барабанных вращающихся печей

Диаметр D_B , мм	Длина L , мм/Число опор z , шт.	Максимальная нагрузка на опорную станцию P , кН	l , мм	l_1 , мм	Толщина корпуса S , мм	Масса, т	Скорость вращения n , рад/с (об/мин)
1000	8000/2	100	1650	4700		5,3	0,170 (1,62)
	12 000/2	100	2500	7000	8	6,1	0,212 (2,02)
	16 000/2	100	3350	9300		6,9	0,315 (2,91)
1200	12 000/2	160	2500	7000	10	8,4	
	16 000/2	160	3350	9300		9,6	
1600	12 000/2	250	2500	7000		15,4	
	16 000/2	250	3350	9300	12	17,3	
	20 000/2	250	4150	11 700		19,2	0,085 (0,81)
2200	18 000/2	400	3750	10 500		35,2	0,112 (1,07)
	22 000/2	400	4150	11 700	16	36,9	0,170 (1,62)
	25 000/2	630	5000	15 000			
	35 000/3	800	4500	26 000	16	115,0	
2500	20 000/2	630	4150	11 700		90,0	
	30 000/2	1000	5000	20 000	20		
	4000/3	1250	5000	30 000			
2800	35 000/3	1000	4500	26 000			
	45 000/3	1250	5500	34 000	20	180,0	
	55 000/4	1600	5000	45 000		210,0	
3000	35 000/3	1250	4500	26 000		181,0	0,071 (0,68)
	45 000/3	1600	5500	34 000	22	201,0	0,106 (1,01)
	60 000/4	2000	6000	48 000			0,140 (1,34)
3200	50 000/3	1600	5500	39 000	26	262,0	0,212 (2,02)
	60 000/4	2000	6000	48 000			
3500	60 000/4	1600	6000	48 000		315,0	
	70 000/4	2000	5000	60 000	26		

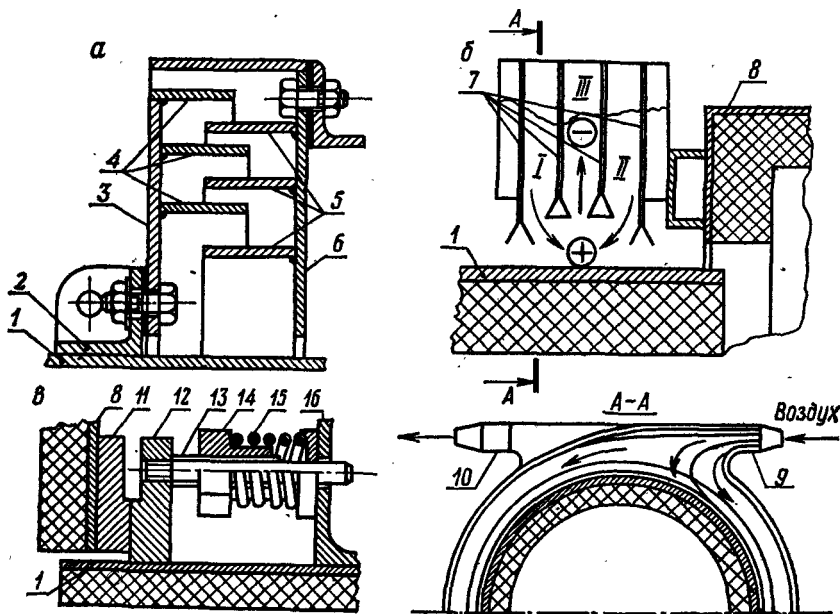


Рис. 11.20. Уплотнения барабанных печей:
 а — лабиринтное; б — аэродинамическое; в — торцевое.

Аэродинамическое уплотнение (рис. 11.20, б) используют в тех случаях, когда допустим значительный подсос воздуха в печь. Кольца 7, прикрепленные к корпусу 8, образуют три камеры вокруг барабана 1. В I и II камеры подают воздух от вентилятора по штуцеру 9, а из камеры III, соединенной со штуцером 10, воздух выходит.

Столкновение струй, выходящих из I и II камер, создает у поверхности барабана повышенное давление (+), которое препятствует выбросу дымовых газов и пыли из печи.

Более сложную конструкцию имеет *торцевое уплотнение* (рис. 11.20, в). Оно обеспечивает лучшую герметизацию печи, чем уплотнения других типов, но требует высокой точности изготовления трущихся колец, нуждается в смазке и чувствительно к пыли. Неподвижное кольцо 11 крепят к головке печи или корпусу. Подвижное кольцо 12 соединено с кольцевым уголком 16 шпильками 13, которые свободно проходят в отверстия уголка. Пружины 15, упирающиеся в кольцо 16 и гайки 14, прижимают подвижное кольцо к неподвижному. Кольцо 16 жестко закреплено на барабане 1.

Барабанные вращающиеся печи изготавливают в соответствии с ГОСТ 11875—73.

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

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

$$n = \frac{KL^2\pi}{\tau D_6 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (11.1)$$

где K — коэффициент, зависящий от характера движения материала; при параллельном токе K равно 0,7 для тяжелых материалов и 0,2 для легких, при противотоке $K=0,5$ для тяжелых и 2,0 для легких материалов; L — длина барабана, м; D_6 — внутренний диаметр барабана по футеровке, м; α — угол наклона барабана, град.

Фактическая скорость вращения должна соответствовать ГОСТ 11875—73 (см. табл. 11.4).

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

$$D_6 = \sqrt{\frac{\omega_r}{0,785v_d}}, \quad (11.2)$$

где ω_r — расход дымовых газов, м³/с; v_d — допустимая скорость газа, м/с (при параллельном токе принимается до 1,5 м/с и при противотоке до 2,5 м/с).

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

$$M_{кр} = 9,8L(G_6 + G_\phi)A + 7,69D_6^2\gamma_n(X + A)L, \quad (11.3)$$

где G_6 — погонная масса ненагруженного барабана, кг/м; G_ϕ — погонная масса футеровки, кг/м; A — приведенный коэффициент трения; ϕ — коэффициент заполнения барабана материалом; γ_n — насыпная масса материала, кг/м³; X — расстояние от центра тяжести материала до вертикальной оси барабана, м.

По заводским данным принимаются следующие значения:

$D_в$, мм	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
G_6 , кг/м	1100	1300	1550	1900	2100	2500	2750
A	0,004	0,0042	0,0044	0,0045	0,0046	0,0048	0,005

Погонную массу футеровки G_ϕ (кг/м) можно рассчитать по уравнению

$$G_\phi = 0,785\rho_\phi(D_в^2 - D_6^2), \quad (11.4)$$

где $D_в$ — внутренний диаметр барабана, м; ρ_ϕ — плотность футеровки, кг/м³ (диас — 2380, шамот — 2270, хромомagneзит — 3200, карбонунд — 2500).

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

$$N_{дв} = \frac{M_{кр} n \beta_m}{1000 \eta_{\Sigma}}, \quad (11.5)$$

где η_{Σ} — общий КПД зубчатой передачи, редуктора и электро-двигателя; β_m — коэффициент запаса мощности.

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

Суммарный изгибающий момент

$$M_{изг} = \frac{PL}{47} + \frac{P_B l_2}{4}, \quad (11.6)$$

где P — вес барабана, футеровки и материала, Н; P_B — вес венцовой шестерни, Н; l_2 — расстояние между бандажами, м.

Расчетный приведенный момент

$$M_p = 0,35 M_n + 0,65 \sqrt{M_n^2 + M_{кр}^2}. \quad (11.7)$$

Условие прочности барабана

$$\sigma = M_p / W \leq \sigma_d; \quad W = 0,785 (D_B + S)^2 S.$$

Для нормальной работы барабана необходимо, чтобы прогиб, отнесенный к 1 м длины, не превышал 0,3 мм ($3 \cdot 10^{-4}$ м). Суммарный прогиб от действия распределенной и сосредоточенной нагрузки f (м) найдем по формуле

$$f = \frac{5PL^3}{384EI} + \frac{P_B l_2^3}{48EI}, \quad (11.8)$$

где I — момент инерции барабана, $м^4$; $I = \pi D_B^3 S / 8$; E — модуль упругости материала барабана, $Н/м^2$.

Условием нормальной работы опорной и опорно-упорной станции является соблюдение неравенства

$$(P + P_B) / z \leq P_{доп},$$

где z — число опорных станций; $P_{доп}$ — допускаемая нагрузка на станцию, Н (см. табл. 11.4).

Пример 11.7: Рассчитать мощность привода барабанной вращающейся печи по следующим данным: D_B 2,8 м, L 55 м, n 0,106 рад/с, число опор z 4, коэффициент заполнения ϕ 0,1, насыпная плотность шихты γ_n 1200 кг/м³, масса барабана 210 т, толщина барабана S 20 мм, общая толщина футеровки δ 0,200 м, плотность футеровки ρ_f 2270 кг/м³.

Внутренний диаметр барабана

$$D_в = D_B - 2(S + \delta) = 2,80 - 2(0,2 - 0,02) = 2,36 \text{ м.}$$

Погонная масса ненагруженного барабана

$$G_6 = 210 : 55 = 3,818, \text{ т/м.}$$

Погонную массу футеровки рассчитаем по формуле (11.4):

$$G_{\phi} = 0,785 \cdot 2,270 (2,76^2 - 2,36^2) = 3,649, \text{ т/м.}$$

Приближенное значение X (м) можно найти из соотношения

$$X = 0,5 D_6 (1 - \varphi) \sin \rho = 1,18 (1 - 0,1) \sin 40^\circ = 0,683,$$

где ρ — угол естественного откоса шихты.

В соответствии с заводскими нормальными для барабана диаметром 2,8 м коэффициент трения $A = 0,0055$.

По формуле (11.3) крутящий момент $M_{кр} = 9,8 \cdot 55 (3818 + 3649) \cdot 0,0055 + 7,69 \cdot 2,36^2 \cdot 0,1 \cdot 1200 (0,683 + 0,0055) = 216761, \text{ Нм.}$

Принимая коэффициент запаса мощности $\beta_M = 1,2$ и суммарный КПД $\eta_{\Sigma} = 0,78$, найдем мощность двигателя:

$$N_{дв} = \frac{216761 \cdot 0,106 \cdot 1,2}{0,78 \cdot 1000} = 35,3, \text{ кВт.}$$

Нагрузка на одну опору

$$(P \nrightarrow P_B) / z = \frac{1}{4} (210 \nrightarrow 3,649 \cdot 55 \nrightarrow 0,785 \cdot 2,36^2 \cdot 0,1 \cdot 1,2 \cdot 55) \times \\ \times 9,81 = 1078,1, \text{ кН,}$$

что меньше допускаемой величины, которая равна 1600 кН (табл. 11.4).

Пример 11.8. Рассчитать потери тепла барабанной вращающейся печью по данным предыдущего примера, если температура в зоне горения равна 1400° и на выходе из печи — 680°C .

Расчет выполним по упрощенной методике, полагая, что коэффициент теплоотдачи от газа к футеровке, по сравнению с общим коэффициентом теплопередачи, велик и его можно не учитывать, так же как и тепловое сопротивление металлического корпуса печи.

Толщина шамотной футеровки S 180 мм, ее теплопроводность λ 1,1 Вт/м \cdot град; толщина асбестовой прослойки 20 мм, λ 0,144 Вт/м \cdot град. Коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху найдем по приближенной формуле:

$$\alpha = 9,3 + 0,058 t_{ст} = 9,3 + 0,058 \cdot 150 = 18, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град,}$$

где $t_{ст}$ — температура стенки, $^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{18} \nrightarrow \frac{0,02}{0,144} \nrightarrow \frac{0,18}{1,1}} = \frac{1}{0,3585} = 2,789, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.}$$

Средняя разность температур при температуре окружающего воздуха 20°C

$$\Delta T = \frac{(1400 - 20) - (680 - 20)}{2,3 \lg \frac{1400 - 20}{680 - 20}} = 977^\circ.$$

Поверхность барабана

$$F = 0,785D_B^2L = 0,785 \cdot 2,8^2 \cdot 55 = 483, \text{ м}^2.$$

Потери тепла

$$Q = KF\Delta T = 2,789 \cdot 483 \cdot 977 = 1318, \text{ кВт.}$$

Проверим принятую температуру стенки:

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{в}} \div \frac{K}{\alpha} \Delta T = 20 \div \frac{2,79}{18} \cdot 977 = 151,5^\circ.$$

Расчетная температура близка к принятой.

Устройство циклонной печи. Циклонная печь для обесфторивания фосфоритов (рис. 11.21) представляет собой верти-

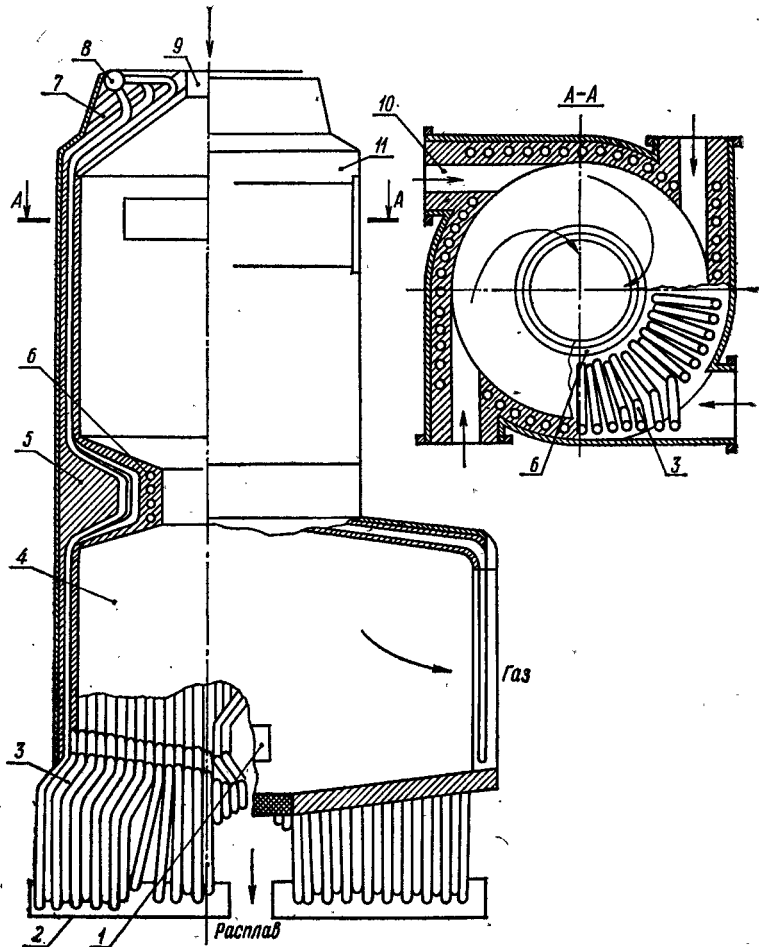


Рис. 11.21. Циклонная печь для обесфторивания фосфоритов.

кальный цилиндр 11 с четырьмя тангенциальными штуцерами 10 для установки газовых горелок и осевым штуцером 9 для подачи размолотого фосфорита. Циклон установлен на сепараторе 4, предназначенном для отделения расплава от газа. На выходе циклон снабжен диафрагмой 5, уменьшающей унос непропавленной фосфоритной муки. Из сепаратора расплав по летке 1 сливают на грануляцию. Газы поступают из горелок со скоростью 100—110 м/с и нагревают фосфориты до 1550—1600 °С. Высокая температура ускоряет обесфторивание, продукт содержит обычно менее 0,2 % F.

Вся внутренняя поверхность циклона и сепаратора экранирована трубами 3 из стали 20, шаг которых (47,5 мм) лишь незначительно превышает наружный диаметр труб — 40 мм. Горловина диафрагмы дополнительно экранирована змеевиком 6. Все трубы присоединены к коллекторам 2 и 8, по которым проходит вода. Внутренняя поверхность экранов имеет защитную хромомagneзитовую обмазку толщиной 25 мм, пространство между экраном и кожухом заполнено пеношамотом 7 для уменьшения потерь тепла. В результате интенсивного охлаждения на внутренней поверхности циклона и сепаратора образуется слой застывшего фосфорита (гарнисаж), защищающий конструкцию от действия высоких температур.

Циклонная печь обладает высокой удельной производительностью (см. табл. 11.2) и тепловой нагрузкой, но низким полезным использованием тепла, которое не превышает 25 %. Тепло отходящих газов используют для выработки пара: на 1 т обесфторенных фосфатов получают 3—4 т пара давлением 1,9—3,8 МПа. Производительность печи диаметром 1,6 м и высотой цилиндрической части 3,2 м 1,67 кг/с (6 т/ч). Потери тепла в окружающую среду составляют 5—10 %.

Глава 12. ГРАНУЛИРОВАНИЕ

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

Широкое использование процессов гранулирования в основной химической промышленности требует от инженеров-

технологов знания устройства и принципов работы грануляторов различного типа.

По количеству ретура (возврата) материала, поступающего в гранулятор со стадий дробления и отсева, методы гранулирования подразделяют на ретурные и безретурные [72—74].

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

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

Величина и форма гранул может быть различной. Чаще всего стремятся получить частицы шарообразной формы, однако при гранулировании прессованием и экструзией образуются гранулы неправильной формы. Величина частиц минеральных удобрений обычно равна 1—4 мм. В ряде случаев получают частицы величиной 10—15 или 15—20 мм, например при гранулировании фосфоритов для обжига на агломерационной ленте или сульфата натрия и угля для восстановления в шахтной печи.

Порошкообразные материалы (с) гранулируют следующими методами: равномерным увлажнением материала с одновременным окатыванием в барабанном (БГ), тарельчатом (ТГ) или шнековом (ШГ) грануляторах; напылением раствора или суспензии (р) на поверхность твердых частиц с последующей или одновременной кристаллизацией в аппаратах с кипящим слоем (КСГ) или барабанном грануляторе-сушилке (БГС); прессованием на валковых прессах (ВП) с последующим дроблением прессата.

Типовая схема гранулирования (рис. 12.1, а) порошков включает собственно гранулирование в аппарате 1 подходящего типа, сушку 2, охлаждение 3, рассев гранул на фракции на грохоте 5 и дробление крупной фракции в молотковой или валковой дробилке 4. В грануляторах типа КСГ и БГС (рис. 12.1, б) гранулирование и сушка проходят одновременно. В случае необходимости продукт (Пр) опудривают специальными добавками (Оп) в кондиционирующем барабане 6.

Расплавы аммиачной селитры и карбамида чаще всего гра-

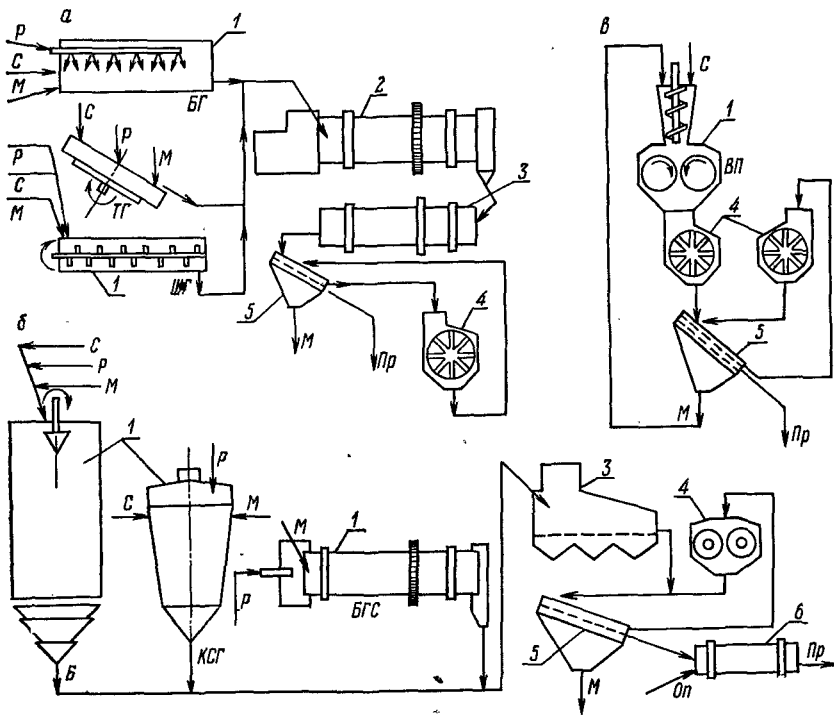


Рис. 12.1. Схемы гранулирования:

а — с барабанным, тарельчатым и шнековым грануляторами; б — с башней-гранулятором, КС и гранулятором-сушилкой; в — с валковым прессом.

нулируют в башнях (Б), недостатком которых является низкая удельная производительность. В настоящее время осваивается процесс гранулирования в аппаратах с кипящим слоем, которые работают с большей удельной производительностью.

Прессование не требует ретура, однако выход продукта после грохочения обычно не превышает 40 %, поэтому на прессование возвращается значительное количество мелкой фракции (рис. 12.1, в).

12.1. ГРАНУЛИРОВАНИЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТВИИ РАСТВОРОВ И РАСПЛАВОВ

С помощью растворов и расплавов гранулируют большинство простых, сложных и сложно-смешанных удобрений: простой и двойной суперфосфат, аммофос, нитроаммофоску, карбо-

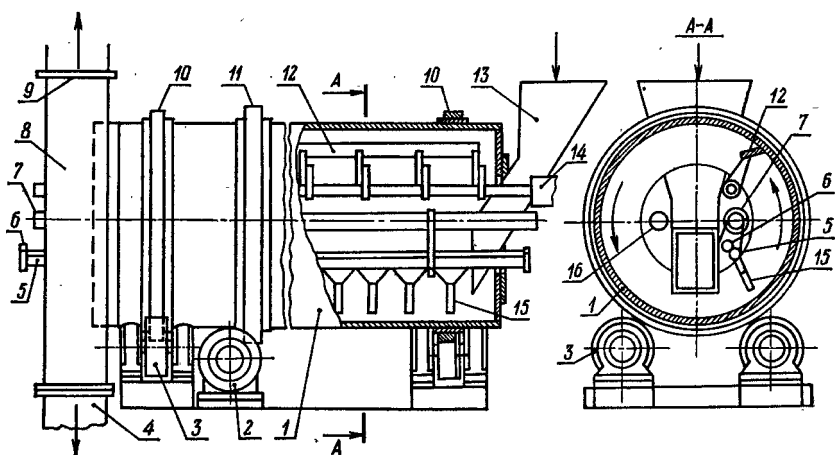


Рис. 12.2. Аммонизатор-гранулятор.

аммофоску и др. Этот метод используют для гранулирования разнообразных руд и концентратов, например фосфоритов, апатитового концентрата и барита. Наибольшее распространение получили грануляторы следующих типов: барабанный, аммонизатор-гранулятор (АГ), барабанный гранулятор-сушилка, шнековый и тарельчатый. В большинстве случаев гранулирование порошков в присутствии растворов и расплавов проводят по регурной схеме (рис. 12.1, в).

Барабанный аммонизатор-гранулятор предназначен для одновременной аммонизации и гранулирования сложно-смешанных удобрений. Характеристика ряда грануляторов данного типа приведена в табл. 12.1.

Аммонизатор-гранулятор (рис. 12.2) представляет собой барабан 1, опирающийся бандажами 10 на опорные ролики 3. Барабан приводится в движение электродвигателем 2 через редуктор и венцовую шестерню 11. По конструкции аппарат АГ аналогичен стандартным барабанным вращающимся печам (см. рис. 11.18) и сушилкам. Барабан установлен с небольшим наклоном ($1-2^\circ$) к выгрузному концу: продольное смещение барабана устраняется упорными роликами. Для очистки внутренней поверхности установлен нож (скребок) 12, который укреплен на трубе и может поворачиваться для изменения толщины срезаемого слоя. Труба с ножами присоединена к пневмоцилиндрам 14, которые периодически перемещают срезающее устройство вдоль оси барабана с частотой 20 колебаний в час и амплитудой 150 мм.

Барабан снабжен подпорными кольцами на входе и выходе; высота кольца на входе равна $0,4-0,6$ диаметра барабана D_v , а на выходе $0,25 D_v$. Выходное кольцо обеспечивает необ-

Табл. 12.1. Характеристика барабанных грануляторов

Тип гранулятора	Диаметр D , м	Длина L , м	Частота вращения, рад/с	Угол наклона α , град	Время окатывания, мин	Коэффициент заполнения τ	Марка удобрения $N-P_2O_5-K_2O$	Кратность регура	Производительность	
									по продукту, т/ч	удельная, кг/м ³ ч
Аммонизатор-гранулятор	3,0	3,5	0,86-1,94	1,8-2,0	15-30	0,13-0,15	18-46-1	3-4	7,75	317
	2,0	4,2	0,86-1,94	1,8-2,0	3-10	0,13-0,15	18-46-1	1-2	20,0	1512
	2,4	4,8	0,86-1,94	1,8-2,0	3-10	0,13-0,15	17-17-17	3-5	69,5	3220
	3,5	7,0	0,86-1,94	1,8-2,0			17-17-17		40,5	669
	4,0	10,0	0,86-1,94	1,8-2,0			18-18-18		76,0	608
	3,2	6,5	0,86-1,94	1,8-2,0			18-46-0	3-4	56,0	1075
Барабанный гранулятор	2,4	7,0	0,630-1,05	0,5-1,0	10-12	0,25		0,2	15,0	475
	1,8	8,0	0,66	1,0	8	0,3	0-20-0	0,2	23,0	1131
	1,6	11,5	0,63	1,0	8-12	0,25	0-15-0	0,2	38,0	1642
	1,4	7,5	0,73	2,0	7	0,25	0-42-0	0,2	20,0	1730
	2,0	5,5	1,05	1,0	6-9	0,29	0-49-0	0,5-1,0	40-60,0	2316-3470
Барабанный гранулятор-сушилка	3,5	16,0	0,42	3,0	40	0,13-1,15	11-50-0	0,5-1,0	15,0	97
	3,6	9,0	0,31-0,52	3,0	30-40	0,13-0,15	17-17-17	1,0-2,0	15-10	50-100
	3,2	22,0	0,52	3,0	30-40	0,12-0,15	11-10-11	2,0-2,5	10-11	56-62
	4,0	16,0	0,42	3,0	40	0,11-0,13	10-44-0	0,5-1,0	15	75

ходимую глубину слоя материала в грануляторе. Толщина корпуса зависит от размеров барабана и составляет 12—21 мм.

Порошкообразный материал и ретур вводят в барабан по течке 13, расплав или раствор по трубе 6, а жидкий аммиак по трубе 5, снабженной трубками 15, которые погружены в слой гранулируемой массы. Трубопроводы прикреплены к трубе 7, а также к передней неподвижной крышке и разгрузочной юбке 8. Расплав или раствор распыляют паровыми форсунками. По трубе 16 в гранулятор подают воздух. Влажные гранулы ссыпаются в течку 4 и далее поступают в сушилку, а газы отводят на очистку по штуцеру 9.

Основные детали гранулятора изготавливают из углеродистых сталей. В ряде случаев внутреннюю поверхность барабана защищают от коррозии легированными сталями (например, 12X18H10T) или резиной. В промышленности применяют аппараты АГ и других конструкций, отличающихся деталями внутреннего устройства.

Барабанные грануляторы в отличие от аммонизаторов не имеют устройства для подачи аммиака. Они по конструкции основных узлов схожи с другими аппаратами с вращающимся барабаном (см. рис. 11.18).

Основные размеры барабанных грануляторов приведены в табл. 12.1. Для увеличения времени пребывания материала на концах барабана установлены подпорные кольца, обеспечивающие степень заполнения барабана φ от 0,2 до 0,3. Чтобы уменьшить налипание гранулируемого материала на стенки барабана, его внутреннюю поверхность покрывают резиной, прикрепляемой с шагом 0,2—0,5 м. В верхней точке барабана резина прогибается под тяжестью налипшего материала или специального груза и налипший слой обрушивается. Грануляторы с гладкой поверхностью снабжены ножом для очистки стенок. Воду (или раствор), необходимую для увлажнения гранулируемого материала, подают в барабан по трубопроводу, где она разбрызгивается форсунками.

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

Пример 12.1. Рассчитать время пребывания материала и мощность привода барабанного гранулятора по следующим данным: диаметр D_b 1,8 м, длина L 10 м, угол наклона α 0,01743 рад ($1,0^\circ$), скорость вращения n 8 об/мин (0,838 рад/с), производительность G_p 13,93 кг/с (50 т/ч), гранулируемый материал — двойной суперфосфат с насыпной плотностью γ_n 1000 кг/м³. Аппарат внутри футерован резиной толщиной δ 5 мм.

Время пребывания τ (мин) рассчитаем по формуле

$$\tau = \frac{30,8(\rho \div 24)L}{D_6 n \operatorname{tg} \alpha} = \frac{30,8(42,3 \div 24) \cdot 10}{1,79 \cdot 8 \cdot 0,0175} = 8,3,$$

где ρ — угол естественного откоса материала в покое 47° (для движения принимаем $\rho = 0,9 \cdot 47 = 42,3^\circ$); D_6 — диаметр барабана по футеровке, м; $D_6 = D_b - 2\delta = 1,8 - 2 \cdot 0,005 = 1,79$ м; n — число оборотов в минуту.

Время пребывания можно также определить по формуле

$$\tau' = 0,785 D_6^2 L \varphi \gamma_n / G_p = 0,785 \cdot 1,79^2 \cdot 10 \cdot 0,3 \cdot 1000 / 13,93 = 524 \text{ с} = 8,7 \text{ мин.}$$

Расчеты по разным формулам близко совпадают.

Степень заполнения гранулятора φ , по данным табл. 12.1, принята равной 0,3.

Для определения мощности привода найдем суммарный крутящий момент M_c , действующий на барабан:

$$M_c = M' \div M'', \quad M' = 9,81 G_m X = 7,8 D_6^2 L \gamma_n \varphi \frac{(1 - \varphi) D_6}{2} \sin \rho;$$

$$M'' = \frac{9,81 (G_b \div G_m)}{D_p \cos \alpha'} \left[(D' \div D_p) 0,0005 \div 0,015 \frac{D' d_{ш}}{2} \right], \text{ Нм,}$$

где G_m — масса материала в грануляторе, кг; X — расстояние от центра тяжести материала до вертикальной оси аппарата, м; G_b — масса барабана, кг; D_p — диаметр ролика, м; D' — диаметр бандажа, м; α' — угол между опорными роликами; $d_{ш}$ — диаметр шейки ролика, м.

$$M' = 3,90 \cdot 1,766^3 \cdot 10 \cdot 1000 \cdot 0,3(1 - 0,3) \cdot 0,6561 = 29\,596, \text{ Нм.}$$

Масса барабана G_b составляет 24 200 кг, а масса материала в барабане G_m 7620 кг. По каталогу $D_p = 0,6$ м, $D' = 2,2$ м, $d_{ш} = 0,1$ м, угол между опорными роликами $\alpha' = 60^\circ$.

Определим крутящий момент от трения бандажей по опорам:

$$M'' = \frac{9,81(24\,200 \div 7620)}{0,6 \cdot 0,866} [(2,2 \div 0,6) 5 \cdot 10^{-4} \div 75 \cdot 10^{-4} \times$$

$$\times 2,2 \cdot 0,1] = 1832, \text{ Нм;}$$

$$M_c = 29\,596 \div 1832 = 31\,428 \text{ Нм.}$$

Рассчитаем мощность двигателя при условии, что суммарный КПД передачи $\eta_\Sigma = 0,82$, а коэффициент запаса мощности $\beta_m = 1,2$:

$$N_d = \frac{M_c n \beta_m}{974 \eta_\Sigma} = \frac{31\,428 \cdot 0,838 \cdot 1,2}{974 \cdot 0,82} = 39,57, \text{ кВт.}$$

Выбираем электродвигатель АО2-82-6 мощностью 40 кВт со скоростью вращения 102,6 рад/с (980 об/мин); его КПД равен 91,5%.

Барабанные грануляторы-сушилки используют в производстве аммофоса, нитрофоски, нитроаммофоски и других удобрений. Совмещение в одном аппарате гранулятора и сушилки упрощает технологическую схему, уменьшает количество ретурра и расходы на транспортировку, позволяет работать на ретворах или суспензиях с различным содержанием воды и по-

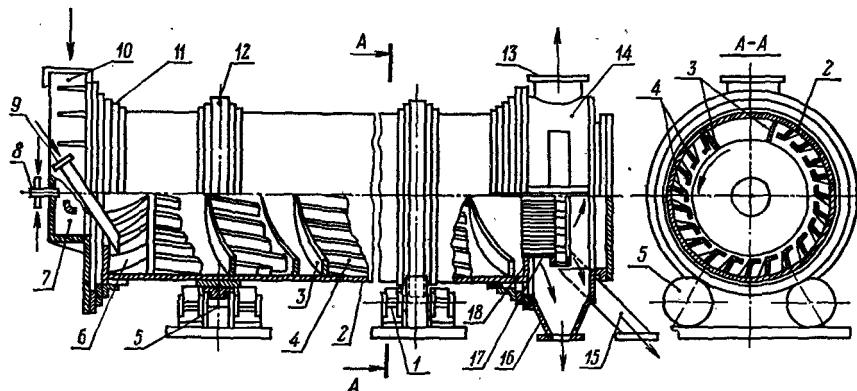


Рис. 12.3. Барабанная сушилка-гранулятор.

лучать гранулы заданного размера. К недостаткам аппаратов БГС относятся налипание продукта на стенки и трудности гранулирования веществ с высокими температурами плавления и разложения (выше 300°C).

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

Аппарат БГС (рис. 12.3) представляет собой вращающийся барабан 2, опирающийся бандажми 12 на ролики 5, которые укреплены в подшипниках 1. Барабан снабжен лопастной насадкой 4 и спиральной насадкой 3, которая образует обратный шнек. При вращении барабана часть гранулированного и высушенного материала транспортируется в голову барабана. Таким образом, сушилка-гранулятор работает с внешним и внутренним ретуром. В месте загрузки материала размещена винтовая насадка 6, которая устраняет завал материала в голове аппарата. Внешний ретур подают по трубе 9, кратность его составляет 1—2. Через неподвижную загрузочную камеру 7 подаются топочные газы по штуцеру 10 и пульпа, распыляемая форсункой 8. В разгрузочном конце имеется подпорное кольцо 18, при помощи которого поддерживается постоянный уровень материала в барабане. Гранулированный сухой продукт на грохоте 17 делится на две фракции: мелкая через течку 16, идет на виброгрохот, а крупная по течке 15 направляется на дробление. Штуцер 13, укрепленный на разгрузочной камере 14, предназначен для вывода дымовых газов на очистку. Уплотнение 11 устраняет выброс дымовых газов из гранулятора.

Основные детали гранулятора-сушилки изготовлены из углеродистых сталей. Для удаления налипшего материала на наружной поверхности барабана укрепляют специальные молотки, которые бьют по корпусу при его вращении.

Разработаны и внедряются в производство комбинированные аппараты БГСХ, в разгрузочном конце которых гранулы охлаждаются воздухом. Зарубежные аппараты типа сферодайзер имеют близкую к БГС конструкцию и режим работы.

Шнековые грануляторы используют в производствах аммофоса и сложно-смешанных удобрений. По конструкции шнекогрануляторы мало чем отличаются от описанных ранее шнеков-реакторов (см. рис. 11.11). Они имеют один или два вала с лопатками, установленными под углом $10-45^\circ$, концы лопаток описывают окружность диаметром $0,6-1,0$ м. Перемешивающие лопатки устанавливают под углом $10-20^\circ$, а транспортирующие — под углом $30-40^\circ$. Лопатки с максимальной шириной $0,2D_{ш}$ расположены по винтовой линии, чаще всего 4 лопатки на виток с шагом $0,8D_{ш}$.

В двухвалных шнеках валы расположены на таком расстоянии, чтобы происходило самоочищение лопаток. Между валами лопатки движутся навстречу снизу вверх и здесь наблюдается интенсивное перемешивание материала, а на периферии лопатки опускаются и отбрасывают материал на дно к центру корыта. Валы вращаются со скоростью $3,14-10,03$ рад/с. Характеристика шнеков-грануляторов приведена в табл. 12.2.

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

Метод агломерации относится к малоретурным, кратность ретура равна $5-8$, а концентрация растворимых веществ в суспензии обычно больше 70% , чем заметно снижает затраты на транспортировку и сушку. Технологический режим гранулирования различных видов удобрений описан в литературе [74].

Достоинства шнеков-грануляторов сводятся к следующему: высокая удельная производительность и, следовательно, малая занимаемая площадь, герметичность, надежность в работе, простота устройства и эксплуатации. К недостаткам от-

Табл. 12.2. Характеристика шнековых грануляторов

Показатели	Единицы измерения	Виды удобрений				
		аммофос		нитрофос	нитрофоска	нитроаммофоска
Число валов	шт.	1	2	2	1	2
Размеры:	м					
длина		3,00	3,62	3,60	4,32	2,50
ширина		0,65	1,70	1,60	0,80	1,60
высота		0,85	1,20	1,30	1,15	1,53
Объем	м ³	1,3	5,8	5,1	3,7	4,3
Скорость вращения	рад/с (об/мин)	3,14(30)	3,25(31)	3,25(31)	4,19(40)	4,19(40)
Производительность по продукту	т/ч	7—8	18—23	16—18	10—12	11—13
Удельная производительность	кг/м ³ ·ч	5400— 6150	2930— 3960	3130— 3520	2700— 3250	2620— 3100

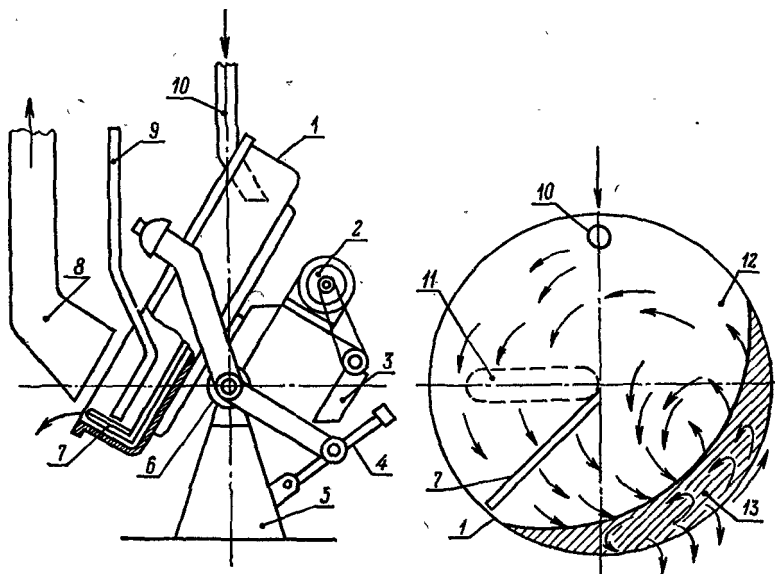
носятся низкий выход товарной фракции (до 50 %) и повышенный расход электроэнергии.

Механический расчет шнеков рассмотрен выше (см. пример 11.4).

Тарельчатый гранулятор (рис. 12.4) представляет собой чашу 1 с плоским или сферическим дном диаметром 1—6 м и высотой борта до 0,6 м, укрепленную на наклонном валу и приводимую в движение электродвигателем 2 через клиноременную передачу и редуктор 3. Чаша с приводом смонтированы на станине 6, угол наклона которой можно регулировать устройством 4. Конструкция опирается на фундамент 5. Ножи 7 служат для очистки бортов и днища от налипшего материала. Гранулируемый материал подают по трубе 10, а жидкость для гранулирования по трубопроводу 9. Жидкость подают под слой материала или распыляют форсунками. Колпак 8 служит для отсоса газов и паров и уменьшает попадание пыли в атмосферу цеха.

Известны конструкции тарельчатых грануляторов с кольцевыми перегородками, которые увеличивают время пребывания материала в грануляторе и облегчают гранулирование.

Порошкообразный материал поступает на тарелку в верхней точке и смешивается с мелкими частицами, поднимающимися благодаря вращению чаши. Разбрызгивание жидкости в области 11 способствует слипанию мелких частиц и закатыванию гранул. Ножи 7 направляют материал в зону орошения. Крупные частицы скатываются к периферии и переваливаются



Р и с. 12.4. Тарельчатый гранулятор.

через борт чаши в области 13, где наблюдается наибольшая глубина слоя. Мелкие частицы остаются в слое и поднимаются вместе с тарелкой в область малой глубины слоя 12. В тарельчатом грануляторе одновременно с закатыванием гранул происходит их классификация, что увеличивает выход товарной фракции до 70—90 %. Как правило, грануляторы данного типа используют в малоретурных схемах.

Для грануляции используют растворы аммиака, нитрата аммония, карбамида, фосфорной кислоты и фосфатов, жидкого стекла, полиакриламида или сульфитно-спиртовой барды.

Величина частиц определяется требованиями технологии. Так, при гранулировании удобрений обычно получают гранулы величиной 1—4 мм, при гранулировании апатитового концентрата — 2—5 мм, а фосфоритов для обжига — 10—15 мм.

Тарельчатые грануляторы применяются для гранулирования суперфосфата, сложно-смешанных удобрений, фосфоритной муки, апатитового концентрата и ряда других руд и концентратов. Их изготавливают из углеродистой стали, реже из легированных сталей. В некоторых случаях внутреннюю поверхность диска покрывают стеклом или пластмассами для уменьшения налипания гранулируемого материала.

Характеристика тарельчатых грануляторов приведена в табл. 12.3.

Табл. 12.3. Характеристика тарельчатых грануляторов

Гранулируемое удобрение	Размеры тарелки, м		Частота вращения, рад/с (об/м)	Угол наклона тарелки, град	Продолжительность гранулирования, мин	Производительность	
	диаметр	высота борга				по продукту, т/ч	удельная, кг/м ² ·ч
Карбамид	1,00	0,10	3,46 (33)	65	1—2	0,5	640
Простой суперфосфат	3,25	0,40— 0,60	1,14 (11)	45	11—12	5,0	605
Двойной суперфосфат	3,60	0,35	1,47 (14)	30—50	12—13	10—12	600
Сложно-смешанные	4,00	0,40	1,14— 1,47 (11—14)	40—52	2,5—4	10	795
Нитроаммофос	4,27	0,50	1,36— 1,99 (13—19)	65—70	—	17,6— 25	1160— 1640
Шихта из апатитового концентрата	3,00	0,40	1,26 (12)	35—70	—	8—9	1130— 1270

Грануляторы рекомендуется подбирать по удельной производительности q_F , которая составляет в среднем 770—900 кг/м²·ч:

$$D = \sqrt{G_p / 0,785 q_F},$$

где D — диаметр чаши, м; G_p — производительность гранулятора, кг/ч.

Мощность привода тарельчатого гранулятора $N_{дв}$ (кВт) можно рассчитать приближенно по формуле

$$N_{дв} = 8 \cdot 10^{-5} D^5 \gamma_n n \beta_m \sin \alpha / \eta_{\Sigma},$$

где γ_n — насыпная плотность материала, кг/м³, n — скорость вращения, рад/с; α — угол наклона чаши.

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

Раствор, суспензию или расплав вводят в слой разными методами: впрыскиванием непосредственно в кипящий слой с

помощью форсунок или распылением над кипящим слоем. Одновременно с распределением жидкость может упариваться в факеле распыления за счет подачи теплоносителя.

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

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

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

Предложено несколько конструкций грануляторов КС. Опытный аппарат КС, предназначенный для гранулирования и досушки гранул аммиачной селитры (рис. 12.5), состоит из цилиндрического корпуса 8 с расширенной верхней частью и двух газораспределительных решеток 4 (отверстия 30 мм) и 12 (отверстия 2,5 мм). Воздух (или топочные газы) подают по штуцеру 2. Пройдя завихритель 3, предназначенный для равномерного распределения газов по сечению аппарата, воздух поступает под решетки 4 и 12. Отработанный газ выходит через штуцер 9 и направляется на очистку. Ретур из бункера 7 подают в кипящий слой или над ним инжектором 6, второй инжектор служит для возврата пыли. Раствор аммиач-

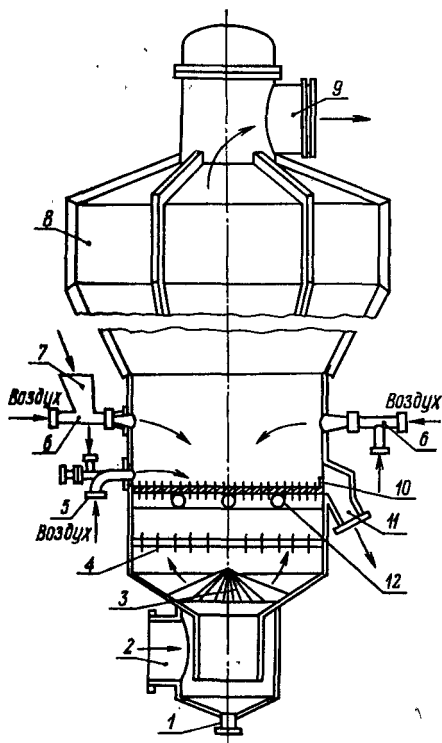


Рис. 12.5. Гранулятор с кипящим слоем.

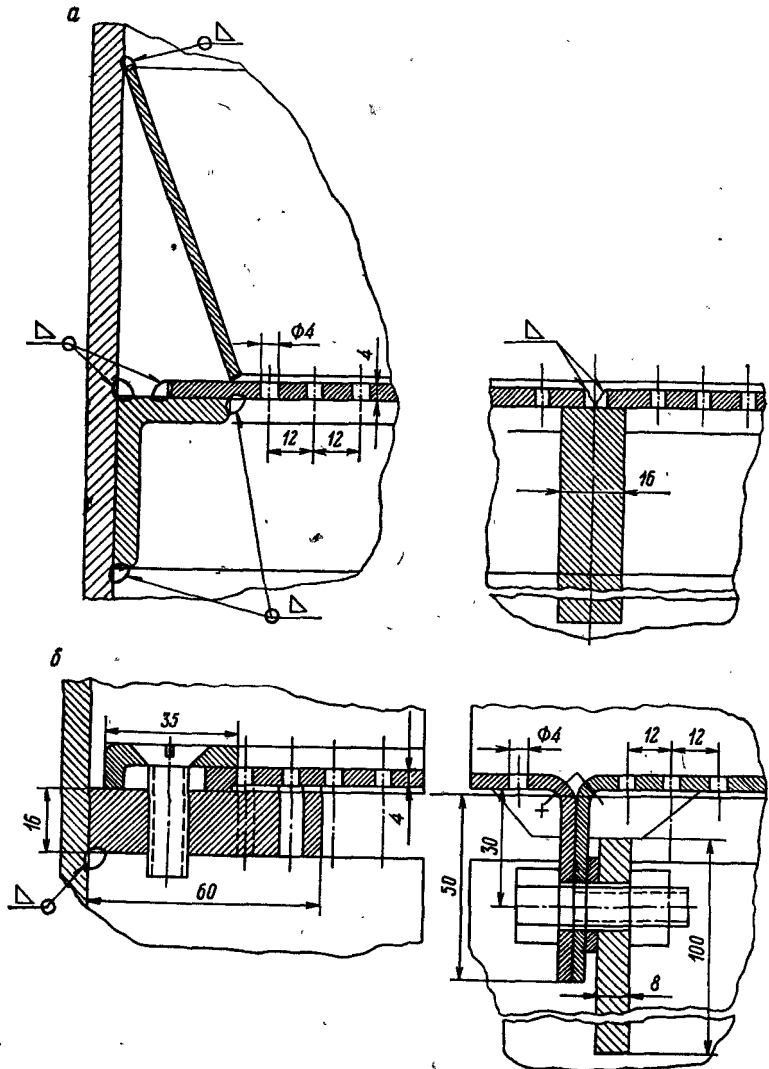


Рис. 12.6. Способы соединения и крепления решетки:
 а — сварное неразъемное; б — разъемное.

ной селитры впрыскивают в кипящий слой с помощью форсунки 5. Гранулированный продукт сыпается по течке 11, снабженной затвором, количество выгружаемых гранул регулируют заслонкой 10. Штуцер 1 предназначен для удаления раствора, образующегося при пропарке аппарата.

В грануляторах КС применяют провальные и непровальные решетки с отверстиями диаметром 2—4 мм или щелями

такой же ширины. Доля свободного сечения решеток составляет 3—8 %. Большое распространение получили провальные решетки, набранные из листов толщиной 2—15 мм. Два варианта крепления и соединения газораспределительных решеток показаны на рис. 12.6, но в промышленности применяют и другие конструкции.

Непровальные решетки представляют собой перфорированные листы, покрытые сеткой, или два перфорированных листа, скрепленные между собой таким образом, чтобы отверстия в них не совпадали. Решетки обычно изготавливают из нержавеющей стали.

Корпус гранулятора изготавливают из углеродистой или легированной стали толщиной 6—12 мм и усиливают продольными ребрами и бандажами из уголка или швеллера.

Для очистки решеток от налипшей соли предусматривают подвод пара, а образующийся раствор отводят по штуцеру 1 (см. рис. 12.5).

Гранулятор обязательно оборудуют люком, смотровыми окнами и штуцерами для присоединения контрольно-измерительных приборов.

Подовая интенсивность грануляторов КС составляет 450—1745 кг/м²·ч, что мало отличается от тарельчатых грануляторов, а удельная производительность для различных видов удобрений изменяется от 53 до 477 кг/м³·ч. При сушке растворов карбамида и аммиачной селитры удельная производительность равна 97—266 кг/м³·ч, что в среднем в 2 раза выше, чем в аппаратах типа БГС (см. табл. 12.1). Технологический режим гранулирования и принципы расчета описаны в литературе [74].

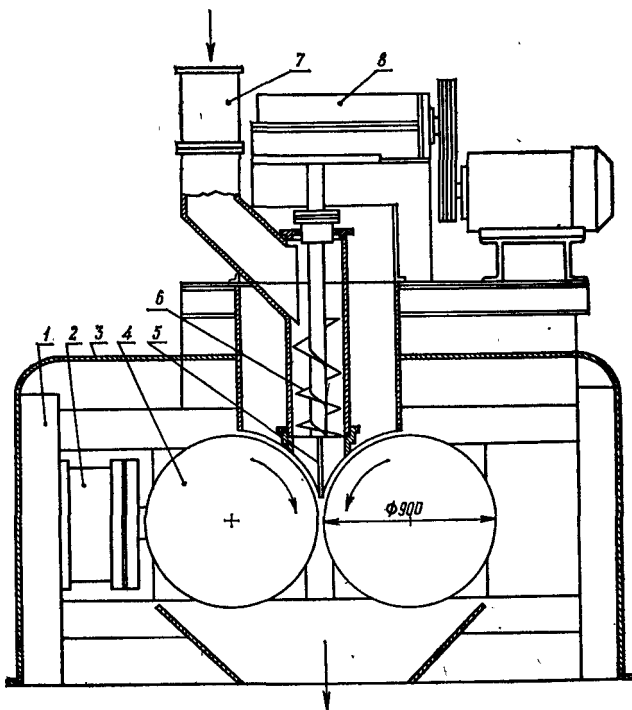
12.2. ГРАНУЛИРОВАНИЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПРЕССОВАНИЯ

Методом прессования гранулируют простые и сложно-смешанные удобрения. В настоящее время это единственный промышленный способ гранулирования калийных удобрений. Эффективность данного метода заключается в следующем: малый удельный расход энергии (10—12 кВт·ч/т), отсутствие расхода тепла, малые габаритные размеры установки, возможность гранулирования удобрений разного состава и простота перехода с одной марки удобрения на другую. Недостатком метода прессования является низкий выход товарной фракции, составляющей 30—50% (табл. 12.4).

При достаточно высоком давлении, зависящем от свойств прессуемого материала, частицы уплотняются, деформируются и образуют плитку за счет сил молекулярного притяжения и контактного сплавления отдельных частиц. Воздух, поступаю-

Табл. 12.4. Технологический режим прессования удобрений

Исходные компоненты смеси	Марка удобрения N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	Размер валков пресса d×B, мм	Скорость вращения, рад/с (об/мин)	Зазор между валками, мм	Удельное давление, МН/м	Удельная производительность, т/м·ч	Выход продукта, %	Температура смеси, °С
KCl	0-0-60	900×1200	(16,94—25,50) 1,77—2,66	4—8	4,5	10—16	30—45	100—120
NH ₄ H ₂ PO ₄ NH ₄ NO ₃ (нитроаммофоска)	13-17-17 15-15-17 15-20-17	520×520	3,14 (30)	2,5	до 4,0	6—8	40—55	60
KCl NH ₄ H ₂ PO ₄ CO(NH ₂) ₂ (карбаммофоска)	19-19-19 16-24-16 15-22-22	520×520	3,14 (30)	3—5	2—3,4	10—15	30—40	20
KCl Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0-15-15	900×1200	1,36—1,57 (13—15)	5—7	2,0—3,4	8,5—14	35	50—60
NH ₄ H ₂ PO ₄ (NH ₄) ₂ HPO ₄	25-40-0	520×520	3,14 (30)	2—2,5	2,8—3,5	4—5	35—40	110
Аммофос	11-50-0	900×1200	1,37 (12,75)	5—8	2,5—3,5	15—16,7	30	70—80



Р и с. 12.7. Схема валкового пресса.

щий вместе с материалом, вытесняется при прессовании вниз, в зазор между валками, и вверх. Движение воздуха вниз приводит к уменьшению выхода плитки, а поднимающийся поток воздуха разрыхляет поступающий порошок и затрудняет подачу материала между валками. Вследствие этого выход плитки составляет 40—70, иногда 90 %. При измельчении плитки образуется мелкая фракция, которая и возвращается на прессование в качестве ретура (см. рис. 12.1, б).

Для прессования хлорида калия, аммофоса и фосфорнокалийных удобрений используют валковые прессы фирмы «Гумбольд» с диаметром валков 900 мм и длиной 1200 мм. Скорость вращения валков зависит от вида материала. Производительность по плитке достигает 30 т/ч. Валки пресса 4 (рис. 12.7) вращаются навстречу друг другу. Подшипники одного валка перемещаются по станине 1, расстояние между валками и усилие прессования создается цилиндром 2, в который подают масло от насоса высокого давления. Валки размещены в кожухе 3.

Порошкообразный материал по течке 7 поступает в шнекоподпрессовщик 6, который предварительно уплотняет порошок

и подает его между валками. Шнек приводится в движение электродвигателем через редуктор 8. Воздух из зоны уплотнения удаляется по гребенке 5. Недостатком данной схемы удаления воздуха является частое забивание труб гребенки пылью. На ряде заводов используют валковые прессы без шнека-подпрессовщика, сырье поступает в загрузочную шахту над валками высотой 4,5 м.

Мощность привода валкового пресса производительностью 75 т/ч равна 680 кВт, а шнекового питателя 27 кВт.

Производительность пресса G_p (кг/с) по плитке рассчитывают по формуле

$$G_p = \delta B v \gamma_{\text{пр}} \psi = \delta B r \omega \gamma_{\text{пр}} \psi,$$

где δ — расстояние между валками, м; r , B — радиус и ширина валков, м; v — окружная скорость валков, м/с; $\gamma_{\text{пр}}$ — плотность прессата, кг/м³; ψ — выход прессата; ω — угловая скорость вращения валков, рад/с.

12.3. ГРАНУЛИРОВАНИЕ РАСПЛАВОВ

Гранулирование расплавов путем охлаждения капель воздухом — самый распространенный способ производства аммиачной, известково-аммиачной и кальциевой селитры, карбамида и сложных удобрений. В Советском Союзе этот способ применяется с 1937 г. Гранулирование осуществляют в башнях высотой 21—140 м и диаметром 8—30 м. Расплав разбрызгивают с помощью специального устройства, и за время падения капель происходит кристаллизация плава и охлаждение гранул. В оптимальных условиях образуются частицы примерно одинакового размера, процесс является практически безретурным (см. рис. 12.1, б).

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

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

В отечественной промышленности широко применяют грануляторы центробежного типа, представляющие собой конус с диаметром основания 300—350 мм и высотой 350—475 мм. Конус закреплен на валу основанием вверх и вращается со скоростью 41,9—47,2 рад/с (400—450 об/мин). На поверхно-

сти конуса расположены отверстия диаметром 0,25—2,5 мм, величина отверстий уменьшается к вершине конуса. Недостатки конического гранулятора — значительный разброс величины гранул и неравномерность распределения нагрузки по сечению башни.

Усовершенствованный центробежный вибрационный гранулятор аммиачной селитры (рис. 12.8) состоит из перфорированного днища 1 и цилиндрического корпуса 4. Они укреплены на полом валу 5, приводимом в движение электродвигателем через шкив 10 с угловой скоростью 7 рад/с (67 об/мин). Плав аммиачной селитры подают по штуцеру 8, укрепленному в неподвижной крышке 7. По насадке плав стекает в зазор между корпусом 4 и обечайкой 6; перфорированная плита 3 обеспечивает равномерное распределение плава по корзине. Для образования одинаковых капель плава днище 1 колеблется пневматическим вибратором 12, который соединен с днищом штоками 11 и 2. Воздух подают от сети через переходник 13. Полый вал 5, вращающийся в подшипниках 9, соединен с корпусом шестью радиальными перегородками 14, благодаря которым плав вращается с той же угловой скоростью, что и перфорированное днище.

Производительность одного отверстия w_0 ($\text{м}^3/\text{с}$) можно найти по формуле

$$w_0 = f_0 v_0 = 0,785 d_0^2 \varphi \sqrt{gh + \omega^2 r^2},$$

где f_0 — площадь отверстия, м^2 ; v_0 — скорость истечения струи, $\text{м}/\text{с}$; d_0 — диаметр отверстия, м ; φ — коэффициент скорости; h — высота слоя расплава над отверстием, м ; ω — угло-

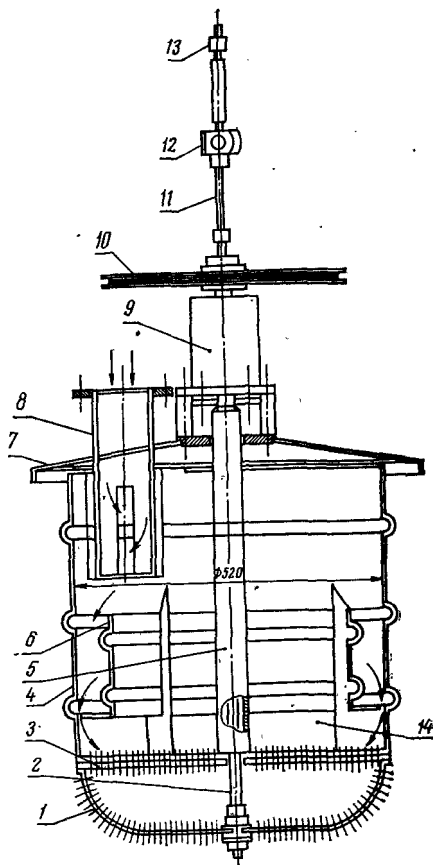


Рис. 12.8. Центробежный виброгранулятор.

вая скорость вращения днища, рад/с; r — радиус, на котором расположено рассматриваемое отверстие от оси вращения, м.

Общая производительность гранулятора будет равна суммарной производительности всех отверстий на перфорированной части днища.

Собственная частота струи плава ω_c определяется уравнением

$$\omega_c = v_0/4,51d_c,$$

где d_c — диаметр струи в начальной части.

Частота наложенных внешних колебаний от вибратора 12 (см. рис. 12.8) не должна превышать собственной частоты. Зависимость между величиной капель d_k и другими параметрами процесса выражается формулой

$$d_k = (1,5d_c^2\varepsilon v_0/\omega_c)^{\frac{1}{3}},$$

где ε — коэффициент сжатия струи, определяемый для центральных грануляторов по уравнению

$$\varepsilon = K_r g h / (2gh + v_{отн}^2),$$

где K_r — коэффициент, характеризующий геометрию отверстий, по литературным данным равный 1,6; $v_{отн}$ — скорость жидкости относительно внутренней стенки вращающегося гранулятора при равенстве угловых скоростей жидкости и перфорированной оболочки $v_{отн} \rightarrow 0$ и $\varepsilon \rightarrow 0,8$.

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

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

Статические (лещные) грануляторы (рис. 12.9, а) применяют для гранулирования карбамида и аммиачной селитры, а *трубчатые с внешним обогревом* (рис. 12.9, б) для гранулирования аммиачной селитры.

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

Расчет статического (лещного) гранулятора. Диаметр отверстий гранулятора d_0 (м) можно приближенно определить из соотношения

$$d_{гр} \approx 2,1d_0,$$

где $d_{гр}$ — диаметр гранул, м.

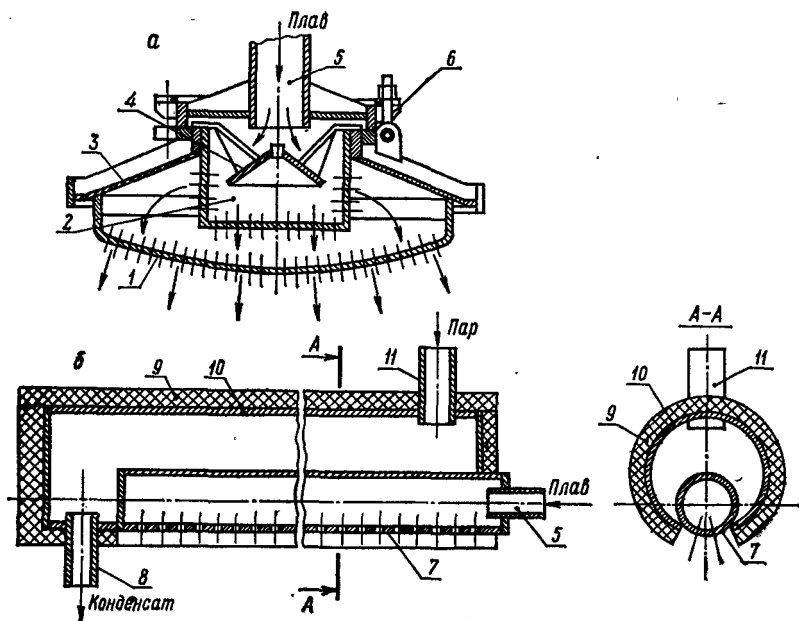


Рис. 12.9. Статические грануляторы:

1 — перфорированное днище; 2 — сеточный фильтр; 3 — корпус; 4 — конус; 5 — штуцер для плава; 6 — затвор; 7 — перфорированная труба; 8 — штуцер для конденсата; 9 — изоляция; 10 — обогревающая труба; 11 — штуцер для пара.

Шаг между отверстиями принимают 8—11 мм, чтобы не сливались отдельные струи плава.

Радиус сферического днища гранулятора R рассчитывают в соответствии с углом наклона крайнего ряда отверстий α_0^0 и диаметром гранулятора $D_{гр}$:

$$R = D_{гр} / 2 \sin \alpha_0^0.$$

Производительность гранулятора $G_{гр}$ (кг/с) зависит от площади отверстия f_0 (м²), числа отверстий z_0 , плотности ρ_p (кг/м³) и скорости плава в отверстиях v_0 (м/с):

$$G_{гр} = f_0 z_0 \rho_p v_0 = 0,785 d_0^2 z_0 \rho_p \varphi \sqrt{2gH_n},$$

где φ — коэффициент скорости, зависящий от критерия Re ; H_n — высота столба расплава над отверстием, м.

Число отверстий гранулятора можно найти из выражения

$$z_0 = 2\pi R h_d / S_0 = \pi [(D_{гр}/2)^2 + h_d^2] / S_0,$$

где h_d — высота сферического днища в вершине, м; S_0 — площадь днища, на которой расположено одно отверстие, м².

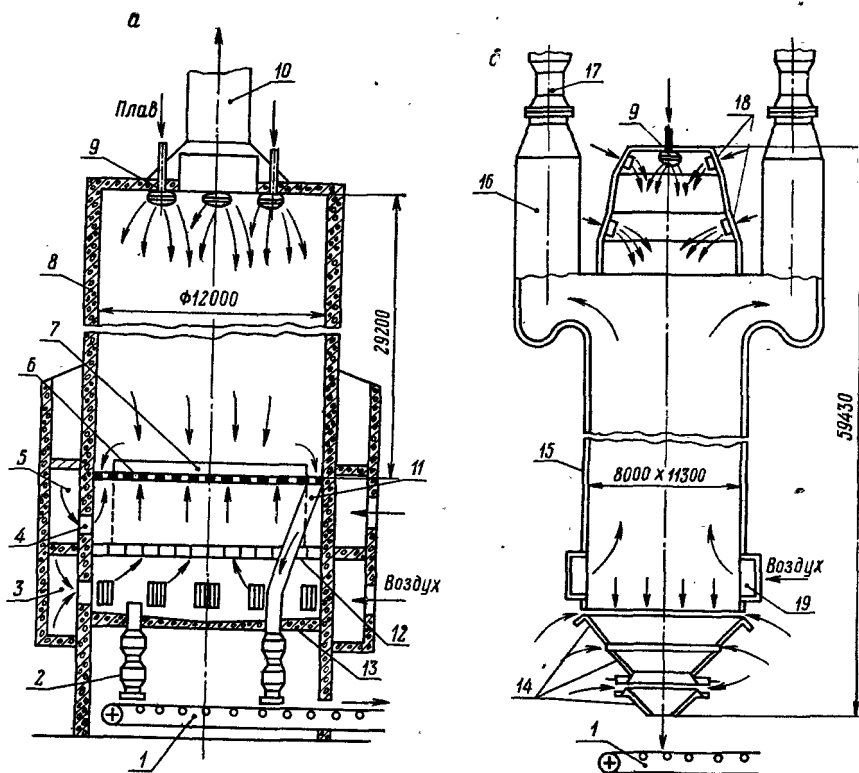


Рис. 12.10. Грануляционные башни:

1 — конвейер; 2 — затвор; 3, 5 — камеры подачи воздуха; 4 — окна; 6 — решетка аппарата КС; 7 — борт; 8 — железобетонный каркас; 9 — леечный гранулятор; 10 — штуцер; 11 — течка; 12 — распределительная решетка; 13 — днище; 14 — конуса; 15 — металлический каркас; 16 — скруббер; 17 — осевой вентилятор; 18 — трубчатый виброгранулятор; 19 — штуцер для воздуха.

Грануляционная башня агрегата АС-67 диаметром 16 м и высотой 30—35 м оборудована шестью статическими грануляторами, производительность каждого 10 т/ч (2,78 кг/с). Акустические грануляторы леечного типа имеют производительность до 15 т/ч (4,17 кг/с). Выход наиболее крупной фракции (2—3 мм) составляет 40—50 % в статических грануляторах и 70—80 % в вибрационных.

Разбрызгивающие устройства (грануляторы) изготавливают из нержавеющей сталей, например 12Х18Н10Т.

Температура гранул в конце падения равна 60—90 °С для карбамида и 70—130 °С для аммиачной селитры. Удельный расход воздуха должен составлять 8—12 кг на 1 кг плава, а скорость воздуха в башне 0,4—2,0 м/с. Плотность орошения башен достигает 600—1000 кг/м²·ч, а удельная производительность 8—24 кг/м³·ч.

Грануляционные башни чаще изготавливают цилиндрическими из железобетона с толщиной стенок 0,4 м, диаметром 12—18 м и общей высотой 30—60 м (рис. 12.10, а). Внутреннюю поверхность башни футеруют кислотоупорным кирпичем. В традиционных схемах на крышке башни размещают аппаратуру для упарки плава и очистки выхлопного газа, а в агрегате АС-67 на ней устанавливают и реакторы для получения аммиачной селитры.

Температура гранул после башни не должна превышать 45 °С, поэтому башни оборудуют встроенными (рис. 12.10, а) или выносными аппаратами КС для охлаждения гранулята воздухом. В старых конструкциях охладитель располагается в конической части днища и его площадь составляет 10 % поперечного сечения башни. В агрегате АС-67 двухзонный охладитель КС занимает все поперечное сечение башни. Первая зона площадью 88 м² ограничена стальным бортом диаметром 10,6 м и высотой 0,3 м. В эту зону подают 139—143 м³/с (500—550 000 м³/ч) воздуха под давлением 4—6 кПа. Вторая ступень представляет собой кольцо с наружным диаметром 12,0 м и внутренним 10,6 м. Под вторую зону подают 41,6—55,5 м³/с (150—200 000 м³/ч) воздуха с давлением 5—5,2 кПа. Охлажденные гранулы выгружаются по течкам через затворы. Основные детали охладителя изготавливают из нержавеющей сталей.

В агрегате АС-72 башня прямоугольной формы (рис. 12.10, б). Рабочая высота башни равна 50 м. Корпус башни металлический. На ее крышке расположены разбрызгивающие устройства 9 и 18, скрубберы для очистки воздуха и осевые вентиляторы. Все оборудование, в том числе и выпарные аппараты, размещено на этажерке рядом с башней.

Башня работает под разрежением, воздух поступает из выносного аппарата КС по штуцеру, а также в зазоры между конусами. Для устранения налипания селитры конусы покрываются резиной.

Расплав разбрызгивают тремя акустическими виброгрануляторами общей производительностью 16,65 кг/с (60 т/ч) или монодисперсными электродинамическими виброгрануляторами (20 шт.) производительностью 3—4 т/ч каждый.

Геометрические размеры башни рассчитывают исходя из ее производительности, допустимой плотности орошения и конечной температуры гранул.

Площадь поперечного сечения башни F (м²) определяют из соотношения

$$F = G_p / P_{ор},$$

где G_p — производительность башни, кг/с (т/ч); $P_{ор}$ — плотность орошения, кг/м²·с (кг/м²·ч).

Полученную величину необходимо проверить на скорость воздуха v_B (м/с), которая не должна превышать 2 м/с. Расход воздуха w_B можно найти по соотношению массового расхода воздуха и плава (G_B/G_P), которое обычно поддерживают в пределах 8—12 кг/кг:

$$v_B = w_B/F = \Pi_{OP}(G_B/G_P)/\rho_B F,$$

где ρ_B — плотность воздуха на входе в башню, кг/м³.

Объем башни V_6 (м³), а следовательно, и ее высоту H (м) можно рассчитать приближенно по удельной производительности (кг/м³·с):

$$V_6 = G_P/q; \quad H_6 = V_6/F.$$

Более точно высоту падения гранул рассчитывают по начальной температуре расплава, конечной температуре гранул, температуре воздуха на входе и выходе из башни и по скорости теплоотдачи от гранул к воздуху.

В последние годы выполнен значительный объем исследований и проведены промышленные испытания гранулирования расплавов аммиачной селитры, карбамида и сложно-смешанных удобрений в аппаратах КС. Основные достоинства этого метода сводятся к следующему: высокая удельная производительность, что позволяет существенно уменьшить объем аппарата; совмещение стадий доупарки плава, грануляции и сушки в одном аппарате, благодаря чему упрощается технологическая схема, и возможность гранулирования расплавов, содержащих твердые примеси. В то же время гранулирование в псевдооживленном слое связано с повышенным уносом пыли (1—4 %), необходимостью возврата мелкой фракции (менее 1 мм) и растворения гранул величиной более 4 мм.

Некоторые показатели грануляторов разных типов сравниваются ниже.

Показатели	Башенный гранулятор	КС	БГС
Удельная производительность, кг/м ³ ·ч	8—24	50—477	50—100
Кратность ретура	0	0,1—0,5	0,5—2,5

По удельной производительности аппараты КС превосходят грануляторы других типов.

Часть IV. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ НОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Высокие темпы роста промышленного производства в СССР обуславливают необходимость строительства новых и реконструкции действующих предприятий. Рост производительности общественного труда при этом требует не только увеличения развития промышленности путем ежегодного увеличения капиталовложений, но и повышения технического уровня, рационального размещения проектируемых предприятий.

Всевозрастающие объемы проектно-изыскательских работ наряду с ежегодно усложняющимися условиями размещения предприятий предъявляют дополнительные инженерные и экономические требования к разрабатываемым проектам. Строительство зданий и сооружений без предварительно разработанных проектов и смет практически невозможно, так как до начала производства строительного-монтажных работ необходимо знать, что, где и как должно быть построено, во что обойдется строительство, сколько и каких потребуется строительных материалов, трудовых ресурсов, какое необходимо оборудование, какие строительные машины, какова продолжительность строительства и будет ли намечаемый объект экономичен в строительстве и эксплуатации. Ответы на эти вопросы можно получить в проекте и смете.

В проекте решаются чрезвычайно важные вопросы и ответственные инженерные задачи: выбор в данных конкретных условиях наиболее эффективного способа производства, расчет размеров и количества аппаратов и машин, а также определение оптимального режима работы оборудования и др. Сложность проектирования обусловлена тем, что многие инженерные проблемы тесно связаны между собой и их решение зависит от географических (точка строительства, расстояние перевозки сырья и продукции, климат), социальных (охрана труда и окружающей среды, жилищно-бытовые условия трудящихся) и экономических факторов (капитальные затраты, себестоимость продукции, окупаемость и т. д.).

К важнейшим экономическим задачам проектирования относятся: 1) установление рационального взаимоотношения человека, индустрии и природы; 2) учет внутрипроизводственных факторов, обуславливающих оптимальность проектируемого производства; 3) выбор рациональных объемно-планировочных решений, конструктивных схем и эффективных строительных материалов; 4) учет санитарно-технических условий труда, повышающих его производительность.

Объектами проектирования являются отдельные цехи, их части, целые предприятия, всевозможные сочетания производства или окружающая среда проектируемых объектов. Проектирование — это подготовительная стадия строительства. От качества технико-экономического обоснования и уровня проектных решений в значительной степени зависят сметная стоимость строительства, продолжительность его осуществления, эффективность капитальных вложений.

Создание нового производства — длительный и дорогостоящий процесс. На разработку промышленного способа производства нового продукта или нового, более совершенного метода получения известного продукта затрачивается 3—10 лет труда крупных коллективов исследователей, конструкторов, технологов, экономистов, строителей и требуется много средств и материалов [76, 77].

Ведущая роль в разработке нового химического производства принадлежит инженерам-технологам, которые участвуют на всех ее стадиях от определения потребности в каком-либо продукте до пуска и освоения производства. Наиболее ответственная работа инженера-технолога — это выбор направления лабораторных исследований, разработка метода производства, сравнение и оценка различных способов получения продукта на основе литературных сведений, данных исследований в лаборатории, на пилотной или опытно-промышленной установке. Все технико-экономические расчеты, определяющие экономическую эффективность любого производства, выполняются на основе данных (расходные коэффициенты по сырью и энергии, размеры и количество оборудования и др.), получаемые технологическим расчетом.

На стадии проектирования промышленного объекта инженер химик-технолог координирует работу многих подразделений проектного института, он выдает исходные данные и составляет задания специалистам разного профиля — механикам, энергетикам, теплотехникам, строителям, экономистам и т. д.

Глава 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СООРУЖЕНИЯ НОВОГО ИЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Строительство новых или реконструкция действующих предприятий связаны с большими затратами материалов, сил и средств, поэтому еще до начала проектирования следует обосновать необходимость, целесообразность и экономическую эффективность этих затрат, а также выбрать площадку для строительства.

13.1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рациональное размещение химической промышленности связано с решением многих проблем, требующих глубокого научно-экономического анализа и всесторонних проектных технико-экономических расчетов [75, 79].

Для современной химической технологии характерны следующие особенности, которые имеют принципиальное значение и для размещения производительных сил в целом:

1) техническая возможность и экономическая целесообразность промышленной химической переработки почти неограниченного круга веществ и превращение в промышленное сырье полезных ископаемых, богатств растительного и животного мира, морской и пресной воды, а также воздуха;

2) возможность хозяйственного использования природных богатств всех экономических районов СССР на основе комплексной переработки сырьевых и энергетических ресурсов различных видов и качества, что резко увеличивает промышленные ресурсы сырья в хозяйстве страны;

3) разнообразие химико-технологических методов, позволяющих получать различные химические промышленные продукты из одного и того же основного сырья (пластические массы, синтетический каучук, синтетические жирные кислоты из нефти) или производить равноценные химические продукты из различных видов сырья (получение спирта из пищевого сырья, нефти и газа, древесины, торфа и т. д.);

4) возможность промышленного получения химических полупродуктов и конечной продукции на базе использования комплексных видов сырья.

Выбор района размещения химического предприятия определяется на основе технико-экономического изучения многих факторов в их взаимном сочетании. Для химической промышленности первостепенными факторами являются сырьевой,

энергетический, водный, потребления продукции и др. Для механической переработки химической продукции особое значение имеет трудовой фактор. Для ряда отраслей химического производства и специфических видов химической продукции существенное значение для выбора района размещения предприятий имеет транспортный фактор. Общими условиями для размещения предприятий всех отраслей промышленности являются экономичность, наименьшие удельные затраты при строительстве и эксплуатации предприятия, хозяйственная освоенность района, наличие строительных баз, возможность комбинирования с другими отраслями производства и др.

Сырьевой фактор определяет практическую возможность использования экономически эффективного промышленного сырья, максимальное приближение промышленности к дешевым, массовым видам сырья. Химические производства, как правило, требуют больших затрат сырья на единицу производимой продукции, особенно производства элементарного фосфора, фосфорных и калийных удобрений, соды, крупнотоннажных пластмасс, синтетического каучука, вязкозных волокон и т. д.

При оценке сырьевого фактора в химическом производстве необходимо учитывать: масштабы производства современных предприятий и комплексов; взаимозаменяемость видов, а следовательно, и сырьевых источников; нетранспортабельность или малую транспортабельность отдельных видов сырья; зависимость экономических показателей химической продукции от экономики сырьевой базы.

Энергетический фактор определяет влияние затрат топлива и электроэнергии на размещение химических предприятий и экономическую целесообразность их концентрации в районах нахождения крупных и дешевых ресурсов топлива и гидроэлектроэнергии.

Основные отрасли химической промышленности (производство синтетического каучука, химических волокон, продуктов органического синтеза, минеральных удобрений, пластических масс и др.) требуют больших затрат топлива и электроэнергии. Химическая промышленность Советского Союза в 1975 г. выпустила 6 % валовой продукции и израсходовала почти 15 % энергоресурсов.

Энергетический фактор химического производства для ряда отраслей промышленности определяет район размещения предприятий.

Для правильного размещения химической промышленности большое экономическое и техническое значение имеют обеспечение предприятий водой хорошего качества и рациональное решение вопросов сброса значительного количества загрязненных стоков и отходов (*водный фактор*).

Водные ресурсы по районам страны распределены весьма неравномерно, в ряде районов они весьма ограничены (Украина, Центральные районы РСФСР, Средняя Азия, Казахстан и т. д.). Для их пополнения требуется осуществление крупных и дорогостоящих гидротехнических сооружений. Вода приобретает высокую цену и ее использование должно иметь строгое регулирование. Поэтому выбор источников водоснабжения для химических предприятий, требующих больших затрат воды, определяется состоянием водных ресурсов в экономическом районе в целом. Нарушение этого принципа может нанести большой ущерб хозяйству района и значительно затруднит эксплуатацию химических предприятий.

Фактор потребления применим к отдельным отраслям химической промышленности, выпускающим многотоннажную продукцию, потребляемую преимущественно в определенных территориальных зонах. Наиболее характерны в этом отношении производства минеральных удобрений, шин и резино-технических изделий.

Транспортный фактор — определение суммарного объема и себестоимости транспортных работ по перевозке сырья, материалов, топлива к пунктам производства и потребления. При решении вопроса о строительстве предприятия необходимо стремиться к снижению удельного веса транспортных издержек в себестоимости продукции.

Трудовой фактор — обеспеченность района трудовыми ресурсами и условия, определяющие высокий жизненный уровень трудящихся на химических предприятиях. Он имеет важное значение для размещения химической промышленности. Во-первых, весьма трудоемкие химические предприятия, если этому не противоречат иные факторы, целесообразно размещать в густонаселенных экономических районах. Во-вторых, малая трудоемкость некоторых производств позволяет размещать их во вновь осваиваемых районах или в районах с недостаточными трудовыми ресурсами, если есть возможность привлечь трудовые ресурсы из других районов. В-третьих, учитывая большие возможности для занятия в химическом производстве женщин, размещение таких предприятий в ряде районов способствует полной и рациональной занятости мужского и женского труда. Однако следует учитывать, что на предприятиях, производящих фосфор, фосфорные удобрения, хромовые и фтористые соли, женский труд ограничен.

Фактор времени — максимальный выигрыш во времени в результате четкой организации проектирования, строительства и освоения мощности предприятий с учетом экономного использования труда, материальных и финансовых средств.

При оценке фактора времени следует учитывать наличие строительных баз соответствующей мощности, степень хозяй-

ственной освоенности района, наличие свободных трудовых ресурсов, жилищно-коммунального фонда и удобных транспортных связей. При правильном использовании этих условий предприятие можно построить скорее и дешевле. Фактор времени следует рассматривать в общей совокупности экономических и технических условий строительства и эксплуатации будущего предприятия.

13.2. СОСТАВЛЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЛИ НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Повышение эффективности проектных решений зависит от глубины технико-экономического обоснования целесообразности и хозяйственной необходимости намечаемого строительства [75].

Проектированию и строительству предприятий и сооружений должна предшествовать квалифицированная научно обоснованная предпроектная проработка основных вопросов предстоящего проектирования. Начиная с 1976 г. технико-экономические обоснования (ТЭО) строительства и реконструкции должны разрабатываться по всем намечаемым к проектированию и строительству предприятиям и сооружениям промышленности, энергетики, транспорта и т. д.

Технико-экономические обоснования проектирования и строительства (реконструкции) предприятий и сооружений состоят из таких основных разделов.

1. Исходные положения. В этом разделе отражаются следующие вопросы: характеристика роли данного предприятия в обеспечении роста мощностей и покрытия потребности народного хозяйства в продукции, намечаемой к выпуску; соответствие решений ТЭО схемам развития и размещения отрасли и производительных сил района; характеристика расширяемого или реконструируемого действующего предприятия, оценка и анализ его деятельности, основные технико-экономические показатели его работы.

Базой для определения потребности в продукции проектируемого предприятия является перспективный план и схемы развития и размещения производительных сил по экономическим районам и союзным республикам. По их данным определяется дефицит в продукции, намечаемой к выпуску на проектируемом (реконструируемом) предприятии (при условии максимального использования производственных мощностей действующих предприятий).

Из выявившегося дефицита в изделиях определяется программа производства реконструируемого, расширяемого, ново-

Табл. 13.1. Баланс потребности и производства продукции

Наименование продукции	Единица измерения	Потребность народного хозяйства на 19 г.	Удовлетворение потребности на 19 г.	Дефицит

строящегося завода, которая обеспечивает полное или частичное удовлетворение потребности народного хозяйства в выпускаемой продукции. Выше приведена форма баланса производства и потребности в продукции (табл. 13.1).

2. *Определение проектной мощности и специализация предприятия (сооружения), обоснование ассортимента продукции и требования к качеству выпускаемой продукции.* Расчет производственной мощности проектируемого предприятия начинается с определения мощности отдельных ведущих машин и аппаратов. Ведущая машина, аппарат или группа однородных машин, аппаратов, выполняющих основную стадию технологического процесса, определяют производственную мощность цеха и предприятия. В соответствии со схемой технологического процесса подбирают оборудование по каждому участку и цеху. Для обеспечения высокой экономической эффективности производства решающее значение имеет подбор наиболее совершенных машин и аппаратов, отвечающих высшему техническому уровню.

Исходными расчетными единицами для определения производственной мощности ведущего технологического оборудования большинства производств являются технические нормы производительности и время работы в течение года. Расчет производят раздельно по каждой ведущей машине, аппарату, затем рассчитывают потребное количество оборудования в соответствии с проектируемым объемом производства продукции в заданном ассортименте.

В расчет производственной мощности принимают прогрессивные технические нормы производительности оборудования, которые определяют по каждому аппарату или машине на основе:

1) научной организации труда, обеспечивающей применение высокопроизводительных методов работы и сокращение затрат рабочего времени на каждой операции и единице продукции;

2) обобщения передового опыта действующих предприятий, аналогичных проектируемому;

3) передовой технологии производства. Под передовой технологией понимается применение наиболее выгодных для данных конкретных условий технологических процессов, обеспечивающих полное использование оборудования, сокращение

расхода сырья, материалов, энергетических затрат на единицу продукции и высокое качество продукции.

Вслед за расчетом годовой мощности каждой ведущей машины, аппарата, агрегата определяют количество оборудования, необходимое для производства проектируемого ассортимента продукции. Обоснование мощности проектируемого предприятия производится по всему ассортименту, указанному в задании.

Необходимость применения высокопроизводительных ведущих аппаратов, машин и наиболее полного их использования может служить важным доводом при обосновании мощности проектируемого предприятия (цеха). При определении мощности проектируемого предприятия учитывается также мощность заводов-потребителей, количество получаемого сырья, мощность энергетической базы и т. д. Например, мощность сернокислотного цеха в составе комбината должна обеспечивать потребность цехов экстракционной фосфорной кислоты, простого суперфосфата и других цехов.

Необеспеченность проектируемого предприятия сырьевыми и энергетическими ресурсами может привести к недоиспользованию производственной мощности и повышению себестоимости продукции, а при необходимости сбыта готовой продукции за пределами радиуса допустимых транспортных перевозок к снижению экономии, достигаемой на крупном предприятии от снижения себестоимости. Поэтому определяющим критерием оптимального размера предприятия служит наличие сырьевых и энергетических ресурсов и возможности реализации продукции при минимальных транспортных расходах. Одним из условий определения оптимальной мощности является также обеспечение высокой эффективности проектируемого предприятия и основных технико-экономических показателей на уровне нормативных отраслевых, лучших, достигнутых на передовых отечественных и зарубежных предприятиях.

Существует множество критериев для технико-экономической оценки проектных решений и выбора оптимальных вариантов. В качестве критериев могут быть использованы:

$$\mathcal{E}_{к.в} = \frac{Ц - С}{K};$$

$$T = \frac{K}{Ц - С};$$

$$C_i + E_n K_i = \min;$$

$$T = \frac{K_1 - K_2}{C_2 - C_1};$$

$$E = \frac{C_2 - C_1}{K_1 - K_2};$$

где $\mathcal{E}_{к.в}$ — общая экономическая эффективность капитальных вложений; $Ц$ — стоимость годового выпуска продукции в оптовых ценах предприятия, руб.; $С$ — себестоимость годового выпуска продукции, руб.; $К$ — капитальные вложения, руб.; T — срок окупаемости капитальных вложений, лет; $С_i$ — текущие затраты по варианту, руб.; E_n — нормативный коэффициент эффективности; K_i — капитальные вложения по варианту, руб.; E — коэффициент окупаемости дополнительных капитальных вложений; $K_1 - K_2$ — дополнительные капитальные вложения, необходимые по первому варианту для обеспечения прироста эффекта, руб.; $С_2 - С_1$ — дополнительная экономия или дополнительный прирост прибыли по первому варианту по сравнению со вторым, руб.

3. *Обеспечение сырьем, основными материалами, топливом, энергоресурсами и т. д.* Этот раздел содержит данные о наличии сырьевой базы, потребности в сырье, источниках получения, требованиях к качеству и способах подготовки сырья, развитию сырьевой базы, источниках получения вспомогательных материалов и полуфабрикатов. Кроме того, приводится обоснование рекомендуемых источников обеспечения предприятия электроэнергией, топливом, водой.

4. *Обоснование размещения предприятия, схема генерального плана и транспорт.* В этом разделе даются технико-экономическое сравнение возможных вариантов размещения предприятия; оценка оптимальности выбранного варианта размещения предприятия; характеристика мест размещения предприятия; сведения о климатических, инженерно-геологических и гидрологических условиях района намечаемого строительства предприятия; схема генерального плана предприятия с указанием на нем расположения новых и существующих зданий и сооружений, транспортных путей, площадей для возможного расширения предприятия, пусковых комплексов и очередей строительства, ориентировочных объемов земельных работ, основных показателей по генеральному плану; сведения о грузообороте предприятия и организации транспортного хозяйства.

5. *Основные технологические решения предприятия.* Раздел включает: а) обзор существующих методов производства продукта и их сравнение;

б) рекомендуемую технологию производства, соответствие ее новым прогрессивным технологическим процессам, намеченным основными технологическими решениями в проектировании предприятий данной отрасли, исходя из ближайшей перспективы развития науки и техники, обоснование целесообразности новых производств;

в) обоснование выбора оборудования с учетом намечаемого к выпуску перспективным планом и технические условия на

конструирование оборудования индивидуального изготовления;

г) состав предприятия и схему производства;

д) характеристику и обоснование технических решений, новых технологических процессов, сравнение их с современными технологическими решениями, применяющимися в отечественной и зарубежной технике;

е) требования к уровню механизации и автоматизации предприятия (сооружения);

ж) схему кооперирования ремонтных и вспомогательных цехов с другими предприятиями района.

6. *Охрана окружающей среды.* Этот раздел содержит: определение расчетных расходов сточных вод и газовых выбросов; характеристику производственных сточных вод, выбросов в атмосферу и способов их очистки; краткое описание запроектированных систем по очистке сточных вод и газовых выбросов.

7. *Основные строительные решения.* Данный раздел содержит: технологические требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям; краткую характеристику и обоснование архитектурно-строительных решений зданий и сооружений, предприятия в целом; перечень типовых и повторно применяемых экономичных проектов основных зданий и сооружений (в том числе вспомогательных и подсобных); краткое описание решений по бытовому и медицинскому обслуживанию работающих на производстве, по ограничению шума и вибрации в производственных и вспомогательных цехах.

8. *Сроки строительства и основные решения по организации строительства.* Раздел содержит данные об объемах основных строительно-монтажных работ, о создании (развитии) строительной базы, необходимой в связи со строительством предприятия (сооружения), о потребности в строительных конструкциях и материалах и источниках их получения; организации строительства, сроках начала и продолжительности его осуществления и освоения проектных мощностей.

9. *Объемы капитальных вложений и экономика строительства и производства.* В данном разделе выполняются расчеты объектов капитальных вложений, определение удельных капитальных затрат, расчеты по эффективности капитальных вложений, анализ капитальных вложений и основных фондов. Приводятся данные о численности персонала и источниках обеспечения рабочей силой, показатели производительности труда, себестоимость основных видов продукции. Кроме того, дается оценка и сравнение технического уровня и важнейших технико-экономических показателей предприятия с уровнем и показателями действующих передовых отечественных и зарубежных предприятий, а также с показателями проектируемых на перспективу предприятий соответствующей отрасли про-

мышленности и ранее разработанных и утвержденных аналогичных ТЭО и проектов.

10. Выводы и предложения. Данный раздел включает общую оценку экономической целесообразности и хозяйственной необходимости проектирования и строительства, требования к другим отраслям промышленности, а также перечень научно-исследовательских и конструкторских работ, возникающих в связи с намечаемым строительством и сроки их окончания.

13.3. ВЫБОР ПЛОЩАДКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Площадка для строительства промышленного предприятия, здания или сооружения выбирается при составлении ТЭО до утверждения задания на проектирование в районе или пункте, установленном схемой развития и размещения соответствующей отрасли промышленности и схемой развития и размещения производительных сил по экономическим районам и союзным республикам.

Для выбора пункта строительства проводится обследование предложенных вариантов размещения и сбор необходимых данных для технико-экономического анализа и определения их экономической эффективности. Основанием для рекомендаций варианта размещения служат исходные данные, характеризующие намечаемое к строительству предприятие. Исходные данные разрабатываются на основе укрупненных показателей и сведений, явившихся базой для включения предприятия в схему развития и размещения отрасли или результатом технических и экономических расчетов при составлении ТЭО.

В процессе выбора площадки под строительство сопоставляются все факторы и технико-экономические расчеты по обследованным площадкам с точки зрения наилучшего удовлетворения условий строительства и эксплуатации предприятия. При этом учитываются:

размер и конфигурация площадки, возможность расширения предприятия;

принадлежность земель и их пригодность для сельского хозяйства;

гидрогеологические качества площадки (рельеф, средний уклон, уровень грунтовых вод, затопляемость, допустимое давление на грунт);

снос строений; близость площадки к городу (жилому поселку) и условия сообщения с ними;

удовлетворение санитарно-гигиенических и технических требований;

увязка размещения предприятия на выбранной площадке с развитием промышленности в городе;

условия получения энергии и протяженность трасс (электроэнергии, тепло-, газо-, водоснабжения, радиофикации и связи);

условия сброса сточных вод и протяженность трасс хозяйственно-фекальных и ливневых стоков;

наличие подъездных автомобильных дорог.

В отдельных случаях перечисленные технико-экономические показатели могут быть дополнены, например, такими данными:

условия примыкания и расстояние до железнодорожной станции;

наличие факторов, осложняющих строительство (просадочные грунты, карстовые явления, подземные выработки, гидроизоляция и т. д.);

возможность кооперирования с другими предприятиями;

дополнительные затраты на земляные работы, сооружение дорог, присоединение к источникам энергоснабжения, долевое участие других предприятий в строительстве внешних коммуникаций и объектов кооперированного строительства.

Для определения места расположения предприятия, здания, сооружения (площадки для строительства), если строительство связано с освоением дополнительной территории, министерством или ведомством-заказчиком создается комиссия. Работа комиссии заканчивается составлением акта о выборе площадки, который оформляется в исполкоме местного Совета народных депутатов с участием всех членов комиссии. Акт подписывают все члены комиссии и утверждает министерство или ведомство-заказчик в установленном порядке. Утвержденный акт о выборе площадки для строительства является документом о согласовании намечаемых решений и условиях подключения к источникам снабжения, инженерным сетям и коммуникациям.

Глава 14. РАЗРАБОТКА ЗАДАНИЯ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Разработка проекта строительства или реконструкции промышленного предприятия начинается после получения проектным институтом задания на проектирование. Задание на проектирование составляется в полном соответствии с принятыми в ТЭО решениями и технико-экономическими показателями, включая определенный размер затрат на строительство.

14.1. СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ ЗАДАНИЯ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

В задании на проектирование промышленного предприятия, здания или сооружения указываются:

- 1) наименование предприятия, здания или сооружения;
- 2) основание для проектирования. При включении проекта предприятия в титульный список изыскательских и проектных работ для строительства будущих лет основанием для проектирования являются: согласованная отраслевым министерством с Госпланом СССР схема развития и размещения отрасли, а также утвержденное в установленном порядке технико-экономическое обоснование;
- 3) район, пункт и площадка для строительства (документы, обосновывающие место, расположения предприятия и предварительное согласование в соответствии с актом выбора площадки, и материалы утвержденного ТЭО);
- 4) мощность производства и номенклатура основных видов продукции;
- 5) режим работы предприятия;
- 6) решения о производственном и хозяйственном кооперировании, в том числе о кооперировании при размещении предприятия в составе промузла;
- 7) требования по защите окружающей среды и утилизации отходов производства;
- 8) данные для проектирования объектов жилищного и культурно-бытового строительства;
- 9) основные технико-экономические показатели. Ориентировочная величина основных технико-экономических показателей, которая должна быть достигнута в проекте, и объем капитальных вложений указываются на основе проектно-сметных соображений в схеме развития и размещения отрасли или по данным утвержденного ТЭО. При разработке проекта эти показатели не должны быть ухудшены;
- 10) намечаемые сроки строительства (в соответствии с нормами продолжительности), порядок его осуществления и ввода мощностей по очередям и пусковым комплексам;
- 11) требования по разработке вариантов проекта или его частей для выбора оптимальных решений;
- 12) стадийность проектирования;
- 13) генеральный проектировщик предприятия. Им является головной проектный институт, которому Управление проектирования и капитального строительства поручает проектирование предприятия. В задании указывается наименование и адрес этого института;
- 14) наименование и адрес строительной организации — ге-

нерального подрядчика, которой поручается ведение работ подрядным способом;

15) наличие согласования с территориальной проектной организацией;

16) дополнительные указания. В задании на проектирование в необходимых случаях оговариваются следующие дополнительные условия: разработка автоматизированных систем управления, намечаемое расширение предприятия, основные технологические процессы, оборудование и др.

К заданию на проектирование прилагается утвержденный акт о выборе площадки. Кроме акта о выборе площадки, к заданию на проектирование прилагаются:

архитектурно-планировочное задание, составленное исполкомом местного Совета народных депутатов, в котором содержатся указания о требованиях к застройке участка, этажности и оформлению зданий и сооружений, выходящих на магистральные уличные проезды, о красных линиях и отметках планировки, об условиях и местах присоединения к городским инженерным сооружениям;

строительный паспорт, содержащий основные технические данные по выбранному земельному участку;

технические условия на присоединение проектируемого предприятия или сооружения к источникам снабжения, инженерным сетям и коммуникациям;

сведения о существующей застройке, подземных сооружениях, коммуникациях и др.;

необходимые для проектирования материалы: по видам выделяемого топлива, по месторождениям сырья и полузаводским его испытаниям, чертежи и технические характеристики продукции предприятия, данные по оборудованию, отчеты по выполненным научно-исследовательским работам, связанным с созданием новых технологических процессов и оборудования; данные, полученные от служб Государственного надзора о естественном состоянии водоемов, атмосферного воздуха и почвы, данные обмеров существующих на участке строительства зданий, сооружений, подземных и наземных коммуникаций.

Указанный выше состав задания на проектирование может дополняться применительно к особенностям отрасли промышленности и условиям осуществления строительства.

14.2. ПОРЯДОК УТВЕРЖДЕНИЯ, СОГЛАСОВАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Задание на проектирование утверждается:
по предприятиям, зданиям и сооружениям, проекты которых утверждаются Советом Министров СССР,— министерст-

вами и ведомствами СССР и советами министров союзных республик;

по предприятиям, зданиям и сооружениям, проекты которых должны утверждаться советами министров союзных республик, — соответствующими министерствами и ведомствами республик или исполкомами Советов народных депутатов;

по предприятиям, зданиям и сооружениям, проекты которых утверждаются в порядке, устанавливаемом министерствами и ведомствами СССР и советами министров союзных республик, — инстанциями, которым поручено утверждение проектов.

Задание на проектирование предприятия, здания и сооружения независимо от ведомственной принадлежности должно быть до утверждения согласовано с территориальным проектным институтом Госстроя СССР по следующему вопросу: о возможностях размещения проектируемого предприятия в намечаемом пункте его строительства и намечаемого кооперирования вспомогательных производств, энергоснабжения, водоснабжения, канализации и транспорта действующих, строящихся и проектируемых предприятий, объединения проектируемых предприятий в промышленные узлы — единые производственные комплексы или комбинаты.

Вносить изменения в утвержденное задание на проектирование можно лишь с разрешения руководителя инстанции, утвердившей это задание.

Глава 15. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

Проектирование — важное звено, связующее науку с производством. Для того чтобы новые, прогрессивные научно-технические решения были внедрены, они должны найти отражение в соответствующих проектах. В узком смысле проект — это чертеж или система чертежей, дающих обоснованное техническими расчетами графическое отражение будущего здания, предприятия или сооружения или их отдельных частей. В более широком смысле проект (включая смету, являющуюся его частью) — это совокупность расчетных и графических материалов, обосновывающих техническую возможность, экономическую целесообразность и изображенное графически решение строительства какого-либо здания, предприятия, сооружения. Проект является комплексным технико-экономическим документом, в котором техническая и экономическая сторона предстоящего строительства неразрывно связаны.

Значение проектирования намного шире, чем составление чертежей и смет, необходимых для осуществления строительства. В проектах предусматривается повышение экономиче-

ской эффективности производства, более прогрессивные, чем существующие, технические решения, более низкий, чем на аналогичном предприятии, уровень себестоимости и более высокий уровень качества предусмотренной проектом продукции.

15.1. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

Промышленное проектирование составляет в нашей стране около 80 % всего объема проектных работ. Объекты и виды проектирования многообразны. Однако для процесса проектирования можно установить несколько основных общих положений.

Последовательность проектирования от общего к частному. В процессе проектирования последовательно решаются вопросы сначала обоснования экономической целесообразности и производственно-хозяйственной необходимости, строительства (реконструкции), затем определения основных объемно-планировочных, технологических, конструктивных, архитектурных и других решений.

Вариантность проектирования. Для повышения экономической эффективности капитальных вложений проектирование начиная от размещения на выбранной площадке для строительства объектов (составление генерального плана) и до последней детали проекта производится методом разработки вариантов, их сравнения и отбора лучшего по технико-экономическим показателям решения, позволяющего получить максимальный эффект при минимуме затрат.

Использование типовых проектов. При проектировании конкретного объекта строительства используются в максимальной степени типовые решения. Это позволяет уменьшить трудоемкость проектирования, снизить затраты на проектные работы, повысить их качество. Типовое проектирование способствует своевременному обеспечению строительства проектной документацией, а также является одной из главных предпосылок индустриализации строительства, широкого применения в нем сборных элементов, внедрения передовой техники, наиболее прогрессивных и экономичных планировочных и конструктивных решений.

Комплексность проектирования. Данное положение проявляется в тесной взаимной увязке отдельных частей проекта — технологической, архитектурно-строительной, транспортной, санитарно-технической, энергетической, коммунальной и др. Это необходимое условие для повышения качества проектирования и его экономичности.

На основании задания на проектирование и исходных данных, представляемых заказчиком проекта, проектная органи-

зация приступает к разработке проекта. Различают одно- и двухстадийное проектирование.

На строительство новых, расширение, реконструкцию и техническое перевооружение действующих предприятий, зданий и сооружений разрабатываются, как правило, одностадийные техно-рабочие проекты. Двухстадийное проектирование (технический проект и рабочие чертежи) допускается только для строительства крупных и сложных промышленных комплексов, а также если применяется новая неосвоенная технология производства и используются головные образцы сложного технологического оборудования.

15.2. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

Основная задача проектирования — повышение качества и экономичности проектов и своевременное обеспечение ими строительства. Для этого в каждом конкретном техническом проекте решаются следующие вопросы.

1. Выбор метода производства, отвечающего конкретным условиям, применение новейшего высокопроизводительного оборудования и эффективных технологических процессов, обеспечивающих наивысшую производительность труда и выпуск продукции высокого качества.

2. Выбор рациональных объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений и эффективных строительных материалов.

3. Выбор рациональных схем транспортных потоков сырья и готовой продукции, механизация погрузочно-разгрузочных работ.

4. Рациональное использование намечаемого для строительства земельного участка и выбор оптимального варианта генерального плана.

5. Обеспечение высокого технического и экономического уровня проектных решений.

6. Сокращение затрат на строительство и отражение в сметной документации действительно необходимых затрат на строительство.

15.3. СОСТАВ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА

В состав технического проекта входят следующие разделы: общая пояснительная записка с кратким изложением содержания проекта, технико-экономический, генеральный план и транспорт с разделом о рекультивации нарушенных земель, технологический, обеспечение энергоресурсами и защита окружающей среды, организация труда, строительный, организа-

ция строительства, организация, подготовка и освоение проектных мощностей, сметный и паспорт проекта.

В *общей пояснительной записке* указывается основание для разработки проекта, вид строительства (новое, расширение, реконструкция), мощность, состав предприятия, номенклатура основной продукции, основные технико-экономические показатели, организация и сроки строительства.

В *технико-экономической части* проекта приводятся: данные о результатах расчетов экономической эффективности и обоснование нового строительства;

обоснование прогрессивности принимаемых технологических процессов;

сведения о хозяйственных связях проектируемого предприятия с другими предприятиями;

обоснование потребности в основных категориях рабочих и ИТР;

анализ капитальных вложений и основных фондов предприятия;

данные о сравнении технико-экономических показателей с аналогом (передовые отечественные и зарубежные предприятия) и др.

Раздел *«Генеральный план и транспорт»* содержит:

обоснование решений по внутриплощадочным транспортным путям;

основные планировочные решения и решения по вертикальной планировке и благоустройству территории;

решения по инженерным сетям и коммуникациям;

сведения о грузообороте и организации транспортного хозяйства и др.

В *технологической части* проекта приводятся:

характеристика выпускаемой продукции, оценка качества и прогрессивности ее, обоснование эффективности продукции в народном хозяйстве;

программа выпуска продукции;

схема производства и состав предприятий;

характеристика и обоснование технических решений и новых технологических процессов;

трудоемкость производственных процессов;

уточненные данные по предприятию о потребности в сырье, основных материалах, оснастке, топливе, электроэнергии, газе, воде, тепле;

межцеховые технологические коммуникации;

обоснование вспомогательных производств и др.

В разделе *обеспечения энергоресурсами* указываются исходные данные, характеристика потребителей энергии, определение нагрузок потребной мощности, заказные спецификации и перечень оборудования.

В разделе *организация труда* приводятся решения по организации трудовых процессов, обеспечивающих наибольшую производительность труда.

В *строительной части* проекта дается: краткое описание архитектурно-строительных решений по зданиям, сооружениям, строительству которых предполагается по индивидуальным проектам, проектных решений, обеспечивающих заданную освещенность, благоприятные условия воздушной среды производственных и вспомогательных помещений, взрыво- и пожаробезопасность, решений по бытовому, санитарному обслуживанию работающих на производстве; обоснование принятых решений по отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха; обоснование принятых схем водоснабжения и канализации; перечень и характеристика основных сооружений водопровода и канализации и др.

В *сметной части* проекта выполняются расчеты затрат, предусматриваемых на строительство, реконструкцию предприятий, сгруппированных соответственно структуре капитальных вложений на строительные работы, на работы по монтажу оборудования; затрат на технологическое, энергетическое, подъемно-транспортное и другое оборудование, приспособления, инструмент и инвентарь, на прочие капитальные работы и затрат, связанных с осуществлением строительства.

Сводная смета технического проекта является основным и неизменным документом, на основании которого осуществляются планирование капитальных вложений и финансирование строительства. Сводная смета содержит следующие главы:

1. Подготовка территории строительства.
2. Объекты основного производственного назначения.
3. Объекты подсобного производственного и обслуживающего назначения.
4. Объекты энергетического хозяйства.
5. Объекты транспортного хозяйства и связи.
6. Внешние сети и сооружения водоснабжения, канализации, теплофикации и газофикации.
7. Благоустройство территории промышленной площадки.
8. Временные здания и сооружения.
9. Прочие работы и затраты.
10. Содержание дирекции строящегося предприятия.
11. Подготовка эксплуатационных кадров.
12. Проектные и изыскательские работы.

Техно-рабочие (технические) проекты на строительство предприятий, зданий, сооружений по стройкам сметной стоимостью 3 млн. руб. и выше утверждаются министерствами и ведомствами СССР, советами министров союзных республик.

Проекты наиболее крупных предприятий и сооружений утверждаются Советом Министров СССР по представлению

министерств и ведомств СССР и совета министров союзных республик. Порядок утверждения и переутверждения проектов по стройкам сметной стоимостью до 3 млн. руб. устанавливается министерствами и ведомствами СССР и советами министров союзных республик.

Документом об утверждении проекта предприятия, здания, сооружения является приказ, постановление, решение или другой распорядительный документ, изданный в соответствии с положением о министерстве, ведомстве и единой государственной системой делопроизводства.

15.4. ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектные организации осуществляют проектирование строительства в соответствии с народнохозяйственным планом. Современный уровень развития науки и техники требует специализации проектных организаций. Различают два вида специализации — отраслевую и технологическую.

При *отраслевой* специализации проектные организации разрабатывают проекты предприятий, сооружений или зданий соответствующих отраслей народного хозяйства, транспорта, машиностроения, химической промышленности и др., при *технологической* — части проектов: технологическую, энергетическую, транспортную, архитектурно-строительную, санитарно-техническую и др.

В ряде случаев проектные организации, осуществляющие проектирование промышленных предприятий, специализируются по отраслевому и технологическому признакам в совокупности.

Проектные организации строительного профиля, специализированные по видам работ и отраслям промышленности, сгруппированы в объединения («Союзхимстройпроект», «Союзхимнефтьстройпроект», «Союзметаллургстройпроект» и др.) и входят в систему Госстроя СССР. Под *строительным проектированием* понимается не только проектирование строительных работ по возведению зданий и сооружений, включая их внутренние санитарно-технические устройства, но и работ по водоснабжению, канализации, промышленному транспорту.

Для быстрого внедрения в народное хозяйство результатов научных исследований и опытно-экспериментальных работ в последние годы создаются комплексные институты по видам производств для научных исследований и разработки проектной документации (НИИпроект). Например, Всесоюзный научно-исследовательский институт галургии (ВНИИГ) не только ведет разработку новых процессов производства калийных Удобрений и солей, но и проектирует новые цеха и за-

воды; Ленинградский государственный научно-исследовательский и проектный институт основной химической промышленности (Ленниигипрохим) проводит исследования и испытания, проектирует новые производства элементарного фосфора и фосфорнокислых солей, а Государственный научно-исследовательский институт азотной промышленности и продуктов органического синтеза (ГИАП) — аммиака, азотной кислоты, аммиачной селитры, карбамида, метилового спирта и ряда продуктов органического синтеза.

Из числа наиболее крупных и обладающих наиболее квалифицированными кадрами технологических и архитектурно-строительных проектных организаций Госстроем СССР и министерствами СССР выделены головные проектные организации. Их основная задача заключается в проведении единой технической политики при проектировании объектов народного хозяйства.

Проектные организации — хозрасчетные предприятия, которые работают на основе государственного плана и договоров с заказчиками.

15.5. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Из всех методов проектирования основным считается *графический*. Однако в химической промышленности иногда целесообразнее пользоваться объемным (модельно-макетным) методом проектирования.

Сущность *макетно-модельного проектирования* состоит в следующем. После разработки схемы цепи аппаратов и спецификации оборудования подбирают или изготавливают (обычно в масштабе 1 : 50) модели оборудования, аппаратуры, трубопроводов, стандартизированные элементы строительных сборных конструкций и из них на специальном столе-стенде собирают макет цеха или корпуса предприятия. В компоновке цеха на стенде одновременно могут участвовать проектировщики всех специальностей. После того как будет найдено рациональное архитектурно-компоновочное решение, раскладываются трубопроводы и коммуникации, а затем на макете проставляются необходимые размеры и отметки.

Объемный метод проектирования имеет ряд преимуществ по сравнению с графическим, например значительное сокращение времени и расходов на проектирование (до 15—20 %). Фотографируя макеты предприятий или их отдельные составные части, можно легко и быстро размножить проектную документацию.

Метод математического проектирования находится в стадии разработки. Его используют для решения отдельных частных задач, таких, как расчет оптимального технологического

режима работы аппаратов в сложных производствах и определение оптимальной мощности технологической линии. Этот метод требует точного математического описания всех закономерностей технологического процесса в их взаимосвязи и большого объема вычислений.

15.6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Проектирование, как и любая инженерная работа, требует активного творческого подхода и в то же время оно регламентировано множеством нормативных документов, таких, как ГОСТы, технические условия, строительные нормы и правила (СНиП), правила устройства электроустановок (ПУЭ), требования охраны труда и окружающей среды.

Инженер химик-технолог, работающий в монтажно-технологическом отделе проектной организации, занимается разработкой технологической схемы производства, выбором технологического оборудования, объемно-планировочным решением (компоновка) производства и размещением технологического оборудования, монтажной разработкой производства, оформлением проектной документации (пояснительная записка и чертежи).

Разработка технологической схемы производства начинается с анализа способов производства и обоснования выбранного метода производства. Как правило, необходимые данные имеются в ТЭО и в задании на проектирование, но в некоторых случаях при проектировании разрабатывают несколько вариантов в целях обоснованного выбора наиболее эффективного. Для этого требуется максимально полная информация, обеспечивающая надежность принятых в проекте решений.

Одна из трудностей при выборе метода производства — необходимость одновременного учета всех факторов, определяющих метод, и их взаимного влияния.

Химико-технологический процесс представляет собой совокупность ряда химических и физических методов переработки сырья и промежуточных продуктов в целях получения нового вещества. Этот процесс также включает в себя и ряд таких операций, как транспортирование, складирование, затаривание и т. д.

Таким образом, методы получения одного и того же продукта могут отличаться типом применяемого сырья, способом его переработки или тем и другим одновременно. Что касается отходов, то их количество и состав полностью зависят от сырья и способа его переработки и не являются независимыми переменными. Следовательно, выбор метода производства в химической промышленности сводится в основном к выбору

сырья и способа его переработки. Для этого требуется информация о сырье и способе его переработки по каждому из сравниваемых методов.

Наиболее полная и достоверная информация о методе производства может быть получена с освоенных и нормально эксплуатируемых предприятий. Однако чаще приходится сравнивать с уже освоеными в промышленности методами какой-либо вновь разрабатываемый способ производства. В этом случае задача получения информации усложняется, еще сложнее получить данные, необходимые для сравнения двух или нескольких методов, каждый из которых является вновь разрабатываемым. Наконец, наиболее сложен анализ вновь разрабатываемого метода, для которого нет аналогов.

Основой выбора метода производства — *выбор сырья и способа его переработки*. Под термином «сырье» условно понимается вся номенклатура сырья и вспомогательных продуктов (катализаторы, абсорбенты, адсорбенты, флотореагенты, растворители), используемых в данном производстве. Необходимую информацию о сырье можно разделить на две группы: исходные данные и данные, полученные в результате расчетов.

Исходная информация о сырье должна содержать, как минимум, следующие сведения: 1) наименование и качество сырья, необходимого для получения готового продукта с заданными свойствами. При этом особое внимание должно быть уделено его токсичности, огне- и взрывоопасности; 2) обеспеченность разрабатываемого производства сырьем к моменту ввода его в эксплуатацию; 3) данные, необходимые для материальных расчетов. Источниками указанной информации являются литературные, архивные и экспериментальные данные.

После получения всех данных о сырье необходимо определить, в какие продукты и каком количестве превращается сырье. Для этого нужно выполнить материальные расчеты, определить расходные коэффициенты по сырью, количеству и составу отходов и сточных вод.

Информация о способе производства также может быть разделена на две группы: информацию, получаемую в качестве исходных данных, и информацию, получаемую в результате расчетов.

Минимум исходной информации о методе производства составляют данные о методах переработки сырья (с указанием основных параметров технологического процесса), краткая характеристика основного технологического оборудования, необходимого для осуществления процесса, и сведения о предполагаемой мощности производства.

К информации, получаемой в результате технологических расчетов, относятся тип, размеры и число единиц оборудования, нужного для осуществления технологического процесса,

характеристика сооружений для размещения оборудования, расходы энергии и сведения о штатах, требуемых для эксплуатации производства.

После выбора способа производства или нескольких способов, подлежащих сравнению, определяют основные и вспомогательные физико-химические процессы, механические операции, их последовательность и оптимальные параметры режима на каждой стадии переработки сырья в конечный продукт.

Во многих случаях нормы технологического режима зависят от используемого оборудования, поэтому уже на данной стадии необходимо предварительно выбирать оборудование. Например, для разделения твердой и жидкой фаз можно использовать отстойники, гидроциклоны, фильтры и центрифуги. В зависимости от типа оборудования изменяется содержание твердой фазы в жидкости и влажность осадка.

Для каждого способа производства создают схему материальных потоков и энергетических связей производства, на которой отдельные процессы (нагрев, растворение, отстаивание, выпарка) и операции (измельчение, классификация и т. д.) обозначают прямоугольниками или кружками в их технологической последовательности, а потоки — линиями.

При выборе метода производства предпочтение следует отдавать тем способам, которые при равном качестве продукта обеспечивают меньшие энергетические затраты. В последние годы получили распространение энерготехнологические схемы производства аммиака, азотной и серной кислот, в которых тепло экзотермических процессов используется для выработки пара или привода турбокомпрессоров. Снижение расхода электроэнергии компенсирует увеличение капитальных затрат и приводит к уменьшению себестоимости продукции.

Материальный расчет (баланс) производства. Это расчет количеств загружаемых и получаемых продуктов на каждой стадии технологического процесса с определением расходных коэффициентов по-сырью и расчет состава и количества отходов и сточных вод. Он может быть составлен на единицу времени (сутки, час и т. д.), на единицу массы сырья или готовой продукции (тонну, килограмм и т. д.). Универсальным является материальный баланс, составленный на наиболее постоянную величину — единицу массы 100 %-ного готового продукта.

Материальный расчет составляют на основании закона сохранения масс:

$$\sum G_{\text{исх}} = \sum G_{\text{получ}}$$

где $\sum G_{\text{исх}}$, $\sum G_{\text{получ}}$ — сумма масс исходных и полученных веществ.

Отсюда материальный баланс любой стадии технологического процесса, в котором взаимодействуют вещества A и B , а получаются вещества C и D , может быть записан в общем виде следующим образом:

$$G_A + G_B = G_C + G_D + G'_A + G'_B + \Delta G,$$

где G_A , G_B , G_C , G_D — массы соответствующих веществ; G'_A , G'_B — массы веществ A и B , не вступившие в реакцию; ΔG — потери или примеси.

Материальные балансы рассчитывают с учетом состава сырья, степени протекания основных и побочных реакций, потерь на каждой стадии производства или степени извлечения полезного компонента.

Если балансы рассчитывают на единицу массы (сырья или продукта), то по данным балансов определяют материальные потоки (в кг/с, т/ч, м³/с или м³/ч) через каждый аппарат или машину, так как эти величины необходимы для последующего расчета аппаратуры.

На основании балансов рассчитывают расходные коэффициенты по исходным веществам, количество и состав газовых выбросов, сточных вод и отходов производства.

Тепловой расчет производства. Количество тепла, которое надо подвести к аппарату или отвести от него для проведения химического процесса, определяют на основании *теплового баланса*. Уравнение теплового баланса химического процесса может быть представлено в следующей форме:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

где Q_1 — тепло, отдаваемое теплоносителем аппарату и перерабатываемым веществам, кДж (ккал); Q_2 — тепло, вносимое в аппарат с перерабатываемыми веществами; Q_3 — тепловой эффект экзотермического процесса; Q_4 — тепло, уносимое из аппарата с продуктами реакции; Q_5 — тепло, расходуемое на нагревание отдельных деталей аппарата или отнимаемое от них хладагентом; Q_6 — тепло, теряемое аппаратом в окружающую среду.

$$\text{Отсюда } Q_1 = Q_4 + Q_5 + Q_6 - Q_2 - Q_3.$$

Тепловой баланс рассчитывают в соответствии с нормами технологического режима и физико-химическими свойствами веществ, участвующих в процессе. На основании теплового баланса определяют потоки теплоносителя (водяного пара, топлива, электроэнергии) или хладагента (кг/с, т/ч, м³/с, м³/ч) и удельный расход их на единицу продукции.

Выбор типа, расчет размеров и количества машин и аппаратов. На стадии аппаратурного оформления производства выбирают тип машин, аппаратов и транспортных устройств

для всех операций и процессов производства, рассчитывают размеры и число аппаратов по мощности технологической линии и производительности отдельных машин и аппаратов по ГОСТам, каталогам и фактической производительности, достигнутой на действующих предприятиях, решают вопросы о способах приема и транспортировки сырья, выдачи готовой продукции, удаления отходов производства, механизации и автоматизации всех операций и процессов.

Общие методы расчета аппаратов объемного типа изложены в гл. 1, а аппаратов других типов в гл. 5—12 и в литературе [3, 8, 17, 30, 61, 62, 65].

При выборе оборудования следует отдавать предпочтение стандартным или нормализованным машинам и аппаратам, так как они освоены промышленностью, их легче изготовить и стоимость их значительно ниже стоимости оборудования индивидуального изготовления. Стандартное оборудование проектированию не подлежит.

При выборе оборудования необходимо сравнивать: показатели различных его видов: 1) производительность (кг/с, т/сут); 2) ресурс работы, который определяют по каталогам или практическим данным (ч/год); 3) стоимость (руб./шт.); 4) надежность, которая может быть выражена через вероятность безотказной работы в течение заданного времени $P(\tau)$; 5) качество продукта — степень превращения для реакторов, содержание влаги (для фильтров, центрифуг и сушилок), величину кристаллов и т. д.; 6) энергетические затраты — общий расход энергии на единицу продукции (кДж/кг, руб./кг); 7) стоимость ремонтов — общие затраты на ремонты в течение года (руб./год); 8) затраты на обслуживание с учетом количества необходимого персонала и его зарплаты (чел.; руб./год); 9) соответствие данного типа машины или аппарата требованиям охраны труда, техники безопасности и охраны окружающей среды; 10) занимаемый объем и его стоимость (м³, руб.).

Критерием оптимальности выбора является минимум затрат на единицу продукции. При расчете следует учесть, что в случае параллельной работы ряда однотипных аппаратов надежность их увеличивается.

Надежность оборудования — это свойство выполнять заданные функции, сохраняя во времени установленные эксплуатационные показатели в требуемых пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Одним из факторов, определяющих надежность, служит *долговечность* — способность сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Выход эксплуатационных характеристик за допустимые пределы называют *отказом*. Например, отказом считается уменьшение производительности или напора насоса, турбокомпрессора, газодувки ниже заданной или их остановка из-за поломки, снижение выхода продукта ниже минимально допустимого в реакторе. Отказы подразделяются на две группы: внезапные — аварии, которые невозможно предвидеть, и постепенные, обусловленные износом, коррозией или снижением активности катализатора, которые можно предвидеть и предотвратить.

Надежность любого вида оборудования или технологической линии зависит от проектирования, изготовления и эксплуатации. Долговечность и надежность технических устройств может быть повышена на стадии проектирования, т. е. во время научных исследований, конструирования, расчетов и проектных разработок. Усилия и средства, затраченные на стадии проектирования, окупаются при эксплуатации, а проектирование без учета надежности оборудования приводит к снижению производительности технологических линий. Так, годовая производительность цехов экстракционной фосфорной кислоты и разбавленной азотной кислоты ниже запроектированной, так как проектировщики при расчете не учли надежность оборудования. Расчеты показывают, что при среднем времени безотказной работы для каждого аппарата или машины агрегата слабой азотной кислоты, равном 0,999, вся система будет простаивать сверх плана 17 суток в год. При мощности 400 т в сутки выработка азотной кислоты будет на 6800 т в год ниже плановой.

Теория надежности базируется на законах статистической математики, в частности теории вероятностей, и без статистических данных об отказах используемого оборудования затруднительно оценить его надежность.

Рассмотрим некоторые показатели, характеризующие надежность. Вероятность отказа $Q(\tau)$ отражает вероятность хотя бы одного отказа в течение времени τ . Вероятность безотказной работы $P(\tau)$ показывает вероятность отсутствия отказа в работе аппарата (устройства) за время τ . Эти величины связаны соотношением

$$P(\tau) = 1 - Q(\tau).$$

Интенсивность отказов $\lambda(\tau)$ — это отношение числа аппаратов $n(\tau)$, вышедших из строя за какой-то интервал времени $\Delta\tau$, к среднему числу аппаратов, находящихся в данном интервале в работоспособном состоянии \bar{m}_p , деленное на этот период времени:

$$\lambda\tau = n_i(\tau) / \Delta\tau \bar{m}_p.$$

Интенсивность отказов связана с вероятностью безотказной работы в случае экспоненциального распределения отказов следующим выражением:

$$P(\tau) = e^{-\int_0^{\tau} \lambda(\tau) d\tau}$$

Важно отметить, что интенсивность отказов сложного изделия $\lambda_A(\tau)$ (или технологической линии), состоящего из k узлов, равна сумме интенсивностей отказов отдельных узлов (аппаратов) $\lambda_i(\tau)$:

$$\lambda_A(\tau) = \sum_{i=1}^k \lambda_i(\tau),$$

а вероятность безотказной работы того же сложного изделия $P_A(\tau)$ равна произведению вероятностей безотказной работы узлов, входящих в это изделие:

$$P_A(\tau) = \prod_{i=1}^k P_i(\tau),$$

поэтому надежность технологической линии всегда будет ниже надежности отдельных аппаратов, составляющих эту линию.

При расчетах необходимо учитывать коэффициент экспансивного использования аппарата или машины K_a , равный отношению времени фактической работы аппарата или машины τ_f к календарному времени τ_k : $K_a = \tau_f / \tau_k$.

Из-за остановок на планово-предупредительные ремонты этот коэффициент всегда меньше единицы.

Долговечность машины характеризует *ресурс* — наработка узла, машины или аппарата до предельного состояния, оговоренного в технической документации. Он может измеряться в часах работы, количестве переработанного сырья или в других единицах.

Надежность технологических линий и агрегатов может быть существенно улучшена за счет установки резервного оборудования — насосов, компрессоров или аппаратов, которое включают в работу в случае отказа действующего. Иногда резервируют целые технологические линии.

Резервирование приводит к увеличению капитальных затрат, но в то же время уменьшает простои основного оборудования из-за отказов. Например, в аппаратах для осуществления гетерогенных каталитических процессов количество загруженного катализатора в 1,3—1,4, а иногда в 2—3 раза больше расчетного. Дополнительное количество катализатора является горячим резервом и обеспечивает длительную устойчивую работу аппарата.

В современных системах большой единичной мощности синтеза аммиака, слабой азотной кислоты, карбамида, аммиачной селитры, фосфорной кислоты и других практически нет резервных машин и аппаратов, что снижает их надежность и приводит к внеплановым остановкам из-за отказов. Так, система синтеза аммиака производительностью 1360 т в сутки состоит из 83 машин и аппаратов. Принимая среднюю вероятность безотказной работы каждого из них равной 0,999, найдем, что вероятность безотказной работы технологической линии в целом составит $P_A(\tau) = 0,999^{83} = 0,9264$. Это указывает на реальную возможность отказов. На многих системах в течение года происходит до 6 внеплановых остановок в основном из-за отказов оборудования или автоматики. Каждый час простоя такой системы приносит около 5 тыс. рублей убытков.

Резервирование существенно увеличивает надежность отдельных узлов и технологической линии в целом. Так, для случая постоянно включенного (горячего) резерва вероятность безотказной работы системы из n аппаратов

$$P_n(\tau) = 1 - [1 - P_1(\tau)]^n,$$

а для случая холодного дублирования, когда резервный аппарат включается после отказа основного,

$$P_2(\tau) = (1 + \lambda\tau)/e^{\lambda\tau}.$$

Последнее выражение справедливо, если переключатели, соединяющие резервный аппарат с рабочей системой, обладают полной надежностью.

После выбора и расчета оборудования составляют технический проект нестандартного оборудования — напорных баков, емкостей, бункеров, реакторов, некоторых выпарных аппаратов, теплообменников и колонных аппаратов. Он включает эскизные чертежи (общий вид аппарата, некоторые виды) и краткую техническую характеристику. Особое внимание следует уделить применению типовых и стандартных узлов и деталей, выбору материала с учетом условий работы (см. гл. 3) и разработке мероприятий, обеспечивающих заданный технологический режим, т. е. средств контроля и управления процессом. Технический проект разрабатывают механики совместно с технологами, а рабочие чертежи выполняют в конструкторском бюро завода-изготовителя.

Подбор и расчет оборудования заканчивают разработкой обвязки технологических узлов, т. е. аппаратов или группы аппаратов, необходимых для выполнения определенной технологической операции — смешения, растворения, кристаллизации, выпарки и т. д. Обвязка представляет собой весь комплекс трубопроводов и арматуры, предназначенных для подачи и регулирования исходных веществ, теплоносителя, отвода

продуктов, хладагента и контроля производства. Вопросы контроля и управления технологическим процессом разрабатывают совместно технологи, специалисты по автоматике и механике.

На следующей стадии проектирования рассчитывают трубопроводы, подбирают материал для их изготовления с учетом условий эксплуатации (P , T , свойства среды) и арматуру (см. гл. 6).

После решения вопросов аппаратурного оформления обвязки технологических узлов вычерчивают полную технологическую схему производства и составляют задание отделу КИП и автоматики на детальную разработку средств автоматического контроля и управления технологическим процессом.

Объемно-планировочное решение (компоновка) производства и размещение оборудования. Под компоновкой цеха понимается состав помещений, необходимых для размещения оборудования и вспомогательных служб цеха (производства), их размеры и взаимное расположение. Компоновка производства должна предусматривать полное соответствие специфическим условиям технологического процесса, безопасность и удобство обслуживания оборудования, удобство монтажа и ремонта оборудования и минимальную стоимость строительства.

Первоначально решается вопрос о размещении оборудования на открытых площадках и этажках (постаменты). Обычно стремятся к максимальному выносу оборудования из закрытых помещений, так как это удешевляет строительство, упрощает монтаж и разборку аппаратуры при ремонте, устраняет необходимость в вентиляции. Перечень аппаратуры, которая устанавливается на открытых площадках, приведен в литературе [78]. Однако при этом необходимо учитывать специфику химического производства (токсичность и взрывоопасность перерабатываемых веществ), технологические требования и климатические условия в пункте строительства. Производства катализаторов, реактивов, сильно пылящих и агрессивных веществ, растворов с высокой температурой кристаллизации размещают только в закрытых помещениях, а также большинство машин — компрессоры, газодувки, насосы, мельницы, дробилки, грохота, аппаратуру для растворения, упаривания, фильтрации и сушки. При компоновке учитывают степень токсичности, пожаро- и взрывоопасности производства, необходимость размещения вспомогательных производственных (вентиляционные камеры, электроподстанции и электрораспределительные устройства, цеховые лаборатории) и обслуживающих помещений, таких, как ремонтные мастерские, кладовые, бытовые и административные.

После решения вопросов объемной планировки приступают к размещению оборудования по площадкам и этажам с учетом его размеров и массы, направления материальных потоков, токсичности перерабатываемых веществ, удобства монтажа, ремонта и обслуживания, а также требований охраны труда и техники безопасности. Как правило, оборудование подразделяют на группы, в каждой из которых собирают машины и аппараты близкого типа или характеризующиеся каким-либо общим признаком (например, с сильной вибрацией и пылевыделением, выделением токсичных или агрессивных веществ) и распределяют эти группы по соответствующим производственным помещениям: компрессорным, насосным, реакторным, сушильным и т. д. Оборудование изображают на чертежах компоновки производства (цеха).

Выполнение этой части проектирования заканчивают составлением следующих заданий:

энергоотделу с указанием размещения потребителей электроэнергии, их мощности и режим работы;

отделу генеральных планов с чертежами компоновки зданий, сооружений и площадок;

отделу водоснабжения и канализации с указанием потребителей воды, требований к ее качеству и расхода;

строительному отделу на разработку архитектурно-строительной части проекта (первое задание) в виде чертежей цеха с нанесенным оборудованием и указанием максимальных и минимальных полезных нагрузок от машин и аппаратов, трубопроводов и арматуры, а также от деталей машин и аппаратов при ремонте;

отделу внешних сетей на проектирование различных технологических трубопроводов между цехами;

сметному отделу на составление сметы строительства, в задании сообщают объем и тип зданий, сооружений и площадок, спецификацию оборудования и изделий, необходимых для проектируемого производства.

В последующем указанные задания уточняются и согласовываются с соответствующими отделами. По данным подбора и расчета оборудования составляют спецификацию оборудования, задание на проектирование нестандартного оборудования, технологическую схему производства, сортамент труб и арматуры.

Монтажная проработка заключается в выполнении чертежей трубопроводов (обвязки), связывающих различные аппараты в цехе. В данной части проекта намечают трассы трубопроводов и способы их соединения с аппаратами, разрабатывают способы обогрева трубопроводов, предназначенных для замерзающих жидкостей, меры устранения вибрации, гидравлических ударов и температурной деформации трубопроводов,

способы крепления трубопроводов, места размещения арматуры. Проект должен обеспечивать удобство обслуживания и ремонта трубопроводов, выполняться в соответствии с требованиями техники безопасности и противопожарными правилами.

Монтажная проработка заканчивается выполнением монтажно-технологической схемы, на которой изображают оборудование и его трубопроводную обвязку, монтажных чертежей, на которых вычерчивают в масштабе аппаратуру и все трубопроводы, составлением журнала трубопроводов, сводной спецификации на трубы и арматуру и монтажной инструкции.

Оформление проектной документации осуществляют по мере готовности ее отдельных частей. Чертежи, схемы и расчеты, подготовленные разными отделами проектного института, согласовываются, проверяются и утверждаются. Состав технического проекта описан в разделе 15.4.

При разработке проектов промышленных предприятий, зданий и сооружений проектная организация должна руководствоваться действующими нормами и правилами по проектированию и строительству, каталогами типовых проектов и конструкций, выпускающихся предприятиями стройиндустрии. В зависимости от характера проектируемого объекта и стадии проектирования пользуются разным набором нормативных документов.

Графическая часть проектов — размер листов чертежей, масштаб, толщина линий, чертежные шрифты, принципы построения изображений на чертежах, условные обозначения — регламентируются специальными нормативными документами.

С 1971 г. в Советском Союзе введена единая система конструкторской документации (ЕСКД), которая представлена специальным разделом Государственных стандартов (группа Т-52). Многие стандарты данной системы распространяются и на строительную документацию, во вводной части которых имеется указание об этом.

Действует несколько стандартов на условные графические обозначения только для строительных чертежей: ГОСТ 11691—66 — условные графические обозначения элементов зданий; ГОСТ 11692—66 — условные графические обозначения элементов конструкции; ГОСТ 11628—65 — условные графические обозначения санитарно-технических устройств.

Глава 16. ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Подготовка инженера химика-технолога завершается выполнением дипломного проекта, который может включать элементы исследования какого-либо технологического процесса.

Основная цель дипломного проектирования состоит в систематизации, закреплении и углублении знаний общенаучных, инженерных, специальных и социально-политических дисциплин, овладении студентами методами проектирования химических производств и освоении навыков самостоятельной работы при проектировании с использованием нормативной, научно-технической и справочной литературы.

Одновременно при выполнении дипломного проекта и его защите студент показывает уровень освоения всех дисциплин институтского курса и умение использовать знания при решении инженерных задач.

16.1. ЗАДАНИЕ НА ДИПЛОМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Задание на дипломное проектирование составляет руководитель проекта и утверждает заведующий кафедрой. Тема дипломного проекта утверждается приказом по институту. Задание выдают студенту до отъезда на преддипломную практику. В задании указываются: тема дипломного проекта, производительность цеха, вид сырья, способ производства, разделы расчетно-пояснительной записки, подлежащие разработке, аппараты или машины, которые необходимо детально рассчитать, и объем графической части проекта.

В дипломном проекте обязательно должны содержаться элементы новизны: усовершенствование технологии, повышение качества продукта, применение более совершенного оборудования, повышение производительности труда за счет механизации и автоматизации производства, увеличение степени переработки или извлечения полезного компонента, а также уменьшение загрязнения окружающей среды за счет усовершенствования очистки газовых выбросов и сточных вод.

16.2. СОДЕРЖАНИЕ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

Дипломный проект состоит из расчетно-пояснительной записки (100—150 страниц) и графической части, объем которой указывается в задании, но должен быть не менее 6 листов формата А4.

- В расчетно-пояснительную записку включаются следующие разделы: 1) общий; 2) технологический; 3) расчет и подбор оборудования; 4) автоматизация контроля и управления; 5) компоновка оборудования; 6) охрана труда и окружающей среды; 7) гражданская оборона; 8) экономический; 9) краткая аннотация проекта и 10) список использованной литературы.

Общий раздел. Состоит из введения и обоснования точки

Табл. 16.1. Нормы технологического режима отделения

№ п/п	Контролируемый аппарат и поток	Контролируемый параметр	Показатели по регламенту	Частота определения	Кто определяет

строительства нового цеха (завода) или целесообразности модернизации, реконструкции действующего производства.

Во введении приводятся краткие данные о развитии основной химической промышленности, излагаются решения партии и правительства о развитии данной отрасли химической промышленности и задания пятилетнего плана. Описываются масштабы производства продукта, который должен выпускать проектируемый цех, основные области его применения и эффективность использования в народном хозяйстве.

Мощность цеха (завода) принимают на основе анализа потребления и производства данного продукта в выбранном районе с учетом оптимального расстояния перевозок, перспективных изменений потребностей и рациональной производительности технологической линии.

Технологический раздел. Это наиболее ответственный раздел расчетно-пояснительной записки, так как на основе технологических расчетов выполняются почти все другие разделы проекта. Эта часть включает в себя следующие подразделы.

1. Обзор существующих методов производства и выбор способа для данного проекта. Обзор составляют по научно-технической и патентной литературе, сопоставляют достоинства и недостатки различных методов производства данного продукта и выбирают оптимальный способ.

2. Сырье и продукция. В данном разделе приводят данные о составе сырья и требованиях к качеству продукта в соответствии с ГОСТом и ТУ. Описывают основные физико-химические свойства исходных веществ и продуктов, их воздействие на человека и ПДК в воздухе и сточных водах.

3. Физико-химические основы производства. Влияние технологических параметров (P , T , C , катализаторы и др.) на равновесие и кинетику основных и побочных реакций, осуществляемых в данном производстве. Оптимальный технологический режим работы основных аппаратов.

4. Описание технологической схемы производства. Технологическую схему цеха (отделения) изображают на 1—2 листах стандартного формата с указанием технологических потоков и энергетических связей.

Нормы технологического режима работы аппаратов, методы их определения и частоту контроля удобно свести в таблицу (табл. 16.1).

5. Материальные балансы. Необходимы для расчета расхода сырья и вспомогательных материалов на заданное количество продукта, для расчета тепловых балансов и, следовательно, расчета расхода тепла (пара, топлива, электроэнергии на технологический процесс), для определения размеров и числа машин и аппаратов, количества и состава отходов, газовых выбросов и сточных вод. Материальные расчеты лежат в основе всех инженерных расчетов.

Балансы составляют на 1000 кг сырья или продукта, на секундную, часовую или суточную производительность, выражаемую в килограммах, килограмм-молях или тоннах.

Помимо общих балансов, составляют балансы по основному компоненту: по P_2O_5 в производстве фосфорных удобрений, по S и H_2O в производстве серной кислоты и т. д.

Материальные балансы рассчитывают по отдельным аппаратам последовательно по всей технологической линии.

6. Тепловые балансы. Их составляют по аппаратам или стадиям производства в целях определения расхода теплоносителя, хладагента или температуры в конце процесса.

Расчет тепловых потерь обязателен, так как в зависимости от температуры процесса, величины и устройства аппарата потери изменяются в пределах 1—35 % от суммарного прихода тепла. Все тепловые расчеты выполняют в системе СИ (в кДж, МДж или кВт). Результаты расчетов сводят в таблицы.

Расчет основного и подбор вспомогательного оборудования. Основное оборудование, подлежащее детальному расчету, указывает руководитель. К нему относят один или два аппарата. Все прочие аппараты и машины подбирают по их основным технологическим характеристикам без подробного расчета.

Выбор основного аппарата. Необходимо описать по литературным данным конструкции аппаратов, применяемых для проведения проектируемого основного технологического процесса (экстракции, сжигания, окисления и т. д.). С учетом их достоинств и недостатков выбирают аппарат определенного типа и мощности. Порядок и объем расчетов оборудования указан в разделе 1.4.

Расчет и подбор оборудования заканчивают составлением таблицы (табл. 16.2).

Порядковый номер аппарата должен соответствовать номеру на технологической схеме, а название — нормативным документам (ГОСТ, ТУ, каталогам). Материал приводят по группам, например углеродистая сталь, нержавеющая сталь, кислотоупорный кирпич и т. д.

Табл. 16.2. Спецификация основного и вспомогательного оборудования цеха (отделения)

№ п/п	Наименование аппарата или машины	ГОСТ, ТУ, тип	Материал	Масса, кг	Основные характеристики
1	2	3	4	5	6

В основные характеристики входят следующие показатели: производительность, напор (разряжение, давление), скорость вращения, мощность привода и габаритные размеры (длина L , диаметр D , ширина B , высота H).

Автоматизация контроля и управления. Современными мощными технологическими линиями невозможно управлять без применения средств автоматизации. В данном разделе описывают принципы автоматизации контроля и управления проектируемым производством, схему автоматизации, изображаемую на технологической схеме или на отдельном листе, приводят расчет какого-либо регулятора, относящегося к основному аппарату, и составляют спецификацию автоматических приборов контроля и управления по основному отделению.

Расчет регулятора (температуры, давления, расхода, концентрации, соотношения или рН) выполняют по заданию консультанта по автоматике, а прочие средства контроля и автоматизации технологического процесса подбирают по каталогам в соответствии с их характеристиками и сводят в таблицу (табл. 16.3).

Табл. 16.3. Спецификация приборов контроля и автоматики

Номер позиций	Измеряемая (регулируемая) величина	Место измерения	Пределы измерения	Свойства среды	Наименование, тип, характеристика прибора	Количество	Литературный источник

Охрана труда и окружающей среды. Задача любого проекта — обеспечение нормальных условий труда для работающих на предприятии (в цехе) и минимальное загрязнение окружающей среды за счет отходов, газовых выбросов и сточных вод. Требования охраны труда и окружающей среды необходимо учитывать уже при выборе технологической схемы производства.

В расчетно-пояснительной записке должны содержаться следующие параграфы: 1) производственные вредности проектируемого цеха; 2) расчет приточно-вытяжной и аварийной

вентиляции; 3) расчет отопления цеха с учетом выделения тепла аппаратурой, размещенной в цехе; 4) расчет освещения цеха (отделения); 5) индивидуальные средства защиты работающих; 6) обучение и инструктаж по безопасным методам работы; 7) расчет бытовых и санитарных помещений и устройств; 8) электробезопасность и противопожарные мероприятия в цехе; 9) отходы, газовые выбросы и сточные воды; 10) методы утилизации, рекуперации и очистки отходов производства, сточных вод и газовых выбросов, обратное водоснабжение.

Санитарно-бытовые помещения (гардероб, душ, санузлы и медпункт), если они располагаются в отдельном административно-бытовом корпусе и не попадают в основные строительномонтажные чертежи, должны быть вычерчены на миллиметровке или кальке и вшиты в расчетно-пояснительную записку.

Гражданская оборона. В данном разделе следует описать весь комплекс мероприятий, осуществляемых на предприятии и в цехе при угрожающем положении: режим работы цеха, категоричность предприятия и поселка (города) по гражданской обороне, формирования гражданской обороны в цехе, меры по защите оборудования и коммуникаций, коллективные и индивидуальные средства защиты трудящихся.

Компоновка оборудования. Строительная часть дипломного проекта должна соответствовать требованиям технологического процесса, обеспечивать комфортабельные и безопасные условия труда для всех работающих в цехе. В то же время все строительные решения должны быть экономически оправданными, т. е. отвечать принципу экономии капитальных затрат. Объемно-планировочные и конструктивные решения промышленных зданий и сооружений зависят от габаритов, конфигурации и массы оборудования, его размещения, условий эксплуатации и свойств перерабатываемых веществ. В целях уменьшения стоимости строительства значительную часть технологического оборудования размещают на открытых площадках и этажерках.

Очень важным вопросом является компоновка оборудования, т. е. размещение его на определенных отметках и в определенном месте внутри здания, на открытой площадке или этажерке. Сложность компоновки объясняется большим числом требований, которые должны при этом выполняться: минимальная длина трубопроводов и транспортных устройств между аппаратами, удобство монтажа, ремонта и обслуживания машины и аппаратов, для чего должны быть предусмотрены проемы, площадки и проходы, минимальная длина пролетов, достаточная освещенность, хорошая вентиляция всех рабочих площадок в помещениях.

Требования технологии, строительного дела и охраны труда необходимо решать комплексно. Конструкция здания долж-

на соответствовать требованиям технологии, пожаро- и взрывоопасности производства, климатическим условиям, а строительные материалы противостоять коррозионному воздействию среды.

В соответствии с принятыми решениями и расчетами вычерчивают строительно-монтажные (компоновочные) чертежи — планы, продольный и поперечный разрезы, всего 3—4 листа.

Экономический раздел. К данной части проекта относятся выбор и обоснование места (пункта) строительства или реконструкции (расширения) действующего производства. Этот раздел помещают в общей части расчетно-пояснительной записки, а его содержание описано в гл. 13 и в литературе [75].

В экономическую часть расчетно-пояснительной записки входят следующие параграфы:

1. Обоснование производственной мощности проектируемого предприятия или цеха. Мощность технологической линии рассчитывают по производительности ведущего оборудования. Составляют таблицу баланса времени работы основного оборудования, в которой учитывают затраты времени на все виды ремонтов и остановки по технологическим причинам.

Число технологических линий зависит от наличия сырья, потребности в данном продукте и допустимого расстояния перевозок (гл. 14).

2. Расчет объема производства и реализации продукции. Расчет сводят в таблицу, в которой определяют годовой объем реализуемой продукции в натуре и в стоимостном выражении с учетом действующих оптовых цен.

3. Расчет капитальных затрат на строительство (реконструкцию) проектируемого предприятия или цеха.

4. Расчет потребности в сырье и материалах на годовую программу. Его ведут по принятой мощности цеха и нормам расхода сырья и материалов на единицу продукции.

5. Расчет плановых заготовительных цен на сырье и материалы. Заготовительные цены определяют с учетом отпускных цен поставщиков, стоимости перевозок и наценок.

6. Расчет стоимости сырья и материалов. Стоимость сырья на годовую программу рассчитывают по годовой их потребности (пункт 4) и заготовительной цене (пункт 5).

7. Баланс времени работы одного среднесписочного рабочего. При расчете эффективного рабочего времени учитывают выходные и праздничные дни, невыходы на работу по болезни, очередные и другие отпуска, выполнение гособязанностей и продолжительность рабочего дня.

8. Расчет списочной численности работающих. Расчет числа работающих ведут отдельно по основным и вспомогатель-

ным рабочим и рабочим, занятым текущим ремонтом оборудования. При расчете учитывают квалификацию рабочих.

9. Расчет планового фонда заработной платы рабочих. Фонд заработной платы рабочих определяют по списочной численности рабочих данной квалификации, тарифной ставке и числу рабочих дней в году с учетом доплат.

10. Расчет штата и фонда заработной платы цехового персонала. В данном разделе указывают должности инженерно-технических работников и младшего обслуживающего персонала, их месячные оклады, число штатных единиц, дополнительные оплаты, премии и вычисляют общий годовой фонд заработной платы.

11. Расчет амортизационных отчислений, которые определяют по укрупненным отраслевым нормам отдельно для зданий, сооружений и оборудования.

12. Смета расходов на содержание и эксплуатацию оборудования.

13. Смета цеховых расходов. Включает зарплату цехового персонала (пункт 10), отчисления на социальное страхование, содержание и текущий ремонт производственных зданий и сооружений, амортизацию производственных зданий и сооружений (пункт 11), затраты по охране труда, а также расходы на износ инвентаря, изобретательство и рационализацию.

14. Плановая калькуляция себестоимости продукции.

15. Расчет прибыли от реализации продукции. Прибыль рассчитывают на годовой выпуск продукции как разность между стоимостью продукции по отпускным ценам (пункт 2) и ее себестоимостью (пункт 14).

16. Потребности цеха в нормируемых оборотных средствах рассчитывают по среднесуточной потребности цеха в материальных ресурсах (сырье, топливо, материалы), выраженной в рублях и норме запаса.

17. Основные технико-экономические показатели проектируемого цеха. В этом разделе сопоставляют технико-экономические показатели проектируемого и действующего цехов на годовую мощность: объем реализуемой продукции, численность работающих, производительность труда, общий фонд заработной платы, среднегодовая зарплата одного работающего, полная себестоимость продукции, капитальные затраты, годовая прибыль, уровень общей рентабельности и срок окупаемости капитальных вложений.

16.3. ОФОРМЛЕНИЕ РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Расчетно-пояснительную записку к дипломному проекту печатают на машинке или пишут от руки на одной стороне писчей бумаги стандартного формата. С левой стороны страницы

оставляют поле для переплета шириной 25 мм, справа 5—10 мм, сверху и снизу поля шириной 15 мм. Высота букв 2,5—5 мм, пространство между строчками 5—7 мм. Заголовки разделов и параграфов необходимо выделять пробелами шириной в две строки, а разделы лучше начинать с новой страницы. После титульного листа помещают задание на дипломный проект, затем содержание расчетно-пояснительной записки. Дальнейшее расположение материала описано в разделе 16.2.

Нумерация страниц сквозная, а рисунков (графиков) и таблиц по разделам.

Расчетные формулы, кроме общеизвестных, способы производства, физико-химические константы веществ, значения различных коэффициентов и норм, взятые из литературы, необходимо приводить со ссылкой на соответствующую литературу.

Примеры: [1] *Лащинский А. А., Толчинский А. Р.* Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Справочник.— Л.: Машиностроение, 1970.— 752 с.; [2] *Киприанов Ю. И., Зотов Б. Г., Зайцев В. А.* Высокоскоростной аммонизатор для производства фосфатов аммония и сложных удобрений.— Хим. и нефтяное машиностроение, 1976, № 1, с. 8; [3] *Павлов В. М.* Карусельный фильтр. Авт. св. СССР, кл. ВО1 d 33/24, № 421340, опубл. 28.08.74.— РЖХ, 1975, 9И61П.

16.4. ОФОРМЛЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОЕКТА

В графическую часть проекта входят: технологическая схема производства и схема автоматизации цеха (отделения), которые могут быть совмещены (1—2 листа); чертежи основных аппаратов (3—4 листа); строительно-монтажные чертежи (2—3 листа) и таблица экономических показателей проектируемого производства (1 лист). Все чертежи должны быть выполнены в карандаше в соответствии с требованиями ЕСКД: форматы чертежей выбирают по ГОСТ 2.301—68, а масштабы по ГОСТ 2.302—68. Каждый чертеж должен иметь основную надпись (штамп), выполняемую в соответствии с ГОСТ 2.104—68 и располагаемую в правом нижнем углу чертежа.

Технологическую схему вычерчивают на 1—3 листах стандартного формата 24, причем ее всегда считают за один лист. Схема должна давать ясное представление о технологических потоках данного производства, об используемом оборудовании и энергетических связях между аппаратами.

Все машины и аппараты на схеме обозначаются порядковым номером, который необходимо располагать по часовой стрелке. Перечень оборудования, его обозначения, количество и основные характеристики размещают на чертеже, в его правой части. Технологические потоки и энергетические связи

(разные виды сырья, газы, растворы, продукты, пар и т. д.) могут обозначаться цветными линиями или цифровыми индексами в соответствии с ГОСТ. Принятые обозначения потоков необходимо привести на чертеже.

Условные графические изображения средств контроля (термометры, термопары, манометры, уровнемеры), приборов (потенциометры, мосты) и механизмов управления (клапаны, задвижки, вентили и т. д.) должны соответствовать ГОСТ 2.721—68.

Для одного-двух аппаратов необходимо выполнить чертежи общего вида или сборочный чертеж по ГОСТ 2.109—68, виды, разрезы и сечения наиболее сложных узлов по ГОСТ 2.305—68, а также чертежи ответственных деталей.

На чертеже общего вида (сборочном) размещают: 1) таблицу штуцеров, в которой должно содержаться буквенное обозначение штуцера, его назначение, диаметр условного прохода D_y и условное давление среды P_y ; 2) технические условия, в которых отражают назначение аппарата, его основные характеристики — габаритные размеры, массу, скорость вращения, тип редуктора, тип, мощность и скорость вращения электродвигателя; 3) технические требования, в них отражают методы изготовления и испытаний, способы футеровки и изоляции, применение определенных видов сварки.

Надписи, позиции и технические условия должны выполняться в соответствии с ГОСТ 2.109—68 и ГОСТ 2.119—73.

Спецификацию деталей и составных частей аппарата, изображенного на чертеже общего вида, составляют по ГОСТ 2.108—68 на отдельных листах формата 11 и вшивают их в расчетно-пояснительную записку. Каждый лист спецификации снабжают основной надписью.

Составные части (узлы), разрезы и виды размещают на последующих листах, на чертеже общего вида их заключают в окружность и обозначают римской цифрой. На чертежах узлов представляют все необходимые размеры и показывают сварные швы в соответствии с ГОСТ 2.312—72.

Детали оборудования вычерчивают на отдельных форматах, каждая из которых снабжается основной надписью.

Строительно-монтажные чертежи должны давать четкое представление о размещении технологического оборудования, подъемно-транспортных машин (краны, тельферы, конвейеры) и крупных газопроводов и трубопроводов. Оборудование на этих чертежах изображают упрощенно, показывая их контурные очертания.

Спецификацию оборудования, размещенного на строительно-монтажных чертежах, выполняют на отдельных листах формата 11 по ГОСТ 2.108—68 и подшивают в расчетно-пояснительную записку.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Материалы XXV съезда КПСС.*— М.: Полнтиздат, 1976.— 256 с.
2. *Л. А. Костандов.* Химическая промышленность СССР к XXV съезду КПСС.— М.: Химия, 1976.— 88 с.
3. *А. Г. Касаткин.* Основные процессы и аппараты химической технологии.— М.: Химия, 1973.— 750 с.
4. *И. Я. Клинов.* Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы.— М.: Машиностроение, 1967.— 468 с.
5. *И. Я. Клинов, П. Г. Удыма, А. В. Молоканов, А. В. Горяинова.* Химическое оборудование в коррозионностойком исполнении.— М.: Машиностроение, 1970.— 592 с.
6. *Г. Я. Воробьева.* Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств.— М.: Химия, 1975.— 816 с.
7. *А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский.* Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Справочник.— Л.: Машиностроение, 1970.— 752 с.
8. *Справочник сернокислотчика.* Под ред. К. М. Малина.— М.: Химия, 1971.— 744 с.
9. *Справочник химика.* Под ред. Б. П. Никольского, т. V.— М.— Л.: Химия, 1966.— 972 с.
10. *Л. З. Альперт.* Основы проектирования химических установок.— М.: Высшая школа, 1976.— 270 с.
11. *Г. Л. Вихман, С. А. Круглов.* Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов.— М.: Машиностроение, 1978.— 328 с.
12. *А. Э. Генкин.* Оборудование химических заводов.— М.: Высшая школа, 1978.— 272 с.
13. *А. Д. Домашнев.* Конструирование и расчет химических аппаратов.— М.: Машгиз, 1961.— 624 с.
14. *Н. А. Козулин, В. Н. Соколов, А. Я. Шапиро.* Примеры и задачи по курсу оборудование заводов химической промышленности.— М.: Машиностроение, 1966.— 491 с.
15. *А. С. Криворот.* Конструкция и основы проектирования машин и аппаратов химической промышленности.— М.: Машиностроение, 1976.— 376 с.
16. *Р. З. Рахмилевич, С. И. Зусмановская.* Расчет аппаратуры, работающей под давлением.— М.: Издат. стандартов, 1968.— 180 с.
17. *О. В. Румянцев.* Оборудование цехов синтеза высокого давления в азотной промышленности.— М.: Химия, 1970.— 376 с.
18. *Вертикальные аппараты с перемешивающими устройствами.* Каталог — справочник.— М.: Цинтихимнефтемаш, 1971.— 49 с.
19. *Э. А. Васильцев, В. Г. Ушаков.* Аппараты для перемешивания жидких сред. Справочное пособие.— Л.: Машиностроение, 1979.— 272 с.
20. *Н. А. Бакланов.* Насосы в химической промышленности.— Л.: Химия, 1977.— 72 с.

21. М. И. Ведерников. Компрессорные и насосные установки химической промышленности.— М.: Высш. школа, 1974.— 358 с.
22. Лопастные и роторные насосы. Каталог.— М.: Цинтихимнефтемаш, 1973.— 84 с.
23. Центробежные вентиляторы. Под ред. Т. С. Соломаховой.— М.: Машиностроение, 1975.— 415 с.
24. В. М. Черкасский. Насосы. Вентиляторы. Компрессоры.— М.: Энергия, 1977.— 422 с.
25. В. И. Борзенков. Вакуум-насосы в химической промышленности.— М.: Машиностроение, 1964.— 72 с.
26. В. А. Успенский, Ю. М. Кузнецов. Струйные вакуумные насосы.— М.: Машиностроение, 1973.— 145 с.
27. Н. А. Бакланов. Трубопроводы в химической промышленности.— Л.: Химия, 1977.— 96 с.
28. М. И. Севостьянов. Технологические трубопроводы нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов.— М.: Химия, 1972.— 312 с.
29. Д. Ф. Гуревич, О. Н. Шпаков, Ю. Н. Вишнев. Арматура химических установок.— Л.: Машиностроение, 1979.— 320 с.
30. А. О. Спиваковский, В. К. Дьячков. Транспортирующие машины.— М.: Машиностроение, 1968.— 504 с.
31. Ф. Л. Марон, А. В. Кузьмин. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин.— Мн.: Высшая школа, 1977.— 272 с.
32. О. П. Вдовенко. Пневматический транспорт на предприятиях химической промышленности.— М.: Машиностроение, 1966.— 136 с.
33. А. Я. Малис. Пневматический транспорт сыпучих материалов при высоких концентрациях.— М.: Машиностроение, 1969.— 193 с.
34. И. Я. Рязумов. Пневмо- и гидротранспорт в химической промышленности.— М.: Химия, 1979.— 248 с.
35. С. П. Орлов. Дозирующие устройства.— М.: Машиностроение, 1966.— 288 с.
36. С. П. Орлов, С. С. Михайловский, К. К. Тимофеев. Весы и дозаторы. Справочник.— М.: Машиностроение, 1972.— 226 с.
37. Приборы для измерения и дозирования массы. Номенклатурный справочник.— М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1977.— 80 с.
38. П. М. Сиденко. Измельчение в химической промышленности.— М.: Химия, 1976.— 368 с.
39. С. Н. Ганз. Очистка промышленных газов. Справочное пособие.— Днепропетровск: Проминь, 1977.— 118 с.
40. М. Л. Маргулис, М. Г. Мазус, А. С. Мандрико, М. И. Биргер. Рукавные фильтры.— М.: Машиностроение, 1977.— 256 с.
41. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Под ред. А. А. Русанова.— М.: Энергия, 1975.— 296 с.
42. В. Н. Ужов. Очистка промышленных газов электрофильтрами.— М.: Химия, 1967.— 344 с.
43. В. Н. Ужов, Б. И. Мяжков. Очистка промышленных газов фильтрами.— М.: Химия, 1970.— 320 с.
44. В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. Очистка газов мокрыми фильтрами.— М.: Химия, 1972.— 247 с.
45. Б. Н. Борисоглебский, В. П. Абрамов. Советские фильтры для химических производств.— Хим. и нефт. машиностроение, 1970, № 4, с. 13.
46. В. А. Жужиков. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий.— М.: Химия, 1971.— 440 с.
47. Фильтры для жидкостей. Каталог.— М.: Цинтихимнефтемаш, 1974.— 246 с.
48. В. И. Соколов. Центрифугирование.— М.: Химия, 1976.— 408 с.
49. Д. Е. Шкоропад. Центрифуги для химических производств.— М.: Машиностроение, 1975.— 246 с.
50. А. М. Бакластов. Проектирование, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок.— М.: Энергия, 1970.— 568 с.

51. Т. А. Колач, Д. В. Радун. Выпарные станции.— М.: Машгиз, 1963.— 396 с.
52. Н. П. Попов. Выпарные аппараты в производстве минеральных удобрений.— Л.: Химия, 1974.— 128 с.
53. П. Г. Удыма. Аппараты с погружными горелками.— М.: Машиностроение, 1973.— 272 с.
54. Г. А. Аксельруд, А. Д. Молчанов. Растворение твердых веществ.— М.: Химия, 1977.— 272 с.
55. А. В. Бэмфорт. Промышленная кристаллизация.— М.: Химия, 1969.— 240 с.
56. Л. Н. Матусевич. Кристаллизация из растворов в химической промышленности.— М.: Химия, 1968.— 304 с.
57. П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская, В. Ф. Фролов. Массообменные процессы химической технологии.— Л.: Химия, 1975.— 336 с.
58. С. А. Анастасиади, С. С. Лачинов, И. И. Подольский. Каталитические реакторы синтеза аммиака, обзорная информация.— М.: НИИТЭХИМ, 1976.— 58 с.
59. Катализ в кипящем слое. Под ред. И. П. Мухленова, В. М. Померанцева.— Л.: Химия, 1978.— 232 с.
60. О. Левеншиль. Инженерное оформление химических процессов.— М.: Химия, 1969.— 624 с.
61. Общие основы химической технологии / С. Бретшнайдер, В. Кавецкий, Я. Лейко, Р. Марциновский.— Л.: Химия, 1977.— 504 с.
62. Р. Михаил, К. Кырлогану. Реакторы в химической промышленности.— Л.: Химия, 1968.— 388 с.
63. В. Н. Соколов, И. В. Доманский. Газожидкостные реакторы.— Л.: Машиностроение, 1976.— 216 с.
64. Ф. Холланд, Ф. Чапман. Химические реакторы и смесители для жидкофазных процессов.— М.: Химия, 1974.— 208 с.
65. С. С. Забродский. Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем.— М.: Энергия, 1971.— 328 с.
66. М. Ш. Исламов. Печи химической промышленности.— Л.: Химия, 1975.— 432 с.
67. Е. В. Токарева, В. Е. Фильшин. Известково-обжигательные печи в СССР и за рубежом.— Обзоры по отд. производствам хим. пром. 1977, вып. 5 (115).— М.: НИИТЭХИМ.— 46 с.
68. П. Д. Лебедев. Расчет и проектирование сушильных установок.— М.: Госэнергоиздат, 1963.— 320 с.
69. Сушильные аппараты и установки. Каталог.— М.: Цинтихимнефтемаш, 1972.— 67 с.
70. А. Н. Терновская, Я. Г. Коренберг. Обжиг колчедана в кипящем слое.— М.: Химия, 1971.— 198 с.
71. С. В. Хижняков. Практические расчеты тепловой изоляции (промышленное оборудование и трубопроводы).— М.: Энергия, 1976.— 200 с.
72. Н. Г. Вилесов, В. Я. Скрипко, В. Л. Ломазов, И. М. Танченко. Процессы гранулирования в промышленности.— Киев: Техника, 1976.— 191 с.
73. Е. А. Казакова. Гранулирование и охлаждение в аппаратах с кипящим слоем.— М.: Химия, 1973.— 152 с.
74. В. Н. Кочетков. Гранулирование минеральных удобрений.— М.: Химия, 1975.— 224 с.
75. М. П. Зубрицкий. Экономическое обоснование строительства и реконструкции химических предприятий.— Л.: Химия, 1971.— 224 с.
76. Я. И. Гринберг. Проектирование химических производств.— М.: Химия, 1970.— 268 с.
77. Д. А. Гуревич. Проектные исследования химических производств.— М.: Химия, 1976.— 208 с.
78. В. А. Макаревич. Строительное проектирование химических предприятий.— М.: Высшая школа, 1977.— 208 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5

Часть I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Глава 1. Классификация оборудования, требования, предъявляемые к нему, и порядок расчета	7
1.1. Классификация оборудования	7
1.2. Требования, предъявляемые к оборудованию	11
1.3. Нормативно-техническая документация для расчетов и эксплуатации машин и аппаратов	12
1.4. Порядок расчета аппаратуры	14
Глава 2. Коррозия металлов и сплавов	16
2.1. Электрохимическая коррозия	17
2.2. Химическая коррозия	19
2.3. Виды коррозионных разрушений металлов и сплавов	22
2.4. Коррозионная устойчивость металлов и сплавов	24
Глава 3. Материалы для химической аппаратуры	25
3.1. Маркировка металлов и сплавов	25
3.2. Области применения металлов и сплавов	27
3.3. Неорганические коррозионноустойчивые материалы	31
3.4. Конструкционные материалы на органической основе	33
3.5. Коррозионная устойчивость различных материалов	35
3.6. Способы защиты металлов и сплавов от коррозии	37
Глава 4. Расчеты основных деталей химической аппаратуры на прочность	40
4.1. Выбор материала и допускаемого напряжения	42
4.2. Расчет тонкостенных цилиндрических обечаек на внутреннее давление	47
4.3. Расчет цилиндрических обечаек на наружное давление	49
4.4. Расчет обечаек, работающих под действием осевой сжимающей силы, изгибающего момента и наружного давления	51
4.5. Расчет днищ на внутреннее давление	53
4.6. Расчет днищ на наружное давление	60
4.7. Расчет обечаек на ветровую нагрузку	61
4.8. Фланцы	63
4.9. Опоры аппаратов	69

Глава 5. Аппараты емкостного типа	72
5.1. Аппаратура высокого давления	72
5.2. Расчет основных деталей аппаратов высокого давления на прочность	81
5.3. Емкости, сосуды и резервуары	87
5.4. Аппараты с перемешивающими устройствами	91

Часть II. ОБЩЕЗАВОДСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Глава 6. Трубопроводы и арматура	105
6.1. Трубы и фасонные части трубопроводов	106
6.2. Соединения трубопроводов	107
6.3. Компенсаторы	107
6.4. Опоры трубопроводов	108
6.5. Арматура	109

Глава 7. Машины и устройства для непрерывного транспорта, хранения и дозирования сыпучих материалов	114
7.1. Классификация транспортирующих устройств	114
7.2. Ленточные конвейеры	116
7.3. Скребокковые конвейеры	125
7.4. Ковшовые элеваторы	128
7.5. Винтовые конвейеры	131
7.6. Установки пневмотранспорта	135
7.7. Бункера и затворы	139
7.8. Дозаторы сыпучих материалов	142

Глава 8. Аппараты для разделения неоднородных систем	153
8.1. Аппаратура для разделения систем газ — жидкость и газ — твердое	153
8.2. Аппараты для сухой очистки газов от пыли	155
8.3. Аппараты для мокрой очистки газов от аэрозолей	160
8.4. Выбор аппаратов для очистки газов от пыли и тумана	164
8.5. Типовые схемы пылеочистки	167
8.6. Аппараты для разделения систем жидкость — твердое	168

Глава 9. Растворители и кристаллизаторы	180
9.1. Растворители	180
9.2. Кристаллизаторы	189
9.3. Расчет кристаллизаторов	197

Часть III. СПЕЦИАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Глава 10. Аппаратура для синтеза аммиака и карбамида	204
10.1. Аппаратура для синтеза аммиака	204
10.2. Аппаратура синтеза карбамида	215

Глава 11. Реакторы гетерофазных процессов	217
11.1. Контактные аппараты	217
11.2. Реакторы газофазных процессов	227
11.3. Реакторы для систем жидкость — газ	227
11.4. Реакторы для систем жидкость — твердое	232
11.5. Печн	242

Глава 12. Гранулирование	264
12.1. Гранулирование порошкообразных материалов в присутствии растворов и расплавов	267
12.2. Гранулирование порошкообразных материалов методом прессования	279
12.3. Гранулирование расплавов	282
 Часть IV. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ НОВОГО ПРОИЗВОДСТВА	
Глава 13. Определение технико-экономической целесообразности сооружения нового или реконструкции действующего предприятия	291
13.1. Основные принципы размещения предприятий химической промышленности	291
13.2. Составление технико-экономического обоснования целесообразности реконструкции или нового строительства	294
13.3. Выбор площадки для строительства	299
Глава 14. Разработка задания на проектирование промышленных предприятий	300
14.1. Состав и основные данные задания на проектирование	301
14.2. Порядок утверждения, согласования и изменения задания	302
Глава 15. Проектирование промышленного объекта	303
15.1. Разработка технического проекта	304
15.2. Основные задачи технического проекта	305
15.3. Состав технического проекта	305
15.4. Основы организации проектирования	308
15.5. Методы проектирования	309
15.6. Проектирование химического производства	310
Глава 16. Дипломное проектирование	320
16.1. Задание на дипломное проектирование	321
16.2. Содержание дипломного проекта	321
16.3. Оформление расчетно-пояснительной записки	327
16.4. Оформление графической части проекта	328
Литература	330