ВВЕДЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ, ПРЕДМЕТ КУРСА «ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ЕГО РОЛЬ И МЕСТО В СИСТЕМЕ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В АКАДЕМИИ ГПС МЧС РОССИИ

Цель курса «Пожарная безопасность технологических процессов» -дать знания, необходимые для разработки систем предотвращения пожаров и противопожарной защиты, а также организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение пожарной безопасности технологических процессов современных производств.

Задачи курса: ознакомить с устройством и особенностями эксплуатации технологического оборудования, используемого для обработки, переработки и хранения пожаровзрывоопасных веществ и материалов; изучить методы анализа пожарной опасности технологических процессов, принципы и способы обеспечения их пожарной безопасности; научить применять и обосновывать расчетами технические решения по обеспечению пожарной безопасности технологического оборудования и производственных процессов в целом.

Пожарная безопасность технологических процессов как учебная дисциплина сложилась и развивается на стыке наук о технологии и пожаре. Поэтому пожарная опасность как самих технологических процессов, так и технологического оборудования (аппаратов, машин, агрегатов, транспортных коммуникаций) исследуется с использованием математического аппарата и фундаментальных законов физики, химии, термодинамики, механики и других научных дисциплин.

С другой стороны, будучи прикладной специальной дисциплиной, пожарная безопасность технологических процессов обобщает и использует практический опыт и методы работы противопожарной службы при осуществлении надзора за проектированием технологических процессов и промышленных предприятий, их строительством и реконструкцией, за обеспечением пожарной безопасности на действующих промышленных, складских и сельскохозяйственных объектах страны, а также опыт внедрения на них новых способов, установок и устройств обеспечения пожарной безопасности.

Пожарная безопасность - многогранное понятие. На кафедре пожарной безопасности технологических процессов изучается такая дисциплина, как пожарная безопасность технологических процессов, а на других специализированных кафедрах Академии изучаются смежные дисциплины, что позволяет получать комплексные знания, необходимые для решения задач по обеспечению пожарной безопасности проектируемых, строящихся, действующих и реконструируемых промышленных предприятий.

2. КРАТКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ЗНАНИЙ О ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВ И ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В окружающей нас природе протекают разнообразные явления, которые называют естественными процессами. Промышленные процессы переработки природных материалов в средства производства и предметы потребления называются производственными или технологическими процессами. Изучение технологических процессов и разработка наиболее эффективных способов их проведения составляет предмет технологии.

Наука о технологии как самостоятельная отрасль прикладных знаний возникла в конце XVIII столетия в связи с развитием крупной машинной промышленности. Несколько слов об истории технологии. На основании имеющихся археологических данных можно сделать вывод, что более 7-8 тыс. лет тому назад люди добывали и перерабатывали некоторые руды, глины, использовали в качестве топлива древесину, уголь, нефть. За 3-4 тыс. лет до нашей эры изготовляли стекло и керамические изделия, минеральные краски, масла. За несколько веков до. нашей эры добывали серу, соду, производили косметику, зажигательные снаряды, пытались перерабатывать нефть и уголь. Уже в начале нашей эры в Китае изобрели бумагу, в VI веке там же начали делать фарфор.

Становление и развитие технологии в России приходится на начало XVII века. В 1632 г. в России был построен первый доменный завод, а в 1635 г. - стекольный завод вблизи Москвы. Первый химический завод в России, производивший азотную кислоту, купорос, краски, скипидар, канифоль и другие готовые продукты и полуфабрикаты был построен в 1720 г.; первый нефтеперегонный завод на р. Ухте был построен в 1745 г.; производство серной кислоты камерным способом начато в 1805 г.; синтез анилина по методу Н.Н. Зинина освоен в 1842 г.; пиролиз нефтяных углеводородов по методу А.А. Летнего - в 1871 г.; крекинг нефти по методу В.Г. Шухова - в 1890 г.; производство бездымного пороха по методу Д.И. Менделеева освоено в 1892 г.; производство противогазов Н.Д. Зелинского освоено и они были использованы в боевых условиях в 1915 г.; производство синтетического каучука по методу СВ. Лебедева начато в 1932 г.; использование кислорода в металлургии по методу И.П. Бардина - в 1944 г. В 1954 г. в СССР построена первая в мире атомная электростанция в г. Обнинске. Первые в мире искусственные спутники Земли (1957 г.), Солнца (1959 г.), Луны (1966 г.), Венеры (1975 г.) запущены в СССР. Этот перечень можно продолжить и далее.

Возникновение и развитие промышленного производства имело, к сожалению, свои отрицательные стороны, в том числе оно привело к увеличению числа пожаров и ущерба от них. В царской России вопросы обеспечения пожарной безопасности производств были отданы на откуп предпринимателям и, в некоторой мере, страховым акционерным компаниям. Надзора со стороны государства за противопожарным состоянием предприятий фактически не было, так как отдельные постановления в этом направлении сводились к элементарным мерам чисто формального характера. В 1918 г. после обобществления всех средств производства в советской России и появления государственного страхования убытки от пожаров на предприятиях становятся убытком для

государства. В связи с этим вопрос о пожарной безопасности предприятий приобрел государственное значение и потребовал подготовки профессиональных кадров.

Впервые пожарная профилактика как учебная дисциплина стала предметом изучения в Ленинградском пожарном техникуме (ЛПТ), организованном в 1924 г. В то время в ЛПТ, а позже и в других пожарно-технических учебных заведениях вплоть до 1964 г. она включала в себя весь комплекс направлений по обеспечению пожарной безопасности объектов промышленного и гражданского назначения. В 1964 г. на факультете инженеров пожарной техники и безопасности (ФИПТиБ) при Высшей школе МВД СССР по предложению Михаила Васильевича Алексеева была создана кафедра пожарной профилактики в технологических процессах производств, на которой читалась и изучалась аналогичная дисциплина.

Большой вклад в становление и развитие пожарной безопасности технологических процессов внесли такие ученые и преподаватели, как П.М. Браун и В.А. Эллисон - начало 30-х годов; П.Г. Демидов, П.И. Дмитриев и Ф.Д. Скаженик - конец 30-х годов. После окончания ВОВ с середины 40-х годов - М.В. Алексеев, В.М. Смирнов, А.Г. Исправникова, А.Н. Савушкина, а с середины 70-х годов - О.М. Волков, Н.Ф. Шатров, А.П. Петров, В.С. Клубань и другие.

Наиболее значительным вкладом в развитие науки о пожарной безопасности технологических процессов следует считать создание доцентом М.В. Алексеевым комплексного метода анализа пожарной опасности и защиты технологических процессов, что позволило заложить основы для системного подхода к решению вопросов обеспечения пожарной безопасности производств. Разработки кафедры в указанном направлении использованы при создании Государственных стандартов ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования» и ГОСТР 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля», учитываются при разработке правил пожарной безопасности федерального и отраслевого уровней, а также норм пожарной безопасности по применению способов, установок и устройств для обеспечения противопожарной защиты технологических процессов и оборудования, других нормативных документов.

Метод М.В. Алексеева используют работники пожарной охраны, занимающиеся нормативно-технической и инспекторской деятельностью, а также эксперты при проведении расследований причин аварий и пожаров на действующих промышленных и сельскохозяйственных предприятиях и объектах складского назначения.

3. ВЗАИМОСВЯЗЬ И ВЗАИМООБУСЛОВЛЕННОСТЬ ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГИИ, ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Развитие ведущих сфер общественного производства направлено не только на подъем экономики, но и на создание наиболее благоприятных условий для высокопроизводительного труда, на совершенствование системы охраны труда и

повышение уровня экологической безопасности. Для создания этих условий разрабатываются и внедряются новые эффективные и безопасные процессы, более надежное технологическое оборудование, современные приборы и системы контроля технологических параметров, средства защиты и автоматизированные системы управления.

Понятие «Охрана труда» включает в себя три независимые составные части: технику безопасности, пожарную безопасность и промышленную санитарию, которые неразрывно связаны друг с другом. Чтобы уяснить взаимосвязь и взаимообусловленность проблем технологии, пожарной безопасности и охраны окружающей среды, рассмотрим реальный достаточно простой и наглядный технологический процесс транспортировки нефти по магистральному нефтепроводу из районов ее добычи в места переработки на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ). Сущность технологии транспортировки нефти ясна из схемы, приведенной на рис. 1.

Добытая на нефтепромыслах *1* нефть обезвоживается и дегазируется на пунктах подготовки нефти к транспортировке *2* и поступает в резервуарный парк *3* магистрального нефтепровода, откуда забирается насосами (подпорными и магистральными) головной НПС *4* и под высоким давлением подается в трубы *5*. Так как транспортировка нефти осуществляется на расстояния, достигающие сотен и тысяч километров, то для обеспечения заданной производительности системы на трассе трубопровода имеются дополнительные насосоперекачивающие станции 6, в состав которых часто входят резервуарные парки для хранения резервных количеств нефти, чтобы обеспечить бесперебойную работу нефтепровода по всей его длине (собственно в состав магистрального нефтепроводного предприятия входят объекты, обозначенные не схеме цифрами 1-3).

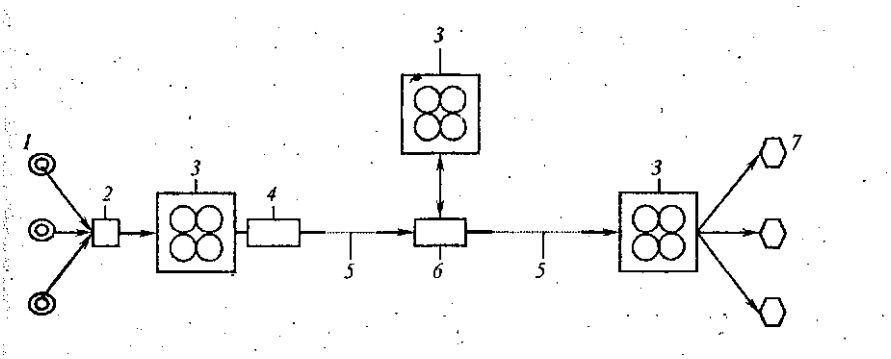


Рис. 1. Схема магистрального нефтепровода:
1–нефтепромысел; *2*–пункт подготовки нефти; *3*–резервуарный парк; *4*–головная насосоперекачивающая станция (головная НПС); *5*–линейная часть нефтепровода (магистральный нефтепровод); *6*–промежуточная НПС; *7*–потребитель (НПЗ и др.)

Резервуары в таких парках обычно заполнены не полностью, а на половину своего объема, чтобы в случае аварийных или каких-либо других ситуаций, возникающих на «трубе» после станции, принимать нефть с промыслов или с предшествующих участков трубопровода, а в случае прекращения подачи нефти на станцию - выдавать продукт из резервуаров. Не вдаваясь в особенности технической эксплуатации резервуарных парков магистральных нефтепроводов,

необходимо отметить, что уровень нефти в резервуарах периодически изменяется: снижается ниже среднего уровня или повышается. При снижении уровня нефти в резервуары со стационарной крышей через дыхательные устройства подсасывается атмосферный воздух, что приводит к образованию во внутреннем пространстве взрывоопасной паровоздушной смеси. При повышении уровня нефти в резервуарах нефтяные пары выделяются через дыхательные устройства в атмосферу с образованием наружных зон взрывоопасных концентраций. Выделившиеся в атмосферу нефтяные пары, естественно, загрязняют окружающую среду. Взрывопожарная и экологическая опасности возникают даже при нормальном режиме эксплуатации производства. Любые неплотности, течи в оборудовании, неисправности резервуарной дыхательной арматуры и, тем более, разрушения резервуаров и трубопроводов чрезвычайно опасны и в пожарном отношении и в отношении загрязнения окружающей среды.

Известно множество случаев в нашей стране и за рубежом, когда при аварийной разгерметизации резервуаров и трубопроводов происходили не только экологические катастрофы, связанные с загрязнением среды, но и трагедии, приведшие к массовой гибели людей. Например, 1 марта 1960 года на Каменской нефтебазе в Ростовской области произошло полное разрушение наземного вертикального стального резервуара объемом 700 $м^3$, которое привело к разливу хранимого бензина на площади до 10 тыс. $м^2$. Пожар охватил все строения и часть резервуарного парка нефтебазы и, кроме того, распространился на жилые дома, расположенные на расстоянии 60 м от территории нефтебазы. В результате происшедшей катастрофы погиб 41 человек.

В ночь с 3 на 4 июня 1989 г. произошел разрыв магистрального трубопровода сжиженного нефтяного газа (внутренний диметр труб 720 мм, толщина стенок 10 мм) в 900 м от полотна Башкирского отделения Куйбышевской железной дороги. В течение 6-10 мин (до момента взрыва паровоздушной смеси) разлилось более 1000 т продукта с образованием колоссальных размеров взрывоопасного облака, захватившего участок полотна железной дороги. В 1 ч 10 мин по местному времени, когда на перегоне между станциями Казаяк и Улу-Теляк находились два встречных пассажирских поезда, прогремел чудовищной силы взрыв, эквивалентный взрыву 200-300 т тринитротолуола. Были полностью разрушены участки железнодорожного полотна протяженностью 350 м и элекгроконтактной сети (3 км). От воздействия ударной волны в районе взрыва образовалась зона сплошного завала леса на площади 2,5 км", в радиусе 15 км от места взрыва в населенных пунктах выбиты стекла в домах, полностью или частично разрушены рамы и шиферные покрытия. На месте катастрофы погибло 258 человек, 1224 человека получили разной степени тяжести телесные повреждения, многие из пострадавших скончались в больницах.

Аварийные разливы пожароопасных жидкостей, даже не сопровождающиеся пожарами и взрывами, часто имеют характер экологических катастроф. Так, летом 1994 года произошла авария трубопровода на севере России, в результате которой вышло наружу и разлилось на значительной площади несколько десятков тысяч тонн (по некоторым данным до 200 тыс. тонн) нефти. Нефть попала в реку

Печора и достигла Баренцева моря. Частично разлившуюся нефть убрали до начала зимы и работы прекратили. Весенняя талая вода разнесла нефть за сотни километров, уничтожая все живое на огромных пространствах. Северная природа очень чувствительна к каким-либо воздействиям и последствия этой катастрофы еще до конца не оценены специалистами-экологами.

Таким образом, перед современной технологической наукой и практикой стоит триединая проблема обеспечения безопасности производств: технической безопасности, пожарной безопасности и охраны окружающей среды. Проблемы эти решать трудно, но возможно. Большая роль в этом отводится пожарной охране, призванной не допустить к эксплуатации ненадежные, опасные в пожарном отношении производства, так как снижение пожарной опасности технологических процессов - это одновременно и улучшение условий труда и защита окружающей среды.

4. СТАТИСТИКА ПОЖАРОВ - ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И МЕТОДОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОЖАРОВ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Несмотря на значительные успехи в деле обеспечения пожарной безопасности, на производствах непростительно часто происходят аварии, взрывы, пожары, зачастую с человеческими жертвами. Эта картина наблюдается не только в нашей стране, но и во всех индустриально развитых странах мира.

Системный анализ аварий, и пожаров показывает, что при проведении научных разработок разнообразных технологических процессов в научно-исследовательских институтах, проектировании оборудования в конструкторских бюро, при строительстве и монтаже не всегда в достаточной мере решаются вопросы обеспечения нормативных требований пожарной безопасности. Одна из причин - отсутствие в этих организациях специалистов, способных квалифицированно решать эти вопросы. В то же время необходимо отметить, что у пожарной охраны недостаточно кадров, чтобы заниматься вопросами пожарной безопасности на всех этапах создания и эксплуатации производств.

Согласно статистическим данным, большинство аварий и пожаров является следствием ряда последовательных, взаимно связанных ошибочных действий людей в процессе производства и недостатков в конструкции оборудования и лишь небольшое число их зависит от случайности. Например, 67 % аварий, происшедших в различное время на предприятиях химической и нефтехимической промышленности в нашей стране и за рубежом, было вызвано неисправностью оборудования, контрольно-измерительных приборов и систем автоматического управления процессами, а 17 % аварий обусловлено отсутствием систем предотвращения пожаров и противопожарной защиты, т.е. 84 % взрывов и пожаров можно было предотвратить.

Рассмотрим обобщенные статистические данные о пожарах в России. Ежегодно происходит 250-300 тыс. пожаров (по данным за 1998-2002 гг.). Число крупных пожаров не превышает 200, но ущерб от них достигает 10 % от общего

ущерба. На пожарах гибнет 12-15 тыс. человек в год. На производственных объектах происходит около 6-7 % всех пожаров, из них по технологическим причинам возникает 3-4 % пожаров.

По местам возникновения пожары на производственных предприятиях распределялись следующим образом (в %):

- основные производственные помещения 39
- вспомогательные производственные помещения 18
- наружные технологические установки 10
- материальные склады 4
- административно-бытовые помещения 5
- прочие объекты 24

Итого: 100 %

На тех же объектах были отмечены следующие причины возникновения пожаров (в %):

- неисправности технологического оборудования и нарушения технологического процесса 25
- неисправности электрооборудования 23
- неосторожное обращение с огнем 20
- огневые ремонтные работы 13
- прочие, в т.ч. не установленные причины 19

Итого: 100 %

Кафедра пожарной безопасности технологических процессов многие годы ведет научно-исследовательские работы в области обеспечения пожарной безопасности процессов хранения нефти и нефтепродуктов. Сотрудниками кафедры собраны данные, характеризующие уровень взрывопожарной опасности резервуарных парков с различными типами резервуаров и видами хранящихся в них нефтепродуктов в различных отраслях народного хозяйства, приведенные в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Вероятность появления источников зажигания.

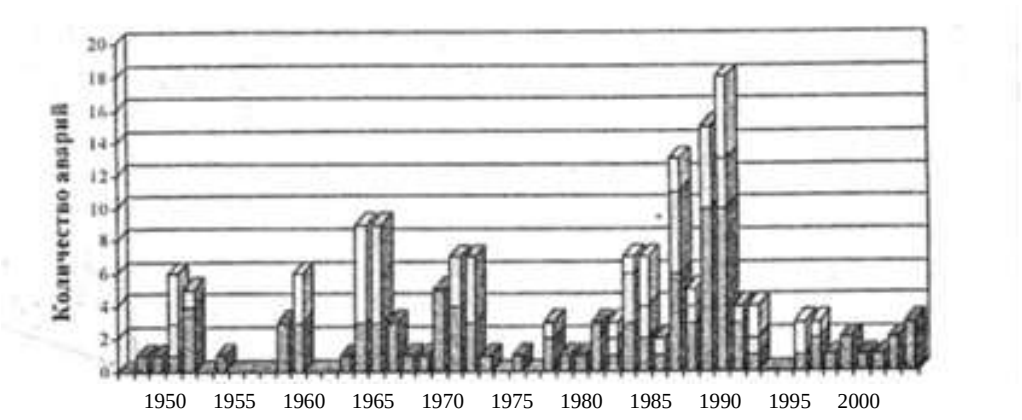
Источник зажигания в резервуарном парке	Вероятность, $P_{из}*10^4$
Разряды атмосферного электричества	1,6
Разряды статического электричества	1,6
Фрикционные искры	5,4
Открытое пламя и искры	5,4
Самовозгорание пирофорных отложений	1,4

Таблица 2. Частота возникновения пожаров.

Отрасль хозяйства и тип резервуара	Частота пожара, $N*10^4$, 1/год
Резервуарные парки объектов переработки нефти:	
- резервуары со стационарной крышей	1,86
- резервуары с плавающей крышей	1,29
- резервуары с понтоном	4,53
Резервуарные парки объектов энергетики:	
- резервуары со стационарной крышей	5,73
Резервуарные парки объектов транспорта и распределения нефтепродуктов:	
- резервуары со стационарной крышей	1,09
- резервуары с понтоном	1,95

Согласно имеющейся на кафедре пожарной безопасности технологических процессов базы данных, за период с 1950 по 2000 год в СССР, а после его распада в России и странах СНГ, зарегистрировано 100 случаев аварий и катастроф на объектах, предназначенных для хранения нефти и нефтепродуктов, вследствие внезапных разрушений вертикальных стальных резервуаров. Более половины таких аварий классифицировались как крупные или катастрофические, в 7 из них погибло 78 человек, а 40 % аварий сопровождалось крупными пожарами с травмами людей. На рис. 2 приведены статистические данные по полным разрушениям резервуаров. Распределение разрушившихся резервуаров по их номинальным емкостям и видам находившихся в них продуктов представлено на рис. 3 и 4.

Характер взаимодействия выходящего из разрушившегося резервуара потока жидкости с защитной стеной или обвалованием таков, что в 64 % случаев поток разрушал стену или размывал обвалование, в 28 % случаев - перехлестывал через них и только в 8 % случаев, когда истечение происходило из частично заполненных РВС, обвалование выполнило свои защитные функции. В 37 % случаев поток разливающейся жидкости или сдвигающийся в результате отдачи раскрывшийся корпус резервуара разрушал или повреждал соседние резервуары.



Годы

S3 - разрушение резервуара с образованием волны прорыва
□- разрушение соседнего резервуара волной прорыва
□- повреждение соседнего резервуара волной прорыва

Рис. 2. **Распределение разрушений резервуаров по годам**

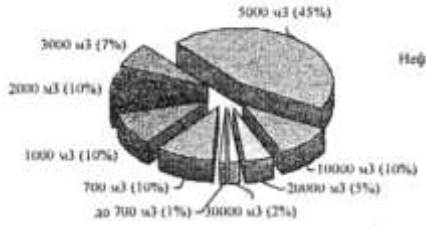


Рис. 3. Распределение разрушений по номинальным емкостям РВС

Рис. 4. Распределение разрушений по видам хранившихся в РВС продуктов

Представленные статистические данные свидетельствуют не только о высокой опасности разрушения вертикального стального резервуара, но и о необходимости разработки защитных мероприятий, адекватных рассматриваемому явлению.

Статистический анализ на объектах производственного, сельскохозяйственного и складского назначения в зависимости от стоящих перед исследователем целей можно проводить по различным признакам: по видам технологического оборудования, местам возникновения взрывов и пожаров, обращающимся на производствах веществам и т.д. Такой анализ позволяет выявить истинные причины и места возникновения пожаров, обоснованно применять системы пожарной безопасности, а также разрабатывать новые способы, установки и устройства, направленные на обеспечение пожарной безопасности технологических операций, процессов и оборудования, установок, агрегатов, линий, цехов и производств в целом.

5. НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ НО ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

На основании статей 20 и 21 Федерального закона «О пожарной безопасности», принятого Государственной Думой 18 ноября 1994 года, меры пожарной безопасности обеспечиваются, в соответствии с законодательством Российской Федерации, нормативными документами по пожарной безопасности, а также на основе опыта борьбы с пожарами и по результатам оценки пожарной опасности веществ и материалов, технологических процессов, изделий, конструкций, зданий и сооружений.

К нормативным документам по пожарной безопасности относятся Государственные стандарты (ГОСТы), Федеральные правила и нормы пожарной безопасности (ППБ и НПБ), строительные нормы и правила (СНиПы), региональные и отраслевые правила и нормы, а также другие руководящие

документы (РД), содержащие требования пожарной безопасности.

В наиболее общем виде требования к принципам и способам обеспечения пожарной безопасности объектов изложены в ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования». Требования пожарной безопасности к технологическим процессам различного назначения всех отраслей экономики страны и любых форм собственности изложены в ГОСТ Р 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля». В указанных стандартах на федеральном уровне изложены требования к созданию, строительству, эксплуатации и реконструкции технологических объектов всех отраслей производства, а также требования по разработке и изменению норм технологического проектирования и других нормативных документов, регламентирующих мероприятия по обеспечению пожарной безопасности на производственных объектах, по разработке проектной документации (технологических частей проектов) и технологических регламентов. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации (ППБ-03-2003) определяют порядок организации пожарной безопасности для всех предприятий, учреждений и организаций независимо от отраслевой принадлежности и форм собственности.

К нормативным документам федерального уровня относятся, в частности, такие нормы Государственной противопожарной службы, как НПБ 105-95 «Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности», НПБ 107-97 «Определение категорий наружных установок по пожарной опасности», которые устанавливают методики определения категорий помещений и зданий производственного и складского назначения по взрывопожарной и пожарной опасности, а также наружных установок по пожарной опасности, исходя из вида находящихся (обращающихся) на производствах (складах) горючих веществ и материалов, их количества и особенностей технологических процессов. Категории помещений, зданий и наружных установок применяются для установления нормативных требований по обеспечению взрывопожарной и пожарной безопасности указанных объектов в отношении планировки и застройки, этажности и площади (габаритов), размещения помещений и установок, инженерного оборудования, а также конструктивных решений.

На основании нормативных документов федерального уровня разрабатываются нормативные документы регионального и ведомственного (отраслевого) уровней, а также местного (объектового) уровня. В настоящее время в нашей стране ведется интенсивная работа по созданию единой системы нормативных документов по пожарной безопасности, включая пожарную безопасность технологических процессов и технологического оборудования. Это - длительный, кропотливый и непрерывный процесс, который осуществляется на различных уровнях при участии преподавателей Академии ГПС. Более подробно содержание и методики использования нормативно-технических документов по пожарной безопасности технологических процессов и оборудования будут рассматриваться при изучении соответствующих разделов нашей дисциплины.

Контрольные вопросы

Укажите цель и задачи курса «Пожарная безопасность технологических процессов».

Что изучает дисциплина «Пожарная безопасность технологических процессов»?

Каким образом пожарная безопасность технологических процессов связана со смежными профилактическими дисциплинами, изучаемыми на других кафедрах академии?

Какие процессы называются естественными, а какие - технологическими?

Что составляет предмет технологии?

Какие отрицательные стороны имело возникновение и развитие промышленного производства?

Какой вклад внес доцент М.В. Алексеев в развитие науки о пожарной безопасности технологических процессов?

В чем заключается сущность анализа пожарной опасности?

Что такое пожарная безопасность технологических процессов?

Как обеспечивается создание наиболее благоприятных условий для высокопроизводительного труда, совершенствование системы охраны труда и повышение уровня экологической безопасности на производствах?

Что включает в себя понятие «Охрана труда»?

Какая имеется взаимосвязь между проблемами технологии, пожарной безопасности и охраны окружающей среды?

Что такое авария и крупная авария?

По каким причинам происходит большинство аварий и пожаров в промышленности?

Что позволяет выявить статистический анализ аварий и пожаров на промышленных объектах?

Для чего необходимо выявлять истинные причины аварий и пожаров на промышленных объектах?

Раскройте содержание статей 20 и 21 Федерального закона «О пожарной безопасности», принятого Государственной Думой 18 ноября 1994 года, с точки зрения обеспечения пожарной безопасности технологических процессов.

В каком нормативном документе в наиболее общем виде изложены требования к принципам и способам обеспечения пожарной безопасности объектов?

В каком нормативном документе изложены требования пожарной безопасности к технологическим процессам различного назначения всех отраслей экономики страны и любых форм собственности?

Какие документы являются базовыми для разработки нормативных документов регионального, ведомственного и местного уровней?

Литература

Основная

Рабочая программа курса пожарная профилактика технологических процессов (5 лет обучения). -М.: ВИПТШ МВД России, 1995.

Федеральный закон «О пожарной безопасности», -М.: АО «Противопожарный центр Подмосковья», 1995.

3. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования (ГОСТ 12.1.004-91). -М.: ИПК издательство стандартов, 1996.

ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля (ГОСТ Р 12.3.047-98). -М.: Госстандарт России, 1998.

Правила пожарной безопасности в Российской Федерации (ППБ-01-93). -М.: Инфра-М, 1994.

Дополнительная

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. -М.: Изд-во «Химия», 1975.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ С ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫМИ СРЕДАМИ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Современные предприятия представляют собой сложные комплексы и состоят из отдельных цехов, участков, установок, связанных между собой рельсовым и автомобильным транспортом, трубопроводами, конвейерами или иными транспортными коммуникациями. Технологическое оборудование (машины и аппараты, которые объединены коммуникациями в технологическую схему производства той или иной продукции) размещается в производственных помещениях и на наружных установках.

Несмотря на большое разнообразие получаемых продуктов и сложность самих производственных процессов, существует ограниченное количество типов и видов аппаратов и машин для реализации этих процессов, имеющих принципиальные конструктивные отличия. Так, например, в хи- мическом и нефтяном машиностроении ассортимент выпускаемых аппаратов и машин делится всего на 15 основных групп: теплообменники, выпарные аппараты, ректификационные и сорбционные колонны, сушилки, барабанные аппараты, емкостная аппаратура, центрифуги, сепараторы, насосы, компрессоры и другое оборудование. Подобные перечни существуют и ' в других отраслях машино- и аппаратостроения.

Основным классификационным признаком технологического оборудования является физико-химическая сущность протекающего в аппарате или машине технологического процесса, в соответствии с чем оборудование подразделяется на механическое, гидромеханическое, тепловое, массообменное и химическое (более подробно процессы, протекающие в технологическом оборудовании, будут рассмотрены в следующих главах). Оборудование, кроме того, классифицируют:

по конструкции (емкостное, башенное, с перемешивающими устройствами, с

рядным или V-образным расположением цилиндров и т.д.);

по виду применяемых материалов (чугунное, стальное, эмалированное, винипластовое и др.);

по способу изготовления (сварное, клепаное, клееное и т.д.);

по организации подвода сырья и отвода продуктов (периодически, непрерывно или полунепрерывно действующее);

по расположению относительно горизонтальной плоскости (горизонтальные, вертикальные или наклонные аппараты);

по конструктивным особенностям внутренних устррйств (лопастные, пропеллерные, турбинные и другие мешалки; ситчатые, провальные, колпачковые или другие тарелки барботажных абсорберов и ректификационных колонн и т.д.);

по способу подвода и отвода тепла (рекуперативные или регенеративные теплообменники; конвективные, терморадиационные, диэлектрические или другие сушилки и т.д.);

по форме и виду ограждающих поверхностей (цилиндрические, сферические, конические емкости или бункеры и др.);

по количеству рабочих органов (одноцилиндровые, двухцилиндровые или многоцилиндровые компрессоры и насосы) и по другим признакам.

При описании процесса производства той или иной продукции указывают не только на последовательность проведения технологических операций, но приводят также названия и режимы работы оборудования, в которых эти процессы протекают. Полное название аппарата или машины во многих случаях дает представление об их устройстве и конструктивной схеме. Например, можно представить схему горизон-тальной сварной емкости с эллиптическими днищами (рис. 1.1) или поршневой насос двойного действия.

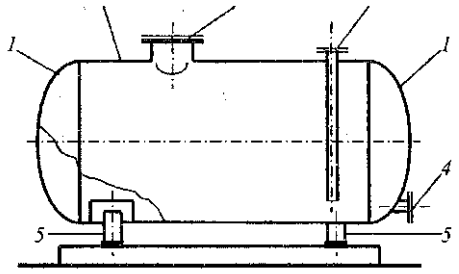


Рис. 1.1. Сварная горизонтальная цилиндрическая емкость с эллиптическими днищами: *1*–днища (крышки); *2*–корпус; *3*–смотровой люк (лаз); *4*–патрубки (штуцеры); *5*–опоры (лапы)

Особенности классификации и устройства типовых аппаратов и машин, используемых для проведения основных производственных процессов, будут рассмотрены в следующих главах.

1.2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫМИ СРЕДАМИ

Для изготовления технологического оборудования широко применяются следующие конструкционные материалы: черные металлы и сплавы (стали, чугуны); цветные металлы и сплавы (медь, титан, латуни, дюралюмины и другие металлы и сплавы); неметаллические материалы (пластмассы, керамика, углеграфиты, силикаты и другие материалы).

Выбор материалов для изготовления технологического оборудования определяется: факторами, зависящими от рабочих условий эксплуатации; факторами, непосредственно характеризующими свойства конструкционного материала. К первому типу факторов, зависящих от рабочих условий эксплуатации, относятся: температура, давление и свойства среды. Ко второму типу факторов, характеризующих свойства конструкционных материалов, относятся физико-механические и технологические свойства материалов (технологичность материалов). Наиболее важными технологическими свойствами материалов являются свариваемость, обрабатываемость давлением и резанием.

Наряду с перечисленными факторами при выборе того или иного материала для изготовления технологического оборудования принимают во внимание экономические соображения.

С точки зрения обеспечения пожаровзрыво-безопасности технологического оборудования конструкционные материалы должны обладать:

высокой механической прочностью при заданных рабочих давлениях и температурах, при допускаемых отклонениях от них, а также при испытании оборудования;

высокой химической стойкостью в рабочих средах при заданных технологических параметрах протекающих в аппаратах процессов и допускаемых отклонениях от них.

Указанным требованиям удовлетворяют, в первую очередь, стали, которые и нашли наибольшее применение в машино- и аппаратостроении. Конструкционные стали - сплавы железа с углеродом (обычно до 1 %) и другими элементами.

В обозначения марок сталей входят буквы русского алфавита, которые характеризуют наличие в сталях помимо железа и углерода других компонентов - легирующих элементов. Основные из них следующие: А -азот, Б - ниобий, В - вольфрам, Г - марганец, Д - медь, Е - селен, К - кобальт, М - молибден, Н - никель, П - фосфор, Р - бор, С - кремний, Т -титан, Ф - ванадий, Х - хром, Ц - цирконий, Ч - редкоземельный элемент, Ю - алюминий.

Кроме этого, введены обозначения групп сталей обыкновенного качества (буквы Б или В стоят в начале марки стали), а также качества и назначения стали (буквы стоят в конце марки стали): А - высококачественная, К - котельная (для котлостроения), Л - литьевая (для отливок), Ш - особо высококачественная.

В зависимости от состава и свойств конструкционные стали подразделяются на пять основных групп. Ниже приведены их краткие характеристики и примеры обозначения.

1.2.1. Стали конструкционные обыкновенного качества

В зависимости от назначения стали обыкновенного качества подразделяются

на три группы: А - поставляемые по механическим свойствам, Б - поставляемые по химическому составу и В - поставляемые по механическим свойствам и химическому составу.

В обозначениях марок этих сталей буквы «Ст» означают «сталь», цифры от 0 до 6 - условный номер марки. В обозначениях сталей группы А букву «А» не указывают. В зависимости от степени раскисления стали изготовляют кипящими (кп), полуспокойными (пс) и спокойными (сп). Каждая группа сталей выпускается 2-6 категорий. Цифру, указывающую категорию, добавляют в конце обозначения марки стали (первую категорию в обозначении марки стали не указывают).

Примеры обозначения марок сталей обыкновен-ного качества: Ст0 - сталь первой категории марки 0 группы А (степень раскисления не указана);

Ст3-2 - сталь второй категории марки 3 группы А (степень раскисления не указана);

ВСт1сп5 - спокойная сталь пятой категории марки 1 группы В;

БСт3Гпс2 - полуспокойная сталь второй категории марки 3 группы Б с повышенным содержанием марганца (буква «г» в обозначении марки стали).

1.2.2. Стали конструкционные качественные

В обозначениях марок этих сталей используются двузначные числа, означающие среднее содержание углерода в сотых долях процента, указывается степень раскисления, назначение или способ изготовления, легирующий элемент.

Примеры обозначения марок качественных углеродистых конструкционных сталей:

05кп - кипящая сталь, содержащая до 0,05 % углерода;

30 - сталь, содержащая 0,3 % углерода;

15Л- отливки из стали, содержащей 0,15 % углерода;

18К - сталь для котлостроения, содержащая 0,18 % углерода;

20Г - сталь, содержащая 0,2 % углерода и около 1 % марганца.

1.2.3. Стали конструкционные низколегированные

Конструкционные низколегированные стали обычно содержат до 2,5 % легирующих элементов, которые придают им определенные физикохимические и механические свойства. В обозначениях марок этих сталей используются двузначные числа, означающие среднее содержание углерода в сотых долях процента, после которых следуют буквы и цифры, указывающие на легирующий элемент и его количество в процентах. Отсутствие цифр после букв указывает, что количество легирующих элементов составляет около 1 %.

Примеры обозначения марок низколегиро-ванных сталей:

18Г2 - марганцевая сталь, содержащая 0,18 % углерода и около 2 % марганца;

15ГФ - марганцевованадиевая сталь, содержащая 0,15 % углерода, около 1 % марганца и 1 % ванадия;

14ХГС - хромомарганцевокремниевая сталь, содержащая 0,14 % углерода, около 1 % хрома, 1 % марганца и 1 % кремния.

1.2.4. Стали конструкционные легированные

Стали этой группы содержат от 2,5 до 10 % легирующих элементов.

Примеры обозначения марок легированных (среднелегироваиных) конструкционных сталей:

15Х5 - хромистая сталь, содержащая 0,15 % углерода и 5 % хрома;

30ХrСН2А - высококачес-твенная хромомарганцевокремненикелевая сталь, содержащая до 0,3 % углерода, около 1 % хрома, 1 % марганца и 1 % кремния, около 2 % никеля;

38ХМЮШ - особо высококачественная хромомолибденоалюминиевая сталь, содержащая 0,38 % углерода, около 1 % хрома, 1 % алюминия и 1 % молибдена.

1.2.5. Стали конструкционные высоколегированные

Высоколегированные стали и сплавы содержат более 10 % легирующих элементов и в зависимости от свойств подразделяются на три подгруппы:

I – коррозионно-стойкие (нержавеющие), обладающие стойкостью против электрохимии-ческой и химической коррозии;

II – жаростойкие (окалиностойкие), обладающие химической стойкостью в газовых средах при повышенных температурах и работающие без нагрузок;

III – жаропрочные, работающие под нагрузками при высоких температурах.

Примеры обозначения марок высоколегирован-ных конструкционных сталей и сплавов разного класса:

12Х18Н10ТЛ - литьевая хромоникелевая сталь, содержащая около 0,12 % углерода, 18 % хрома, 10 % никеля, 1 % титана (коррозионно-стойкая сталь);

00Х18Н12Б - хромоникелениобиевая сталь, содержащая около 0,1 % углерода, 18 % хрома, 12 % никеля и 1 % ниобия (коррозионно-стойкая сталь);

10Х17Н13М3Т – хромоникелемолибденотита-новая сталь, содержащая до 0,1 % углерода, около 17 % хрома, 13 % никеля, 3 % меди и 1 % титана (жаростойкая сталь);

45Х25Н20С2Л - литьевая хромоникелекремни-евая сталь, содержащая около 0,45 % углерода, 25 % хрома, 20 % никеля, 2 % кремния (жаропрочная сталь).

Для изготовления аппаратуры широко применяют биметаллические стали. Биметалл - двухслойный лист, состоящий из двух различных металлов. Основной (толстый) слой воспринимает нагрузку. Тонкий слой, называемый защитным или плакирующим, предохраняет основной слой от коррозионного воздействия среды. Основной слой биметаллической стали выполняют из дешевых углеродистых сталей (марок ВСтЗсп5, 20К, 16ГС и других), а защитный слой толщиной 1-6 мм - из легированных сталей 4 и 5 групп (марок 15Х5, 08Х13, 0Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М и других).

Пример обозначения биметаллической стали:

10+08Х13 - биметаллическая (двухслойная) сталь, основной слой которой выполнен из качественной конструкционной стали марки 10, а плакирующий слой - из жаростойкой высоколегированной стали марки 08Х13.

1.2.6. **Конструкционные чугуны и цветные металлы**

Основные марки конструкционных чугунов, цветных металлов и сплавов

приведены ниже.

Чугуны, представляющие собой сплавы железа с углеродом (в среднем 2-4 % углерода) и другими элементами, обладают хорошими литейными свойствами, что позволяет изготовлять из них корпусные детали и узлы сложной конфигурации. Наибольшее распространение получили:

серый чугун (буквы «СЧ» в обозначении марки): СЧ 00, СЧ 12-28, СЧ 36-56 и другие (первые две цифры показывают среднюю величину предела прочности при растяжении в кгс/мм", вторые - предел прочности при испытании на изгиб в кгс/мм^2);

жаростойкий чугун (буквы «ЖЧ» в обозначении марки): ЖЧХ15, ЖЧХ30 и др. (содержание хрома соответственно 15 и 30 %, содержание кремния 1-2 %);

высокохромистые жаростойкие чугуны: 75Х28Л, 135Х34Л и другие;

ковкий чугун (буквы «КЧ» в обозначении марки): КЧ 30-6, КЧ 35-10, КЧ 63-2 и другие (первые две цифры соответствуют пределу прочности при растяжении в кгс/мм", вторые - относительное удлинение в процентах);

ферросилиды (буква «С» в обозначении марки): С15, С17, содержащие соответственно 15 и 17 % кремния;

жаростойкий чугун с высоким содержанием никеля: ЧН15Д7Х2 и другие чугуны.

Примеры обозначения некоторых марок цветных металлов и их сплавов:

алюминий АД00, АДО, АД1, АД;

сплавы алюминия с марганцем (магналии): АМц (около 1,5 % марганца), АМг (около 7 % марганца) и другие;

дюралюмины (сплавы алюминия с медью и другими элементами): Д1, Д1АМ, Д16, АД1, В95 и другие;

медь М00, М1р, М3 и т. д.;

латуни (сплавы меди с цинком): Л63, Л59-1, ЛЖмц59-1-1 и другие;

бронзы (сплавы меди с другими металлами, кроме цинка): БрАМц9-2, БрАЖН 10-4-4 и другие;

никель НП1, НП2 и т.д.;

никелевые сплавы ХН65МВ, Н70МФ («хастеллой») и другие;

титан ВТ1-00, ВТ1-0 и его сплавы ОТ4, ОТ4-1, ВТ5-1, ИРМ-2 и другие;

свинец С1, С2, С3, ССу-1 и т. д.;

медноникелевый сплав НМЖМц28-2,5-1,5 («монель»), в котором содержится 28 % меди, 2,5 % железа, 1,5 % марганца, остальное - никель.

Неметаллические материалы применяются в машино- и аппаратуростроении в качестве конструкционных и футеровочных материалов. К неметаллическим материалам относятся: полимерные материалы без наполнителей (полиэтилен, полипропилен, фторопласты и др.) и с наполнителями (фаолит, стеклопластики и др.), углеграфитовые материалы, стекло и ситаллы, фаянс, эмали, керамика, керметы, материалы на основе каучука (резина, эбонит) и другие материалы и их композиции.

1.3. ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ И ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

Наиболее важными показателями, характери-зующими механические свойства (прочностные характеристики) конструкционных материалов, являются: предел прочности, или временное сопротивление, $б_в$, предел текучести $б_{тт}$, относительное удлинение z или сужение E|, модуль упругости при растяжении *E* (модуль продольной упругости), коэффициент Пуассона m ударная вязкость $a_к$. Помимо указанных механических характеристик, для аппаратов, работающих при повышенных температурах, необходимо знать такие свойства, как ползучесть, длительная прочность материала, склонность к тепловой хрупкости, чувствительность к старению и прочие, а для аппаратов, работающих при пониженных температурах - склонность к хладоломкости. Из физических характеристик важно знать температурный коэффициент линейного расширения материала а и его коэффициент теплопроводности *к* (особенно для теплообменной аппаратуры).

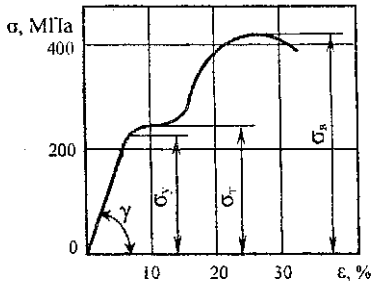


Рис. 1.2. Диаграмма растяжения пластичного материала

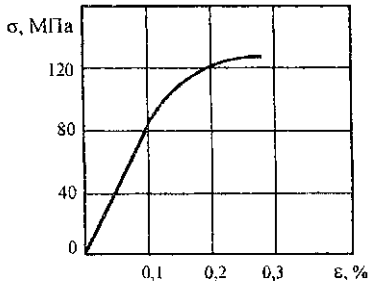


Рис. 1.3. Диаграмма растяжения хрупкого материала

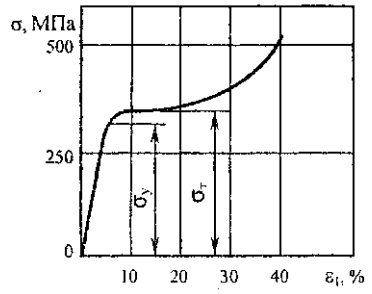


Рис. 1.4. Диаграмма сжатия пластичного материала

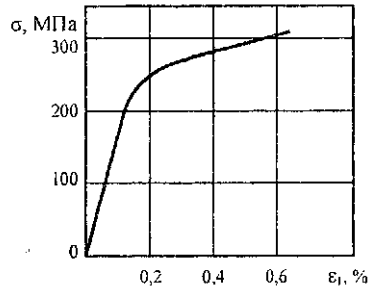


Рис. 1.5. Диаграмма сжатия хрупкого материала

Рассмотрим в качестве примера поведение так называемых пластичных и хрупких материалов при их растяжении и сжатии. На рис. 1.2 и 1.3 приведены диаграммы растяжения, а на рис. 1.4 и 1.5 - сжатия пластичных (вязких) и хрупких материалов. На рис. 1.2 и 1.3 по осям абсцисс отложено относительное удлинение (относительная продольная деформация) материала, а на рис. 1.4 и 1.5 относительное сужение (относительная поперечная деформация).

На рис. 1.2—1.5 обозначено:

$б_у$ - предел упругости, т.е. напряжение, превышение которого вызывает незначительные остаточные деформации (не более 0,03 %);

$б_т$ - предел текучести, т.е. напряжение, при котором происходит течение материала (рост деформаций) при постоянной нагрузке;

$б_в$ - предел прочности, или временное сопротивление, т.е. напряжение,

вызванное наибольшей нагрузкой, при которой начинается разрушение образца.

Величину относительного удлинения (или сжатия) определяют из выражения

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} 100\ \% \qquad (1,1)$$

где Al - абсолютное удлинение (сжатие) образца; / l- первоначальная длина образца.

Величину нормального напряжения в соответствии с законом Гука определяют из выражений

$$\sigma = \varepsilon E \quad \text{или} \quad \sigma = \frac{P}{F}, \qquad (1,2)$$

где E - модуль упругости (сжатия) материала, характеризующий сопротивляемость материала упругой деформации при растяжении (сжатии); $E = tgy$ (см. рис. 1.2); P - сила, растягивающая или сжимающая образец; F- поперечное сечение образца.

Под действием внешней силы P в образце возникают не только продольные, но и поперечные деформации. Величину относи-тельной поперечной деформации определяют из выражения

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta b}{b} 100\ \%, \qquad (1,3)$$

где Δb = |b –b_1| - абсолютное сужение (расшире-ние) образца; b- первоначальный поперечный размер образца; b_1- поперечный размер образца после нагружения силой P.

Хрупкие материалы (чугун, керамика, бетон и др.) разрушаются под действием растягивающих сил при очень малых остаточных деформациях (рис. 1.3). Для пластичных материалов (сталь, медь и др.) характерны большие значения остаточных деформаций (рис. 1.2). При сжатии пластачные материалы ведут себя почти так же, как и при растяжении (рис. 1.4). Хрупкие же материалы (рис. 1.5) при сжатии разрушаются так же, как и при растяжении, т. е. при весьма малых деформациях. В то же время необходимо отметить, что хрупкие материалы сопротивляются сжатию гораздо лучше, чем растяжению.

Рассмотренные характеристики «хрупкий» и «пластичный» для многих конструкционных материалов являются относительными и меняются при изменении температуры окружающей среды, а также при возникновении некоторых видов коррозии. Так, пластичная при нормальной температуре конструкционная сталь обыкно-венного качества становится хрупкой при низких температурах (при минус 30°С и ниже), а пластичная нержавеющая сталь типа 18-9 становится хрупкой при появлении межкристал-литной коррозии.

Механические свойства конструкционных материалов, из которых

изготовлено технологическое оборудование, претерпевают изменения в зависимости от технологических параметров протекающих в аппаратах процессов, свойств и характеристик технологической и окружающей среды. При повышенных температурах механические свойства конструкционных материалов ухудшаются, одновременно интенсифицируются коррозионные процессы. Низкие температуры также вызывают ухудшение механических свойств материалов.

При повышенных давлениях ужесточаются требования к качеству конструкционных материалов (при больших давлениях используют стали с лучшими механическими свойствами и пониженным содержанием серы, фосфора и других вредных примесей). Кроме того, увеличение давления часто приводит к интенсификации коррозии. При наличии в аппаратах пожаровзрывоопасных сред к выбору материалов для изготовления аппаратов предъявляют повышенные требования.

Известно, что у углеродистых конструкцион-ных сталей при температурах 150-300°С сни-жается пластичность. Поэтому при изготовлении и ремонте оборудования следует избегать деформирования таких сталей (гибки, ковки, от-бортовки) в указанном интервале температур.

Некоторые легированные стали при длительной работе в интервале температур 400-500°С приобретают тепловую хрупкость. Наличие хрома, марганца и никеля в сталях способствует ее возникновению, а молибдена и вольфрама - уменьшает склонность стали к тепловой хруп-кости.

В результате одновременного воздействия высоких температур и нагрузок аппараты могут разрушаться вследствие ползучести металла. *Ползучестью* называют свойство металла медленно, непрерывно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при высоких температурах. Пределом ползучести (условным) $\sigma_п$ называют напряжение, которое вызывает общую деформацию ползучести 1 % ($\Delta l = 0{,}01 \cdot l$) за время, равное 10^4 или 10^5 ч, что будет соответствовать скорости ползучести 10^{-6} или 10^{-7} $ч^{-1}$.

На рис. 1.6 показаны графики, характеризующие пластические деформации образцов, работающих под постоянной наг-рузкой и при повышенной температуре, в зависимости от времени испытания. При небольших начальных напряжениях (кривая 1) пластические деформации с течением времени затухают. При высоких начальных напряжениях (кривая 2) процесс ползучести с течением времени изменяется (на кривой ползучести видны три участка):

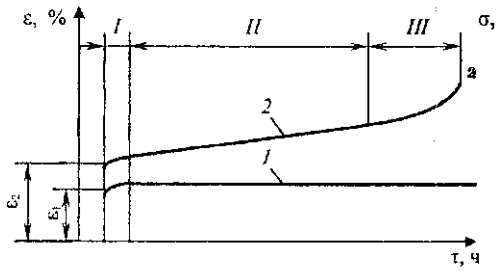


Рис. 1.6. Кривые ползучести: ε_1 и ε_2 – начальные удлинения

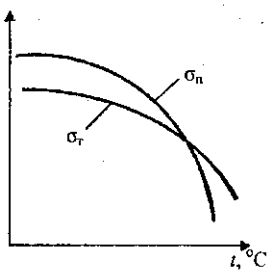


Рис. 1.7. Влияние температуры на пределы текучести и ползучести

I – участок начальной ползучести, которая появляется непосредственно за упругой деформацией образца;

II – участок с постоянной скоростью ползучести;

III – участок нарастающей скорости ползучести до момента разрыва образца в точке а.

Предел ползучести с ростом температуры снижается быстрее, чем предел текучести (рис. 1.7). Поэтому при расчетах, начиная с некоторого значения температуры, необходимо учитывать не только предел текучести, но и предел ползучести. Для конструкционных сталей обыкновенного качества и качественных, явление ползучести необходимо учитывать при температуре выше 380 °С, для легированных сталей - выше 420 °С, для высоколегированных хромоникелевых сталей - выше 525 °С. В тех случаях, когда общая деформация ползучести несущественна, но узлы или детали работают под нагрузкой при высокой температуре, критерием напряженного состояния служит предел длительной прочности $\sigma_д$, характеризующий нагрузку, под действием которой происходит разрушение узла (детали) за определенный промежуток времени при данной температуре.

При отрицательных температурах; а иногда и при невысокой положительной температуре металлы проявляют хладоломкость, которая характеризуется низкой величиной ударной вязкости $a_н$. На рис. 1.8 показано изменение величины ударной вязкости в зависимости от температуры для конструкционной стали обыкновенного качества марки Ст1 (кривая 1) и легированной стали марки Х9М (кривая 2).

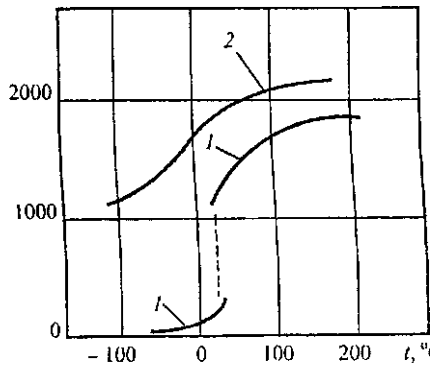


Рис. 1.8. Влияние температуры на ударную вязкость сталей

В интервале низких температур от 0 до минус 30 °С у углеродистых сталей наблюдается хрупкий излом, а выше 20 °С - вязкий излом. Промежуточный

интервал (обозначен пунктиром) характеризуется неопределенностью изменения ударной вязкости (зона рассеяния свойств).

Для легированных сталей характерно сохранение высокого показателя ударной вязкости даже при температурах ниже минус 70 °С. Цветные металлы не подвержены хладоломкости и могут использоваться при очень низких температурах (до минус 250 °С).

1.4. ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АГРЕССИВНЫХ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ СРЕДАХ

В процессе эксплуатации производственное оборудование подвержено агрессивному воздействию перерабатываемой технологической среды, а также окружающей среды. Взаимодействие материала оборудования со средой называется коррозией. В результате протекания самопроизвольного разрушения материала, вызванного коррозией, толщина стенок аппаратов и трубопроводов уменьшается. Одновременно изменяются механические свойства металлов: падает прочность и износостойкость, хладо- и красноломкость растет и увеличивается хрупкость. Качество хранимых или перерабатываемых в аппаратах продуктов ухудшается, т.к. они загрязняются продуктами коррозии. Некоторые продукты коррозии являя-ются пирофорными соединениями.

Коррозии подвержены все конструкционные материалы: металлы, полимерные материалы, силикаты и другие материалы. Почти треть производимого в мире металла разрушается коррозией, причем десятая его часть теряется безвозвратно. Около 70 % аварий и повреждений оборудования происходит по этой причине. Коррозия оборудования с пожаровзрыво-опасными средами часто становится причиной аварий, пожаров и взрывов на технологических установках. В возникновении этих видов опасностей всегда присутствует фактор неожиданности, так как уменьшение толщины стенок оборудования и, тем более, изменение механических свойств материалов в результате коррозии трудно поддается контролю и протекает наиболее интенсивно в недоступных для осмотра местах. Практически многие виды коррозии обнаруживаются только в момент аварийного разрушения конструкции, образования сквозных поражений стенок аппаратов и трубопроводов.

Классификация коррозионных воздействий среды на оборудование осуществляется по многим признакам, основными из которых являются характер коррозионных разрушений и механизм коррозии. Характерные коррозионные разрушения металлов, встречающиеся на практике, и относительные частоты их появления приведены на рис. 1.9.

Рис. 1.9. Виды коррозионных разрушений металлов (в остальных 10 % случаев коррозионных разрушений имели место щелевая коррозия, коррозионное растрескивание и коррозионная усталость, коррозия под напряжением и другие виды коррозии)

Коррозионная стойкость металлов делится на шесть групп стойкости и оценивается по десятибалльной шкале:

- совершенно стойкие (1 балл) - скорость коррозии не превышает 0,001 мм/год;
- весьма стойкие (2-3 балла) - скорость коррозии не превышает 0,01 мм/год;
- стойкие (4-5 баллов) - скорость коррозии не превышает 0,1 мм/год;
- понижено стойкие, малостойкие и нестойкие (6-10 баллов) - скорость коррозии от 0,1 до 10 мм/год и более.

Для изготовления оборудования с пожаро-взрывоопасными средами рекомендуются метал-лы, обладающие 1-5 баллами стойкости, скорость коррозии которых в технологических средах не превышает 0,1 мм/год.

Под скоростью коррозии металлов П понимают проникновение коррозии в глубину металла. Скорость коррозии рассчитывается из опытных данных потери массы металла после удаления продуктов коррозии. Расчет скорости коррозии производится по формуле

$$П = \frac{К}{\rho}, \qquad (1,4)$$

где К - потеря массы, кг/(м^2/год); р - плотность металла, кг/м^3.

Скорость коррозии металлов учитывается в процессе проектирования при расчете аппаратов на прочность, а в процессе эксплуатации - для оценки степени коррозионного износа оборудования. Для компенсации потерь от коррозии предусматривают увеличение толщины стенок оборудования на величину

$$C = П\tau, \qquad (1,5)$$

где *t* - срок службы оборудования, годы.

При проведении проверочных расчетов оборудования на прочность, а также при анализе возможных причин его разрушения напряжения определяют с учетом фактического износа материала от коррозии, измеряя толщину стенок

оборудования в местах наиболее подвергшихся коррозионному разрушению. Толщину стенки аппарата в месте коррозионного поражения через определенный период эксплуатации можно оценить по

$$S_\Phi = S_{an} - C \ , \qquad (1,6)$$

где S_Φ - фактическая (действительная) толщина стенки аппарата; S_{an} - толщина стенки нового аппарата (первоначальная толщина), принимаемая по паспорту, сертификату или иному документу.

В зависимости от механизма взаимодействия металла с коррозионной средой различают химическую и электрохимическую коррозию.

1.4.1. Химическая коррозия и ее разновидности

Химической коррозией называется само-произвольное разрушение металлов, вызванное химическими процессами. Химическая коррозия имеет место в среде жидких диэлектриков или сухих газов, обычно нагретых до высоких температур, и не сопровождается протеканием коррозионных токов в конструкциях. Рассмотрим некоторые разновидности химической коррозии.

1. *Взаимодействие металлов с сухими газами-окислителями* (воздухом, кислородом и другими) при повышенной температуре. В качестве примера приведем реакцию взаимодействия железа (железо является основным компонентом стали) с кислородом воздуха при температуре 500 °С и выше:

$$4Fe + 3O_2 = 2Fe_2O_3 \ .$$

Образующаяся окалина ($Fe_20з$) не обладает механической прочностью, отслаивается от основного металла, уменьшая толщину стенки и прочность конструкции.

2. *Взаимодействие металлов с сернистыми соединениями и серой* при повышенной температуре. При взаимодействии железа стали с сероводородом при температуре выше 450 °С образуется сульфид железа:

$$Fe + H_2S = FeS + H_2 \ .$$

Сернистое железо (FeS), также как и окалина, не обладает механической прочностью и, к тому же, способно окисляться на воздухе с образованием серы и выделением большого количества тепла, достаточного для самовозгорания серы или воспламенения технологических горючих смесей. Сероводород, сера и сернистые соединения содержатся во всех видах природного сырья (в торфе, угле, нефти, попутных газах, природном газе), а также в жидких, твердых и газообразных продуктах угле-, нефте- и газопереработки.

3. *Взаимодействие стали с окисью углерода.* Окись углерода используется во многих совре-менных процессах переработки углеводородного сырья и получения синтетических материалов (процессы получения альдегидов, спиртов и другие).

При повышенной температуре и давлении протекает следующая реакция взаимодействия окиси углерода с железом с образованием пентакарбонила железа (пентакарбонил железа - жидкость с температурой кипения 80 °С):

$$Fe + 5CO = Fe(CO)_5 .$$

При температуре около 200 °С в интервале давлений 10-30 МПа скорость образования пентакарбонила железа максимальна и металл в среде окиси углерода как бы испаряется. Кроме того, начиная с 500-600 °С окись углерода без давления диффундирует вглубь нелегированных сталей. При этом окись углерода разлагается с выделением углерода по границам структурных зерен стали:

$$2CO = CO_2 + C .$$

Науглероживание резко снижает работоспо-собность стальных деталей, металл становиться хрупким. Это явление часто наблюдается при проведении ремонтных работ, связанных с газовой сваркой и резкой.

4. *Взаимодействие металлов с водородом.* При проведении химических процессов с участием водорода (синтеза аммиака, гидрогенизации, гидроочистки, риформинга и других процессов) при высоких температурах и давлениях происходит водородная коррозия сталей. При этих условиях водород диффундирует в толщу стали, особенно по границам структурных зерен. Этот процесс сопровождается разрушением кристалл-лической структуры стали и ее механические свойства ухудшаются. Металл становится хрупким, способность его к сопротивлению удару и изгибу падает. Водород взаимодействует с карбидом железа (цементитом стали) по реакции:

$$Fe_3C + 2H_2 = 3Fe + CH_4 .$$

В результате водородной коррозии сталь теряет прочность, металлический блеск, поверхность становится матовой. Из-за скопления метана под большим давлением в приповерхностном слое металла образуются вздутия.

1.4.2. Электрохимическая коррозия и ее разновидности

Электрохимическая коррозия происходит при контакте металла с электролитами, т.е. водными растворами солей, кислот и щелочей, влажными газами, расплавами солей, кислот и щелочей, обладающими свойствами проводимости электрического тока.

При электрохимической коррозии металла (рис. 1.10) возникают микрогальванические пары, образующие анодные и катодные участки, на по-верхности которых протекают следующие реакции:

анод: $Me \rightarrow Me^{n+} + n\bar{e}$,

катод: $2H^{+} + 2\bar{e} \rightarrow 2H \rightarrow H_2\uparrow$ или

$$O_2 + 2H_2O + 4\bar{e} \rightarrow 4OH^{-} .$$

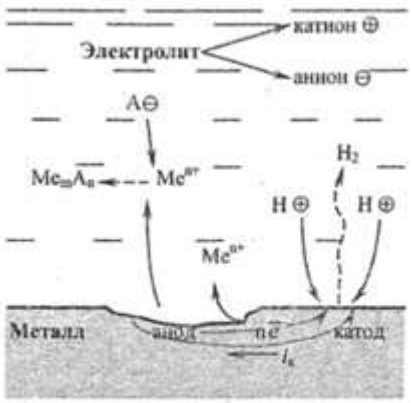


Рис. 1.10. Схема электрохимической коррозии:
⊕ – катион; ⊖ – анион; $\bar{e}$ – электрон;
$i_к$ – коррозионный ток

Сущность электрохимической коррозии заключается в следующем. При контакте электропро-водной среды с аппаратом, его узлами или деталями положительно заряженные ионы металла пере-ходят в электролит. Вследствие наличия примесей (включений) в металле, неодинакового строения металла, раз-личия состава электролита у отдельных участков оборудования и различных температур участков, неодинаковых деформаций узлов и деталей и напряжений в них, а также наличия блуждающих токов (токов утечки), ионы металла переходят в электролит с различных участков оборудования неравномерно, что приводит к образованию анодных (отрицательно заряженных) и катодных (положительно заряженных) участков. Положи-тельно заряженные ионы металла взаимодействуют с анионами электролита, образуя химические соединения типа Me_mA_n (здесь *A* - анион). На катодных участках оборудования катионы диссоциированного электролита (в данном случае *H*-катионы) разряжаются с образованием нейтральных атомов водорода, которые соединяясь в молекулу H_2, выделяются с поверхности катодного участка в виде пузырьков газа.

Рассмотрим некоторые примеры электрохимии-ческой коррозии оборудования.

1. Характерен механизм точечной и щелевой коррозии, которые вызывают интенсивное разрушение в отверстиях, соединениях частей оборудования внахлестку, во фланцевых, заклепочных и болтовых соединениях и т.д. Она протекает также под слоем различных отложений на поверхности металла: солей, полимеров, песка, продуктов коррозии, кокса, биологических наростов и других продуктов.

Рассмотрим щелевую коррозию стального фланцевого соединения, в щели

под прокладкой в растворе NaCl (рис. 1.11). На первой стадии коррозии равномерно протекают на всей поверхности, прилегающей к щели, анодная и катодная реакции:

$$\text{анод: } Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\bar{e},$$

$$\text{катод: } O_2 + 2H_2O + 4\bar{e} \rightarrow 4OH^-.$$

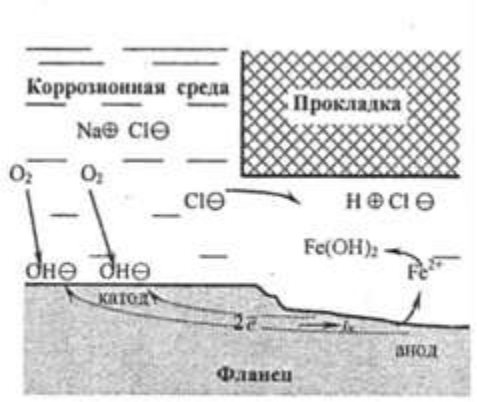


Рис. 1.11. Схема щелевой коррозии металла в растворе NaCl

Через некоторое время катодная реакция в щели прекращается из-за истощения запаса кислорода вследствие низкой ско-рости его диффузии вглубь щели. Здесь начинает протекать анодная реакция, а катодом становится тот участок, к которому обеспечен свободный приток кислорода. Между анодным и катодным участками возникает электрический ток. В металле ток переносится электронами, в растворе -ионами. При этом в щель переносятся анионы (в нашем случае агрессивные хлор-ионы). Концентрация хлоридов в щели возрастает, а их гидролиз приводит к выпадению в щели нерастворимой гидроокиси железа и к обогащению раствора свободной соляной кислотой:

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2\downarrow + 2HCl \ .$$

Рост концентрации ионов хлора и подкисление раствора ведут к увеличению скорости коррозии. Процесс непрерывно самоускоряется, приобретая автокаталитический характер. Сильное повышение кислотности раствора в щели особенно опасно для пассивных металлов, так как приводит к их активации в глубине щели. Поэтому у хромистых и хромоникелевых сталей наблюдается гораздо большая склонность к щелевой коррозии, чем у углеродистых сталей.

2. Оборудование, находящееся в земле и водоемах вблизи установок, работающих на постоянном токе (электрифицированных участков железных дорог, трамвайных линий, линий метро, сварочного оборудования, трасс электрокабелей, линий ЛЭП и т.д.), подвержено электрохимической коррозии, вызываемой блуждающими токами, или токами утечки. В некоторых случаях вредное воздействие оказывают и блуждающие переменные токи, которые возникают при нарушении симметрии напряжения и тока отдельных фаз линий электропередач,

замыканий на землю и утечек через изоляторы, а также при появлении индукционных токов.

Схема коррозии участка трубопровода под действием токов утечки показана на рис. 1.12. В почве (вблизи трамвайной линии) во время движения вагона по рельсам появляются электрические токи, называемые токами утечки или блуждающими токами. Наибольшая величина этих токов наблюдается при повреждении электрической связи между отдельными участками рельсового пути.

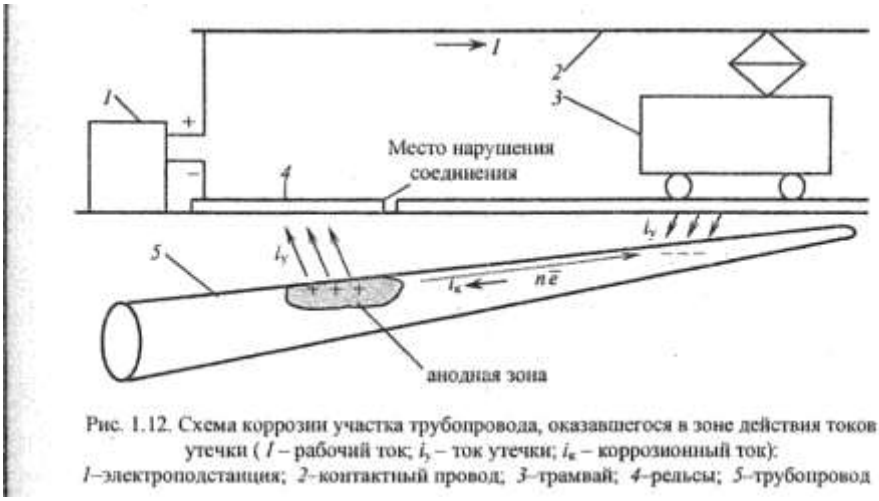


Рис. 1.12. Схема коррозии участка трубопровода, оказавшегося в зоне действия токов утечки (*I* – рабочий ток; i_y – ток утечки; $i_к$ – коррозионный ток): *1*–электроподстанция; *2*–контактный провод; *3*–трамвай; *4*–рельсы; *5*–трубопровод

Подземное сооружение, оказавшееся в зоне действия токов утечки (в данном случае трубопровод), подвержено интенсивной коррозии, потери массы от которой достигают 5-10 кг/(м^2*год) и более. В некоторых случаях наблюдались сквозные поражения стенок трубопроводов, резервуаров и другого оборудования, оказавшегося в зоне действия токов утечки уже через месяц после начала эксплуатации. Так как металл оборудования обладает меньшим электрическим сопротивлением, чем грунт, то блуждающие токи из грунта входят в трубопровод (катодная зона), движутся по нему до места, в котором трубопровод начинает отдаляться от рельсового пути, выходят из трубопровода в грунт (анодная зона) и возвращаются к рельсовому пути, образуя замкнутый электрический контур. В анодной зоне трубопровода ионы металла активно переходят в прилегающие слои грунта, вступая в дальнейшие вторичные реакции с образованием продуктов коррозии, представляющих собой характерные наросты на поверхности металла, но вследствие своей рыхлости и электропроводности не препятствующие дальнейшему протеканию коррозионного процесса.

1.4.3. **Влияние технологических параметров на скорость коррозии**

На скорость коррозии оказывают влияние такие технологические параметры, как *температура, давление, концентрация компонентов,* а также *расход* перерабатываемой среды. Определить скорость коррозии того или иного материала в перерабатываемой или окружающей среде и, тем более, выявить влияние технологических параметров процессов на скорость коррозии можно только экспериментально.

Повышенное давление среды в аппарате, также как и *повышенная*

температура процесса, приводит к увеличению скорости коррозии, особенно в газовых средах. В качестве примера можно привести рассмотренную ранее водородную коррозию стали. При повышенных температурах и давлениях водород растворяется в металле и диффундирует вглубь. В нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т при температуре 500 °С и давлениях 5, 20 и 50 МПа растворяется соответственно 26, 58 и 96 $см^3$ водорода в 100 г металла, а при атмосферном давлении - только 4,2 $см^3$/100 г. Воздействие водорода на сталь приводит к глубоким структурным изменениям и, как следствие, к потере ее механической прочности (явление межкристал-литной коррозии).

Увеличение расхода технологической среды (перерабатываемых веществ и материалов) вызывает не только усиление абразивного износа материала оборудования (эрозии), но и интенсифицирует процессы коррозии, т.к. при этом облегчается доступ коррозионных примесей, содержащихся в технологической среде, к поверхности металла. Помимо этого, движущаяся среда истирает тонкий защитный (плакирующий) слой, образующийся в некоторых случаях на поверхности металла при его взаимодействии со средой, в результате чего скорость коррозии возрастает.

Влияние других технологических и эксплуатационных факторов рассмотрим на примере работы оборудования для хранения нефти и нефтепродуктов. Резервуары и трубопроводы изготавливаются из углеродистых сталей марок Ст0, Ст2, Ст3, Ст3кп, сталей 10, 20 и др. В некоторых случаях используются низколегированные стали марок 19Г, МХГС, 09Г2С и др. Коррозионная агрессивность чистых углеводородов по отношению к сталям невелика. Однако нефть и продукты ее переработки содержат целый ряд коррозионных примесей. Это, в первую очередь, сернистые и кислоро-досодержащие соединения (сера, сероводород, меркаптаны, сульфиды, полисульфиды, тиофаны, тиофены, серная, сульфоновая и органические кислоты, перекиси). Кроме того, в сырых нефтях и нефтепродуктах присутствуют минеральные соли и окислы металлов ($MgCl_2$, $CaCl_2$, NaCl, KCl, SiO_2, MgO, CaO, FeO, Fe_2O_3 и др.), образующие с водой рассолы разной степени минерализации, содержащие также растворенные коррозионно-активные газы: кислород, сероводород, диоксид углерода (углекислый газ).

Опыт эксплуатации резервуаров-отстойников на нефтепромыслах показывает, что их фактический срок службы (вследствие интенсивной коррозии с образованием сквозных поражений днищ и стенок) не превышает 1,5-2 лет при нормативном сроке эксплуатации 20 лет. Обследования ре-зервуарных парков магистральных нефтепроводов показали, что днища резервуаров уже через 3-5 лет требуют капитального ремонта, так как в каждом из них имелось до 30-50 сквозных коррозионных поражений и до 300-500 язв глубиной 1-3 мм при толщине листов 4-5 мм.

Резервуарное оборудование нефтеперерабатывающих заводов, пред-назначенное для хранения бензинов, подвергается коррозии сернистыми соединениями, кислой подтоварной водой (pH ≈ *2*) и растворенным в бензине и воде кислородом. Скорость коррозии стали в этом случае достигает 0,4-0,6 мм/год. Резервуары с темными нефтепродуктами из-за наличия растворенной в продуктах воды, содержащей кислород и другие агрессивные примеси, и в результате

воздействия микроорганизмов разрушаются уже через 11-12 месяцев. Сильной коррозии подвержены танкеры, перевозящие нефтепродукты (скорость коррозии стенок и днищ танков при транспортировке бензинов в три раза больше, чем при транспортировке сырой нефти).

Внутренние поверхности резервуаров и других емкостей (цистерн, танков и другого оборудования) в процессе эксплуатации находятся в неодинаковых условиях. В коррозионном отношении внутреннее пространство резервуара можно условно разбить на 3 основные зоны:

верхнюю зону - паровоздушное пространство над зеркалом нефтепродукта, в котором находятся воздух, сероводород, пары воды, а по крыше и стенкам резервуара стекает конденсатная пленка;

среднюю зону - занятую жидкими нефтепродуктами с эмульгированными в них капельками минерализованной воды и растворенными газами (кислородом, сероводородом и др.);

нижнюю зону - днище резервуара и нижний пояс стенки, где основными коррозионно-активными элементами являются подтоварная вода и твердые отложения (в том числе и продуктов коррозии). Днище резервуара, помимо всего прочего, подвержено почвенной коррозии, а стенки и крыша - атмосферной коррозии.

Учесть все факторы, влияющие на коррозию, достаточно трудно, т.к. коррозионное разрушение в каждой зоне резервуара зависит от совокупности множества факторов и, кроме того, сами зоны постоянно меняют свое положение.

Установлено, что скорость коррозии стенок стальных резервуаров при хранении продуктов переработки нефти с незначительным содержанием воды и с плотностью 960 кг/м^3 и выше не превышает 0,03-0,05 мм/год, а с плотностью 750 кг/ м^3 и ниже - 0,5 мм/год. На рис. 1.13 приведены зависимости скорости коррозии внутренней поверхности резервуара от вида

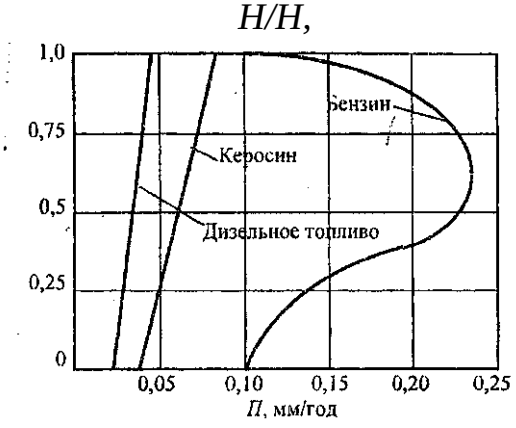


Рис.1.13. Зависимость скорости коррозии стенок резервуаров от вида хранимых нефтепродуктов: H – расстояние от днища резервуара; $H_р$ – высота стенки резервуара; $П$ – скорость коррозии

хранимого в нем продукта. Скорость коррозии стенок резервуаров с дизельным топливом и керосином возрастает практически линейно (примерно в 2 раза) от днища к крыше, что связанно с более активным притоком кислорода в

верхние слои нефтепродуктов. В резервуарах с бензином отмечена другая закономерность: сначала скорость коррозии значительно возрастает (примерно в 3-4 раза) от днищ к крышам и достигает в некоторых случаях значений 0,25 мм/год на уровне 0,6-0,8 высоты стенок резервуаров, а затем резко падает до значений, соответствующих скорости коррозии днищ резервуаров. Такой ход кривой объясняется тем, что обследованные резервуары с бензином имели большое количество циклов заполнения-опорожнения (более 2-3 раз в сутки, т.е. на порядок выше, чем резервуары с дизельным топливом и керосином), а это приводило к обогащению паровоздушной среды и бензина кислородом воздуха. Электрохимическая коррозия стенок резервуаров в области ватерлинии протекает по механизму с кислородной деполяризацией (рис. 1.14).

В слое влажного нефтепродукта протекают реакции:

$$\text{анод: } Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\bar{e},$$

$$\text{катод: } 0{,}5O_2 + H_2O + 2\bar{e} \rightarrow 2OH^-.$$

Частые изменения уровня нефтепродукта (в данном случае бензина) в пределах 0,25-1,0 высоты стенки и обуславливают интенсификацию коррозйи в этой зоне (в области ватерлинии). На рис. 1.15 проведена зависимость скорости коррозии внутренней поверхности стенок резервуаров от частоты их смачиваний бензином в течение суток.

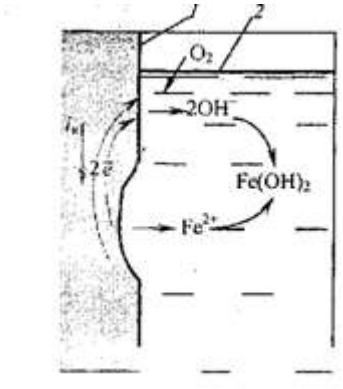


Рис. 1.14. Схема коррозии стенки резервуара в области ватерлинии: 1-стенка резервуара; 2-уровень нефтепродукта.

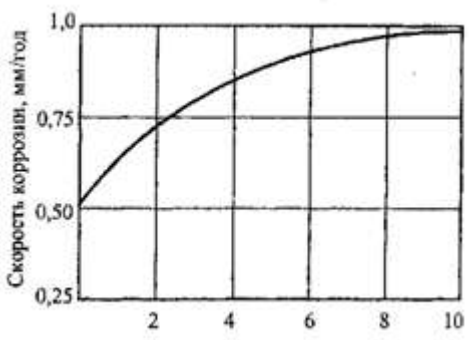


Рис. 1.15. Влияние частоты заполнения-опорожнения резервуаров на скорость коррозии.

Отмечено, что скорость коррозии зависит от объема паровоздушного пространства: в резервуарах с бензином емкостью 10000 $м^3$ скорость коррозии стенок и крыши примерно в 3 раза меньше, чем в резервуарах с тем же продуктом емкостью 2000 $м^3$ при прочих равных условиях. Конструкция вертикальных стальных резервуаров также значительно влияет на скорость коррозии стенок. Так, стенки резервуаров с плавающей крышей практически не подвержены коррозии, т.к. в резервуарах такой конструкции почти полностью ликвидировано паровоздушное пространство.

Как уже отмечалось, у резервуаров с нефтепродуктами наблюдается интенсивная коррозия нижних поясов стенок и днищ, так как здесь постоянно имеется отстой сильно минерализованной воды и слой твердого осадка. Наиболее интенсивно коррозия протекает на границе раздела фаз: нефтепродукт-вода. Дополнительно к приведенным в данном параграфе сведениям необходимо отметить, что все твердые отложения солей и окислов металлов, в том числе окислов железа, по отношению к материалу резервуаров - стали ведут себя как катоды.

Правильный выбор конструкционных материалов для изготовления технологического оборудования способствует увеличению срока его эксплуатации, продолжительности межремонтного пробега, а также значительно снижает пожаровзрывоопасность производств, что подтверждается статистическими данными.

1.5. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ АППАРАТОВ И МАШИН

Аппараты представляют собой устройства для проведения технологических процессов, не связанных с механическим воздействием на вещества и материалы. В наиболее общем случае аппарат состоит из: корпуса с крышками (или днищами), образующими внутреннее пространство соответствующей формы; штуцеров, служащих для ввода сырья, вывода продуктов и присоединения к аппарату контрольно-измерительных приборов и других устройств; люков и лазов для монтажа, осмотра и регулирования; опор (лап, стоек, юбок) и внутренних устройств, имеющих специальное функциональное назначение (тарелки, насадка, мешалки, змеевики и другие устройства, которые, кстати, могут и отсутствовать, например, в емкостях, ресиверах и т.п. оборудовании).

Машины представляют собой устройства для перемещения веществ и материалов или для проведения технологических процессов, связанных с механическим воздействием на вещества и материалы. Основными узлами и деталями любой машины являются: станина (корпус); рабочий орган (ротор, вентилятор, вал, поршень, колесо и т.п.); подшипниковые узлы, служащие для удержания подвижных узлов машины в рабочем положении; механическая передача (редуктор, вариатор, муфта и т.п.) и привод (электродвигатель, паровая машина и др.).

В связи с тем, что большинство технологических процессов характеризуется

высокими рабочими параметрами (температурой, давлением, концентрацией, расходом и др.), а также высокой агрессивностью, токсичностью и пожаровзрывоопасностью среды, к аппаратам и машинам предъявляются следующие основные требования:

Механическая прочность - способность выдерживать рабочие нагрузки. Прочность обеспечивается при конструировании соблюдением соответствующих расчетных нормативов и является главным условием безопасной эксплуатации оборудования.

Герметичность - способность оборудования не пропускать находящуюся в них среду наружу или воздух внутрь, что достигается применением цельносварных конструкций, устройством обтюрации в разъемных соединениях. Герметичность оборудования позволяет предотвратить образование взрывоопасных концентраций в аппаратах и производственных помещениях.

Устойчивость - способность оборудования сохранять в течение всего периода эксплуатации первоначальную форму и положение, что достигается учетом в расчетах факторов, влияющих на устойчивость (ветра, колебаний почвы, осадки грунта, образования вакуума и других факторов).

Надежность и безопасность в эксплуатации, достигаемая устройством предохранительных и защитных систем, одновременно позволяющих обеспечить взрывопожарную безопасность оборудования.

Долговечность - расчетный срок службы аппарата или машины, обычно принимаемый в расчетах равным 10-20 годам.

Стабильность обеспечения технологических параметров процесса в условиях непрерывного автоматизированного производства.

Технологическое оборудование должно быть высоко производительным и экономичным (иметь минимальную стоимость проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации); обладать технологичностью конструкции, что обеспечивается стандартизацией и нормализацией узлов и деталей, их взаимозаменяемостью; отличаться простотой устройства, обслуживания, ремонта; быть транспортабельным (обладать возможностью транспортировки к месту монтажа в собранном виде с завода-изготовителя), а также удовлетворять требованиям технической эстетики.

1.6. ЭЛЕМЕНТЫ ПРОВЕРОЧНЫХ РАСЧЕТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ

Проектирование, изготовление, монтаж, эксплуатацию и реконструкцию оборудования производят в соответствии с единой системой конструкторской и технологической документации (ЕСКД и ЕСТД), системой стандартов безопасности труда (ССБТ), на основании действующей нормативно-технической документации, к которой, в частности, относятся: государственные стандарты (ГОСТы), отраслевые стандарты (ОСТы), руководящие технические материалы (РТМ), технические условия (ТУ), нормы проектирования и правила эксплуатации и другие документы.

Каждый аппарат или машину проектируют по определенной методике,

принимая в качестве исходных данных рабочие параметры процесса, задаваемые технологами, и физико-химические свойства сырья и продуктов. Обычно проектирование осуществляют в следующей последовательности:

1. Составляют и решают уравнения материального и энергетического (теплового) балансов для определения неизвестных материальных потоков - продуктов, расходов и параметров теплоносителей, производительности оборудования и обоснования рабочих параметров процесса.

2. Выполняют гидравлические расчеты аппарата (машины), т.е. определяют его основные размеры, которые округляют до стандартных значений, и другие характеристики.

3. Выбирают по стандартам, норма, каталогам аппаратуру, имеющую наиболее близкие к расчетным размеры и параметры.

4. Выбирают конструкционные материалы и определяют их механические характеристики при расчетной температуре.

5. Рассчитывают на прочность основные элементы оборудования с учетом их рабочих нагрузок.

Встречающиеся в нормативных документах, в проектных и производственных материалах, паспортах и сертификатах на оборудование термины требуют специального пояснения. Различают рабочее, расчетное, условное и пробное давления, а также рабочую и расчетную температуры.

Рабочее давление $p_р$ в аппарате определяется технологическим режимом и представляет собой максимальное внутреннее избыточное или наружное давление при нормальном режиме протекания технологического процесса (без учета допускаемого давления при срабатывании предохранительных устройств).

Расчетным p называется давление, на которое производят расчет на прочность элементов аппарата (обечаек, днищ, патрубков, фланцев и др.) при максимальной температуре их стенок. При прочностных расчетах необходимо учитывать гидростатическое давление, если его величина превышает 5 % рабочего давления.

Под *условным давлением* $p_у$ понимают расчетное давление среды при температуре 20 °С (без учета гидростатического давления столба жидкости), которое используют при расчете на прочность стандартного оборудования. ГОСТом установлен следующий ряд значений $p_у$ в МПа: 0,1; 0,2; 0,25; 0,3;...; 10,0; 12,5; 16; 20;... ; 100; 112,5; 125; 140 и далее. Для прочностных расчетов аппаратов должны быть известны также значения их базовых диаметров. Для аппаратов, изготовляемых из листовых материалов, базовым является внутренний диаметр $D_в$, а для изготовляемых из труб - наружный диаметр $D_н$. Стандарты задают следующие ряды значений базовых диаметров: $D_в$, в мм - 400; 450; 500; 550; ...; 2000; 2200; 2400; ...; 3600; 3800; 4000 и более; $D_н$ в мм - 159; 180; 219; 273;...; 480; 530; 630 и 720.

Пробным $p_{пр}$ называется давление, при котором производится испытание аппарата после его изготовления, а также периодически в процессе эксплуатации.

Под *рабочей температурой* $t_р$ понимают максимальную (минимальную) температуру в аппарате при нормальном режиме протекания технологического процесса.

Расчетная температура t стенки - температура, при которой определяются физико-механические характеристики, допускаемые напряжения материала и проводится расчет на прочность элементов аппарата.

В проектной и производственной документации приняты сокращенные записи приведенных выше показателей. Например, условное давление, равное 1,6 МПа, обозначают $p_y 1,6;$ рабочее давление 2,5 МПа при температуре 150 °С -p_p2,5t150; условный диаметр 2200 мм - D_y2200 и т.п.

При проведении механических (прочностных) расчетов необходимо учитывать повышение напряжений в стенках аппарата не только из-за повышенного пробного давления по сравнению с рабочим, но и вследствие несовершенства контроля и технологии изготовления, неоднородности структуры металла, колебания технологических параметров в допускаемом диапазоне и изменения свойств среды. Кроме того необходимо учитывать характер приложения и род нагрузок, точность расчетов, а также пожаро-взрывоопасные свойства среды.

Все эти факторы учитываются коэффициентами запаса η и n_i, при выборе допускаемых напряжений. Напряжение, при котором учитывается наличие взрывопожароопасных веществ в аппарате, обеспечивается его прочность с расчетным запасом и минимальным расходом конструкционного материала, называют *допускаемым напряжением* и определяют по формуле

$$\sigma_{доп} = [\sigma]\,\eta \ , \qquad (1,7)$$

где [о] - нормативное допускаемое напряжение; т) - коэффициент, учитывающий пожаровзрывоопасные свойства среды в аппарате, значения которого определяются следующим образом:

$\eta = 0,9$ при $\varphi_н < 0,05$ об.д. или $t_{св} < 300$ °С;
$\eta = 0,95$ при $0,05$ об.д. $\le \varphi_н < 0,1$ об.д. или 300 °С $\le t_{св} < 400$ °С;
$\eta = 1,0$ при $\varphi_н \ge 0,1$ об.д. и $t_{св} \ge 400$ °С.

Здесь: $\varphi_н$ - нижний концентрационный предел распространения пламени; $t_{св}$-температура самовоспламенения горючего вещества.

Нормативные допускаемые напряжения [σ] определяют по различным выражениям в зависимости от вида конструкционного материала и температурных условий эксплуатации.

Для сталей обыкновенного качества и качественных, работающих при температуре до 380 °С, для низколегированных сталей - до 420 °С и дл высоколегированных сталей - до 525 °С:

$$[\sigma] = \min\left[\frac{\sigma'_т}{n_т}; \frac{\sigma'_в}{n_в}\right] . \qquad (1.8)$$

Для сталей обыкновенного качества и качественных, работающих в интервале температур 380-475 °С, для низколегированных сталей - в интервале 420-560 °С и

для высоколегированных сталей - в интервале 525-610 °С:

$$[\sigma] = \min\left[\frac{\sigma'_т}{n_т}; \frac{\sigma'_д}{n_д}\right] . \qquad (1.9)$$

В приведенных формулах 1.8 и 1.9 значения величины $n_в$ принимают по справочной литературе при расчетной температуре, но не выше 20 °С, величины $n_т$ - при расчетной температуре, а величины $n_д$ - по среднему значению предела длительной прочности за 10^5 ч при расчетной температуре. Значения коэффициентов запаса прочности и, для проката и поковок из сталей принимаются следующими: $n_в \geq 2{,}6$; $n_т \geq 1{,}5$; $n_д \geq 1{,}5$.

Для литых изделий из цветных металлов и их сплавов

$$[\sigma] = \min\left[\frac{\sigma'_в}{n_в}; \frac{\sigma'_т}{n_т}\right] , \qquad (1.10)$$

где $n_в \geq 3{,}5$; $n_т > 2$.

В зависимости от практических целей выполняют проектные и проверочные расчеты. Проектные расчеты обычно сочетаются с конструированием и ставят своей целью определение размеров сечений элементов аппаратов и машин (толщины стенок, диаметров валов, осей и других размеров). .

При проверочных расчетах определяют фактические напряжения, возникающие в элементах оборудования, и сравнивают их с допускаемыми при заданной рабочей температуре. Цели проверочных расчетов: проверка возможности использования выбранного аппарата в конкретных условиях эксплуатации; проверка возможности дальнейшего использования оборудования после определенного периода эксплуатации; выявление причин повреждений и разрушений оборудования при проведении пожарно-технических экспертиз. Работники пожарной охраны или привлекаемые ими специалисты соответствующих отраслей народного хозяйства при проведении экспертиз аварий и пожаров проверяют выполнимость условия прочности, непосредственно сравнивая фактические и допускаемые напряжения:

$$\sigma_ф \leq \sigma_{доп} , \qquad (1.11)$$

где $\sigma_ф$ - фактические напряжения в элементе конструкции аппарата (машины).

Помимо выражения (1.11) для оценки безопасности эксплуатации оборудования используют следующие выражения: $\delta_ф \geq \delta$, $p_ф < p_{доп}$, $N_ф < N_{доп}$, $M_ф < M_{доп}$ и др. (здесь: $\delta_ф$ и δ - соответственно фактическая и расчетная толщина стенки аппарата, диаметр оси, вала или болта и т.п.; $p_ф$ и $p_{доп}$ -фактическое и допускаемое давление; $N_ф$ и $N_{доп}$ - фактическая и допускаемая сила; $M_ф$ и $M_{доп}$ - фактический и допускаемый изгибающий или крутящий момент).

Величина фактических напряжений зависит от многих факторов: характера приложения и вида нагрузки, размеров детали и ее конструкции, способа изготовления, технологических параметров, характеристик среды и других

факторов. Рассмотрим некоторые наиболее простые выражения для определения фактических напряжений в основных конструктивных элементах аппаратов и трубопроводов.

Напряжения в тонкостенной цилиндрической обечайке или трубопроводе (при $D_н/D_в < 1,5$), работающих под повышенным давлением, определяют по формулам:

$$\sigma_ф = \frac{p_ф(D_в + S_ф)}{2S_ф\varphi} \qquad (1.12)$$

$$\sigma_ф = \frac{p_ф(D_н - S_ф)}{2S_ф\varphi}, \qquad (1.13)$$

где $p_ф$ - макиимальние давление, зафиксированное контрольно-измерительными приборами в момент повреждения или разрушения аппарата; при экспертизе проектных материалов или отсутствии показаний приборов величину $p_ф$ можно оценить расчетом по специальным методикам с учетом конкретного вида нарушения технологического процесса, приведшего к возникновению аварийной ситуации; $D_в$ и $D_н$, - соответственно внутренний и наружный диаметр обечайки; (φ - коэффициент прочности продольного сварного шва (для литых, кованных и сваренных автоматической сваркой аппаратов с двухсторонним сплошным проваром шва $\varphi = 1$); $S_ф$ -фактическая наименьшая толщина стенки аппарата, определяемая непосредственным измерением после удаления продуктов коррозии или рассчитываемая по формуле (1.6).

Напряжения в стандартной крышке (днище) эллиптической формы, нагруженной внутренним давлением, определяют по формуле

$$\sigma_ф = \frac{p_ф(D_в + 0,5S_ф)}{2S_ф\varphi}. \qquad (1,14)$$

В специальной литературе приводятся методики расчетов различных деталей и узлов аппаратов и машин, подверженных воздействию всевозможных нагрузок: растягивающих и сжимающих сил, изгибающих и крутящих моментов, статических и динамических нагрузок и т.д., действующих врозь или одновременно. Указанные расчеты достаточно сложны сами по себе, но еще большую трудность представляет определение нагрузок, возникающих при различных нарушениях нормального режима эксплуатации производственного оборудования.

1.7. ИСПЫТАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Технологическое оборудование подвергается техническому освидетельствованию до пуска в работу, после изготовления и периодически в процессе эксплуатации. При освидетельствовании исследуют состояние внутренних и наружных поверхностей, влияние среды на стенки аппаратов, а

также проводят гидравлические испытания аппаратов на прочность перед пуском в работу и в последующем один раз в 2-10 лет (в зависимости от вида оборудования и скорости его коррозии) на пробное давление $p_{пр}$ (табл. 1.1). При невозможности проведения гидравлических испытаний (например, из-за большой величины гидростатического давления) проводят пневматические испытания воздухом или инертным газом при том же пробном давлении, соблюдая меры предосторожности. Аппарат, в котором содержались взрывопожароопасные продукты, перед испытанием воздухом предварительно тщательно очищают от остатков горючих веществ и материалов.

Таблица 1.1

Типы аппаратов	Пробное давление $p_{пр}$, МПа
Сварные	$1{,}25p\frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}$
Литые	$1{,}5p\frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t}$

В табл. 1.1 обозначено: $[\sigma]_{20}$ и $[\sigma]_t$, - нормативные допускаемые напряжения соответственно при 20 °С и при расчетной температуре *t.*

Испытание оборудования на герметичность (плотность) проводят после изготовления или периодически в процессе эксплуатации после испытания на прочность. Испытание на герметичность проводят сжатым воздухом или инертным газом, плавно повышая давление до рабочего с остановками с целью проверки отсутствия утечек. Длительность повышения давления, порядок выявления и устранения утечек при промежуточных и рабочем давлениях регламентируются отраслевыми нормами и производственной документацией. При достижении испытательного давления (максимальное давление испытания соответствует разрешенному рабочему давлению) оборудование отключают от источника сжатого газа и фиксируют изменение давления в оборудовании в течение не менее 4 ч при периодической проверке и не менее 24 ч - при испытании нового оборудования. Относительное падение давления δ, при испытании на герметичность рассчитывают по формуле

$$\delta = \frac{100}{\tau}\left(1 - \frac{p_к T_н}{p_н T_к}\right), \%/ч,$$

где p и T - соответственно давление в МПа (абс.) и температура в К (индексы н и к означают, что параметры имеют отношение к начальному и конечному состояниям); τ - длительность испытания, часы.

Вновь установленное оборудование для работы с токсичными пожаровзрывоопасными средами считается выдержавшим испытание, если падение давления в нем за 1 час не превышает 0,1 %, а для работы с нетоксичными пожаровзрывоопасными средами - 0,2 %. При повторных испытаниях

допустимое падение давления не должно превышать 0,5 % в час.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под термином *технологическое оборудование*?
2. Как классифицируют оборудование в соответствии с физико-химической сущностью протекающего в аппарате или машине технологического процесса?
3. Какие классификационные признаки технологического оборудования Вы знаете?
4. Какие факторы определяют выбор материалов для изготовления технологического оборудования?
5. Какие факторы, определяющие выбор конструкционных материалов, зависят от рабочих условий эксплуатации?
6. Какие факторы непосредственно характеризуют свойства конструкционных материалов?
7. Каким требованиям должны удовлетворять конструкционные материалы с точки зрения обеспечения пожаровзрывобезопасности технологического оборудования?
8. Что означают буквы В, Г, К, М, Н, Х и Т в обозначении марки стали?
9. Что означают буквы А, К, Л и Ш, стоящие в конце марки стали?
10. К каким группам относятся стали марок ВСт1сп5, 15ГФ и 38ХМЮШ?
11. Как расшифровываются марки сталей 18К, 15Х5 и 45Х25Н20С2Л?
12. Что такое биметаллические стали и для чего они применяются?
13. Какие наиболее важные показатели, характеризующие механические свойства конструкционных материалов, Вы знаете?
14. Чем, отличаются пластичные конструкционные материалы от хрупких?
15. Что такое ползучесть металла?
16. Что характеризует показатель ударной вязкости стали и как он зависит от температуры?
17. Подвержены ли цветные металлы и их сплавы хладоломкости?
18. Какие виды коррозионных разрушений Вы знаете?
19. Какие механизмы взаимодействия металла с коррозионной средой Вам известны?
20. Что понимают под скоростью коррозии металлов?
21. Каким образом учитывается коррозия при проектировании оборудования?
22. Какие разновидности химической коррозии Вы знаете?
23. К чему приводит водородная коррозия стали?
24. Вследствие чего в металле образуются микрогальванические пары?
25. Какие участки металла подвержены интенсивной электрохимической коррозии и почему?
26. Какие разновидности электрохимической коррозии Вы знаете?
27. Что такое блуждающие токи и чем они опасны для подземного технологического оборудования?
28. Как влияет расход продукта и наличие в нем механических примесей на

скорость коррозии?

29. Как влияет давление процесса на скорость коррозии?

30. Как влияет температура процесса на скорость коррозии?

31. Какие части резервуаров с нефтью и нефтепродуктами в наибольшей степени подвержены коррозии?

32. Что понимают под термином *аппараты?*

33. Что понимают под термином *машины?*

34. Что понимают под механической прочностью оборудования и чем она обеспечивается?

35. Что такое герметичность оборудования и что она обеспечивает?

36. Что такое устойчивость оборудования и чем она достигается?

37. Что такое надежность и безопасность в эксплуатации и чем они достигаются?

38. Что понимают под рабочим, расчетным и условным давлениями?

39. Что понимают под рабочей и расчетной температурами?

40. Что учитывается коэффициентами запаса при выборе нормативных допускаемых напряжений?

41. Каким образом учитывается наличие пожаровзрывоопасной среды в аппарате при выборе допускаемых напряжений?

42. В какой последовательности выполняют проектирование оборудования?

43. Для чего проводят проверочные расчеты технологического оборудования на прочность?

44. От чего зависят фактические напряжения в элементах деталей или узлов аппаратов или машин?

45. Что входит в перечень работ по техническому освидетельствованию оборудования?

46. Что понимают под пробным давлением?

47. Какие виды испытаний оборудования на прочность Вы знаете?

48. Чем опасно пневматическое испытание оборудования воздухом?

Литература

Основная

Рабочая программа курса пожарная профилактика технологических процессов (5 лет обучения). -М.: ВИПТШ МВД России, 1995.

ССБТ. Пожарная безопасность технологические процессов. Общие требования. Методы контроля (ГОСТ Р 12.3.047-98). -М.: Госстандарт России, 1998.

Дополнительная

1.Алексеев М. В., Волков О. М., Шатров Н. Ф. Пожарная профилактика технологических процессов производств. -**М.:** ВИПТШ МВД СССР, 1985.

2.Вихман Г. Л., Круглов С. А. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов: Учебник для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. -М.: Изд-во «Машиностроение», 1978.

3.ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования

безопасности (ГОСТ 12.2.003-91). -М.: Госстандарт России, 1992.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 10-115-96). -М.: Госгортехнадзор России, 1996.

С у х о т и н А. М., З о т и к о в В. С. Химическое сопротивление материалов: Справочник. -Л.: Изд-во «Химия», 1975.

Справочник нефтехимика / Под ред. канд. хим. наук С. К. Огородникова / В 2-х т. -Л.: Изд-во «Химия», 1978.

Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИИ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

2.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Для того, чтобы быстро и достаточно глубоко вникнуть в вопросы технологии необходимо, прежде всего, владеть терминологией этой науки и понимать ее смысловое значение. Рассмотрим некоторые основные термины и понятия.

Процессом производства, или *способом переработки,* называют совокупность всех стадий и операций, которые проходит сырье до получения из него продукта. Операции или стадии обычно включают в себя целый ряд физико-химических процессов и протекают в аппаратах, машинах или вне технологического оборудования на специально отведенных площадках. В каждом аппарате (машине) может протекать один или несколько процессов (например, в насосах протекают гидродинамические процессы, в теплообменниках протекают тепловые и гидродинамические процессы, а в химических реакторах одновременно происходят химические превращения, протекают диффузионные, гидродинамические и тепловые процессы).

Сырье - природные вещества и материалы, используемые в производственном процессе. Сырье является одним из основных элементов технологического процесса, определяющих технологию производства, его аппаратурное оформление, экономику, качество готовой продукции, а также взрывопожарную опасность. Сырье бывает минеральным (руды металлов, сера, воздух, торф, уголь, нефть, природный газ и т.д.), животным или растительным (жиры и масла, шерсть, хлопок, древесина и пр.). В качестве сырья часто используют продукцию других производств (полуфабрикаты, полупродукты) или побочные продукты и отходы.

Производительностью цеха (установки, агрегата, машины или аппарата) называют количество фактически выработанного продукта (или переработанного сырья) в единицу времени. Максимально возможная производительность при оптимальных условиях проведения процесса называется *мощностью.*

Производительность и мощность современных производств, установок, агрегатов достигают больших значений. Так, например, мощность нефтеперерабатывающей установки может превышать 10 млн. тонн нефти в год, производительность агрегата синтеза аммиака достигает 1,3 тыс. тонн аммиака в сутки, а производительность насоса магистрального нефтепровода

составляет 10000 $м^3$/час и более. Рост производительности оборудования приводит к увеличению количества горючих веществ и материалов на производственных и складских площадях, т.е. к росту горючей нагрузки. Пожар на таких объектах часто носит затяжной характер с большим прямым материальным ущербом из-за уничтожения сырья и материалов, повреждения и выхода из строя оборудования, зданий, сооружений и с еще большим косвенным ущербом.

Интенсивность работы аппарата - отношение производительности к одной из основных характеристик аппарата (поверхности теплообмена, объему катализатора и т.д.). Например, интенсивность работы испарителя выражается в килограммах пара, получаемого с одного квадратного метра теплообменной поверхности в час, а интенсивность работы колонны синтеза аммиака - в килограммах аммиака, образующегося в одном кубическом метре катализатора в час и т.д. Повышение интенсивности процессов (интенсификация производств) является одной из важнейших задач промышленности, направленных на повышение производительности труда. В то же время интенсификация работы технологического оборудования, не подкрепленная необходимыми мерами взрывопожарной безопасности, приводит к повышению угрозы взрывов и пожаров на объектах.

По способу организации производства, т.е. по способу осуществления процессов во времени, технологические процессы, а также аппараты, в которых эти процессы протекают, подразделяют на *периодические* и *непрерывные.*

Периодический процесс характеризуется единством места проведения различных стадий (все стадии осуществляются в одном месте) при изменении во времени его технологических параметров, в том числе периодичностью подвода сырья и отвода продуктов. Например, в аппарат, в котором осуществляют периодический процесс, загружают исходное сырье, через определенный промежуток времени после проведения одной или нескольких операций (стадий) выгружают конечный продукт, затем процесс повторяют. Работа такого периодически действующего аппарата делится на производственные циклы.

На рис. 2.1 приведен график работы мерника, служащего для измерения объемного расхода жидкости.

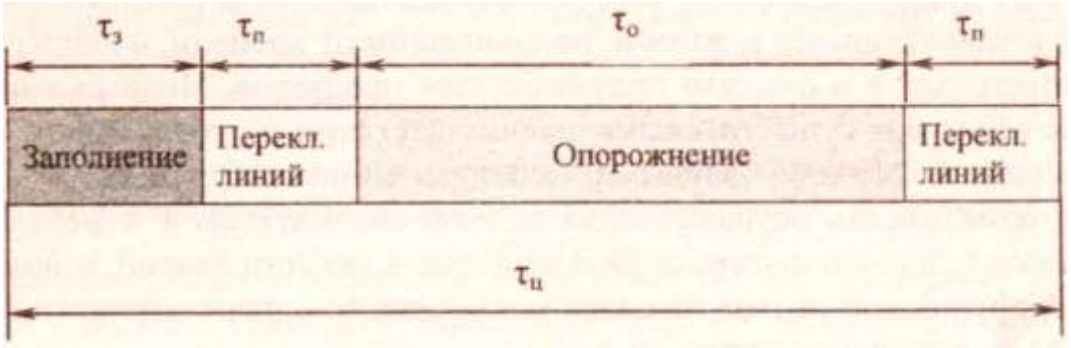


Рис. 2.1. Цикл работы мерника.

Продолжительность производственного цикла мерника складывается из продолжительности отдельных операций: заполнения мерника жидкостью до определенного уровня, переключения линий, опорожнения мерника (подачи жидкости потребителю), повторного переключения линий. Затем операции возобновляются,

Таким образом,

$$\tau_ц = \tau_з + \tau_п + \tau_о + \tau_п , \qquad (2,1)$$

где τ - время проведения операции; индексы ц, з, п, о означают соответственно: цикл, заполнение, переключение и опорожнение.

Из рис. 2.1 видно, что продолжительность собственно операции опорожнения значительно меньше продолжительности цикла. Для обеспечения непрерывности подачи жидкости потребителю необходимо установить несколько мерников, согласовав соответствующим образом их работу. В данном случае необходимо установить два одинаковых мерника, т.к. $\tau_о$ несколько превышает $\tau_ц / 2$. На рис. 2.2 показана комбинация производственных циклов этих мерников, последовательная работа которых позволяет производить непрерывную подачу жидкости потребителю при периодическом наполнении каждого мерника. Такой производственный процесс называется *комбинированным, полунепрерывным* или *непрерывно-периодическим.*

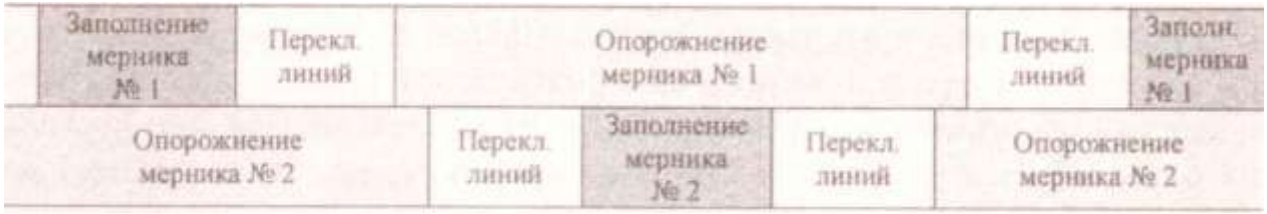


Рис. 2.2. Совмещенные циклограммы работы двух одинаковых мерников.

Непрерывный процесс характеризуется единством времени протекания всех стадий, каждая из которых осуществляется в специальном аппарате, установившимся режимом, не зависящим от времени, и непрерывным подводом сырья и отводом получающихся продуктов. Непрерывные процессы обладают существенными преимуществами по сравнению с периодическими и комбинированными. Основные из них следующие:

- возможность осуществления полной автоматизации и механизации процесса и, в связи с этим, снижение числа и тяжести аварий, и повреждений оборудования за счет большей устойчивости и равномерности течения процесса, постоянства режима;
- однородность и постоянство высокого качества получаемых продуктов;
- уменьшение объема аппаратуры и, следовательно, горючей нагрузки на производственных площадях и участках;
- отсутствие перерывов в работе и необходимости разгерметизации оборудования на загрузку сырья и выгрузку продукции, что уменьшает

возможность образования взрывоопасных концентраций внутри аппаратов и в производственных помещениях;

- снижение численности обслуживающего персонала и, следовательно, уменьшение риска гибели людей при взрыве или пожаре на производстве.

При проектировании технологических объектов стремятся переходить от периодических к непрерывным производственным процессам, которые при прочих равных условиях являются менее взрывопожароопасными. На рис. 2.3 и 2.4 приведены примерные схемы организации периодического и непрерывного процессов получения одного и того же продукта.

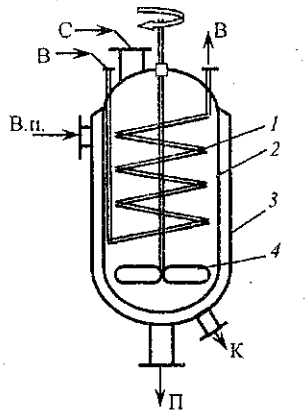


Рис. 2.3. Схема организации периодического процесса: *1*–змеевик; *2*–корпус реактора; *3*–рубашка; *4*–мешалка

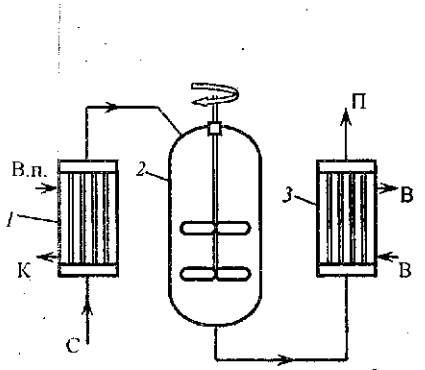


Рис. 2.4. Схема организации непрерывного процесса: *1*–подогреватель; *2*–реактор с мешалкой; *3*–холодильник

Примечание. В обеих схемах приняты следующие обозначения: В - вода; В.п-водяной пар; К - конденсат; П - продукт; С - сырье.

Химико-технологические процессы в зависимости от агрегатного состояния взаимодействующих веществ делятся на гомогенные (однородные) и гетерогенные (неоднородные). *Гомогенные* процессы протекают в системах, в которых реагирующие вещества находятся в одной фазе: газовой или жидкой. *Гетерогенные* процессы более распространены в промышленности, чем гомогенные, и характеризуются наличием в системах двух и более фаз. В производственных процессах чаще встречаются двухфазные системы: газ-жидкость, газ-твердое тело, жидкость-твердое тело; реже - многофазные системы: газ-жидкость-твердое тело и тому подобные системы.

Процессы делятся также на низкотемпературные и высокотемпературные, каталитические и некаталитические, электрохимические, биохимические и др.

Понимание сущности происходящих в аппаратах процессов позволяет правильно проанализировать их взрывопожарную опасность и способствует разработке технически грамотных решений, направленных на обеспечение пожаровзрывобезопасности производственных процессов.

2.2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Для проведения любого технологического процесса необходимы вещества

и материалы, подвергающиеся обработке, энергия, аппараты и машины, при помощи которых реализуются процессы и трудовые затраты. При проектировании производств выполняются расчеты технологических процессов и аппаратов в целях обоснования оптимальных размеров оборудования и режимов его работы, определения расходов топлива, воды и водяного пара, электроэнергии, катализаторов и т.д., определения потерь вредных и пожароопасных веществ, приводящих к загрязнению атмосферы, воды и почвы, выбора рациональной конструкции аппаратов.

Технологические расчеты выполняются на основании материальных и энергетических балансов и проводятся в целях обоснования рабочих параметров процесса (давления, температуры, объемной скорости и других параметров), определения расхода исходных материалов и выхода готовых продуктов, реакционных объемов и производительности аппаратов.

С помощью *гидравлических расчетов* определяются размеры рабочих сечений оборудования (с учетом технологических расчетов уточняются габариты аппаратов), а также перепады давления, необходимые для обеспечения работы аппаратов с заданной производительностью.

Исходные данные для выполнения проверочных технологических или гидравлических расчетов в зависимости от стадии проектирования технологического процесса можно найти в проектном задании, техническом проекте или рабочих чертежах. На действующем производстве можно найти данные для аналогичных расчетов в технологическом регламенте или воспользоваться показаниями контрольно-измерительных приборов. При экспертизе аварий и пожаров для этих целей используют также записи в журналах операторов, диаграммы самопишущих контрольно-измерительных приборов или анализируют данные в памяти ЭВМ. Перечень исходных данных для проверочных расчетов должен включать не только давление, температуру, расход, концентрацию и другие параметры технологического процесса, но и показатели, характеризующие пожаровзрывоопасные, коррозионные и токсичные свойства перерабатываемых веществ и материалов.

Материальные (энергетические) балансы составляются для процессов в целом, отдельных его стадий, аппаратов (машин) с целью количественной оценки всех участвующих в процессе потоков веществ (энергии) с учетом потерь этих веществ (энергии). Материальные балансы основаны на законе сохранения массы, энергетические - на законе сохранения энергии. Материальные (энергетические) балансы можно составлять для неустановившихся и установившихся процессов. Для неустановившегося процесса разность между приходными и расходными статьями баланса составляет накопление или убыль веществ (энергии) в системе за определенный отрезок времени. Отсутствие разбаланса показывает, что процесс является установившимся. Так как основным видом энергии на производстве является тепловая, то энергетические балансы часто называют тепловыми.

В общем виде для неустановившегося процесса уравнения материального и энергетического балансов записывают следующим образом:

$$\Sigma G_{i,п} - \Sigma G_{i,р} = \pm\Delta G \quad и \quad \Sigma Q_{i,п} - \Sigma Q_{i,р} = \pm\Delta Q, \qquad (2,2)$$

а для установившегося процесса:

$$\Sigma G_{i,п} = \Sigma G_{i,р} \quad и \quad \Sigma Q_{i,п} = \Sigma Q_{i,р}, \qquad (2,3)$$

где $\Sigma G_{i,п}$ и $\Sigma G_{i,р}$ - количество i-тых веществ, поступающих на переработку (приход) и количество /-тых веществ, получающихся в результате переработки (расход); $\Sigma Q_{i,п}$ и $\Sigma Q_{i,р}$ - соответственно приходные и расходные статьи теплового баланса; ΔG и ΔQ - убыль (-) или накопление (+) соответственно вещества или энергии в аппарате.

Материальные балансы можно составлять не только относительно веществ, но и относительно какого-либо компонента или элемента. Балансы составляют в виде уравнений, таблиц, схем или диаграмм. Ниже приведено уравнение материального баланса процесса гидроочистки бензина (гидроочистка - процесс улучшения качества топлива, повышения его стабильности, удаления из него сернистых и других вредных примесей).

$$G_б + G_в = G_г + G_у + G_с + G_п, \qquad (2.4)$$

где G — количество вещества; индексы б, в, г, у, с, п означают соответственно: сырой бензин, водород, очищенный бензин, углеводородный газ, сероводород и потери.

В табл. 2.1 приведен материальный баланс процесса по данным технического проекта установки гидроочистки бензина мощностью 300 тыс. тонн в год (по сырью), из которой видно, что потери веществ на рассматриваемой установке (несмотря на то, что все оборудование установки герметизировано) при нормальном режиме работы оборудования составляют 0,8 %, что соответствует более чем 7 тоннам горючих веществ в сутки. Эти потери складываются из утечек через предохранительные клапаны, сальники насосов, прокладки фланцевых соединений и другие места.

Таблица 2.1 Материальный баланс процесса гидроочистки бензина.

Приход			Расход		
Обозначение	Наименование	%	Обозначение	Наименование	%
$G_б$	Сырье (прямогонный бензин)	99,01	$G_г$	Гидроочищенный бензин	96,53
$G_в$	Водород	0,99	$G_у$	Углеводородный газ	1,58
			$G_с$	Сероводород	1,09
			$G_п$	Потери	0,80
	Всего:	100,0		Всего:	100,0

Нефтеперерабатывающие установки размещаются на открытых площадках, достигающих десятков и сотен метров в длину и ширину (площадь современной нефтеперерабатывающей установки составляет несколько гектар), в связи с чем такие большие утечки нефтепродуктов, происходящие к тому же равномерно в течение суток и рассредоточенные в пространстве, не приводят к образованию зон взрывоопасных концентраций на всей территории установок. Однако выход из аппаратов наружу экологически вредных веществ оказывает пагубное влияние на окружающую среду.

В отдельных случаях выход веществ наружу даже из нормально работающего оборудования все же приводит к опасной загазованности территории наружных установок. Например, при использовании в технологических процессах для хранения пожароопасных жидкостей емкостных аппаратов (резервуаров, расходных баков, мерников, цистерн и т.п. аппаратов), оборудованных дыхательными патрубками. Заполнение таких аппаратов легковоспламеняющимися жидкостями часто сопровождается мощными выбросами паровоздушных смесей через дыхательные патрубки наружу с образованием зон взрывоопасных концентраций значительных размеров.

2.3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ТЕХНОЛОГИИ

Технология как наука базируется на химических, физико-химических и физических закономерностях. *Химические уравнения* используются для проведения стехиометрических и термохимических расчетов. *Термодинамические расчеты* показывают направление протекания процесса при конкретных технологических параметрах, позволяют определить его тепловой эффект, равновесную степень превращения исходного сырья в готовую продукцию. *Кинетические закономерности* отражают течение процесса во времени. Их используют для оптимизации технологических процессов, выбора рациональных конструктивных и технологических решений. Рассмотрим основные физико-химические закономерности, протекающие в наиболее сложных (химико-технологических) процессах.

Химический технологический процесс складывается из целого ряда физических и химических явлений, которые определяют подвод реагирующих компонентов в зону реакции, непосредственное протекание химических реакций и отвод полученных продуктов из зоны реакции. Говоря о скорости протекания химико-технологического процесса, подразумевают его суммарную скорость, которая лимитируется (ограничивается) скоростью протекания наиболее медленной стадии. Если наиболее медленно протекает химическая реакция и она лимитирует суммарную скорость, то процесс протекает в *кинетической области.* Для ускорения таких процессов увеличивают, например, концентрацию исходных компонентов, повышают температуру и давление, применяют катализаторы. Если общую скорость процесса лимитирует подвод реагирующих компонентов или отвод продуктов реакции, то процесс протекает в *диффузионной области.* Для ускорения таких процессов увеличивают степень турбулизации реагирующей системы, повышают температуру процесса и концентрацию компонентов, гомогенизируют систему. *Переходная область* характеризуется соизмеримостью всех стадий процесса. Для интенсификации химико-технологических процессов, протекающих в переходной области, необходимо изменять те факторы, которые приводят к росту и скорости диффузии и скорости химических реакций, например, повышают температуру.

Химико-технологические процессы делятся на *необратимые* и *обратимые.* Необратимые процессы протекают лишь в одном направлении. Все обратимые процессы стремятся к равновесию, при котором скорости прямого и обратного процессов уравниваются. Равновесное состояние систе мы остается неизменным до тех пор, пока не изменятся условия протекания процесса.

Направление изменений в реакционной системе определяется принципом Ле Щателье-Брауна, выражающим второе начало термодинамики. Согласно этому принципу, в системе, выведенной из состояния равновесия, самопроизвольно происходят изменения, направленные к ослаблению воздействий, выводящих систему из равновесия. Равновесное состояние в системе достигается обычно по истечении довольно значительного промежутка времени.

Эффективность химико-технологического процесса характеризуется *выходом готового продукта,* под которым понимают отношение количества фактически полученного продукта $G_ф$ к теоретически возможному $G_т$:

$$X = G_ф / G_т \ . \qquad (2,5)$$

Применительно к химическим реакциям теоретически возможное количество продукта G_T определяется по стехиометрическим соотношениям, а выход продукта в этом случае называется *степенью превращения* основного исходного вещества в готовый продукт.

Скорость процесса является функцией выхода продукта *X,* т.е.

$$U = dX / d\tau \qquad (2,6)$$

В соответствии с законом действующих масс выход готового продукта *X* изменяется во времени по восходящей логарифмической кривой, а скорость процесса *U* -по нисходящей кривой (рис. 2.5). За равные промежутки времени $\Delta\tau$ приращение выхода в начале ΔX_1 и в конце ΔX_2 процесса уменьшается во много раз. Суммарная скорость процесса при приближении к равновесию практически становится равной нулю ($U \rightarrow 0$).

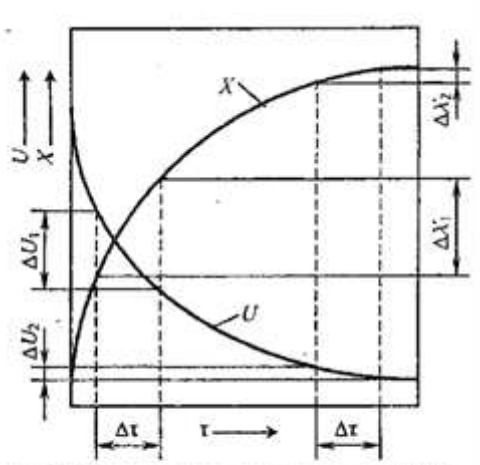


Рис. 2.5. Кинетические закономерности химико-технологического процесса:
ΔU_i – изменение скорости процесса; ΔX_i – приращение выхода продукта; $\Delta\tau$ – интервал времени

Если вместо в формулу (2.5) подставить количе ство продукта, которое получается при установлении равновесия в системе $G_р$, то выход продукта (или степень превращения сырья в готовый продукт), называемый *равновесным выходом* $X_Р$. составит:

$$X_р = G_р / G_т \ . \qquad (2,7)$$

Для необратимых процессов $X_Р = 1$, для обратимых - $X_Р$ всегда меньше 1, поскольку равновесие наступает при неполном превращении реагирующих компонентов в продукты реакции.

Так как реальные химико-технологические процессы, проводимые в производственных условиях, должны протекать с определенной и желательно значительной скоростью, которая определяет производительность аппаратов и их количество в технологической схеме, то их завершают до наступления равновесного состояния. В этом случае процессы характеризуются *фактическим выходом* $X_Ф$, ПОД которым понимают отношение фактически полученного продукта к равновесному $G_р$:

$$X_ф = \frac{G_ф}{G_р} = \frac{G_ф}{X_р G_т} \ . \qquad (2,8)$$

Выход продукта зависит от многих факторов (температуры, давления, времени, концентрации компонентов и др.), поэтому теоретическое его определение затруднено. Выход продукта определяется на основании практических данных и используется для сравнительной оценки одинаковых производств, осуществляемых по разным технологическим схемам или на различных предприятиях.

Рассмотрим процесс синтеза аммиака, в основе которого лежит гомогенная обратимая экзотермическая каталитическая реакция, протекающая с уменьшением объема системы:

$$N_2 + 3H_2 \rightleftarrows 2NH_3 + 112 \text{ кДж} .$$

В соответствии с принципом Ле Шателье для сдвига равновесия вправо, т.е. для повышения равновесного выхода аммиака, необходимо снижать температуру, повышать давление, а также уменьшать концентрацию аммиака или повышать концентрацию исходных веществ: азота и водорода. Так, например, термодинамические расчеты показывают, что для обеспечения всего лишь 80 % степени превращения азота и водорода в аммиак при 400 °С необходимо применять давление около 100 МПа. Зависимость равновесного выхода аммиака от температуры и давления приведена на рис. 2.6. Экспериментально установлено, что фактический выход аммиака с ростом давления увеличивается значительно медленнее, чем равновесный (рис. 2.7). Поэтому применять очень высокие давления (выше 80-100 МПа) в этом процессе экономически невыгодно. В то же время выход аммиака увеличивается при снижении температуры, но скорость процесса при этом падает. Образование аммиака при умеренных температурах (300-500 °С) происходит крайне медленно (скорость процесса близка к нулю). На практике процесс ведут при 400-500 °С, но в присутствии катализаторов, которые позволяют значительно уменьшить время достижения равновесия.

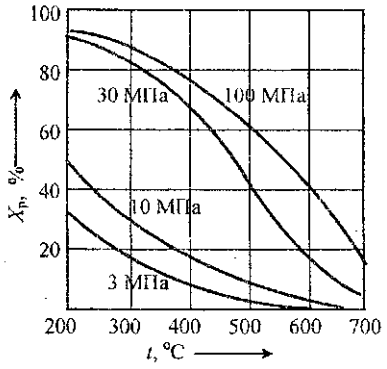


Рис. 2.6. Влияние температуры и давления на равновесный выход аммиака

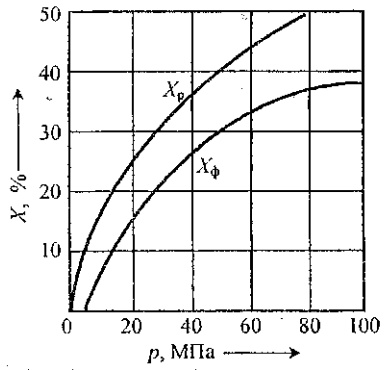


Рис. 2.7. Зависимость фактического выхода аммиака от давления (катализатор – железо; объемная скорость 30000 $ч^{-1}$; t = 500 °С)

В нашей стране при проведении процесса синтеза аммиака под средним давлением используют железный катализатор, промотированный Al_2O_3, K_2O,

CaO и SiO_2.

2.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА И ЕЕ ОПИСАНИЕ

Технологический процесс производства состоит из ряда операций или стадий, которые могут протекать поочередно в различных по назначению и устройству аппаратах или одновременно в одинаковых по устройству аппаратах. Последовательное изложение (описание) технологического процесса и его схематическое изображение называется *технологической схемой* производственного процесса. Технологические схемы могут быть с *открытой цепью, циркуляционными (циклическими, круговыми)* и *комбинированными.* Схемы с открытой цепью характерны для производственных процессов, в которых происходит практически полное превращение исходных веществ в готовый продукт, без выделения последнего из реакционной массы. Циклическая схема с выделением продукта после каждого прохода смеси через реакционную зону осуществляется для процессов с низким равновесным выходом. Многократное возвращение реагирующих масс в один и тот же аппарат позволяет достичь заданной степени превращения. К циркулирующей смеси добавляют такое количество свежего сырья, которое превратилось в готовую продукцию за один цикл. В производственном процессе, осуществляемом по комбинированной технологической схеме, одна из реагирующих фаз последовательно проходит аппараты, а другая многократно циркулирует в некоторых из них.

Характерным примером производственного процесса с циркуляционной технологической схемой является процесс синтеза аммиака под средним давлением (рис. 2.8). Свежая азотоводородная смесь сжимается компрессором *1* до давления 20-30 МПа, смешивается с циркулирующей смесью, проходит через фильтр *2* и направляется в конденсационную колонну *3* и испаритель *4,* в котором охлаждается до нужной температуры за счет испарения жидкого аммиака (ЖА), отбираемого из сепаратора *7.* В конденсационной колонне из азотоводородной смеси выделяется аммиак в жидком виде, который поступает на склад готовой продукции. Подготовленная к синтезу азотоводородная смесь подается в колонну синтеза *5.* Регулирование температурного режима в зоне катализа осуществляется путем подачи части холодного газа в колонну снизу через центральную трубу, минуя теплообменные устройства внутри колонны.

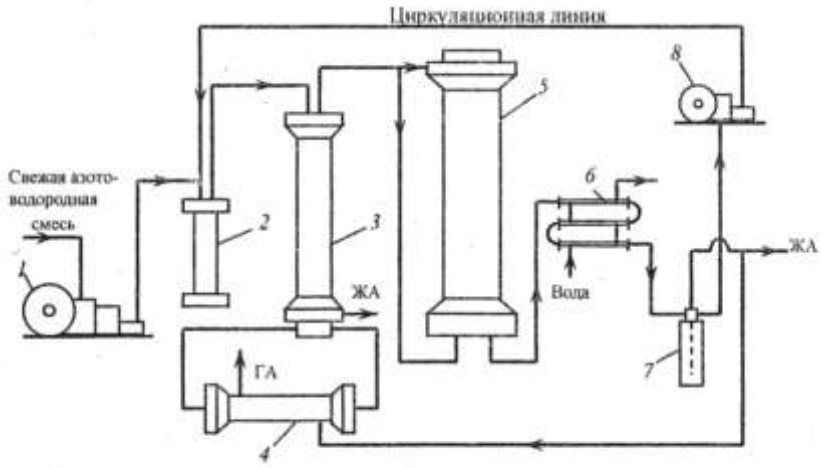


Рис. 2.8. Схема синтеза аммиака под средним давлением

Выходящая из колонны газовая смесь с температурой 500 °С поступает в водяной холодильник *6* и сепаратор 7, в котором отделяется сконденсировавшийся аммиак, направляемый на склад готовой продукции и частично в испаритель *4,* откуда газообразный аммиак (ГА) поступает в газгольдер.

2.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЗРЫВОПОЖАРНУЮ ОПАСНОСТЬ ПРОЦЕССОВ

Все технологические процессы протекают при определенных значениях температур, давлений, концентраций, расходов и других факторов, характеризующих технологический режим. Основные факторы, влияющие на скорость процесса, выход и качество продукции, называются *технологическими параметрами.* Изменение уровней технологических параметров зачастую приводит не только к снижению количества и качества выпускаемой продукции, но и к тяжелым авариям, взрывам и пожарам на производстве.

Различные виды технологических процессов отличаются не только значениями технологических параметров, но и их совокупностью. Например, для большинства химико-технологических процессов первостепенное значение имеют следующие показатели режима: температура, давление, концентрация взаимодействующих веществ, катализатор, объемная скорость (или ее обратная величина - время пребывания вещества в реакционной зоне), степень турбулизации среды. *Электрохимические процессы* характеризуются, в первую очередь, напряжением, плотностью тока, температурой и концентрацией. *Механические процессы* - числом оборотов какого-либо устройства (мешалки, ротора, барабана), дисперсностью материала или вязкостью среды.

Оптимальное значение параметров технологического режима соответствует максимальной производительности аппарата при минимальных сырьевых, энергетических и трудовых затратах. Все технологические параметры взаимосвязаны и в значительной степени обусловливают друг друга. Поэтому задача оптимизации процесса даже по одному из показателей является достаточно сложной, так как изменение одного из параметров влечет за собой резкое изменение оптимальных значений других параметров режима.

Технологические параметры влияют на скорость процессов, их технико-экономические показатели, на конструктивное устройство аппаратов, а также на пожаровзрывоопасность производств. Изменение агрегатного состояния реагирующих веществ или вида катализатора в химико-технологических процессах приводит к изменению конструкции реакторов и даже принципиальной технологической схемы процесса. Например, в нефтехимических производствах осуществляются процессы жидкофазного и парофазного крекинга нефтепродуктов. Известно три типа установок каталитического крекинга: с неподвижным слоем таблетированного катализатора и реакторами периодического действия; с плотным слоем циркулирующего шарикового катализатора и реактором-регенератором непрерывного действия; с псевдоожиженным слоем циркулирующего микросферического катализатора, реактором и регенератором непрерывного действия. Пожарная опасность процессов, протекающих в аппаратах этих установок, различна и может быть определена только при глубоком и всестороннем анализе условий, влияющих на возникновение факторов опасности с учетом мероприятий, направленных на предотвращения их возникновения и противопожарную защиту.

Такие технологические параметры, как температура, давление, концентрация реагирующих веществ, в соответствии с принципом Ле Шателье влияют на равновесное состояние системы, в которой протекают обратимые химические реакции. Это позволяет технологам подбирать соответствующие условия проведения химико-технологического процесса, чтобы обеспечить максимальную степень превращения.

Повышение температуры процесса влияет на состояние равновесия системы и увеличивает скорость химических реакций. Поэтому регулирование температурного режима оказывает универсальное воздействие на процесс в целях повышения его производительности. Характер воздействия ^температуры на процесс определяется тепловым-эффектом реакции. Зависимости равновесного X_p и действительного X_ϕ выхода продукта от температуры для обратимых эндотермических и экзотермических реакций приведены на рис. 2.9 и 2.10 ***(****W* - объемная скорость, причем $W_1<W_2<W_3$***).***

Наиболее сильно интенсифицируются при повышении температуры эндотермические обратимые реакции, т.к. ускоряется не только химическая реакция, но и в соответствии с принципом Ле Шателье растет равновесный выход продукта (рис. 2.9). Для экзотермических реакций с повышением температуры действительный выход продукта сначала увеличивается, приближаясь к равновесному, а затем начинает быстро падать (рис. 2.10).

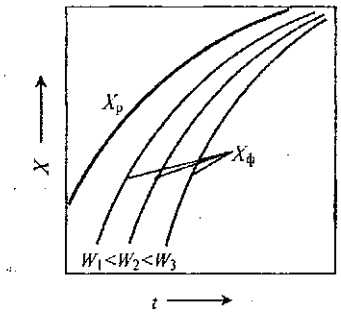


Рис. 2.9. Зависимость выхода продукта от температуры для эндотермической обратимой реакции

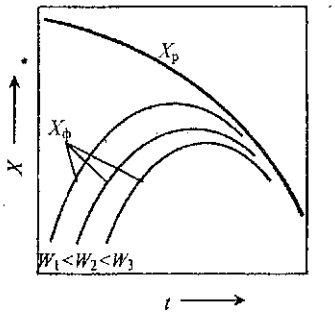


Рис. 2.10. Зависимость выхода продукта от температуры для экзотермической обратимой реакции

Зависимость скорости реакции от температуры характеризуется температурным коэффициентом скорости реакции р, который показывает во сколько раз увеличивается скорость реакции при увеличении температуры на 10 град. Согласно правилу Вант-Гоффа, температурный коэффициент **Р** большинства химических реакций (в области средних температур и энергий активации) равен 2-4.

Константу скорости реакции K_i при любой температуре T_i,- можно определить по уравнению Аррениуса:

$$K_i = K_0 * \exp(-E / R*T_i), \qquad (2.9)$$

где K_0 - предэкспоненциальный множитель; E - энергия активации реакции; R - универсальная газовая постоянная; R = 8,314 Дж/(моль*К).

По определению находим

$$\beta = K_2 / K_1 = \exp\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1 + 10}\right)\frac{E}{8{,}314} \qquad (2.10)$$

Энергии активации многих химических реакций лежат в пределах (0,5-2,0) 10^5 Дж/моль. Примем E = 1,0*10^5 Дж/моль, T_1 = 400 К, T_2 = 410 К (считаем, что температура возросла на 10 градусов). Тогда

$$\beta = \exp\left[\left(\frac{1}{400} - \frac{1}{410}\right)\frac{100000}{8{,}314}\right] \approx 2{,}1 .$$

Нетрудно подсчитать, что при повышении температуры на 100 град, (от T_1 = 400 К до K_2 = 500 К) скорость реакций возрастает в сотни раз (в данном случае β = 409,1). При этом может произойти настолько бурный процесс реагирования технологической среды, что он завершится взрывом. Указанное обстоятельство необходимо учитывать при возникновении пожара на производстве, когда в зоне теплового воздействия очага пожара оказываются реакторы или другие аппараты с вгществами, склонными при нагревании к взрывному распаду или взаимодействующими друг с другом со взрывом.

Повышение температуры в производственных условиях ограничено целым

рядом технических, технологических и экономических факторов. К ним относятся: недостаточная термическая устойчивость (низкие жаропрочность и жаростойкость) конструкционных материалов, снижение равновесного и фактического выхода продуктов при протекании экзотермических процессов, термическая неустойчивость сырья и готовой продукции, большие затраты на создание высоких температур, повышенная взрыво-пожарная опасность и ряд других менее важных факторов.

Например, пластмассы начинают деформироваться при температурах ниже 250 °С, обычные конструкционные стали - при 400 °С, высоколегированные стали устойчивы до 700 °С, а специальные сплавы с высоким содержанием никеля, хрома и с добавками других элементов выдерживают повышенные давления при температурах до 800-900 "С. Металлокерами-ческие сплавы (керметы) способны выдерживать температуры до 3000 °С, но без повышенной нагрузки. Для защиты металлических стенок аппаратов от действия высоких температур применяются огнеупорные неметаллические материалы (динас, шамот, графит и др.), которыми футеруют (защищают изнутри) аппараты. В этом случае температуру процессов удается повысить до 1500-2000 °С, а иногда и до 3000 °С и выше. При этом необходимо учитывать, что металлические корпуса таких аппаратов часто охлаждаются водой (имеют водяные рубашки). Любое, даже незначительное, повреждение футеровки приводит к быстрому прогару металлической стенки, бурному, со взрывом, вскипанию воды, разрушению аппарата, цеха, гибели людей.

Применение *повышенного давления дня* процессов, протекающих с уменьшением газового объема, согласно принципу Ле Шателье приводит к увеличению выхода продукта (рис. 2.7). Скорость газовых реакций с повышением давления растет, т.к. при этом увеличивается плотность реакционной смеси и, следовательно, увеличиваются массовые концентрации компонентов. В каталитических процессах влияние давления неоднозначно сказывается на протекание химических реакций, но применять повышенные давления здесь также выгодно, т.к. при этом уменьшается объем газовой смеси, в результате чего снижаются размеры аппаратов и сечения газопроводов, но, к сожалению, увеличиваются толщины стенок оборудования, испытывающих более высокие нагрузки. Скорости жидкофазных процессов заметно увеличиваются только при весьма высоких давлениях, в сотни и тысячи раз превышающих атмосферное. Так, при относительном росте давления в тысячи раз скорость процессов полимеризации некоторых жидких мономеров увеличивается только в десятки раз. На повышение равновесного выхода каталитических процессов, протекающих со значительным увеличением газового объема, благотворно влияет понижение давления. Поэтому некоторые процессы (дегидрирования, дегидратации и другие) ведут под вакуумом.

Повышение концентрации взаимодействующих компонентов в сырье приводит к увеличению движущей силы процесса ΔC и, как следствие, к увеличению скорости его протекания, что видно из следующего выражения скорости любого химического гомогенного или гетерогенного процесса (без фазовых превращений в системе):

$$U = k*\Delta C. \qquad (2.11)$$

Константа, или коэффициент скорости процесса, k представляет собой сложную величину, которая зависит не только от химических свойств реагирующих веществ, но и от их физических характеристик, конструкции аппаратов, гидродинамики процессов и многих других факторов.

Движущая сила процесса выражается через разности действительных и равновесных концентраций реагирующих веществ. Поэтому к увеличению скорости процесса приводит уменьшение равновесной концентрации, что достигается смещением равновесия за счет изменения температуры или давления процесса (влияние этих параметров на протекание процессов было рассмотрено выше) или отводом продуктов реакции из зоны взаимодействия. Увеличение концентрации компонентов в твердом сырье достигается его обогащением, а в жидком и газообразном - концентрированием. Однако чрезмерное повышение концентрации реагентов во многих экзотермических химических реакциях недопустимо вследствие трудности отвода тепла из зоны реакции, что может привести к выходу из строя оборудования, катализатора или к взрыву, т.к. реакционная смесь становится взрывоопасной.

Объемная скорость W (под объемной скоростью понимают объемный расход исходной смеси, отнесенный к единице объема реакционной зоны) влияет как на выход продукта, так и на производительность реактора. Рассмотрим это на примере процесса синтеза аммиака. Т.к. объемная скорость представляет собой величину обратную времени пребывания реакционной смеси в зоне реакции, то ее увеличение приводит к снижению выхода продукта. Из графика, приведенного на рис. 2.11, видно, что увеличение объемной скорости в 8 раз приводит к некоторому снижению максимального выхода аммиака (почти в 2 раза), однако производительность реактора по аммиаку в целом возрастает более чем в 4 раза. Для многих других производств также характерно повышение производительности процесса при увеличении объемной скорости, но с уменьшением равновесного выхода продукта за один цикл (рис. 2.9 и 2.10).

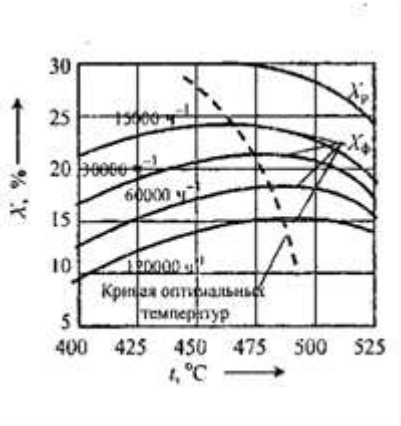


Рис. 2.11. Зависимость выхода аммиака от температуры при давлении 30 МПа.

Следует учитывать, что с увеличением объемной скорости растет и гидравлическое сопротивление системы, для преодоления которого необходимо повышать давление исходной реакционной смеси, что связано с дополнительными энергетическими затратами, а также опасностью разгерметизации оборудования.

Катализ - наиболее эффективное средство ускорения большинства химических реакций. Применение катализаторов способствует увеличению не только производительности оборудования, но и качества получаемых продуктов, т.к. катализаторы обладают *селективностью* (ускоряют основные реакции и тормозят параллельные и побочные). При проведении каталитических процессов часто отпадает необходимость очистки продуктов реакции и их концентрирования, но возникает необходимость более глубокой очистки исходного сырья от вредных примесей - каталитических ядов. Применение катализаторов способствует значительному снижению температуры процессов, что уменьшает и энергетические затраты и их взрывопожарную опасность. В то же время необходимо учитывать, что некоторые катализаторы и инициаторы сами по себе обладают повышенной взрывопожароопасностью.

Рассмотренные здесь технологические параметры оказывают существенное влияние на протекание производственных процессов и их пожарную опасность. Это влияние необходимо учитывать, в первую очередь, на стадиях научных разработок и проектирования производств, при создании новых высокоэффективных, высокопроизводительных и пожаровзрывобез-опасных технологических процессов.

Контрольные вопросы

Что такое процесс производства?

Какие бывают виды сырья и как оно влияет на пожарную опасность производства?

Что такое производительность установки и ее мощность?

Что такое интенсивность работы аппарата и как она влияет на пожарную опасность процесса?

Чем отличается периодический процесс от непрерывного?

Какие преимущества имеет непрерывный процесс по сравнению с периодическим?

Для какой цели проводят технологические расчеты?

На чем основаны материальные и энергетические балансы процессов и для чего их составляют?

Какую опасность представляют потери веществ из аппаратов производственных установок?

Что предпринимают для ускорения процессов, протекающих в кинетической области?

Что предпринимают для ускорения процессов, протекающих в диффузионной области?

Что отражает принцип Ле Шателье-Брауна?

Что понимают под выходом продукта и степенью превращения?

Что такое технологическая схема процесса и какими они могут быть?

В каком случае рационально проводить технологический процесс по открытой схеме, а в каком - по циклической?

Что такое технологические параметры процесса?

Какие технологические параметры влияют на равновесное состояние обратимого химико-технологического процесса?

Какой технологический параметр оказывает универсальное воздействие на процесс и почему?

Как зависят теоретический и фактический выходы продукта от температуры для эндотермической и экзотермической обратимых химических реакций?

Как зависит скорость реакции от температуры и какая при этом возникает опасность?

Какие факторы ограничивают повышение температуры процесса?

Как влияет давление на выход продукта и скорость процесса и чем опасно его повышение?

Как влияет концентрация взаимодействующих компонентов в сырье на скорость протекания процесса и чем опасно ее повышение?

Как влияет объемная скорость на выход продукта и производительность установки и чем опасно ее повышение?

Для чего применяются катализаторы и как они влияют на взрывопожарную опасность процессов?

Литература

Основная

1. Рабочая программа курса пожарная профилактика технологических процессов (5 лет обучения). -М.: ВИПТШ МВД России, 1995.

2. Основы пожарной безопасности: Учебное пособие / Под ред. канд. техн. наук В.А. Копылова. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1990.

Дополнительная

I. Мухленов И. П., Тамбовцева В. Д., Горштейн А. Е. Основы химической технологии: Учеб. пособие для нехимических специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп. -М.: Изд-во «Высшая школа», 1975.

Глава 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

В современном промышленном производстве встречается большое количество разнородных процессов (десятки тысяч), технологическое и аппаратурное оформление которых крайне многообразно. Принципиально

различное по конструктивному устройству оборудование может применяться на одноименных стадиях или операциях технологического процесса или, наоборот, для проведения различных процессов может использоваться однотипное оборудование. Поэтому в этом разделе будут рассмотрены особенности конструктивного устройства аппаратов и машин без учета их использования в конкретном технологическом процессе.

Технологические процессы, а также оборудование, в котором эти процессы протекают, в зависимости от способов создания движущей силы подразделяются на механические, гидродинамические, тепловые, диффузионные и химические.

Механические процессы связаны с обработкой и перемещением твердых кусковых и зернистых материалов (измельчение, рассев, дозирование, транспортировка, прессование, фрезерование и другие процессы). Оборудование для проведения механических процессов - дробилки, мельницы, классификаторы, дозаторы, элеваторы, транспортеры, прессы, фрезерные станки и пр.

Гидродинамические или гидромеханические процессы связаны с обработкой неоднородных систем, состоящих из двух и большего количества фаз, а также с перемещением и хранением жидкостей, сыпучих и пылевидных материалов, сжатием и хранением газов (отстаивание, центрифугирование, фильтрация, перемешивание, транспортировка, компремирование и другие процессы). Оборудование: отстойники, центрифуги, циклоны, фильтры, мешалки, насосы, компрессоры, резервуары и тому подобные аппараты и машины.

Тепловые процессы связаны с передачей тепла от одной среды к другой (нагрев, охлаждение, испарение, конденсация, плавление, кристаллизация и другие процессы). Оборудование для проведения тепловых процессов: теплообменники (общее название аппаратов для проведения процессов нагрева, охлаждения, испарения, конденсации), печи (трубчатые, плавильные и другие печи), котлы и тому подобное оборудование.

Диффузионные, или массообменные, процессы связаны с переходом вещества из одной фазы в другую за счет диффузии (ректификация, газофракционирование, экстракция, абсорбция, адсорбция, сушка и другие процессы). Оборудование для проведения диффузионных процессов: ректификационные колонны, экстракторы, абсорберы, адсорберы, сушилки и другие аппараты.

Химические процессы связаны с химическими превращениями участвующих в производстве веществ с получением новых соединений. К этому виду относится большая группа химических процессов в различных отраслях народного хозяйства: в нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической промышленности - крекинг, пиролиз, риформинг, алкилиро-вание, изомеризация, полимеризация, дегидрирование и др.; в энергетической, топливной и металлургической - окисление, газификация, гидроге-нолиз, коксование, восстановление, электролиз и др.; в пищевой, текстильной и бумажной - гидрогенизация, омыление, ксантогенирование, гидролиз и т.д. Номенклатура оборудования для проведения химических процессов также

разнообразна: реакторы и печи различных видов, колонны синтеза и варочные котлы, автоклавы и электролизеры и другое оборудование.

Приведенная классификация в определенной мере условная, т.к. в технологическом оборудовании может одновременно протекать два и более процессов. Например, в реакторах наряду с химическими протекают тепловые и диффузионные процессы; в кристаллизаторах - тепловые и гидромеханические и т.д. Практически во всех аппаратах и машинах происходит перемещение или смешивание веществ и материалов, то есть осуществляются гидромеханические и механические процессы.

3.2. МАШИНЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

К механическим процессам относятся, в частности, процессы измельчения твердых материалов, разделения (классификации) по размеру частиц и дозирования.

3.2.1. Машины для измельчения твердых материалов

Измельчение твердых горючих материалов производят с целью облегчения их транспортировки, а также ускорения растворения, химического взаимодействия, сжигания, обжига и других процессов, интенсивность протекания которых зависит от размеров твердых частиц.

На современных машинах можно производить измельчение глыб материала объемом до 2 м^3. Конечный размер частиц измельченного материала достигает 0,1 мкм. В процессах измельчения материалов используются способы раздавливания, раскалывания, удара и истирания. Схематичное изображение способов измельчения приведено на рис. 3.1. Выбор способа измельчения определяется физико-механическими (прочностью и хрупкостью) и пожаровзрывоопасными свойствами материала, его влажностью, начальным и конечным размером частиц, возможностью обеспечения пожаровзрывобезопасности и другими факторами.

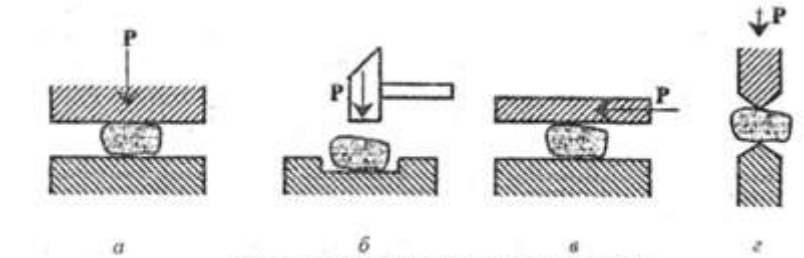


Рис. 3.1. Способы измельчения материалов:
а – раздавливание; *б* – удар; *в* – истирание; *г* – раскалывание

Различают следующие виды измельчения:

- крупное - поперечный размер обрабатываемых кусков, изменяется в диапазоне от 1500 до 25 мм;
- среднее или промежуточное - от 150 до 5 мм;
- мелкое - от 25 до 1 мм;
- тонкое - от 5 до 0,075 мм;

размол - от 0,2 до $1*10^{-4}$ мм.

Кроме того, измельчение бывает сухое и мокрое, когда к исходному материалу добавляется определенное количество влаги.

Отношение поперечника *D* наиболее крупных кусков до измельчения к поперечнику *d* наиболее крупных кусков после измельчения называется степенью измельчения *n*:

$$n = D / d \ . \qquad (3,1)$$

Для материалов большой твердости наиболее эффективными способами измельчения являются удар и раздавливание, для вязких материалов - истирание, для хрупких - раскалывание.

Уравнение материального баланса процесса измельчения имеет вид:

$$\Sigma G_{пр} = \Sigma G_{ух} + G_{пот} \qquad (3.2)$$

где $\Sigma G_{пр}$ - масса поступившего на измельчение материала, кг; $\Sigma G_{ух}$ - масса полученного измельченного материала, кг; $G_{пот}$ - потери материала (в основном пылевидного), кг.

Процессы сухого измельчения протекают со значительным пылеобразованием, что необходимо учитывать при выборе типов измельчающих машин и способов измельчения горючих материалов (угля, кокса, сахара, зерна и других) во избежание взрывов образующихся пылевоздушных смесей.

Сухое тонкое измельчение и сухой размол горючих материалов являются наиболее взрывопожароопасными процессами, так как готовый мелкодисперсный продукт способен легко взвихряться с образованием взрывоопасного аэрозоля, отложения пыли часто склонны к самовозгоранию, а в процессе размола появляются такие источники зажигания, как фрикционные искры и разряды статического электричества.

Измельчающие машины делятся на *дробилки и мельницы.* Дробилками называются машины для крупного и среднего измельчения, мельницами - машины для мелкого и тонкого измельчения, а также для коллоидного размола. Типов и разновидностей дробилок и мельниц, используемых в промышленности, достаточно много. Рассмотрим некоторые из них.

На рис. 3.2 показана схема щ е к о в о й д р о б и л к и . Неподвижная щека из износоустойчивого материала 2 крепится к станине *1* дробилки, а подвижная щека 5, защищенная броневой плитой *4,* качается на оси *6.* Качание подвижной щеки осуществляется с помощью привода, состоящего из шатуна *8,* кривошипа (эксцентрика) 7, маховика *13* и шарнирно закрепленных распорных плит 9, которые одновременно служат для защиты привода от перегрузок при попадании в дробилку кусков металла или других чрезмерно прочных предметов. Регулирование хода подвижной щеки производится с помощью клинового устройства 72, а холостой ход осуществляется с помощью возвратной пружины

11 и тяги *10*. Рабочее пространство дробилки с боков ограничено плитами *3*. Такие дробилки находят широкое применение из-за простоты устройства и надежности конструкции, компактности, возможности измельчения крупнокусковых материалов (ширина загрузочного отверстия достигает 1,5-2 м). К недостаткам щековых дробилок относятся: периодический характер работы (дробление происходит только в момент сближения щек), неуравновешенность движущихся масс, что вызывает сильные толчки и сотрясения фундамента и соседнего оборудования, а также небольшая степень измельчения (и - 2-3).

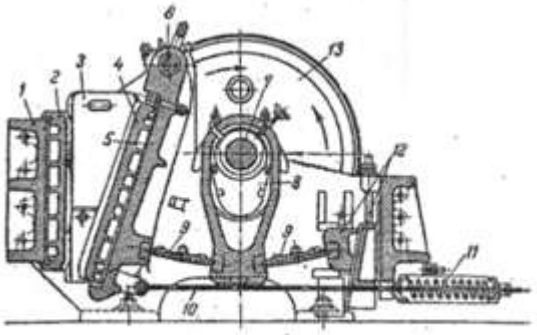


Рис. 3.2. Схема щековой дробилки

В конусной дробилке (рис. 3.3) корпус *1* имеет форму конуса, облицованного броневыми плитами *4*. Вращающаяся дробящая головка 2 также конической формы расположена под углом к оси конусного корпуса, что приводит к образованию узкой щели между головкой и корпусом. Ширина загрузочной щели составляет 0,3-1,5 м. Регулирование степени измельчения достигается подъемом или опусканием корпуса. Корпус крепится к станине с помощью пружин (на схеме не показаны), расположенных по его периметру, которые уменьшают вибрацию и предохраняют машину от перегрузки и поломки при попадании в нее кусков металла. Крепление вала *3* к станине осуществляется с помощью крестовины *6*, конической втулки 7 и гайки *8*. Нижний конец вала входит в стакан-эксцентрик 5, который приводится во вращение с помощью зубчатой передачи. К достоинствам конусных дробилок (а также близких к ним по устройству грибовидных дробилок) относятся: непрерывность действия, высокая производительность, спокойная уравновешенная работа и высокая степень измельчения (и = 10-30). В то же время указанные дробилки достаточно сложны по устройству (по сравнению с щековыми), более трудоемки в обслуживании, но имеют меньший расход энергии и меньшее пылеобразование.

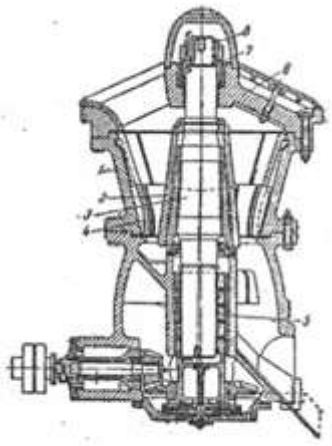


Рис. 3.3. Схема конусной дробилки

М о л о т к о в а я д р о б и л к а (мельница) (рис. 3.4) имеет закрепленный на вращающемся по направлению стрелки валу *5* ротор *4,* к которому шарнирно прикреплены стальные молотки *3.* Поступающий сверху в дробилку материал подхватывается молотками и ударяется о броневые плиты 2, измельчаясь при этом. Степень измельчения колеблется от 10-15 в однороторных дробилках до 30-10 - в двухроторных. Измельченный материал выходит через отверстия в колосниковой решетке *6,* на которой одновременно с раскалыванием происходит раздавливание и истирание материала. В станине корпуса *1* имеется механизм, который позволяет изменять расстояние между колосниковой решеткой и вращающимися молотками и регулировать степень размола. Число оборотов ротора дробилки достигает 400-2400 в минуту, что обеспечивает высокую степень измельчения материала, но одновременно приводит и к значительному пыле-образованию. Для предотвращения повреждения механизма при попадании в дробилку металла подлежащий измельчению материал предварительно пропускают через сита и сепараторы. Молотковые дробилки выпускаются с диаметром роторов от 0,3 до 2 м, имеющих ширину соответственно от 0,2 до 3 м.

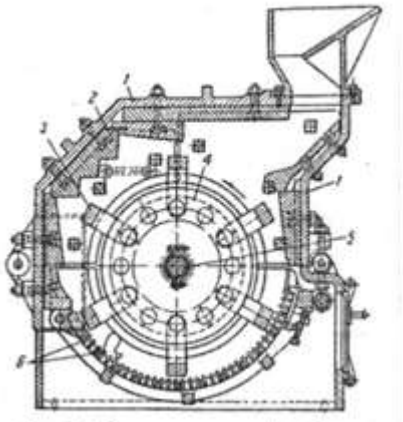


Рис. 3.4. Схема молотковой дробилки

В а л к о в ы е м е л ь н и ц ы (дробилки) (рис. 3.5) - простые по устройству машины. Они имеют два параллельных цилиндрических валка *4,* вращающихся

навстречу друг другу. Валки могут быть рифлеными (зубчатыми, ошипованными) - в дробилках и гладкими - в мельницах. Подшипник *5* валка закреплен неподвижно, а подшипник *3* валка может перемещаться в горизонтальной плоскости и удерживается на станине *1* пружинами *2*. Благодаря наличию подвижной опоры достигается регулирование степени измельчения материала, а наличие пружин предохраняет детали машины от поломки: при попадании в мельницу особо прочных материалов и металла подвижный валок сдвигается влево, сжимая пружину. Твердый материал пропускается через увеличенный зазор между валками без поломки машины. Валковые мельницы не дают значительного пылеобразования, надежны в работе, но мало пригодны для измельчения материалов высокой прочности. Степень измельчения твердых материалов в валковых мельницах не превышает 3-4, хрупких - 10-15. Диаметр валков достигает 0,2-1,5 м при ширине 0,1-0,6 м.

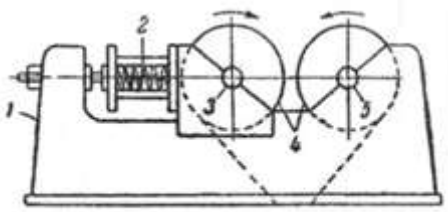


Рис. 3.5. Схема валковой мельницы

Для тонкого размола широко применяются шаровые мельницы, представляющие собой горизонтально расположенные вращающиеся цилиндрические и цилиндро-конические барабаны, заполненные шарами. На рис. 3.6 показана ш а р о в а я м е л ь н и ц а (барабанная диафрагмовая) *(а)* и схема перемещения шаров в ней (б). Корпус *1* барабанной мельницы изнутри облицован броневыми плитами, имеющими ступенчатую или волнистую поверхность для подъема шаров на большую высоту при вращении барабана. Измельчение материала происходит под действием удара падающих стальных шаров, диаметр которых составляет 25-175 мм.

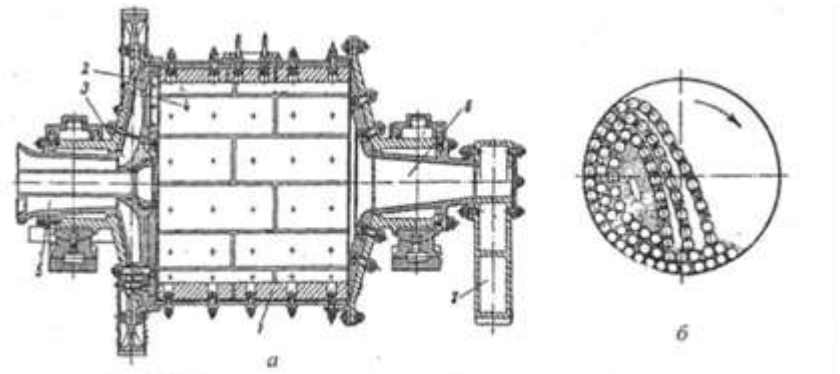


Рис. 3.6. Схема цилиндрической диафрагмовой шаровой мельницы

Исходный материал поступает через полую цапфу *6* с помощью питателя 7, а частицы размолотого материала, размер которых меньше диаметра отверстий в диафрагме *4*, высыпаются из барабана и с помощью радиальных

ребер *3* удаляются через полую цапфу *5* из мельницы. Вращение барабану передается от редуктора через зубчатый венец, укрепленный на корпусе мельницы.

К недостаткам шаровых мельниц относятся громоздкость, значительное пылеобразование, повышенный расход энергии, большой вес оборудования, значительный шум и вибрации. Достоинствами шаровых мельниц являются: высокая производительность, постоянство качества помола, возможность измельчения материала различной твердости со степенью измельчения до 50-100, простота обслуживания, а также возможность размола мокрым способом для предотвращения процесса пылеобразования. Скорость вращения барабанов составляет 2-20 об/мин.

Помимо рассмотренных дробилок и мельниц в промышленности применяются и другие виды измельчающих машин: для мелкого измельчения - ударные мельницы (дезинтеграторы, дисмембраторы); для тонкого измельчения - стержневые, кольцевые, вибрационные мельницы; для коллоидного размола - коллоидные мельницы (сухие и мокрые).

3.2.2. Машины для разделения твердых материалов

После измельчения твердый материал обычно разделяют по размерам частиц с выделением отдельных фракций. Такое разделение называют *классификацией* или *сортировкой.* В промышленности применяются следующие методы классификации: механическая классификация (грохочение), гидравлическая и воздушная классификации.

Материальный баланс процесса классификации:

$$G_{\text{пр}} = \Sigma G_{\text{фр}\,i} + G_{\text{пот}}\ , \quad (3{,}3)$$

где $G_{пр}$ - масса поступившего на разделение материала, кг; $\Sigma G_{\text{фр i}}$ - общая масса i-го количества фракций материала, кг; $G_{\text{пот}}$ - потери материала (в основном пыли), кг.

При механической классификации материалов используются рассеивающие устройства в виде сит и решеток. На рис. 3.7 приведены схемы многократного грохочения исходного сыпучего материала на четыре фракции.

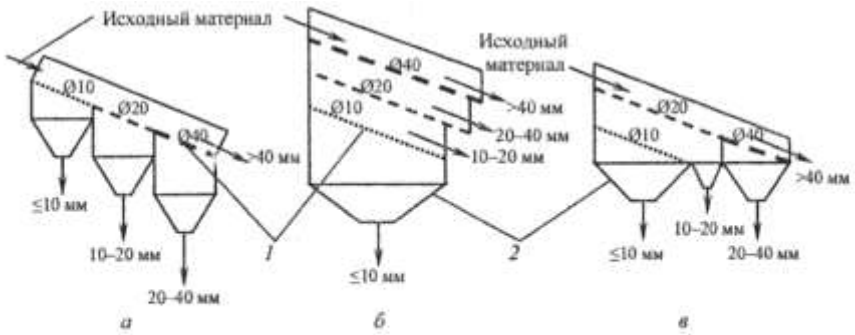


Рис. 3.7. Способы многократной механической классификации:
а – от мелкого к крупному; *б* – от крупного к мелкому; *в* – комбинированный способ;
1–сито (решето); *2*–бункер

Частицы материала, размеры зерен которого меньше диаметра отверстий в сите или решете, под действием силы тяжести проваливаются в бункеры для сбора фракций или поступают на следующее сито (решето), где протекает аналогичный процесс разделения. В зависимости от формы рассеивающего устройства и типа привода применяются неподвижные колосниковые, роликовые, барабанные, качающиеся и вибрационные грохоты.

На неподвижные грохоты, установленные наклонно под углом, большим угла естественного откоса, высыпают подлежащий разделению материал, который, ссыпаясь по поверхности грохота, одновременно при этом классифицируется (мелкие частицы просеиваются). Такие грохоты применяются редко из-за низкой производительности. Более широкое применение нашли вибрационные грохоты, в которых наклонные сита с помощью специального механизма колеблются с частотой 15-50 $с^{-1}$ при амплитуде 0,5-15,0 мм. Благодаря вибрации отверстия в ситах практически не забиваются материалом, обеспечивается высокая производительность, пониженное пылеобразование и меньший расход энергии.

Наибольшее распространение получили барабанные грохоты. Показанный на рис. 3.8 б а р а б а н н ы й г р о х о т представляет собой установленный наклонно (под углом до 9 градусов к горизонту) вращающийся цилиндрический барабан с перфорированными стенками (с отверстиями разного размера). Поступающий через приемную воронку *1* материал движется внутри вращающегося барабана *2* слева направо, проходя сначала секцию с мелкими отверстиями, а затем секции с постепенно увеличивающимися размерами отверстий. Под каждой секцией устанавливаются приемные бункеры (на рисунке не показаны). Вращение барабана осуществляется с помощью привода *3*. Если применить конический барабан, то его можно установить горизонтально, а перемещение материала в нем происходит благодаря конусности стенки. Производительность барабанных грохотов значительно больше, чем неподвижных, но больше и пыление при наличии мелкодисперсных частиц в рассеиваемом материале. Недостатком барабанных грохотов является низкое качество сортировки. Помимо этого секции с мелкими отверстиями часто повреждаются крупными кусками в рассеиваемом материале. При диаметре барабана 1,5-3,0 м скорость его вращения составляет 5-20 об/мин.

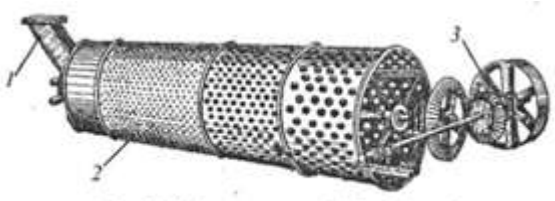


Рис. 3.8. Цилиндрический барабанный грохот

В процессах гидравлической классификации и воздушной сепарации используется принцип разделения частиц на фракции по величине скорости

осаждения в жидкости или в воздухе. Сущность работы воздушно-проходного центробежного сепаратора (рис. 3.9) заключается в следующем: измельченный в мельнице материал в потоке воздуха, движущегося по трубопроводу со скоростью около 20 м/с, через патрубок *1* поступает в кольцевое пространство между корпусом *2* и внутренним конусом *3* сепаратора. Здесь скорость потока резко снижается и наиболее крупные частицы (грубая фракция) под действием силы тяжести выпадают из потока и через патрубок *4* возвращаются в мельницу. Воздушный поток со взвешенными частицами твердого материала движется вверх, проходит между тангенциально установленными к оси сепаратора лопатками 5 во внутренний конус 2, приобретая вращательное движение. Более крупные частицы материала отбрасываются центробежной силой к стенкам внутреннего конуса, движутся по ним вниз и также удаляются через патрубок *4.* Воздушный поток вместе со взвешенными частицами тонкой фракции выходит из сепаратора через патрубок *6* и направляется в циклон, где твердые частицы отделяются от воздуха, который возвращается в мельницу. Работа воздушных сепараторов сопровождается интенсивным пылеобразованием и имеется опасность разрядов статического электричества и появления фрикционных искр.

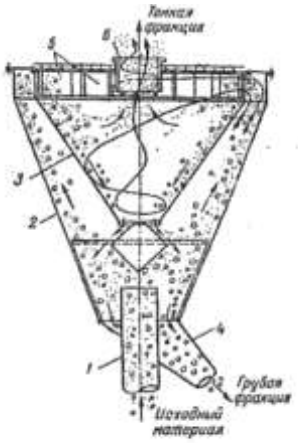


Рис. 3.9. Схема воздушно-проходного сепаратора

Гидравлическая классификация осуществляется в горизонтальном или восходящем потоке жидкости (обычно воды). Поток жидкости выносит из классификатора в слив частицы, меньшие определенного размера, а в классификаторе осаждаются частицы больших размеров, обладающие большей скоростью осаждения.

3.2.3. Механические питатели

Во многих технологических процессах необходимо обеспечивать равномерную подачу твердого материала или регулировать его расход. Для этого применяются *механические питатели (дозеры).* Шнековый дозер (рис. 3.10) работает следующим образом: исходный материал поступает через загрузочную воронку *2* в дозер, подхватывается гребнями вращающегося винта *3* и перемещается вдоль оси корпуса к разгрузочному патрубку *4.* Со стороны

разгрузочного патрубка 1,5-2 витка винта шнека имеют обратную направленность, чтобы предотвратить воздействие уплотненного материала на сальник и опорный подшипник. Производительность дозера регулируется изменением числа оборотов винта (шнека) *3*. Шнековый дозер с переменным шагом винта (шаг винта уменьшается от загрузочной воронки к разгрузочному патрубку), установленный в транспортных коммуникациях, позволяет создать в корпусе 5 затвор из уплотненного материала, обеспечивая герметизацию и разобщение газовых пространств зон **А** и **Б.**

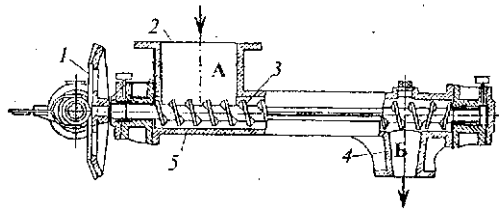


Рис. 3.10. Шнековый питатель:
1–привод; *2*–загрузочная воронка; *3*–бесконечный винт (шнек); *4*–разгрузочный патрубок; *5*–корпус

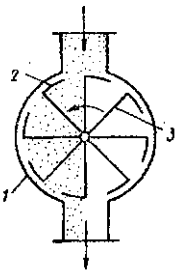


Рис. 3.11. Схема секторного дозера

С е к т о р н ы й д о з е р, схема которого показана на рис. 3.11, состоит из корпуса *1* и вращающегося в нем барабана *2 с* перегородками *3.* Исходный материал поступает в сектор барабана и перемещается в направлении его вращения до выходного патрубка. Регулирование расхода материала обеспечивается изменением частоты вращения барабана.

Контрольные вопросы

Как классифицируются технологические процессы пожаровзрывоопасных производств?

Какие процессы называются механическими?

Какие процессы называются гидромеханическими?

Какие процессы называются тепловыми?

Какие процессы называются массообменными?

Какие процессы называются химическими?

Для какой цели производят измельчение твердых материалов?

От чего зависит выбор способа измельчения твердого материала?

Какие виды измельчения Вы знаете и в чем их отличие?

Какие процессы измельчения сопровождаются интенсивным пылеобразованием?

Из чего складываются потери материала при его измельчении и какая возникает при этом опасность?

Чем отличаются дробилки от мельниц?

Как работает щековая дробилка, какие ее основные достоинства и недостатки?

Как работает конусная дробилка, какие ее основные достоинства и недостатки?

Как работает молотковая дробилка, какие ее основные достоинства и недостатки?

Как работает валковая мельница, какие ее основные достоинства и недостатки?

Как работает шаровая барабанная мельница, какие ее основные достоинства и недостатки?

Для чего производят классификацию материала и какие разновидности классификации Вы знаете?

Из чего складываются потери при классификации материала и какая возникает при этом опасность?

Какими способами осуществляют многократную классификацию, их достоинства и недостатки?

Как работают неподвижные грохоты, их достоинства и недостатки?

Как работает барабанный грохот, его достоинства и недостатки?

Как работает воздушно-проходной сепаратор, его достоинства и недостатки?

Как работает шнековый дозер, его достоинства и недостатки?

Как работает секторный дозер?

Литература

Основная

Рабочая программа курса пожарная профилактика технологических процессов (5 лет обучения). -М: ВИПТШ МВД России, 1995.

Алексеев М. В., Волков О. М., Шатров Н. Ф. Пожарная профилактика технологических процессов производств. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985.

3. Основы пожарной безопасности: Учебное пособие / Под ред. канд. техн. наук В.А. Копылова. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1990.

Дополнительная **I**

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. -М.: Изд-во «Химия», 1975.

Глава 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

В технологических процессах производства многих веществ и материалов возникает необходимость получения или разделения неоднородных смесей, образованных газами, жидкостями и твердыми материалами. Смеси, состоящие как минимум из двух фаз, называются *дисперсными.* (Фаза -однородная по химическому составу и физическим свойствам часть термодинамической системы, отделенной от других частей, имеющих иные свойства, границами раздела, на которых происходит изменение свойств.) Дисперсные системы подразделяются на: *суспензии* - жидкости со взвешенными твердыми частицами; *эмульсии* - жидкости со взвешенными в них каплями других

(нерастворимых) жидкостей; *пены* - взвеси газовых пузырьков в жидкости; *пыли* и *дымы* - газы со взвешенными в них твердыми частицами; *туманы* - взвеси капелек жидкости в газе.

Выбор оборудования для получения или разделения дисперсной системы зависит не только от ее типа, но и от размеров частиц, образующих систему.

4.1. АППАРАТЫ ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Перемешивание жидкостей производится с целью получения эмульсий, суспензий и растворов. Перемешивание используется для приготовле-

ния готовых продуктов или для интенсификации химических, массо- и теплообменных процессов. На производстве широко применяется *механическое* перемешивание с помощью различных вращающихся устройств, *барботажное* (за счет пропускания газов через слой жидкости) и *гидравлическое* (при смешении потоков различных жидкостей в трубопроводах, насосах и других устройствах).

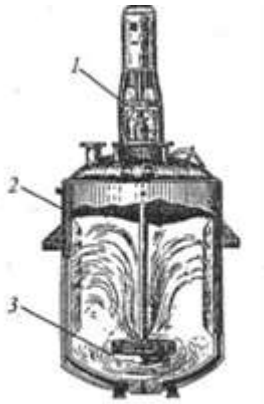


Рис. 4.1. Смеситель ройство, в соответствии с которыми они назы-с турбинной мешалкой

С м е с и т е л и (аппараты для механического перемешивания жидкостей) состоят из корпуса 2, перемешивающего устройства (мешалки) *3* и механического привода *1* (рис. 4.1). Мешалки могут иметь различную форму и устройство, в соответствии с которыми они называются называются лопастными, якорными, пропеллерными, турбинными, дисковыми и другими.

Схемы б а р б о т а ж н о г о с м е с и т е л я и с м е с и т е л я с ц и р к у л я ц и о н н ы м н а с о с о м приведены на рис. 4.2 и 4.3. Такие смесители обычно используются для перемешивания маловязких жидкостей.

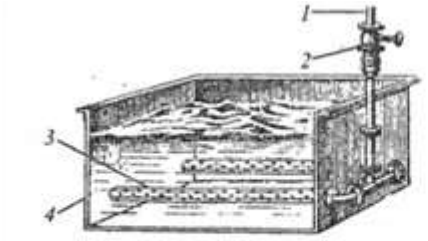


Рис. 4.2. Барботажный смеситель: *1*–газо(паро)провод; *2*–задвижка; *3*–перфорированная труба (барботер); *4*–корпус

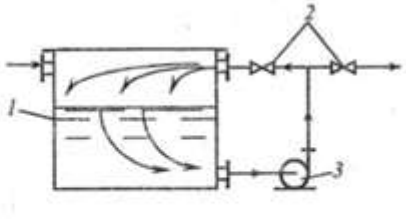


Рис. 4.3. Схема циркуляционного смесителя: *1*–аппарат; *2*–задвижки; *3*–циркуляционный насос

Перемешивание сжатым воздухом происходит сравнительно медленно и при значительном расходе энергии. Помимо этого, перемешивание воздухом часто сопровождается окислением продуктов и испарением жидкостей. Если допускается обводнение продуктов и необходим одновременный их нагрев, вместо газа (воздуха) в *барботеры* подают водяной пар. При чрезмерном расходе сжатого газа или пара существует опасность выброса жидкости из аппарата.

Для перемешивания вязких продуктов (клеев, резиновых композиций и тому подобных, продуктов), а также порошковых или зернистых материалов используются винтовые и ленточные мешатели, а также каландры. На рис. 4.4 показан ленточный мешатель. Внутри корпуса *3* такого смесительного устройства имеются два вращающихся в противоположные стороны перемешивающих устройства, имеющих. вид изогнутых лент *1*.

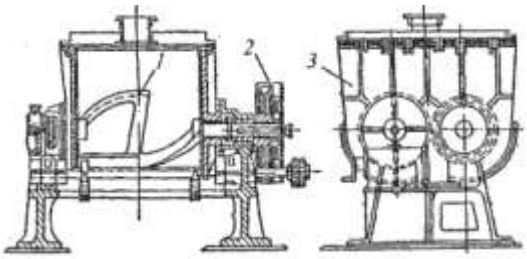


Рис. 4.4. Ленточный мешатель:
1–перемешивающие устройства; *2*–привод; *3*–корпус

Привод рабочих органов рассмотренных выше мешалок производится не от электродвигателей, а через редуктор с зубчатой или червячной передачей, так как число оборотов лопастных мешалок составляет 10-100 об/мин, пропеллерных - 150-1000 об/мин, турбинных - 100-400 об/мин и ленточных мешателей - 5-50 об/мин. При выборе типа перемешивающих устройств учитывают целый ряд факторов. Так, лопастные мешалки, несмотря на простоту устройства и дешевизну изготовления, используются для грубого смешения жидкостей, не склонных к расслаиванию, для растворения и суспендирования твердых веществ, обладающих малой плотностью. Вязкость перемешиваемых жидкостей обычно лежит в пределах 0,005-0,2 Па*с (вязкость воды при 20 °С составляет $1*10^{-3}$ Па*с). Пропеллерные мешалки обеспечивают более интенсивное перемешивание по сравнению с лопастными мешалками, используются для приготовления суспензий и эмульсий с вязкостью 0,05-0,2 Па*с, но не применяются для смешивания жидкостей с твердыми веществами с размерами частиц более 0,15 мм. Турбинные мешалки лишены недостатков лопастных и пропеллерных мешалок: они обеспечивают интенсивное перемешивание и смешивание жидкостей различной вязкости (до 500 Па*с), тонкое диспергирование и быстрое растворение, применимы для смешивания с жидкостями и растворением в них твердых материалов с размером частиц до 25 мм. Однако турбинные мешалки сложны в изготовлении и эксплуатации.

Все смесители с механическим приводом рабочих органов подвержены вибрациям, биениям мешалок, а барботажные смесители, работающие на водяном паре, вибрируют и производят сильный шум из-за быстрой конденсации пузырьков пара в слое жидкости с образованием ударных волн. При интенсивном перемешивании жидкостей с высоким удельным объемным сопротивлением и твердых диэлектрических материалов существует опасность их статической электризации. Высокие потенциалы зарядов статического электричества наблюдаются при каландровании каучуковых композиций и приготовлении резинового клея в мешателях.

4.2. АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОТСТАИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

В аппаратах для отстаивания суспензий и эмульсий используются силы земного притяжения и центробежные силы при наличии разницы в плотностях взвешенных частиц и среды. Если плотность частиц меньше плотности среды, то они всплывают в среде основной жидкости; если плотность частиц больше плотности среды, то они опускаются на дно аппаратов. В аппаратах для отстаивания пылей, дымов и туманов используются те же принципы, с той только разницей, что твердые частицы или капельки жидкостей всегда имеют большую плотность по сравнению с газами и опускаются на дно аппарата. Производительность отстойников зависит от скорости осаждения частиц и от поверхности отстаивания. В связи с этим отстойники имеют большую площадь свободного сечения и незначительную высоту.

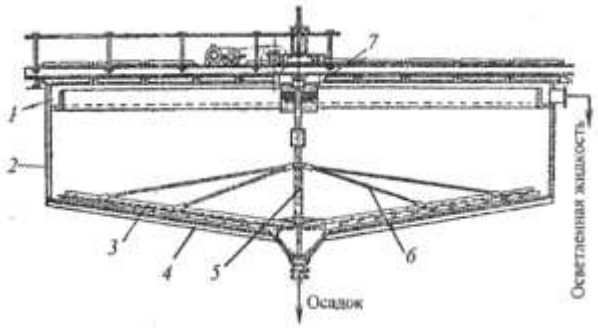


Рис. 4.5. Схема гребкового отстойника непрерывного действия:
1–кольцевой желоб; *2*–корпус; *3*–гребки; *4*–коническое днище; *5*–приводной вал; *6*–рама; *7*–труба для подачи суспензии

Схема гребкового отстойника твердых частиц непрерывного действия показана на рис. 4.5. Суспензия подается в центр аппарата, имеющего пологое коническое днище *4.* Во время ее радиального движения к расположенному на периферии кольцевому желобу *1* происходит осаждение твердых частиц на днище. Медленно вращающаяся рама *6* (скорость вращения 2-20 оборотов в час) с помощью гребков *3*, прикрепленных к ней под углом, перемещает осадок к центру, откуда он отсасывается насосом. Осветленная жидкость переливается через край корпуса в желоб *1* и отводится из аппарата через выходной штуцер. Диаметр отстойников достигает 60 м. Значительно более компактны двухъярусные и многоярусные отстойники, представляющие собой конструкции, собранные из нескольких отстойников, расположенных друг над другом.

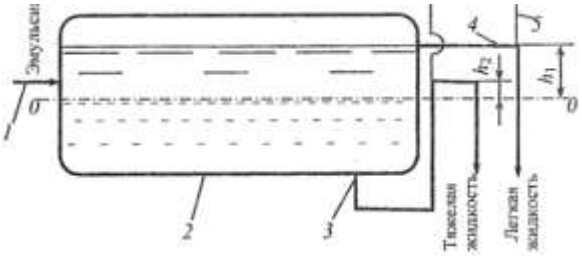


Рис. 4.6. Схема непрерывно действующего отстойника эмульсии (*0–0* – плоскость раздела фаз)

На рис. 4.6 показана схема непрерывно действующего о т с т о й н и к а э м у л ь с и й , представляющего собой полый горизонтальный цилиндрический аппарат. Эмульсия по подводящему трубопроводу *1* вводится через боковую стенку корпуса *2*. Капли легкой жидкости, имеющей плотность $p_{1;}$ всплывают вверх, образуют сплошной слой и удаляются из отстойника через верхний патрубок *4,* Тяжелая жидкость, имеющая плотность рп, отводится снизу аппарата через патрубок *3*. Патрубки для отвода легкой и тяжелой жидкостей размещаются на отметках h_1 и h_2 (при размещении патрубков необходимо учитывать соотношение $p_1 * h_1 = p_2 * h_2$). Обводная линия *5* служит для компенсации давления в паровом пространстве аппарата и обеспечения постоянства отвода жидкостей.

Для интенсификации отстаивания эмульсий процесс проводят в электрическом поле переменного тока высокого напряжения (20-50 кВ), под действием которого частицы однородных жидкостей сливаются вместе, что способствует ускорению процесса отстаивания. Аппараты для разделения эмульсий в электрическом поле называются электроразделителями или электродегидраторами. Их используют, в частности, в нефтеперерабатывающей промышленности для очистки нефти и готовой продукции (бензина, дизельного топлива и других нефтепродуктов) от примеси воды. Электродегидраторы бывают цилиндрические (горизонтальные и вертикальные) и сферические.

На рис. 4.7 приведен поперечный разрез г о р и з о н т а л ь н о г о э л е к т р о д е г и д р а т о р а с нижней подачей сырья, рассчитанного на давление 1,0 МПа и температуру 110 °С и выше. Диаметр корпуса элек-тродегидратора составляет 3,5 м, длина около 18 м, емкость около 160 $м^3$. Производительность электродегидра-тора по нефти достигает 6000 т/сутки. Для защиты от коррозии внутренняя поверхность корпуса и днищ элек-тродегидратора покрыта эмалью.

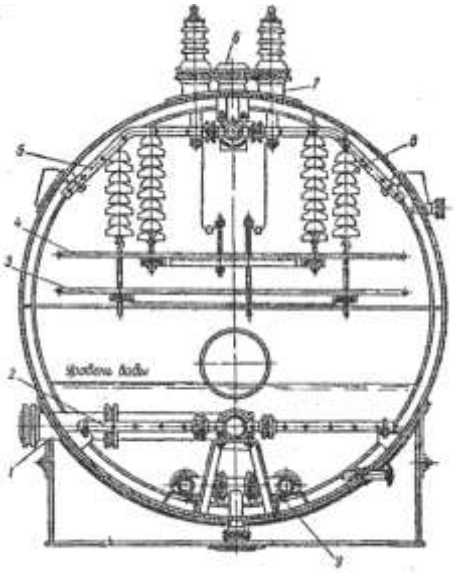


Рис. 4.7. Горизонтальный электродегидратор

Поступающая в аппарат через штуцер *1* эмульсия, по мере ее движения снизу вверх, последовательно проходит через зоны воздействия слабого и сильного электрических полей. Напряженность электрического поля достигает максимального значения в зоне, расположенной между нижним *3* и верхним *4* электродами. Устройство нижнего *2* и верхнего 5 маточников (перфорированных труб) способствует равномерному распределению эмульсии по сечению электродегидратора. Такая конструкция электродегидратора позволяет отделять самые крупные капли воды в нижней части аппарата, а наиболее мелкие - в межэлектродном промежутке. Обезвоженная нефть отводится через верхний штуцер *6,* а вода - через коллектор *9.* К электродам *3* и *4,* подвешенным внутри электродегидратора на гирляндах из высоковольтных тарельчатых изоляторов *8,* от вторичной обмотки трансформатора с помощью шин, проходящих через изоляторы 7, подводится переменный электрический ток с напряжением до 30000 В. Расстояние между электродами (в зависимости от подводимого напряжения) составляет 100— 150 мм.

Для отстаивания взвешенной пыли из потока газа используются аппараты различных типов. На рис. 4.8 показана пылеосадительная камера, сущность работы которой заключается в резком уменьшении скорости движения газового потока и осаждении твердыгх частиц на дно камеры или горизонтальные перегородки под действием силы тяжести.

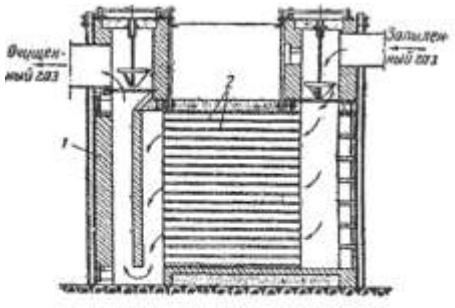


Рис. 4.8. Схема пылеосадительной камеры:
1–корпус; *2*–полки (перегородки)

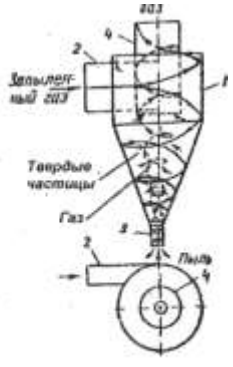


Рис. 4.9. Схема циклон

Очистка газов от пыли, а также разделение эмульсий и суспензий более эффективно происходит в аппаратах циклонного типа. На рис. 4.9 показана схема ц и к л о н а для очистка газа от пыли. В цилиндро-коническом корпусе / имеется аксиально расположенный патрубок *4.* Поступающий в циклон по тангенциально расположенному патрубку *2* запыленный газ приобретает вращательное движение. Величина центробежной силы F_n, действующей на частицу массой *m,* определяется из выражения

$$F_{ц} = - m \omega^2 r \ , \qquad (4.1)$$

где ω - угловая скорость частицы; *r* - радиус вращения частицы.

Твердые частицы под действием центробежной силы движутся к стенкам конического днища аппарата и одновременно перемещаются вниз под воздействием силы тяжести. Осевшая пыль выводится из циклона через нижний патрубок *3,* а обеспыленный газ по патрубку *4* отводится из зоны разделения и выводится из аппарата.

Аналогично работают *гидрог/иклоны* для разделения эмульсий и суспензий. Степень очистки газов от пыли в циклонах относительно небольшая и достигает 60-90 %, но значительно выше, чем в пылеосадительных камерах. В целях увеличения эффективности очистки без значительного увеличения гидравлического сопротивления системы прибегают к уменьшению радиуса вращения газа и замене одного циклона несколькими меньшими. Такой принцип положен в основу устройства б а т а р е й н о г о ц и к л о н а (рис. 4.10), в общем корпусе которого на перегородке *1* смонтировано 50-100 и более параллельно работающих циклонных элементов 2, имеющих диаметр 150-250 мм. В корпусе *3* каждого элемента имеются выхлопные трубы *5* с винтовыми лопастями *4.*

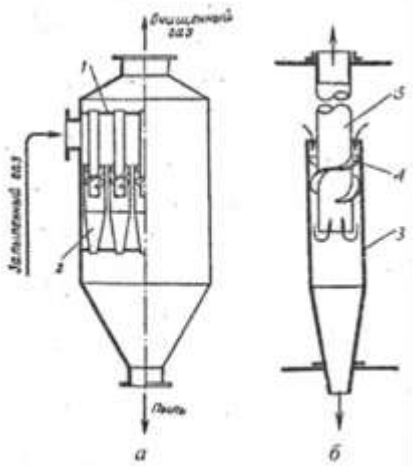


Рис. 4.10. Схема батарейного циклона (*а*) и его элемента (*б*)

К числу недостатков циклонов относятся: невысокая степень очистки от тонкодисперсной пыли, высокое гидравлическое сопротивление, большой расход энергии на очистку, механический износ стенок аппарата частицами пыли, высокая статическая электризация частиц пыли, возможность образования

отложений пыли на стенках циклона, если температура поступающих на очистку газов снизится ниже точки росы (коэффициент запаса должен быть не менее 15-20 °С).

В определенных случаях для неглубокой очистки газов от грубой пыли используются инерционные пылеуловители. Схема работы инерционного жалюзийного золоуловителя показана на рис. 4.11. В корпусе / такого пылеуловителя имеются концентрические конические кольца разного диаметра *2* или наклонные перегородки. Твердые частицы золы (пыли), движущиеся по золоуловителю вместе с потоком газа, ударяются под действием силы инерции о кольца (перегородки) и отбрасываются от них в противоположную движению основного потока газа сторону. Большая часть очищенного газа (около 90 %) обтекает перегородки и удаляется с помощью дымососа в атмосферу, а остальная

его часть с золой (пылью) по центральному патрубку *3* направляется на дополнительную очистку в циклоне. Несмотря на простоту и компактность, а также отсутствие движущихся частей, жалюзийные пылеуловители обладают существенными недостатками: невысокой степенью очистки (отделяется только грубая пыль), большим гидравлическим сопротивлением, износом конических колец (перегородок) и частым забиванием их пылью.

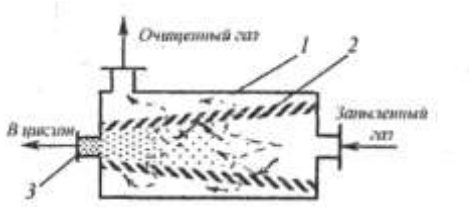


Рис. 4.11. Схема жалюзийного пылеуловителя: траектория движения ←– газа; ← пыли

Аппараты для разделения пылей и туманов в электрическом поле называются электрофильтрами. На рис. 4.12 показана схема трубчатого электрофильтра, который представляет собой вертикальную камеру *1* с газоходами для входа *6* и выхода газа *8.* В камере установлены оса-дительные электроды *2* (трубы диаметром 150-300 мм) длиной 3-6 м, вдоль оси которых с помощью рам *4* и *5* натянута проволока - коронирующие электроды *3.* К нижней раме 5 подвешены грузы для натяжения проволоки, рама *4* подвешена на электроизоляторах и подключена высоковольтным кабелем к отрицательному полюсу повы-сительно-выпрямительного агрегата. Распределительная решетка 7 служит для равномерного распределения запыленного газа по сечению фильтра. При улавливании тумана образующаяся жидкость сама стекает с осадительных электродов *2;* при улавливании пыли последнюю приходиться периодически стряхивать с электродов с помощью вибратора или механизма ударного действия *9* после отключения напряжения.

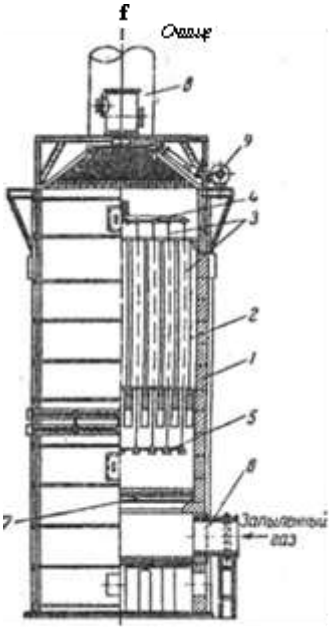


Рис. 4.12. Схема электрофильтра

Аналогично устроены пластинчатые электрофильтры, в которых роль осадительных электродов выполняют пластины, расположенные на расстоянии 150-200 мм друг от друга.

Сущность процесса очистки газа от пыли (тумана) заключается в следующем. Если к двум специально подобранным электродам в виде двух концентрических цилиндров (провода и трубы) или цилиндра и плоскости (провода и пластины) подвести постоянное напряжение выше критического, присоединив провод к отрицательному полюсу источника тока и заземлив трубу или пластину, то между ними образуется неоднородное поле с самостоятельным газовым разрядом (то есть с прохождением тока между электродами в газовом пространстве). При этом в темноте видно голубоватое свечение около провода, называемое коронным разрядом или короной. В области короны градиент напряженности электрического поля выше пробивного, но пробой газа является местным, так как по мере удаления от провода напряженность поля резко падает. Когда между электродами проходит запыленный газ, то электроны, сталкиваясь с частицами пыли, присоединяются к ним и нейтральная пыль приобретает отрицательный заряд. Пылинки притягиваются к пластине, имеющей заряд противоположного знака, и осаждаются на ней.

При улавливании пыли, хорошо проводящей электрический ток, ее слой на осадительном электроде получает положительный заряд и отталкивается в газовый поток, что приводит к выносу пыли из фильтра. Если пыль не электропроводная, то она образует на осадительном электроде возрастающий во времени плотный отрицательно заряженный слой, противодействующий основному полю и снижающий эффективность пылеот-деления. Для исключения этого вредного явления пыль, осевшую на электродах, либо периодически удаляют встряхиванием электродов после отключения напряжения, либо увлажняют водой, увеличивая ее проводимость. Эффективность улавливания пыли в электрофильтрах достигает 99,5 % и более.

Питание всех типов электрофильтров (пластинчатых, трубчатых, го-

ризонтальных, вертикальных, сухих и мокрых) осуществляется постоянным током с напряжением 40-75 кВ.

Основные недостатки электрофильтров: большой расход энергии, а также появление на производстве мощных источников зажигания электрического происхождения.

4.3. АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРОВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

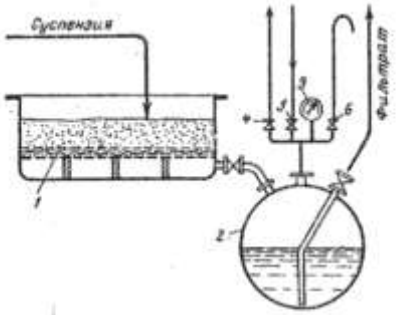


Рис. 4.13. Схема нутч-фильтра:
1–фильтрующая перегородка (фильтр); *2*–сборник фильтрата; *3*–манометр; *4*–вакуумная линия; *5*–линия давления; *6*–воздушная линия

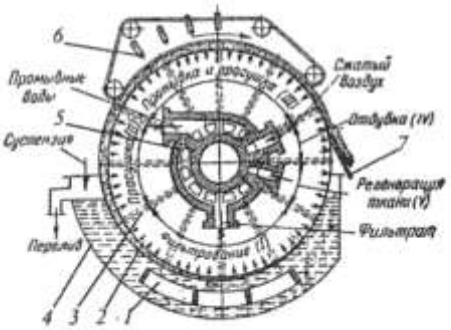


Рис. 4.14. Схема барабанного вакуум-фильтра

Фильтрованием называется разделение суспензий, пылей и туманов, осуществляемое при их прохождении через пористые перегородки. Аппараты для проведения процессов фильтрования и сами пористые перегородки называются *фильтрами.* Осевшие на пористой перегородке частицы называются осадком, а жидкость, отделенная от осадка, - *фильтратом.* В качестве фильтров используются насыпные материалы (гравий, песок), набивные материалы (вата хлопчатобумажная, шерстяная, шлаковая, асбестовое волокно и др.), керамические и металлокерамические материалы, различные ткани и сетки из металлов, полимерных материалов и композиций.

Простейшим аппаратом для фильтрования жидких суспензий под вакуумом является н у т ч - ф и л ь т р (рис. 4.13) - открытый аппарат с горизонтальной фильтрующей перегородкой. Объем аппарата под опорной решеткой сообщается со сборником фильтрата и вакуумной линией. Применение вакуума интенсифицирует процесс фильтрования. Нутч-фильтр работает периодически, а образующийся осадок разгружается вручную.

Одним из представителей непрерывно действующих фильтров является б а-

рабанный вакуум-фильтр (рис. 4.14). Основной частью фильтра является барабан *2* с перфорированной цилиндрической поверхностью, которая покрывается слоем фильтрующей ткани. Барабан устанавливается горизонтально в подшипниках и приводится во вращение через редуктор с помощью электродвигателя. Нижняя часть барабана погружена в корыто *4* с суспензией, оборудованное мешалкой *1.* Внутри барабан имеет радиальные перегородки *3, к* которым через распределительную головку *5* на торце барабана периодически подводится вакуум (I-III) зоны или воздух под давлением (зоны *IV-V).* Переключение камер на вакуум или давление происходит автоматически при вращении барабана. При необходимости образующийся на барабане слой осадка может промываться промывочной жидкостью, поступающей через оросительное устройство *6.* Промытый и просушенный слой осадка снимается ножом 7 с поверхности фильтровальной ткани. Барабан вращается со скоростью 0,1-2,5 об/мин.

По сравнению с нутч-фильтром работа барабанного вакуум-фильтра полностью механизирована и автоматизирована, он имеет значительно более высокую производительность и легко обслуживается. В то же время барабанный фильтр значительно дороже нутч-фильтра, имеет (также как и нутч-фильтр) небольшую фильтрующую поверхность, его значительно труднее герметизировать при фильтрации огнеопасных жидкостей.

Обеспечить полную герметизацию процесса фильтрования позволяют патронные фильтры, которые применяются главным образом в качестве сгустителей. Суспензия подается в корпус *1* патронного фильтра (рис. 4.15) под небольшим избыточным давлением. Фильтрат проходит через фильтровальные перегородки патронов *4* и удаляется из фильтра через штуцер 2. Патрон обычно представляет собой ребристую металлическую трубу *3* с отверстиями, на которую надета гильза из пористого материала *6.* По мере роста толщины осадка на поверхности гильз происходит медленный самопроизвольный рост давления процесса фильтрации. При достижении предельного заданного значения давления отключается подача суспензии и фильтрация прекращается. Затем включается подача промывочной жидкости, под действием потока которой осадок с поверхности гильз сбрасывается на дно фильтра и в виде сгущенной суспензии удаляется из него.

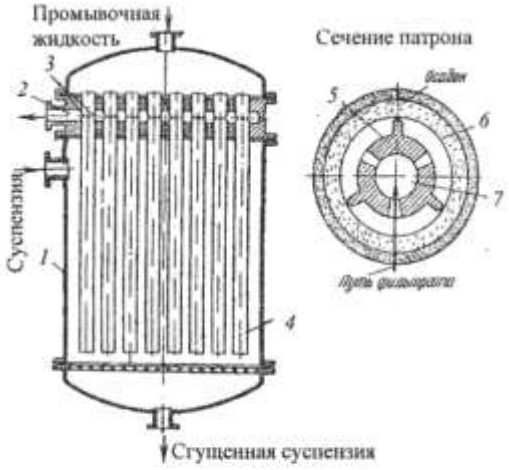


Рис. 4.15. Патронный фильтр:
1–корпус; *2*–патрубок фильтрата; *3*–отверстия в патроне; *4*–патрон; *5*–ребристая трубка; *6*–гильза; *7*–отверстие для отвода фильтрата

Патронные фильтры состоят из нескольких десятков фильтровальных элементов, заключенных в общем корпусе. Указанные фильтры компактны и герметичны, работают в автоматическом режиме, не имеют движущихся элементов, достаточно просто устроены и удобны в эксплуатации, однако фильтровальные элементы подвержены забиванию мелкодисперсными осадками. В качестве пористого материала для изготовления гильз наиболее часто используются пористая керамика, металлокерамика и другие материалы.

Для фильтрования жидкостей в промышленности используются и другие типы фильтров, работающих как под повышенным давлением, так и под вакуумом: фильтр-прессы - периодически действующие аппараты, состоящие из чередующихся плит и рам, обтянутых фильтровальной тканью; мешочные фильтры; дисковые и тарельчатые фильтры, принцип работы которых напоминает барабанные фильтры; ленточные, карусельные и другие фильтры.

Высокая эффективность разделения суспензий достигается под действием центробежных сил. Такой способ разделения называется *центрифугированием* и осуществляется в машинах, называемых *центрифугами.* Основной частью фильтрующей центрифуги является барабан с дырчатыми стенками (барабаны со сплошными стенками используются в центрифугах, предназначенных для отстаивания жидкостей), вращающийся с большой скоростью на вертикальном или горизонтальном валу (скорость вращения барабана достигает 500-3500 об/мин и более). На рис. 4.16 показана горизонтальная автоматическая центрифуга, в которой все операции полного цикла центрифугование, промывка и выгрузка осадка) выполняются автоматически без остановки вращения барабана. Суспензия загружается в барабан с ситчатыми стенками *1* через трубу *3* и равномерно распределяется в нем. После отделения жидкости осадок на полном ходу снимается ножом *6* и падает в желоб *2.* Управление ножа осуществляется с помощью гидравлического цилиндра *4.* В нижней части кожуха 5 имеется штуцер для отвода фильтрата. Вал *8* барабана крепится в станине *9* с помощью двух подшипников качения 7. Несмотря на достоинства, автоматические центрифуги имеют недостатки: образование пыли

при съеме осадка ножом, а также опасность соприкосновения движущихся частей машины с неподвижными.

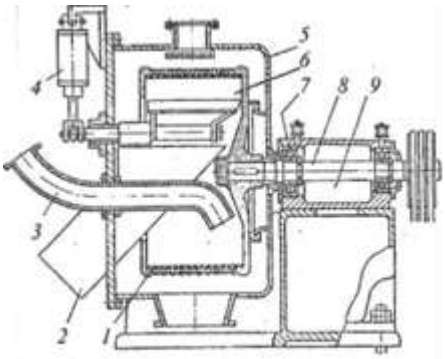


Рис. 4.16. Горизонтальная автоматическая центрифуга

Для фильтрования газов в промышленности используются различные фильтры. В рукавном фильтре (рис. 4.17) фильтрующий элемент выполняется в виде тканевого чехла (рукава), надетого на каркас из металлической сетки или спиральной пружины. Запыленный газовый поток вводится в корпус фильтра *2* снизу и распределяется по фильтрующим элементам - рукавам *3.* Взвешенная в газе пыль оседает на внутренней поверхности рукавов, а отфильтрованный газ удаляется через верхний газоход. Для удаления осевшей пыли прекращают подачу газа и рукава встряхивают с помощью специальных приспособлений (вибраторов) *1.* Пыль собирается в бункере *4* и периодически удаляется из него.

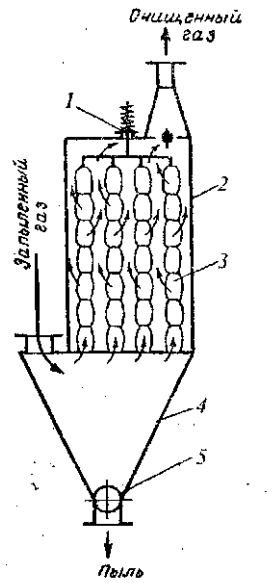


Рис. 4.17. Схема рукавного фильтра:
1–вибратор; *2*–корпус; *3*–фильтровальные рукава; *4*–бункер; *5*–шнек

Непрерывность работы фильтров обеспечивается их секционированием (в каждой секции имеется 12-25 рукавов). Отдельные секции поочередно выключают через равные промежутки времени для встряхивания пыли. Достоинства ру-

кавных фильтров: высокая степень очистки газов от различных видов пылей, в том числе и мелкодисперсных. Недостатки: непригодность для очистки влажных газов с температурой близкой к точке росы (температура газов должна быть не менее чем на 10 °С выше точки росы, иначе ткань увлажняется и замазывается грязью); невозможность очистки горячих газов (максимальная температура газов определяется термостойкостью, фильтровальной ткани); сравнительно быстрый износ ткани. В определенных случаях, связанных с повышенной взрывоопасностыо пылевоздушных смесей, рукавные фильтры изготовляются без герметичного корпуса, а рукава крепятся на каркасе без ограждающих панелей.

Для очень тщательной очистки воздуха или других газов от мелкодисперсной пыли применяются масляные (висциновые) и поролитовые фильтры, а также мокрые пылеуловители и электрофильтры. Масляный фильтр монтируется непосредственно в газоходе в виде металлической кассеты, закрытой с обеих сторон сетками. Кассета заполнена металлическими, керамическими кольцами или другой насадкой, смачиваемой высоковязким висциновым маслом. Улавливаемая пыль прилипает к насадке, в связи с чем кассету периодически вынимают, промывают от пыли и смачивают свежим маслом. Поролитовый фильтр устроен и работает также как и патронный фильтр-сгуститель (см. рис. 4.15).

Мокрая очистка газов осуществляется в полых скрубберах или скрубберах с насадкой, орошаемых жидкостью (скруббер представляет собой вертикальный аппарат башенного типа круглого или прямоугольного сечения). Запыленный газ подается в скруббер снизу и движется вверх. Жидкость в полых скрубберах распыляется форсунками, установленными на разных уровнях, а в скрубберах с насадкой поступает в верхнюю часть через распределительное устройство. Для мокрой очистки применяются также центробежные скрубберы, принцип работы которых аналогичен работе циклонов, внутренние стенки которых орошаются водой (или другой смачивающей жидкостью). Степень очистки газов от пыли в поролитовых и мокрых фильтрах достигает 99 % и более. Скрубберы, в особенности центробежные, просты по устройству, экономичны в эксплуатации, имеют низкое гидравлическое сопротивление. В мокрых фильтрах отсутствует угроза взрыва пылевоздушной смеси. Мокрые фильтры пенного, импел-лерного или других типов устанавливаются в окрасочных камерах для очистки воздуха от уносимых частиц краски, образующихся при окраске изделий жидким распыленным или пылевидным лакокрасочным материалом.

4.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Производственные процессы невозможно представить без перемещения сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, для чего применяются насосы, компрессоры, конвейеры, различные продукте про воды и другое оборудование. Для хранения горючих газов на производствах и складах используются баллоны, ресиверы, газгольдеры; жидкостей - сборники, баки, резервуары; твердых

сыпучих и пылевидных материалов - бункеры, хранилища, силосы и тому подобное оборудование.

4.4.1. Оборудование для перемещения и хранения газов

Перемещение газов по трубопроводам осуществляется благодаря созданию избыточного давления или разрежения с помощью специальных машин: компрессоров, газодувок, вентиляторов и др. Энергия сжатых газов используется таюке для перемещения жидкостей (газлифты и эрлифты, монтежю, струйные насосы), твердых пылевидных и сыпучих материалов (пневмотранспорт), в процессах перемешивания, распыления и разделения веществ и материалов.

В производственных процессах применяются различные по физико-химическим и пожаровзрывоопасным свойствам газы в широком диапазоне давлений, температур и расходов. Это обусловливает большое разнообразие типов и конструкций машин для перемещения, сжатия и разрежения газов.

В зависимости от степени сжатия, то есть от соотношения конечного *($p_к$)* и начального (/?„) давления (степень сжатия s = $p_к$ /$p_л$)*,* различают следующие машины:

- компрессоры, s = 3-1000; конечное давление доходит до 0,3-100 МПа и более;

газодувки, s = 1,1-3; давление находится в пределах 0,11-0,3 МПа;

вентиляторы, s = 1-1,1; давление не превышает 0,11 МПа;

- эксгаустеры - вентиляторы и газодувки, создающие разрежение не ниже 0,01 МПа;

- вакуум-насосы; остаточное давление 0,005-0,00005 МПа. Компрессоры по принципу действия подразделяются на следующие

типы:

- поршневые, в которых возвратно-поступательное движение поршня в цилиндре приводит к сжатию газа вследствие уменьшения объема рабочей камеры;

- ротационные, в которых вращение ротора (или двух роторов) со специальными устройствами приводит к образованию камер переменного объема и сжатию газов;

- центробежные (турбокомпрессоры), в которых сжатие газов осуще-ствляется под действием инерционных сил, возникающих при вращении рабочего колеса;

- струйные, в которых истечение газа из насадка приводит к сжатию газа вследствие изменения его скорости.

В зависимости от количества рабочих органов различают компрессоры одноступенчатые (ε = 2-8), двухступенчатые (ε = 8-50) и многоступенчатые (ε = 50-100 и более).

На рис. 4.18 показан двухступенчатый компрессор с дифференциальным поршнем. Сжатие газа в таком компрессоре происходит как при прямом (справа налево), так и при обратном ходе поршня. Сжатый в первой ступени газ после прохода через холодильник 7 доводится до конечного

давления во второй ступени и направляется к потребителю. Устройство и принцип работы поршневых вакуум-насосов практически не отличается от поршневых компрессоров.

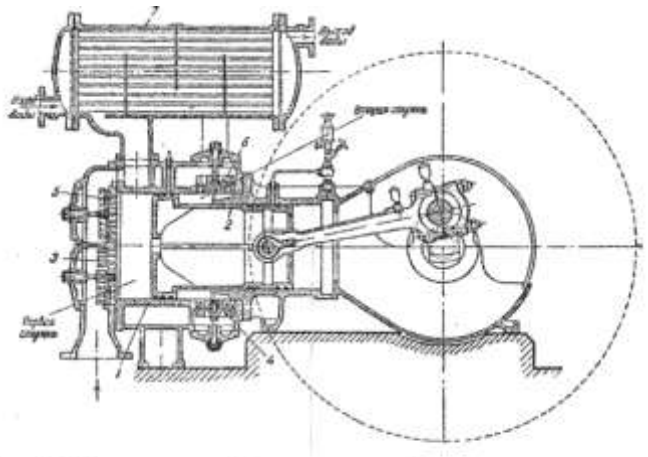


Рис. 4.18. Двухступенчатый компрессор с дифференциальным поршнем:
1–цилиндр; *2*–дифференциальный поршень; *3*, *4*–всасывающие клапаны;
5, *6*–нагнетательные клапаны; *7*–холодильник

Поршневые компрессоры и вакуум-насосы громоздки, требуют массивных фундаментов из-за сильных вибраций; подача газа неравномерная, пульсирующая; газ загрязнен смазочными маслами; попадание в цилиндры жидкости (из-за образования жидкой фазы в процессе сжатия газа, из-за попадания конденсата вместе со сжимаемым газом, из-за нарушения герметичности системы охлаждения иди из-за других причин) чревато опасностью разрушения цилиндров и привода компрессора.

Ротационные компрессоры и вакуум-насосы лишены этих недостатков и, кроме того, они не имеют клапанов. Устройство ротационного пластинчатого компрессора показано на рис. 4.19. Ротор *1* такого компрессора расположен эксцентрично относительно оси цилиндрического корпуса *2*. В прорези ротора вставлены пластины 5, которые при его вращении выдвигаются из прорезей и центробежной силой прижимаются к корпусу. Пластины разделяют свободное серповидное пространство между корпусом и ротором на камеры, объем которых уменьшается по направлению вращения ротора от всасывающего *4* к нагнегательному *5* патрубку. При производительности 160-4000 $м^3$/час такие компрессоры создают давление до 0,4-0,8 МПа. Больших степеней сжатия в ротационных компрессорах достичь нельзя из-за сильных утечек газа через неплотности между ротором и боковыми стенками корпуса.

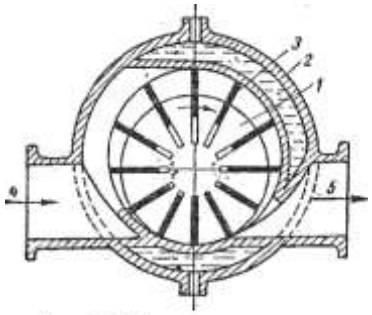


Рис. 4.19. Схема ротационного пластинчатого компрессора

Многоступенчатые турбогазодувки (рис. 4.20) и турбокомпрессоры имеют производительность от 5000 м^3/час и более. Турбокомпрессоры, по сравнению с поршневыми компрессорами, компактны, обеспечивают равномерную подачу газа, не загрязненного смазочными маслами. Наибольшее давление, создаваемое многоступенчатыми центробежными компрессорами, не превышает 3 МПа. В турбокомпрессорах, в отличие от турбога-зодувок, газ охлаждается водой, циркулирующей по отлитым в корпусе турбокомпрессора камерам водяной рубашки, либо в наружных водяных холодильниках после каждой ступени сжатия.

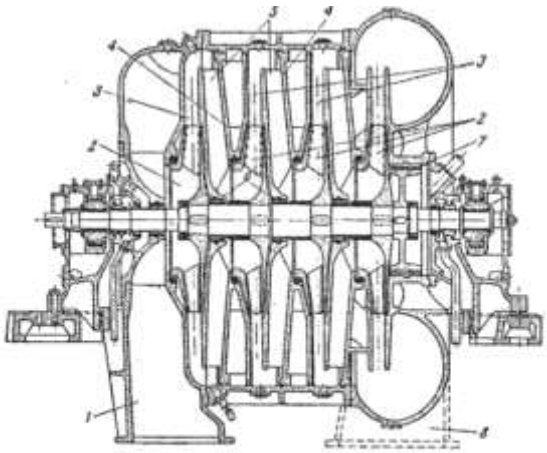


Рис. 4.20. Трехступенчатая турбогазодувка: *1*–всасывающий патрубок; *2*–рабочие колеса *I, II* и *III* ступеней; *3*–направляющие аппараты; *4*–диафрагма; *5*–обратные направляющие аппараты; *6*–уплотнение; *7*–разгрузочный поршень; *8*–нагнетательный патрубок

Струйные компрессоры и насосы бывают всасывающими *(эжекторы)* и нагнетательными *(инжекторы)*. На рис. 4.21 схематично изображен пароструйный-компрессор. Рабочий пар поступает в сопло *1*, адиабатически расширяется в нем и со скоростью до 1400 м/с выходит из сопла. За счет сил трения пар увлекает за собой засасываемый газ (воздух, паровоздушную смесь) и смешивается с ним в смесительной камере *2*. Смесь с большой скоростью поступает в диффузор *3*, в котором происходит преобразование скорости смеси в давление, т.е. ее сжатие.

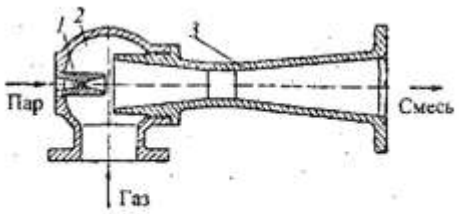


Рис. 4.21. Схема одноступенчатого пароструйного компрессора

Для хранения газов используются баллоны и газгольдеры (газохранилища), обладающие высокой герметичностью. Газохранилища для хранения газа под давлением не выше 500 мм водяного столба (5000 Па (изб.)) бывают мокрые и сухие. Схема работы мокрого газгольдера показана на рис. 4.22. Под колокол *2* такого газгольдера подведены приемно-раздаточные газопроводы *3*. При опорожнении газгольдера колокол *2* погружается в бассейн *1* с запорной жидкостью. По мере подачи газа колокол всплывает. Высота водяного бассейна определяется высотой колокола.

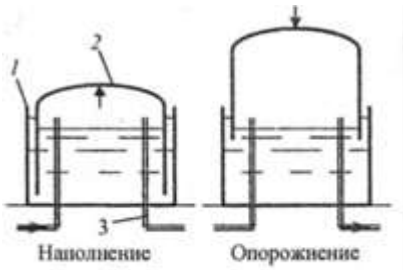


Рис. 4.22. Схема работы мокрого газгольдера

Для увеличения емкости газгольдеров без значительного увеличения высоты бассейна применяются газохранилища с телескопическими кольцами (рис. 4.23). Телескопические кольца соединены с верхней частью и между собой при помощи гидравлических затворов. Высота столба жидкости в затворе должна быть больше высоты, соответствующей избыточному максимальному внутреннему давлению газа в газгольдере. Для обеспечения нормальной работы колокол и телескопы имеют внутренние и внешние ролики, скользящие по направляющим.

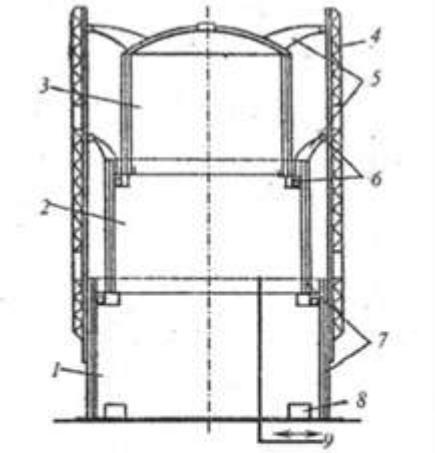


Рис. 4.23. Мокрый газгольдер с телескопическими кольцами:
1–бассейн; *2*–телескоп; *3*–колокол; *4*–направляющие; *5*–кронштейны; *6*–ролики; *7*–каркас; *8*–упоры; *9*–приемо-раздаточный патрубок

Объем телескопических газохранилищ достигает 0,5-1 млн. м^3. К недостаткам мокрых газохранилищ, помимо высокой стоимости, относятся необходимость постройки специального здания или системы обогрева для зимних условий эксплуатации, а также увлажнение газа.

Газ высокого давления хранят в горизонтальных цилиндрических или сферических газохранилищах (резервуарах), а также в баллонах. По сравнению с газохранилищами низкого давления резервуары более компактны, не нуждаются в обогреве, просты в эксплуатации, но требуют больших затрат на сжатие газа. На рис. 4.24 показано с ф е р и ч е с к о е х р а н и л и щ е , которое используется для хранения не только сжатых газов, но и сжиженных газов. Емкость таких хранилищ достигает 2000 м^3 и более.

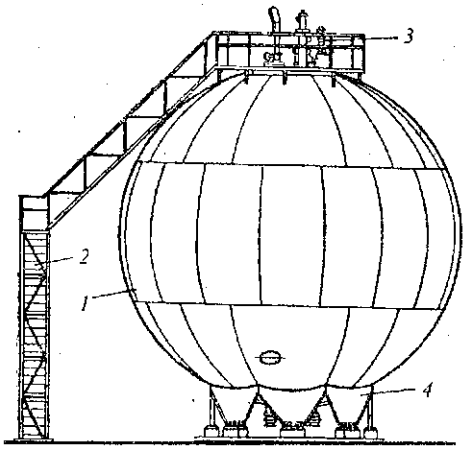


Рис. 4.24. Сферическое газохранилище высокого давления:
1–корпус; *2*–лестница; *3*–предохранительные устройства; *4*–опора

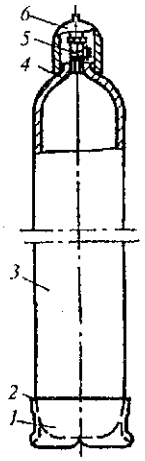


Рис. 4.25. Схема баллона:
1–днище; *2*–подпятник; *3*- корпус; *4*–горловина; *5*–вентиль с заглушкой; *6*–защитный колпак

Резервуары для хранения сжатых и сжиженных газов имеют подводящие и отводящие трубопроводы, а также специальную арматуру (предохранительные клапаны), защищающую от чрезмерного повышения давления.

Б а л л о н ы (рис. 4.25) используются для хранения и транспортировки как

сжатых газов, так сжиженных и растворенных газов. Баллоны имеют емкость от 1 до 100 л и более. Боковые штуцера коренных вентилей 5 баллонов с горючими газами имеют левую резьбу, с кислородом и негорючими газами - правую резьбу. Предельное рабочее давление сжатых газов (горючих газов (кроме ацетилена), кислорода, воздуха и инертных газов) составляет 15,0 МПа, сжиженного пропан-бутана - 1,6 МПа.

Ацетиленовые баллоны (в отличие от остальных баллонов) заполняются пористой массой и ацетоном, в котором ацетилен при заправке баллона растворяется (предельное рабочее давление ацетилена 1,9 МПа). Это связано с необходимостью обеспечения безопасности, так как ацетилен может разлагаться со взрывом, особенно при высоких давлениях и температурах.

В зависимости от вида хранимого газа баллоны имеют различную окраску, текст и цвет надписи, а также цветную полосу (табл. 4.1).

Таблица 4.1 Маркировка баллонов для некоторых газов

Наименование газа	Окраска баллона	Текст надписи	Цвет надписи	Цвет полосы
Азот (другие негорючие газы)	Черная	Азот (наименование газа)	Желтый	Коричневый (-)
Аммиак	Желтая	Аммиак	Черный	-
Ацетилен	Белая	Ацетилен	Красный	-
Водород	Темно-зеленая	Водород	Красный	-
Воздух	Черная	Сжатый воздух	Белый	-
Кислород	Голубая	Кислород	Черный	-
Метан (другие горючие газы)	Красная	Метан (наименование газа)	Белый	-
Сероводород	Белая	Сероводород	Красный	Красный
Двуокись углерода (углекислый газ)	Черная	Углекислота	Желтый	-

На сферической части баллона около горловины или штуцера выбиваются паспортные данные: товарный знак завода-изготовителя, номер баллона, фактическая масса порожнего баллона, дата (месяц, год) изготовления и год следующего освидетельствования, рабочее давление, пробное гидравлическое давление, вместимость баллона в литрах и др. На баллонах емкостью до 5 л или при толщине стенки менее 5 мм паспортные данные выбиваются на пластине, припаянной к баллону, или наносятся краской.

4.4.2. Оборудование для перемещения и хранения жидкостей

Перемещение жидкостей по трубопроводам осуществляется в основном с помощью насосов, которые сообщают жидкости необходимый напор для преодоления гидравлических сопротивлений в трубопроводах и аппаратах и создания необходимого расхода. В производственных установках стараются осуществить принцип самотека, когда движение жидкости происходит от высшего уровня к низшему под действием силы тяжести.

В зависимости от принципа действия различают следующие устройства для перемещения жидкостей:

- объемные насосы, в которых происходит вытеснение жидкости из замкнутого пространства насоса движущимся возвратно-поступательно или вращающимся рабочим органом (поршнем, ротором и т.д.);
- лопастные или центробежные насосы, в которых при вращении лопастных колес возникают центробежные силы;
- вихревые насосы с быстро вращающимися рабочими колесами, под действием которых образуются вихри;
- струйные насосы, в которых движущая сила создается струей газа (воздуха), пара или воды;
- газлифты с образованием пены при подаче воздуха *(эрлифты)* или газа в жидкость;
- *монтежю* (монжусы) - устройства для передавливания жидкостей сжатым воздухом, газом или водяным паром, а также *сифоны.*

К объемным насосам относятся поршневые и ротационные насосы, устройство которых аналогично соответствующим компрессорам, диафрагмовые, шестеренные и другие насосы. В диафрагмовом насосе (рис. 4.26) перекачивание жидкости осуществляется под действием прогибающейся эластичной перегородки - диафрагмы, или мембраны, а в шестеренном насосе (рис. 4.27) - при вращении навстречу друг другу шестерен. Достоинства диафрагмовых насосов: возможность перекачки суспензий, сильно загрязненных и агрессивных жидкостей, а также полная защита привода от контакта с перекачиваемой средой.

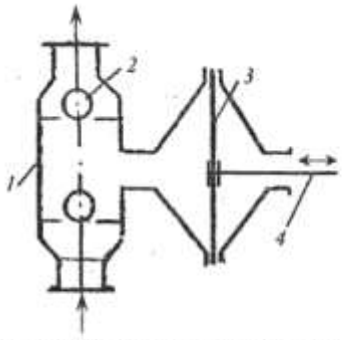


Рис. 4.26. Схема диафрагмового насоса: *1*–корпус; *2*–клапаны; *3*–диафрагма; *4*–шток

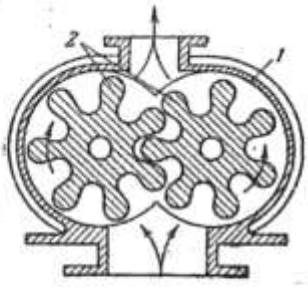


Рис. 4.27. Ротационный шестеренный насос: *1*–корпус; *2*–шестерни

Устройство и работа, а также особенности эксплуатации центробежных насосов для перекачки воды подробно рассматриваются в курсах гидравлики и

пожарной техники. На рис. 4.28 представлен герметичный центробежный насос, предназначенный для перекачки жидкостей, утечка которых недопустима вследствие их химической агрессивности, повышенной взрывопожароопасности, токсичности, радиоактивности или высокой стоимости. При вращении колеса жидкость непрерывно всасывается в насос через всасывающий патрубок, расположенный на оси крышки, движется от центра к периферии колеса, отбрасывается к спиралевидному корпусу насоса, переходящего в нагнетательный патрубок, установленный тангенциально на боковой части корпуса (траектория движения жидкости указана стрелками). Полная герметизация насоса достигается путем установки рабочего колеса *1* непосредственно на валу ротора *2* электродвигателя, который отделяется от обмоток статора *3* герметичной тонкой цилиндрической оболочкой *4* из немагнитного стойкого в перекачиваемой среде материала. Заключенный в оболочку ротор электродвигателя и подшипники погружены в перекачиваемую жидкость, которая служит смазкой для подшипников и охлаждающей средой для ротора, при этом отпадает необходимость в сальниковом уплотнении вала.

Газлифт (рис. 4.29) состоит из трубопровода для подачи сжатого газа *1*, смесителя *3* и подъемной трубы *2*. Газлифт работает следующим образом: сжатый газ от компрессора подается по трубопроводу в подъемную трубу через смеситель, где жидкость насыщается газом. Образовавшаяся газожидкостная смесь поднимается по трубе *2* вследствие того, что ее плотность меньше, чем у жидкости.

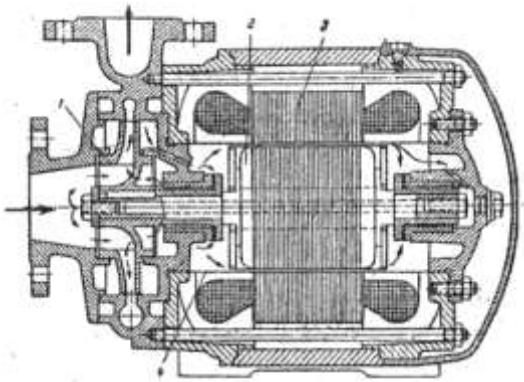


Рис. 4.28. Герметичный центробежный насос: *1*–рабочее колесо; *2*–ротор электродвигателя; *3*–статор электродвигателя; *4*–защитная цилиндрическая гильза

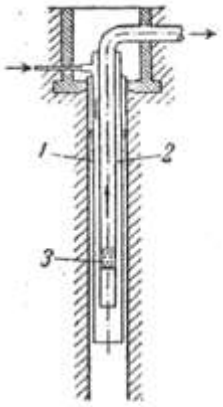
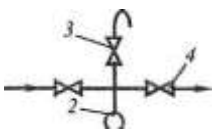


Рис. 4.29. Схема газлифта

На рис. 4.30 показан аппарат (монтежю или монжус), служащий для передавливания жидкостей сжатым газом. Подача жидкости в монтежю *1* осуществляется по линии *2* под действием вакуума, который создается вакуум-насосом, соединенным с монтежю линией *5*, или самотеком при открытой дыхательной линии *4*. Пере-давливание жидкости производят при подаче в аппарат сжатого газа (воздуха, инертного газа или пара) по линии *3*. Под действием давления газа, обычно не превышающего 0,3-0,4 МПа, жидкость поднимается по трубе 7 и поступает в нагнетательный трубопровод *8*. Для контроля давления служит манометр *6*, а для защиты аппарата от чрезмерного



повышения давления имеется предохранительный клапан (на схеме не показан).

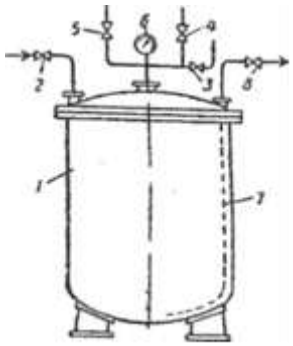


Рис. 4.30. Монтежю

Подъем и всасывание жидкости при помощи с и ф о н а (рис. 4.31) происходит за счет атмосферного давления. Для приведения в работу сифон предварительно заполняют жидкостью до смотрового фонаря *2* при помощи вакуум-насоса, присоединенного к линии *4*, при закрытой напорной линии. Затем вакуум отключают и открывают задвижку на расходной линии 5 до полного опорожнения емкости 1. Прекращение действия сифона достигается при открывании задвижки на воздушнике *3*.

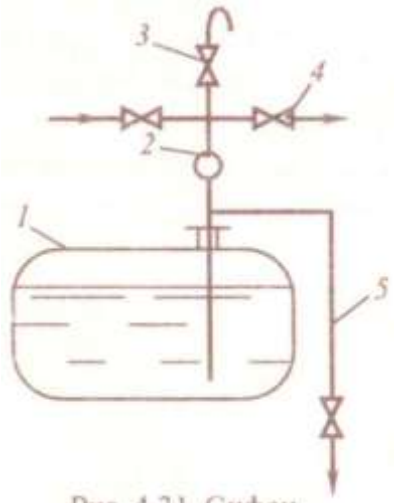


Рис. 4.31. Сифон

К недостаткам монтежю и сифона относятся: периодичность работы аппаратов, наличие вспомогательного дорогостоящего оборудования (вакуум-насосов и компрессоров), небольшая производительность. К достоинствам указанных устройств необходимо отнести: возможность перемещения агрессивных и опасных жидкостей, возможность создания компактных передвижных установок (например, с сифоном) и их использования для аварийного опорожнения емкостного оборудования, возможность перемещения сильно загрязненных жидкостей.

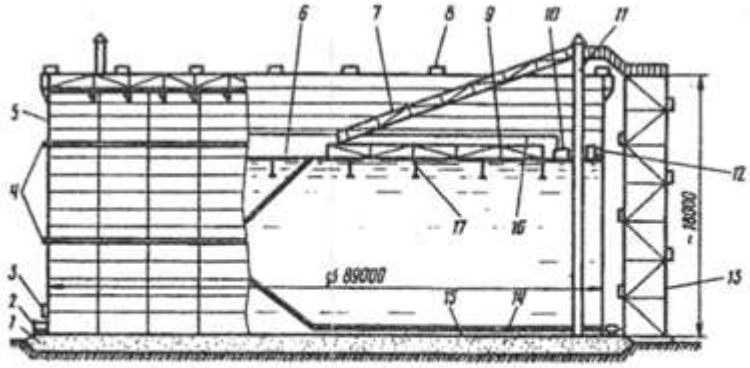


Рис. 4.32. Схема вертикального стального резервуара с плавающей крышей: *1*–основание резервуара (песчаная подушка); *2*–приемо-раздаточный патрубок с хлопушкой; *3*–узел управления хлопушкой; *4*–кольца жесткости; *5*–стальной корпус; *6*–стальная мембрана; *7*–катучая лестница; *8*–пеногенераторы; *9*–опорная ферма; *10*–понтонное кольцо; *11*–направляющие; *12*–затвор; *13*–шахтная лестница; *14*–линия удаления атмосферных осадков; *15*–днище; *16*–бортик удержания пены; *17*–опоры

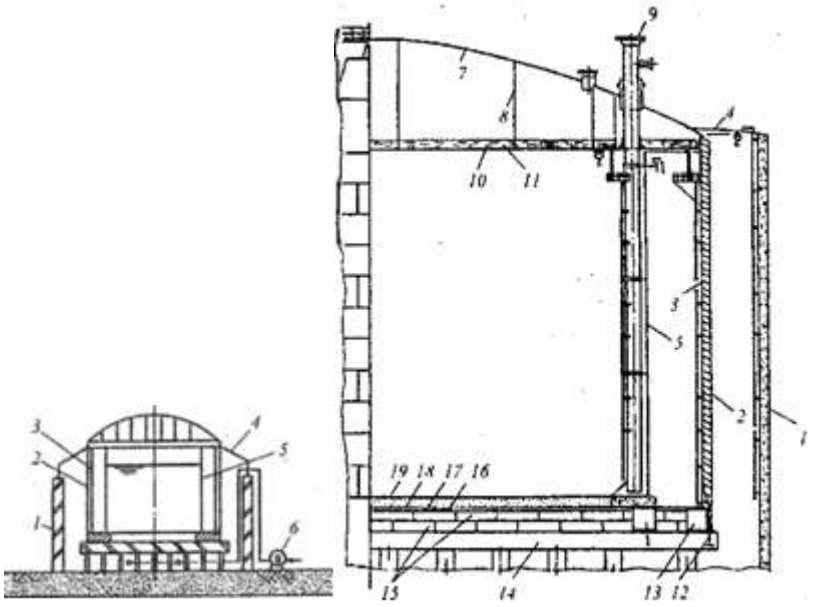


Рис. 4.33. Схема изотермического хранилища сжиженного пропана: 1-защитная железобетонная стена; 2-теплоизоляция с защитным кожухом; 3-стальной корпус; 4-н*авес для защиты от осадков; 5-гер-метичный металлический экран;* 6*-вентилятор; 7-наружняя стальная крыша; 5-стержни;* 9*-приемо-раздаточный патрубок; 10-подвес-ной металлический потолок; 11, 15-теплоизоляция; 12-кольце-вая стальная балка; 13-деревян-ные блоки; 14-свайное основание; 16-песчаная подушка; 17-наружное стальное днище; 18-железобетонное днище; 19-внутреннее стальное днище*

Пожароопасные жидкости хранят в различных по типу и конструкции аппаратах и емкостях: резервуарах, цистернах, баках, бочках и тому подобном оборудовании. Широко применяющиеся в промышленности резервуары для хранения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, а также сжиженных углеводородных газов бывают наземными и подземными; вертикальными, горизонтальными; сферическими, цилиндрическими и др.; стальными, железобетонными или выполненными из эластичных полимерных материалов; со стационарными крышами или с плавающими (с понтонами) и т.д. Устройство вертикального стального резервуара с плавающей крышей

емкостью 100000 м^3 (РВСПК-100000), предназначенного для хранения легковоспламеняющихся жидкостей, показано на рис. 4.32.

Сжиженные углеводородные газы хранят под давлением в цилиндрических, каплевидных или сферических резервуарах (см. рис. 4.24), а при атмосферном давлении - в изотермических хранилищах. В изотермическом хранилище (рис. 4.33) сжиженный газ хранится при температуре несколько ниже своей температуры кипения. Избыточные пары углеводородов, образующиеся при испарении продукта, отсасываются из газового пространства хранилища, сжимаются компрессором, охлаждаются в холодильнике, дросселируются, конденсируются и в жидком виде закачиваются в хранилище, то есть для каждого вида хранимого сжиженного газа в товарном парке должна быть криогенная установка (установка глубокого холода). Такие хранилища имеют хорошую теплоизоляцию.

Вместимость резервуаров колеблется в широких пределах: от 100-2000 м^3 (горизонтальные цилиндрические, шаровые и каплевидные резервуары) до 100000 м^3 и более (вертикальные цилиндрические, подземные и другие резервуары).

4.4.3. Оборудование для перемещения и хранения твердых материалов

Твердые горючие материалы используются в технологических процессах в кусковом, измельченном или зернистом виде и в пылевидном состоянии. Во многих отраслях промышленности перерабатываются и используются натуральные, искусственные и синтетические волокнистые материалы и изделия из них. /Для транспортирования этих материалов в технологических процессах широко используются конвейеры различных типов, системы пневмотранспорта и другое транспортное оборудование. Простейшие транспортные устройства - самотечные трубопроводы и лотки, которые можно использовать для перемещения материалов сверху вниз вертикально или под уклоном, значительно большим угла естественного откоса сыпучего материала.

Для транспортирования сыпучих или компактных материалов в горизонтальном или наклонном направлении применяются *транспортеры,* а для перемещения сыпучих материалов в вертикальном направлении или под большим углом к горизонту - *элеваторы,* или *нории.*

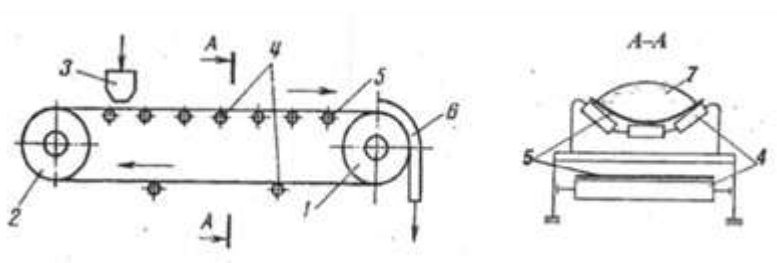


Рис. 4.34. Схема ленточного транспортера: 1-ведущий барабан; 2-ведомый барабан с натяжным устройством; 3-бункер питатель; 4-поддерживающие (опорные) ролики; 5-бесконечная гибкая лента; 6-ссыпное устройство; 7-материал

Транспортер, или ленточный конвейер (рис. 4.34), имеет несущий

элемент, выполненный в виде замкнутой в кольцо (бесконечной) ленты *5*, которая натягивается между ведущим *1* и натяжным *4* барабанами (ведущей и натяжной станциями). Чтобы избежать прогиба ленты под ее собственным весом и весом материала, она опирается на свободно вращающиеся ролики *4*. При устройстве по краям ленты двух дополнительных роликовых опор, расположенных под углом к горизонту, лента образует желоб, удобный для транспортирования сыпучих материалов. В зависимости от температуры и свойств транспортируемых материалов лента изготовляется из резинотканевых материалов, металлических пластин, шарнирно скрепленных друг с другом или других материалов. На приводной станции имеется двигатель, редуктор и защитное устройство, отключающее привод при перегрузке или заклинивании транспортера.

У э л е в а т о р а (рис. 4.35) к движущейся бесконечной ленте или цепям крепятся ковши, чаши или другие устройства для захвата и перемещения сыпучих и пылевидных материалов. В нижней части элеватора (башмаке) имеется загрузочное устройство 7, через которое необходимое количество материала поступает в элеватор. Движущиеся ковши, проходя через слой материала, зачерпывают его и перемещают вверх к ссыпному устройству *8*. Здесь ковши переворачиваются и материал высыпается в разгрузочное устройство.

Для транспортирования компактных грузов (деталей, контейнеров, тюков и т.д.) используются цепные конвейеры, которые устроены и работают практически так же, как и транспортеры или элеваторы, только на них груз подвешивается с помощью захватывающих устройств к цепи, натянутой между ведущей и ведомой звездочками и опирающейся роликами на монорельс.

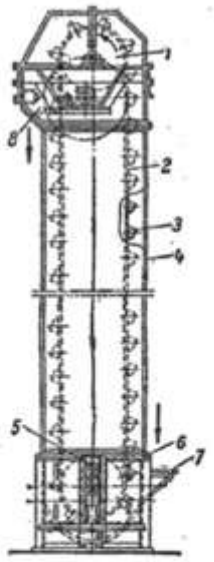


Рис. 4.35. Схема ковшового элеватора:
1–приводной барабан; *2*–лента; *3*–ковши; *4*–корпус; *5*–натяжной винт; *6*–натяжной барабан; *7*–загрузочное устройство; *8*–ссыпное устройство

Системы пневмотранспорта (рис. 4.36) представляют собой устройства для перемещения измельченных (зернистых), пылевидных и волокнистых материалов по трубопроводам в струе движущегося воздуха или инертного газа. Для создания потока газа обычно используются центробежные вентиляторы, а для отделения материала от газа - сепараторы центробежного типа (циклоны). В системах гидротранспорта в качестве носителя твердых материалов используется вода.

Зернистые, пылевидные и волокнистые материалы в производственных процессах хранят, в бункерах, контейнерах, бочках, мешках, тюках и тому подобном оборудовании. Твердые и волокнистые материалы часто хранят навалом на специально отведенных открытых площадках, под навесами или в помещениях закрытых складов. Схема зернохранилища (элеватора) приведена на рис. 4.37. Емкости для хранения зерна (бункеры или силосы) *3* представляют собой вертикальные аппараты круглого, шестигранного или квадратного сечения с крышкой и коническим днищем, угол наклона стенок которого больше угла естественного откоса хранимого материала. В нижней части бункера обычно имеется разгрузочное устройство - питатель или дозатор.

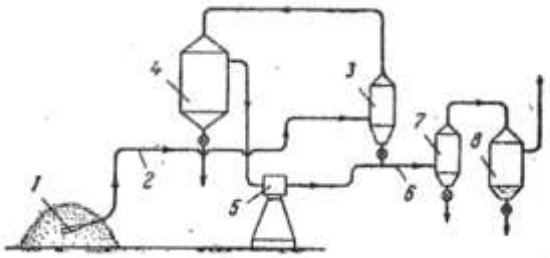


Рис. 4.36. Схема комбинированной системы пневмотранспорта:
1–приемное устройство; *2*–пневматический трубопровод, работающий под разрежением; *3*, *7*–приемные устройства; *4*, *8*–сепараторы (циклоны); *6*–пневматический трубопровод, работающий под давлением; *5*–вентилятор

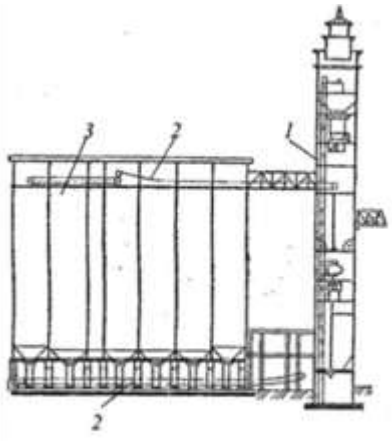


Рис. 4.37. Схема зернохранилища:
1–элеватор; 2–транспортеры; 3–бункеры

Плавкие материалы (например, серу, парафин и другие подобные вещества) можно хранить в рас плавленном состоянии в емкостных аппаратах, сходных по конструкции с аппаратами для хранения жидкостей, но

дополнительно оборудованных теплообменными устройствами и теплоизоляцией.

4.5. ТРУБОПРОВОДЫ, АРМАТУРА, КОМПЕНСАТОРЫ

4.5.1. Технологические трубопроводы

Трубопроводы предназначены для транспортирования жидких, газообразных и сыпучих веществ и материалов и представляют собой системы, собранные из труб обычно круглого сечения. Трубопроводы классифицируют по различным признакам, в частности, по территориально-производственному признаку, по роду транспортируемой среды, рабочим параметрам, конструкции и конструкционным материалам. По территориально-производственному признаку различают магистральные и технологические трубопроводы (общезаводские, межцеховые и внутрицеховые). В зависимости от величины рабочего давления стальные технологические трубопроводы бывают низкого давления (с условным давлением до 10 МПа включительно) и высокого давления (с условным давлением свыше 10 МПа до 320 МПа).

Технологические трубопроводы для транспортирования газообразных, парообразных и жидких сред в зависимости от давления, класса опасности транспортируемого вещества подразделяются на группы, а в зависимости от рабочих параметров среды - на категории. Например, трубопроводы с давлением среды до 10 МПа (включительно) подразделяются на 3 группы, каждая из которых подразделяется на 3-5 категорий.

В группу А включены трубопроводы для веществ с токсичным действием 1-3 классов опасности; в группу Б - для горючих газов, в том числе сжиженных, ЛВЖ и ГЖ, не обладающих токсичными свойствами. Трубопроводы для трудногорючих и негорючих веществ составляют группу В. В качестве примера в табл. 4.2 приведена классификация трубопроводов низкого давления.

Таблица 4.2 Классификация трубопроводов низкого давления группы Б

Среда	Категория трубопровода							
	I		II		III		IV	
	$P_{раб}$, МПа	$t_{раб}$, °С	$P_{раб}$, МПа	$t_{раб}$, °С	$P_{раб}$, МПа	$t_{раб}$, °С	$P_{раб}$, МПа	$t_{раб}$, °С
Взрыво- и пожароопасные вещества: а) горючие газы, в том числе сжиженные	Свыше 2,5	Свыше +300 и ниже –40	Вакуум от 0,08 (абс) до 2,5	От –40 до +300	–	–	–	–
	Вакуум ниже 0,08 (абс)	Независимо	–	–	–	–	–	–
б) легковоспламеняющиеся жидкости	Свыше 2,5	Свыше +300 и ниже –40	Свыше 1,6 до 2,5	От +120 до +300	До 1,6	От –40 до +120	–	–
	Вакуум ниже 0,08 (абс)	Независимо	Вакуум выше 0,08 (абс)	От –40 до +300	–	–	–	–
в) горючие жидкости	Свыше 6,3	Свыше +350 и ниже –40	Свыше 2,5 до 6,3	Свыше +250 до +350	Свыше 1,6 до 2,5	Свыше +120 до +250	До 1,6	От –40 до +120
	Вакуум ниже 0,003 (абс)	То же	Вакуум ниже 0,08 (абс)	То же	Вакуум от 0,08 (абс)	От –40 до +250	–	–

Группа трубопровода для транспортирования смеси, состоящей из нескольких компонентов, устанавливается по компоненту, требующему отнесения трубопровода к более высокой группе. В зависимости от категории и группы трубопровода подбирается тип труб, их материал, определяются условия изготовления, контроля, испытания и эксплуатации. Так, например, для веществ групп А и Б при изготовлении стальных трубопроводов низкого давления рекомендуется использовать бесшовные трубы, эксплуатация которых в зависимости от марки стали допускается при температуре до 700 °С. На выбор прямошовных или спиралешовных электросварных труб для тех же сред помимо марок сталей оказывают влияние рабочие параметры (температура, давление).

Для управления работой и обеспечения нормальных условий эксплуатации трубопроводы снабжаются приборами для измерения температуры и давления среды, указателями расхода, запорной, регулирующей, предохранительной арматурой и, при необходимости, компенсаторами.

Так как промышленность выпускает трубы строго определенной длины (10-20 м), а протяженность технологических трубопроводов различна, то

монтаж труб осуществляют с помощью разъемных (фланцевых, ниппельных, муфтовых и сальниковых) и неразъемных (сварных, паяных, развальцованных и склеенных) соединений. Особые условия предъявляются к устройству трубопроводов со сжиженными горючими газами (СУГ). Трубопроводы для СУГ должны собираться на сварке. Фланцевые соединения допускаются только для присоединения к фланцевой арматуре и штуцерам оборудования. Резьбовые соединения на трубопроводах разрешаются лишь для присоединения резьбовой стальной арматуры и КиП.

Внутризаводские трубопроводы с горючими веществами прокладываются в основном над поверхностью земли на стойках и эстакадах. В особых случаях, которые перечислены ниже, трубопроводы теплоизолируют:

при необходимости предотвращения или уменьшения теплопотерь (для сохранения температуры, предотвращения конденсации, образования ледяных, гидратных или иных пробок и т.д.);

во избежание ожогов при температуре стенки выше 60 °С, а на рабочих местах и в проходах при температуре стенки выше 45 °С;

при необходимости обеспечения нормальных температурных условий в помещении.

После изготовления все технологические трубопроводы подвергаются испытаниям на прочность и плотность (гидравлическим или пневматическим), а также на герметичность. В процессе эксплуатации периодически производят ревизию трубопроводов.

Фланцевые соединения аппаратов и трубопроводов, сконструированные без учета изменения температуры технологической среды, а тем более оказавшиеся в зоне пожара, быстро теряют герметичность вследствие температурной деформации (удлинения) болтов или шпилек, выгорания прокладок, что приводит к выходу содержащихся в них горючих веществ наружу.

На рис. 4.38-4.40 приведены конструкции фланцевых соединений, которые по сравнению со стандартными фланцевыми соединениями обладают высокой герметичностью в условиях значительных колебаний температур технологической и окружающей среды. Данные фланцевые соединения также значительно дольше сохраняют герметичность, оказавшись в зоне пожара.

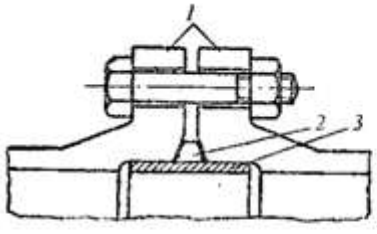


Рис. 4.38. Фланцевое соединение с линзовым уплотнением и втулкой: 1-фланцы; 2-линза; 3-втулка

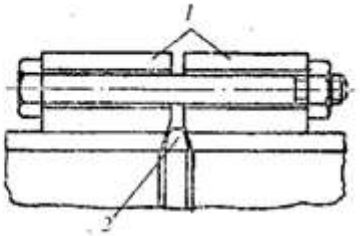


Рис. 4.39. Фланцевое соединение с увеличенной толщиной фланцев: *1*–утолщенные фланцы; *2*–линзовое уплотнение

На рис. 4.38 представлена конструкция фланцевого соединения с лин-

зовым уплотнением и втулкой. Герметичность такого соединения повышается благодаря применению втулки *3*, находящейся в специально расточенных канавках во фланцах. Температурное удлинение болтов или шпилек соединения при увеличении температуры продукта в трубопроводе или температуры окружающей среды не приводит к раскрытию фланцев, т. к. линейные размеры (в том числе и диаметр) герметизирующей втулки *3* также увеличиваются, что приводит к более плотному прилеганию ее к поверхности канавок в обоих фланцах и герметизации соединения.

При увеличении толщины фланцев (рис. 4.39) снижается деформация болтов, что повышает герметичность фланцевого соединения при работе в условиях коле-бания температуры среды в трубопроводе. Массивность фланцев уменьшает скорость их прогрева при воздействии внешнего источ-ника тепла и одновременно увели-чивает съем с них теплатранспортируемой по по трубопроводу средой, что приводит к повышению устойчивости соединения, оказавшегося в зоне пожара.

Совместно со стандартными фланцами можно применять удлиненные болты (шпильки) в болтовых соединениях вместе со специальными гильзами *2* (рис. 4.40), изготовленными из материала, коэффициент линейного удлинения которого больше коэффициента линейного удлинения материала болтов (шпилек), что также обеспечивает необходимую герметичность фланцевого соединения при внешнем температурном воздействии.

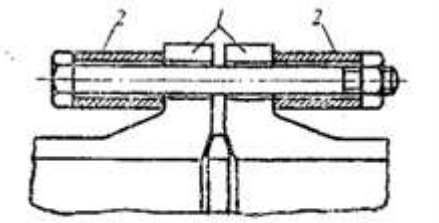


Рис. 4.40. Фланцевое соединение с гильзами:
1–фланцы; *2* гильзы

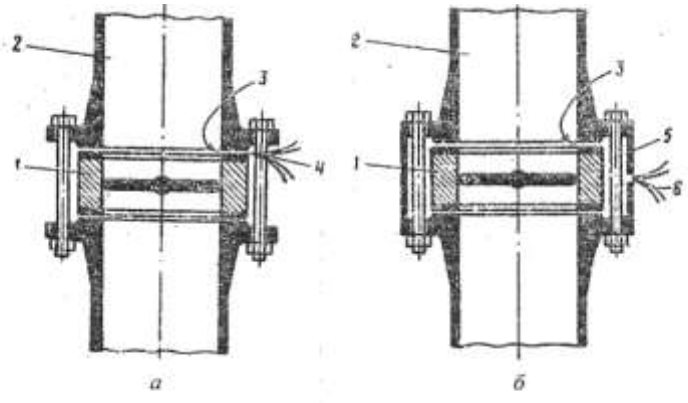


Рис. 4.41. Схемы установки заслонок в трубопроводе:
а – без защитного кожуха; *б* – с защитным кожухом
1–корпус заслонки; *2*–газопровод; *3*–место утечки; *4* и *6*–пламя; *5*–защитный кожух

Известен случай пожара, который произошел на заводе фирмы *Du Pont de*

Nemours & Co (США) в результате утечки нагретого горючего газа через фланцевое соединение трубопровода, работающего под давлением **2**,8 МПа. Так как температура газа была выше температуры самовоспламенения, то при его утечке через прокладку фланца заслонки образовалось слабое пламя. Первоначально небольшое пламя вызвало нагрев болтов и их температурное удлинение, что привело к полной потере герметичности соединения (рис. 4.41, *а)* и пожару в цехе. Была предложена и успешно эксплуатируется в настоящее время система с защитной обечайкой (кожухом), монтируемой на фланцах в местах установки заслонок (рис. 4.41, **б).**

4.5.2. Трубопроводная арматура

В зависимости от назначения арматура подразделяется на следующие группы:

- *запорную,* предназначенную для полного перекрытия потока среды;

предохранительную, обеспечивающую частичный выпуск среды при повышении давления в аппаратах сверх допускаемого и предотвращающую создание прямого или обратного потоков среды при повреждении оборудования;

регулирующую, применяемую для автоматического регулирования расхода или давления в системах управления процессами.

К запорной арматуре относятся: задвижки клиновые, вентили, краны.

К предохранительным устройствам относятся: клапаны предохранительные, предохранительные мембранные устройства, дыхательные клапаны, клапаны обратные и скоростные.

К регулирующей арматуре относятся редукционные и регулирующие клапаны, виды и конструкции которых рассматриваются в курсе «Производственная автоматика».

Наиболее важными эксплуатационными параметрами арматуры являются давление, температура и коррозионная активность среды. Поэтому материалы для изготовления арматуры должны обладать высокой прочностью, выносливостью, пластичностью и полной герметичностью. Материалы для изготовления арматуры также не должны иметь склонности к хрупкому разрушению, старению, должны быть коррозионно-устойчивы-ми, технологичными в изготовлении и обработке. Основным материалом для изготовления корпусов, крышек, маховиков и других деталей служит стальное и чугунное литье. При работе арматуры в условиях низких температур применяются высоколегированные стали и цветные металлы (в первую очередь латуни и бронзы) (табл. 4.3).

Таблица 4.3 Область применения материалов для изготовления арматуры

Материал	Рабочие условия		Назначение
	Температура стенки, °С	Давление среды, МПа (не более)	
ВСт5сп2	от –20 до 425	5	Элементы арматуры
20ГМЛ	от –60 до 450	Не ограничено	Запорная арматура
12Х18Н8ТЛ-Ш 10Х18Н9Л-П	от –253 до 600	то же	Арматура
10Х21Н6М2Л	от –40 до 300	то же	Коррозионно-стойкая арматура
СЧ 15, СЧ 20, СЧ 25	от –15 до 300	1,0	Корпусы арматуры
КЧ 30-6, КЧ 33-8, КЧ 35-10, КЧ 37-12	от –20 до 300	2,0	То же
ЧНХТ	от –15 до 300	1,0	– « –

Для изготовления золотников, седел, втулок применяют латунь, бронзу и металлокерамику. Уплотнительные поверхности арматуры в ряде случаев наплавляют твердыми сплавами или изготовляют из полимерных материалов.

Запорная арматура

Задвижки клиновые служат для перекрытия трубопроводов и регулирования расхода протекающей среды. Они обеспечивают плавное регулирование потока, исключающее гидравлический удар, допускают течение среды в двух направлениях и имеют малое гидравлическое сопротивление. Их можно применять также для вязких жидкостей.

На рис. 4.42 показана литая клиновая задвижка. В корпус задвижки 7 запрессованы два кольца *8* с тщательно обработанными привалочными поверхностями, между которыми располагается клиновидный диск *9.* Маховик *1* задвижки крепится на призматической шпонке к резьбовой втулке *2.* При вращении маховика вместе с ним вращается втулка. При этом шпиндель 5 вместе с клином перемещается вертикально. В крышке *4* задвижки имеются сальниковые уплотнения *3* и прокладка *6,* обеспечивающее герметичность внутреннего пространства. Широко распространены задвижки с дистанционным управлением. Условное обозначение задвижки клиновой литой: ЗКЛ2-100-16, где буквы «ЗКЛ» означают - задвижка клиновая литая; 2 - вариант исполнения; 100 -диаметр условного прохода в мм; 16 - условное давление в кгс/см^2.

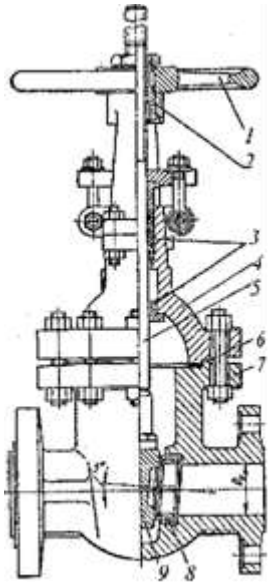
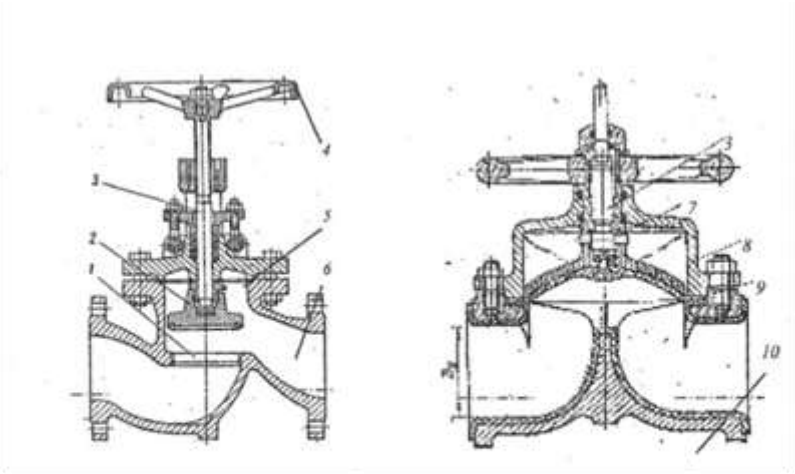


Рис. 4.42. Задвижка клиновая

Запорные вентили, как и задвижки, служат для герметичного перекрытия трубопровода и изменения расхода среды. Конструкция вентиля более сложная, чем задвижки. В то же время она обеспечивает меньший износ уплотняющей поверхности и, следовательно, более герметичное отключение. Гидравлическое сопротивление вентилей больше, чем задвижек, и их не применяют на трубопроводах с густыми и вязкими жидкостями. Кроме того, течение среды через них возможно только в одном направлении - под золотник. На рис. 4.43 показаны вентили золотникового и диафрагмового типов.



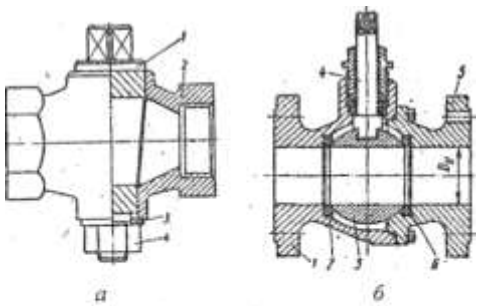
а *б*

Рис. 4.43. Вентили:
а — золотниковый; *б* - диафрагмовый; *1*-седло; 2-золотник; 3-шпиндель; 4-маховик; 5-крышка с сальниковым уплотнением; 6-корпус; 7-крестовина; 8-крышка с резьбовой втулкой; 9-диафрагма; УО-футеровка

Вентили диафрагмового типа используются на трубопроводах с агрессивными, токсичными и пожаровзрывоопасными продуктами, так как в них отсутствуют сальниковые уплотнения и их внутренние поверхности защищены коррозионно-устойчивыми футеровками.

Краны являются запорной арматурой высокой герметичности. Они имеют

меньшие габариты по сравнению с задвижками и вентилями и более просты по конструкции. Их гидравлическое сопротивление небольшое и они позволяют быстро перекрывать трубопроводы. В то же время с помощью кранов трудно регулировать расходы сред в трубопроводах и они требуют значительных усилий для работы с ними при больших диаметрах трубопроводов, в связи с чем максимальный диаметр условных проходов кранов составляет 400 мм.

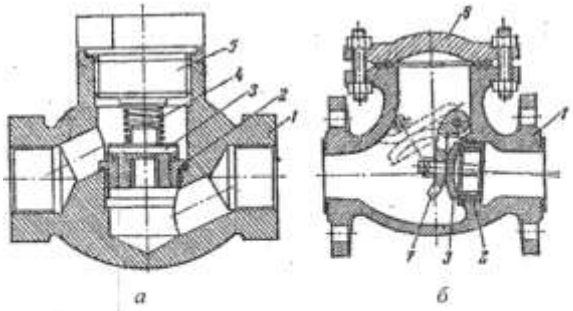


а *б*

Рис. 4.44. Краны:
а – натяжной с конической пробкой (*1*–пробка; *2*–корпус; *3*–шайба; *4*–гайка);
б – шаровой (*1*–корпус; *2*–уплотнительное кольцо из фторопласта; *3*–пробка шарообразная; *4*–шпиндель; *5*–крышка; *6*–кольцо уплотнительное)

В зависимости от формы пробки краны бывают конические и цилиндрические. Разновидностью арматуры данного типа являются шаровые краны, которые используются практически для любых диаметров трубопроводов. Основной недостаток кранов - опасность гидроудара при быстром перекрытии трубопровода. Край с конической пробкой показан на рис. 4.44, а, шаровой кран -на рис. 4.44, *б:*

Предохранительная арматура



а *б*

Рис. 4.45. Обратные клапаны:
а – пружинный подъемный; *б* – поворотный рычажный; *1*–корпус; *2*–седло; *3*–клапан; *4*–пружина; *5*–регулировочная втулка; *6*–крышка; *7*–поворотный рычаг

Обратные клапаны предназначены для самодействующего запирания трубопровода при движении среды в обратном направлении, т.е. при прорыве трубопровода перед клапаном. По конструкции различают подъемные и поворотные обратные клапаны (рис. 4.45). Пружинный подъемный клапан (рис. 4.45, *а)* может работать в любом положении, поворотный рычажный клапан, показанный на рис. 4.45, *б,* устанавливается только горизонтально.

Скоростные клапаны предназначены для отключения трубопроводов при резком увеличении скорости движения среды в них. Скоростные клапаны бывают пружинными и поплавковыми. На рис. 4.46 показаны пружинный скоростной клапан *(а)* и поплавковый скоростной клапан *(б)*. При резком изменении скорости движения среды (при прорыве трубопровода за клапаном) под действием сил трения поплавок *6* поплавкового скоростного клапана всплывает и прижимается клапаном *1* к седлу *2*, перекрывая проходное сечение трубопровода. Аналогично работает пружинный скоростной клапан: возросшая сила трения жидкости о клапан, возникшая при резком увеличении скорости движения жидкости при повреждении трубопровода, преодолевает сопротивление пружины и прижимает клапан к седлу. В обоих случаях клапаны остаются прижатыми к седлам силой, возникающей из-за перепада давления до и после клапана, и надежно перекрывают трубопровод до полной ликвидации аварийной ситуации. После ликвидации повреждения трубопровода производят выравнивание давления среды до и после клапана и клапан возвращается в первоначальное положение, открыв свободное сечение седла. В золотниках клапанов *2* имеются отверстия диаметром около 1 мм (рис. 4.46, *а)* или проточки сече-нием 0,5-1,0 мм^2 (рис. 4.46, *б),* благодаря которым происходит автоматическое выравнивание давления среды до и после клапана после ликвидации аварийной разгерметизации трубопровода. Поплавковые скоростные клапаны пригодны к установке только на вертикальных участках трубопроводов, а пружинные скоростные клапаны работают в любом положении. Для отсекания потоков сыпучих и пылевидных материалов применяются различные шиберные устройства.

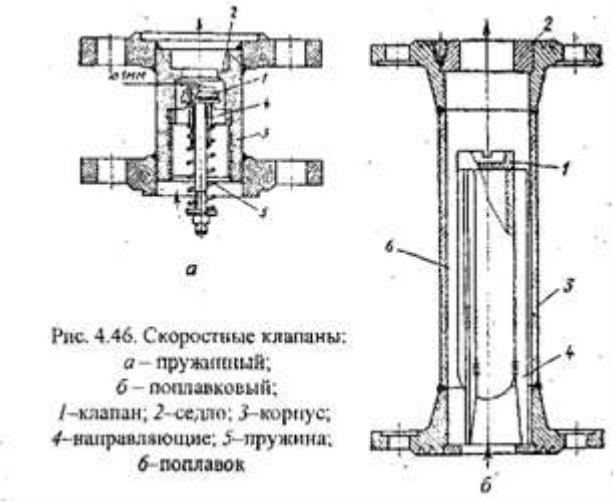


Рис. 4.46. Скоростные клапаны:
а – пружинный;
б – поплавковый;
1–клапан; *2*–седло; *3*–корпус;
4–направляющие; *5*–пружина;
6–поплавок

Предохранительные клапаны

Предохранительные клапаны (ПК) служат для автоматического выпуска из аппарата избыточного количества среды (газа, пара, жидкости) при повышении давления сверх допустимой величины. ПК применяют для защиты аппаратов от разрушения при чрезмерном повышении давления.

В промышленности применяются следующие виды предохранительных клапанов и устройств:

-грузовые предохранительные клапаны;

-рычажно-грузовые предохранительные клапаны;

-пружинные предохранительные клапаны;

-импульсные предохранительные устройства, состоящие из главного предохранительного клапана и управляющего импульсного клапана прямого действия;

-гидравлические затворы (гидравлические «клапаны»);

-другие специальные предохранительные устройства.

Принципиальные схемы основных видов ПК приведены на рис. 4.47.

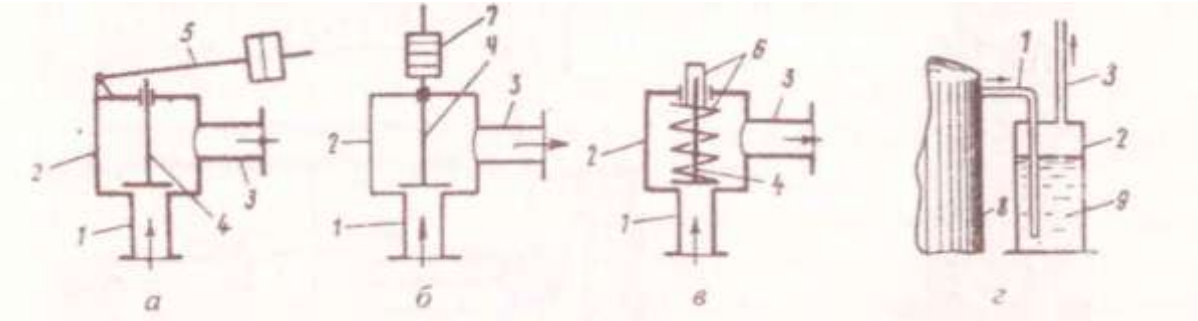


Рис. 4.47. Схемы предохранительных клапанов:
а – рычажно-грузовой; *б* – грузовой; *в* – пружинный; *г* – гидравлический (гидрозатвор);
1–патрубок для соединения с аппаратом; *2*–корпус; *3*–отводной патрубок; *4*–шток клапана с тарелкой; *5*–рычаг с противовесом; *6*–пружина с регулировочной втулкой; *7*–груз; *8*–защищаемый аппарат; *9*–запорная жидкость

Рычажно-грузовые ПК (а) применяются при относительно небольших давлениях для защиты оборудования с невзрывопожароопасными средами и применяются, в основном, для защиты паровых котлов и трубопроводов.

Грузовые предохранительные клапаны с прямым нагружением золотника *(б)* менее распространены, чем рычажно-грузовые, так как имеют небольшие пределы регулирования давления срабатывания Достоинства ры-чажно-грузовых и грузовых ПК: простота конструкции, постоянство нагрузки на золотник при его подъеме. Недостатки: рычажно-грузовые ПК устанавливаются в строго вертикальном положении, имеют большие габариты, склонны к вибрациям, их невозможно применять на подвижных установках.

Пружинные ПК (в) наиболее распространены в промышленности (рис. 4.48). Они применяются для защиты оборудования с любыми средами, имеют небольшие габариты, их можно устанавливать на подвижных установках, они имеют большие проходные сечения седел (до 140 мм), и рассчитаны на работу при высоких давлениях *(p_y16* МПа и более). К недостатку пружинных ПК необходимо отнести увеличение усилия на золотник при сжатии пружины во время срабатывания клапана.

Гидравлические предохранительные устройства (г) (гидрозатворы) применяются для защиты аппаратов, работающих под незначительным из-быточным давлением или вакуумом. Например, на резервуарах со стацио-

нарной крышей типа РВС устанавливаются гидравлические предохранительные клапаны, срабатывающие при избыточном давлении 200 мм водяного столба и вакууме 25-40 мм вод. ст. В качестве запорной жидкости в них используется соляровое масло (рис. 4.49).

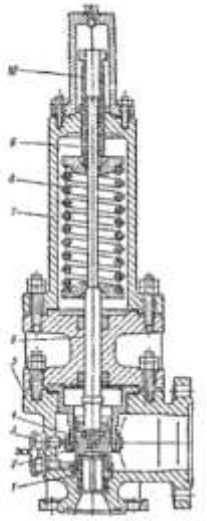


Рис. 4.48. Пружинный предохранительный клапан типа СППК:
1–седло с регулировочной втулкой; *2*–направляющая втулка; *3*–стопорный винт; *4*–золотник; *5*–корпус; *6*–разделитель; *7*–крышка; *8*–пружина; *9*–шток; *10*–резьбовая

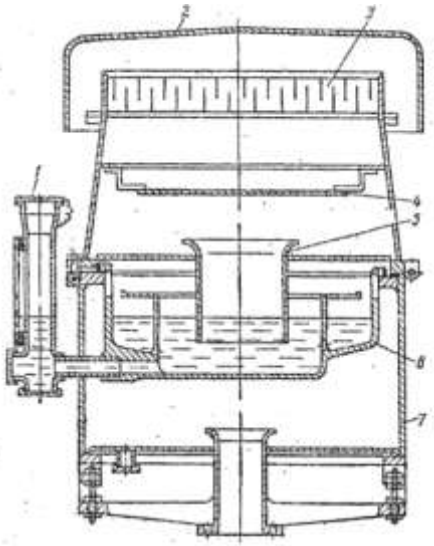


Рис. 4.49. Гидравлический предохранительный клапан типа КПГ:
1–заливное и замерное устройство; *2*–крышка *3*–кассетный огнепреградитель; *4*–отбойни брызг; *5*–патрубок; *6*–чашка; *7*–корпус с присо единительным фланцем

Общим недостатком всех механических ПК является невозможность защиты аппаратов от разрушения при быстром (взрывном) характере повышения давления в них, а также постоянные утечки среды из-за недостаточно плотного прилегания золотника к седлу клапана.

По способу выпуска среды различают ПК *открытого* и *закрытого* типов. Клапаны открытого типа сбрасывают среду из аппаратов непосредственно в атмосферу. Клапаны закрытого типа имеют специальный патрубок для присоединения отводящего трубопровода. Сбрасываемая из аппарата среда по этому трубопроводу может отводиться на безопасное расстояние (на свечу или на факел) или в специальную закрытую систему. Они применяются на аппаратах со взрывопожароопасными и токсичными средами.

Существуют и другие классификации ПК. Например, по высоте подъема тарелки клапана над седлом различают низкоподъемные ($h/d_c < 0{,}05$, где h - высота полного подъема золотника; d_c - диаметр сопла), средне-подъемные и полноподъемные ($h/d_c > 0{,}2$). Полноподъемные клапаны харастеризуются незначительным превышением давления полного открытия клапана над технологическим (рабочим) и практически полным отсутствием утечек при рабочем давлении. По назначению различают рабочие и контрольные ПК.

В обозначениях ПК, серийно выпускаемых нашей промышленностью, отражается устройство, подъемность клапана и условное давление. Примеры обозначения предохранительных клапанов:

-СППК4-80-16 - специальный полноподъемный пружинный фланцевый

стальной предохранительный клапан с условным проходом 80 мм на условное давление 16 кгс/см^2. Этот тип клапанов рекомендуется применять для неагрессивных жидких и газообразных нефтепродуктов при рабочей температуре до 450 °С. В зависимости от номера пружины ПК можно отрегулировать на давление срабатывания от 0,05 до 2 МПа;

-ППК-1 - низкоподъемный пружинный цапковый латунный предохранительный клапан с D_y 20 мм. Рабочая среда - пар, воздух при температуре до 225 °С; диапазон давлений срабатывания 0,2-0,6 МПа;

-гидравлические предохранительные клапаны для резервуаров имеют следующие маркировки:

-ПКС-50,..., ПКС-250 (цифра соответствует условному диаметру присоединительного фланца патрубка D_y в мм);

-КПСА-50,.., КПСА-500 (D_y 50, 100, 150, 200, 250, 350 и 500 мм);

-КПГ-150,..., КПГ-300 (D_y 150, 200, 250 и 350 мм);

-КПГА-250 и КПГА-350 (D_y 250 и 350 мм) и др. (табл. 4.4).

Таблица 4.4 Сравнительная характеристика гидравлических ПК

Тип	Условный диаметр, мм	Предельное давление, мм вод. ст.	Предельный вакуум, мм вод. ст.	Производительность, м^3/ч	Общая масса, кг
КПСА-250	250	200	40	300	243
КПГ-250	250	200	25-40	1500	187
КПГА-250	250	25-30	25-30	500	57

Правила выбора, установки и эксплуатации ПК (кроме гидравлических ПК) регламентируются «Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» (ПБ 10-115-96), утвержденными Госгортехнадзором России. Число ПК для защиты аппаратов, работающих под давлением, их размеры и пропускная способность должны быть выбраны таким образом, чтобы в аппарате не могло образоваться давление, превышающее рабочее (технологическое) давление на определенную величину, принимаемую из следующих соображений. Так как при нормальном протекании технологического процесса в допустимых пределах происходит незначительное колебание рабочего давления, то начало срабатывания клапана должно происходить при давлении более высоком, чем максимально возможное рабочее давление, чтобы обеспечивалась герметичность системы. Такое давление называется давлением настройки ПК - $p_н$ (давление настройки - наибольшее избыточное давление на входе в клапан, при котором обеспечивается заданная герметичность системы). На рис. 4.50 показаны диаграммы работы предохранительных клапанов различных типов.

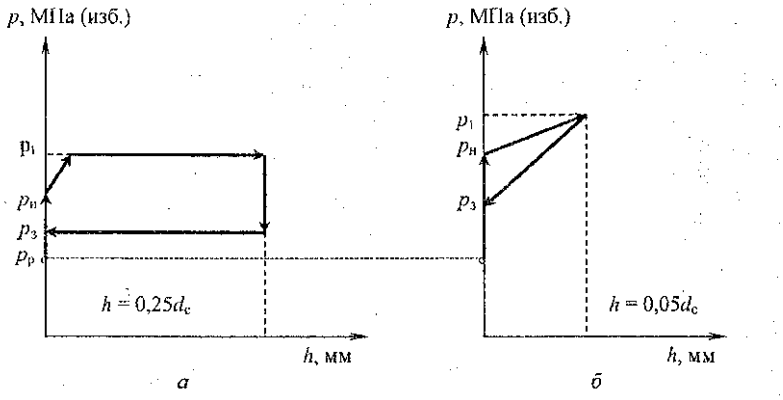


Рис. 4.50. Диаграммы работы предохранительных клапанов:
а – полноподъемный клапан; *б* – низкоподъемный клапан;
$p_р$ – рабочее (технологическое) давление; $p_э$ – давление закрытия клапана;
$p_н$ – давление настройки клапана; p_1 – давление полного открытия клапана

Давление настройки $p_я$ предохранительного клапана открытого типа определяется следующим образом:

а) для аппаратов с рабочим давлением ниже или равным 0,4 МПа - принимается равным 0,6 МПа (здесь и ниже указано избыточное давле-ние);

б) для аппаратов, работающих под вакуумом, - принимается равным 0,1 МПа;

в) для аппаратов с рабочим давлением выше 0,4 МПа, предназначен-ных для пожаровзрывоопасных веществ 1 и 2 классов опасности, величина давления настройки должна приниматься на 10 %, но не менее чем на 0,1 МПа выше рабочего давления;

г) для аппаратов, предназначенных для переработки углеводородного сырья, давление настройки во всех случаях должно приниматься:

-не менее 2 МПа - для этана;

-не менее 1,6 МПа на всасывающей линии и не менее 2,0 МПа на нагнетательной линии - для пропана;

-не менее 0,6 МПа - для бутана;

-не менее 0,3 МПа - для пентана;

д) для аппаратов, не содержащих пожаровзрывоопасных веществ, с рабочим давлением выше 0,4 МПа величина давления настройки должна приниматься на 10 %, но не менее чем на 0,1 МПа выше рабочего давле-ния.

Давление настройки предохранительного клапана закрытого типа (при направлении сбросов в систему с противодавлением) принимается меньше указанных ранее значений на величину противодавления в закрытой системе. В табл. 4.5 приведены значения давления полного открытия клапана.

Таблица 4.5

Давление настройки, МПа (изб.)	Давление полного открытия клапана, МПа (изб.)
Менее 0,3	$p_н$ + 0,05 МПа
От 0,3 до 6,0	1,15 $p_н$

Свыше 6,0	1,1 $p_н$,

С учетом давления срабатывания клапанов производят расчет оборудования на прочность. Так, если давление полного открытия клапана превышает давление настройки не более чем на 10 %, а также для случаев в) и г), расчетное давление принимается равным давлению настройки, т.е. $p = p_н$. В иных случаях расчетное давление принимается равным 90 % давления полного открытия клапана, т.е. $p = 0{,}9p_1$.

Если на элементы аппарата действует гидростатическое давление столба находящейся в нем жидкости, то оно учитывается при выборе расчетного давления этого элемента в случае, если его величина составляет 5 % и более от рабочего давления.

Предохранительные клапаны следует размещать: на вертикальных аппаратах - на верхнем днище (крышке), на горизонтальных аппаратах и трубопроводах - на верхней образующей цилиндра, т.е. в зоне газовой (паровой) фазы. На аппаратах колонного типа с большим числом тарелок (более 40) в случае возможности образования значительного перепада давления между кубовой и верхней частями колонны предохранительные клапаны следует устанавливать в кубовой части колонны (в зоне паровой части куба).

Предохранительные клапаны следует устанавливать на патрубках или трубопроводах, непосредственно подсоединенных к аппарату, которые должны быть защищены от замерзания в них рабочей среды. Диаметр патрубка, предназначенного для установки предохранительного клапана, должен быть не менее диаметра входного патрубка клапана. При установке на штуцере нескольких предохранительных клапанов (например, рабочего и резервного) поперечное сечение патрубка должно быть не менее 1,25 суммарной площади сечений входных патрубков клапанов, установленных на нем. Установка арматуры между сосудом и ПК, а также за ПК не допускается.

Сбросы паров и газов от предохранительных клапанов, установленных на аппаратах с пожаровзрывоопасными средами, следует направлять на факел, а если существует опасность уноса жидкости из аппарата вместе с паром или газом, то сбросы направляют в сепаратор, дренажную емкость и далее на факел.

Сбросы от предохранительных клапанов, установленных на аппаратах с веществами 1 и 2 классов опасности, следует направлять в специальную закрытую систему, из которой пары или газы можно возвращать в производство. При невозможности устройства такой системы сбрасываемые продукты допускается направлять в атмосферу после обязательного обезвреживания их в специальном поглощающем устройстве.

При организации сбросов пожаровзрывоопасных продуктов из аппаратов руководствуются следующими принципами:

-сбросы от ПК направляют в аппараты этой же системы, но работающие под меньшим рабочим давлением и снабженные предохранительными клапанами;

-сбросы жидкостей от ПК, установленных на полностью заполненных жидкостями аппаратах и трубопроводах, направляют в аппараты этой же

системы, частично заполненные жидкостью, работающие под меньшими давлением и снабженные ПК, установленными в зоне паровой фазы этих аппаратов.

Диаметр отводящего трубопровода после ПК должен быть не меньше диаметра выхлопного патрубка клапана.

При проведении проверочного расчета предохранительного клапана сравнивают пропускную способность существующего ПК с максимальным притоком среды, способным вызвать повышение давления, в защищаемый аппарат, т.е. проверяют выполнение условия безопасной эксплуатации аппарата:

$$G_{max} \leq G_{кл}, \qquad (4.2)$$

где G_{max} - максимальный приток среды в аппарат; $G_{кл}$ - пропускная способность ПК, кг/с.

Пропускную способность предохранительных клапанов в зависимости от агрегатного состояния сбрасываемой среды вычисляют по формулам:

-для газа (пара)

$$G_{кл} = 877{,}8\,\alpha_1 F B \sqrt{(p_1 + 0{,}1)\rho_1} \qquad (4{,}3)$$

-для жидкости

$$G_{кл} = 1397{,}2\,\alpha_2 F \sqrt{(p_1 - p_2)\rho_2} \qquad (4{,}4)$$

где F - площадь проходного сечения сопла ПК, м$_2$; α_1 и α_2 - коэффициенты расхода соответственно газа (пара) и жидкости через клапан; B - коэффициент, учитывающий физико-химические свойства газа (пара) при рабочих параметрах, принимаемый по таблицам или вычисляемый по формулам:

- при $\beta \leq \beta_{кр}$

$$B = 1{,}59\sqrt{\frac{k}{k+1}}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \qquad (4{,}5)$$

- при $\beta > \beta_{кр}$

$$B = 1{,}59\sqrt{\frac{k}{k-1}}\sqrt{\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}} \qquad (4{,}6)$$

здесь:

$$\beta = (p_2 + 0{,}1)/(p_1 + 0{,}1) \qquad (4{,}7)$$

$$\beta_{кр} = [2/(k+1)]^{k/(k-1)} \qquad (4{,}8)$$

p_1 - максимальное избыточное давление среды в аппарате, равное давле-

нию полного открытия ПК, МПа; p_2 - максимальное избыточное давление за ПК, МПа; ρ_1 - плотность реального газа (пара) в аппарате при давлении p_1 и температуре T_1 среды перед клапаном во время его срабатывания, кг/м^3; $\rho_1 = (p_1+0{,}1)\ 10^6/(A\ R\ T_1)$ (здесь: A - коэффициент, зависящий от параметров p_1 и T_1, определяемый в соответствии с Приложением 7 ГОСТ 12.2.085-82 «Сосуды работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности»; при низких давлениях (до 1-2 МПа) и средних температурах (до 200 °С) значение коэффициента A близко к 1;

R - удельная газовая постоянная в Дж/(кг*К)); ρ_2 - плотность жидкости перед клапаном при его срабатывании, кг/м^3.

Наибольшую трудность представляет определение максимального притока среды в аппарат, величину которого определяют исходя из следующих условий:

а) для ПК, установленных на технологических емкостях, сепараторах, абсорберах, адсорберах, разделителях и т.п. оборудовании - из условий подачи в аппарат среды при закрытых выходах из него по данным, которые приводятся в расчетно-пояснительной записке (п/з) к технологической части проекта или в технологическом регламенте, или по показаниям, которые зафиксировали записывающие приборы или управляющие компьютеры;

б) для ПК, установленных на ректификационных колоннах, - из условия сброса всего количества паров, поступивших и образовавшихся в аппарате:

если ПК установлен в верхней части колонны, то расход среды определяется суммарным количеством паров сырья и паров орошения;

если ПК установлен в кубовой части колонны, то расход среды определяется суммарным количеством паров сырья и паров, образующихся в нижней части колонны;

в) для ПК, установленных на жидкостных трубопроводах и аппаратах, полностью заполненных жидкостью с расчетным давлением, принятым по давлению питающего источника, - из условия сброса дополнительного количества жидкости G_x, образующегося в результате теплового расширения от действия солнечной радиации:

$$G_ж = V_c \rho_ж \beta_ж (T_2 - T_1)\ , \text{кг/с} \qquad (4.9)$$

где V_C - первоначальный объем жидкости в аппарате (трубопроводе) при температуре T_1, м^3; $\rho_ж$ - плотность жидкости при T_1, кг/м^3; $\beta_ж$- коэффициент объемного расширения жидкости в интервале температур T_1-T_2, К$^{-1}$; T_1 - рабочая температура жидкости в аппарате, К; T_2 - максимальная температура жидкости в аппарате (трубопроводе), К; принимают $T_2=323$ К;

г) для ПК, установленных на трубопроводах на стороне меньшего давления после регулятора давления, - из условия полного открытия регулирующего клапана и отсутствия расхода после него по максимальной производительности регулятора;

д) для ПК, установленных на нагнетательных трубопроводах после

насосов или компрессоров, - из условия полной производительности насосов или компрессоров при отсутствии расхода после них;

е) для ПК, установленных на обогреваемом трубопроводе с пожароопасными жидкостями или сжиженными газами между отключающей арматурой, - из условия сброса всего количества паров (газов) $G_п$, кг/с, образующихся при кипении жидкости:

$$G_п = F_{об} K (T_{сп} - T_{кип}) / r, \quad (4,10)$$

где $F_{об}$ - поверхность обогреваемого участка трубопровода между отсекающими задвижками, м^2; K - коэффициент теплопередачи при обогреве паровым или водяным спутником; принимают K = 12 кВт/(м^2*К); $T_{сп}$ — температура спутника, К; $T_{кип}$ - температура кипения жидкости при давлении сброса p_1, К; r - скрытая теплота испарения жидкости при давлении сброса p_1, кДж/кг;

ж) для ПК, установленных на складских емкостях для сжиженных газов и пожаровзрывоопасных жидкостей и для холодильного оборудования, - из условия пожара вблизи аппарата, в результате чего происходит испарение жидкости или тепловое расширение газа (ПК на подземных емкостях и теплообменных аппаратах на эти условия не. рассчитываются).

Расчет ПК в этом случае производится при условии полного отключения аппарата и прекращения подачи в него предусмотренного технологическим регламентом продукта:

- для сосудов, полностью заполненных жидкостью или содержащих жидкую и паровую фазы:

$$G_{ж,п} = F_{см} K_ж (T_г - T_{кип}) / r, \quad (4.11)$$

где $G_{ж,п}$ - избыточное количество жидкости, образующейся при ее тепловом расширении в условиях пожара, кг/с; $F_{см}$ - смоченная поверхность аппарата, м^2; $K_ж$ - коэффициент теплопередачи от окружающего воздуха к жидкости в аппарате; для теплоизолированного аппарата $K_ж$ = 2,9 кВт/(м^2*К); для не теплоизолированного аппарата $K_ж$ = 23,2 кВт/(м^2*К); $T_г$ - температура газовоздушной смеси (продуктов горения), омывающей при пожаре наружную поверхность аппарата; принимается $T_г$ = 873 К.

Смоченная поверхность аппарата определяется при максимальном уровне жидкости. Для ректификационных колонн смоченная поверхность определяется при максимальном уровне жидкости в кубе и на тарелках.

- для сосудов, содержащих пары или газы:

$$G_г = F_н K_г (T_г - T_н) / C_p T_н, \quad (4,12)$$

где $G_г$ - избыточное количество газа, образующегося при его тепловом

расширении в условиях пожара, кг/с; $F_н$ - полная наружная поверхность аппарата, м ; $К_г$ - коэффициент теплопередачи от окружающего воздуха к газу; для теплоизолированных аппаратов $К_г$ = 3 кВт/(м^2*К) и для не теплоизолированных аппаратов $К_г$ = 12 кВт/(м^2*К); $Т_п$- температура газов (паров) в аппарате при нормальном режиме работы, К; C_p- теплоемкость газа (пара) при давлении p_1, кДж/(кг*К).

Если максимальный приток среды в аппарат превышает пропускную способность предохранительного клапана, то следует установить на аппарате клапан с большим диаметром сопла, а если это невозможно, то несколько предохранительных клапанов.

В связи с тем, что детали ПК подвержены воздействию среды, находящейся в защищаемом аппарате, в целях предотвращения их коррозии, прикипания золотника к седлу или примерзания, образования отложений полимеров, продуктов кристаллизации, а также для предотвращения утечек через закрытый клапан взрыво- и пожароопасных, токсичных, экологически вредных и т.п. сред перед предохранительным клапаном устанавливается *мембранное предохранительное устройство* (рис. 4.51, *а)*. МПУ устанавливают и на выходной стороне предохранительного клапана для предотвращения вредного воздействия среды со стороны сбросной системы и для исключения влияния колебаний противодавления со стороны этой системы на точность срабатывания ПК (рис. 4.51, *б)*. Мембранное предохранительное устройство может также устанавливаться параллельно с предохранительным клапаном для увеличения пропускной способности системы сброса давления и в случае взрывного характера нарастания давления среды в защищаемом аппарате (рис. 4.51, *в)*.

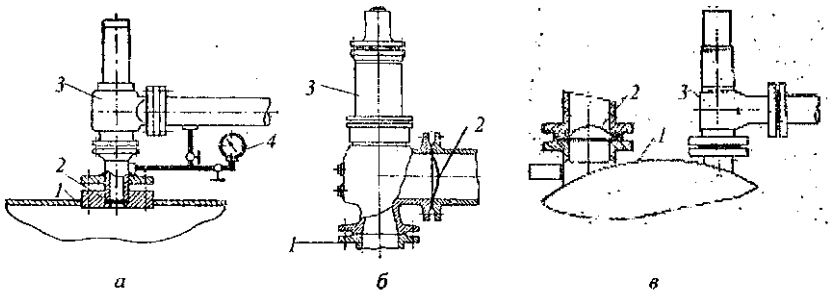


Рис. 4.51. Схемы установки предохранительного клапана совместно с мембранным предохранительным устройством (МПУ):
а – МПУ перед ПК; *б* – МПУ после ПК; *в* – МПУ параллельно с ПК;
1–защищаемый аппарат; *2*–МПУ; 3–предохранительный клапан; *4*–манометр

4.5.3. Температурные компенсаторы

Для компенсации температурных напряжений на технологических трубопроводах во избежание их деформации и разгерметизации применяют *компенсаторы*. Изменение длины ΔL, м, жестко закрепленного («защемленного») участка трубопровода можно определить по формуле

$$\Delta L = \alpha L(T_{кон} - T_{нач}), \quad (4,13)$$

где α - коэффициент линейного расширение материала трубопровода $К^{-1}$, L - длина жестко закрепленного участка трубопровода, м; $\mathbf{T_{нач}}$ и $\mathbf{T_{кон}}$ - ответственно начальная и конечная температуры трубопровода, К.

Температурные напряжения σ_t, МПа, возникающие при этом в материале, определяют из выражения

$$\sigma_t = E \Delta L / L, \quad (4,14)$$

где E - модуль упругости материала, МПа.

Из этих двух выражений с учетом условия прочности находим допускаемую разность температур [Д7], град, при которой не требуется компенсация:

$$[\Delta T] = [\sigma] / (E \alpha), \quad (4,15)$$

где $[\sigma]$ - нормативное допускаемое напряжение для материала трубопровода, МПа.

Принимаем для стальных труб $[\sigma]$=110-120 МПа, $E=2,1*10^5$ МПа, $\alpha = 11,5*10^{-6}$ $К^{-1}$ и определяем допускаемую разность температур, которая составляет 45-50 град. При больших значениях разности температур требуется компенсация возникающих температурных напряжений.

Трубопроводы, как правило, прокладываются с изгибами. При этом происходит самокомпенсация напряжений. При недостаточной величине самокомпенсации применяют температурные компенсаторы, которые бывают П-образные (Ω-образные), линзовые, волнистые и сальниковые.

П-образные компенсаторы представляют собой изогнутые в виде букв «П» или «Ω» участки трубопроводов, изготовленные изгибом труб или сваркой, с применением крутоизогнутых фитингов. Компенсаторы устанавливают на трубопроводах через 20-50 м с вертикальным компенсирующим элементом (рис. 4.52) или с горизонтальным компенсирующим элементом. Они обладают большой компенсирующей способностью (до 700 мм) и применяются при любых давлениях. Недостатки П-образных компенсаторов: громоздкость, необходимость применения специальных опор и достаточно большое гидравлическое сопротивление.

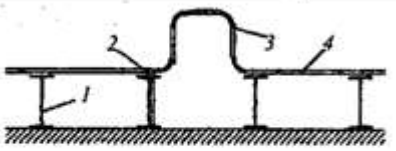


Рис. 4.52. П-образный компенсатор с вертикальным компенсирующим элементом: *1*–опора с подвижным креплением трубопровода; *2*–опора с неподвижным креплением трубопровода; *3*–П-образный компенсирующий участок трубопровода; *4*–трубопровод

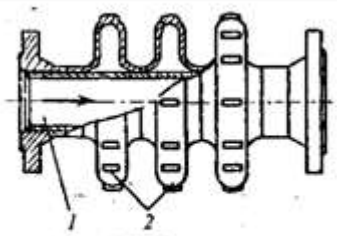


Рис. 4.53. Схема линзового компенсатора: *1*–направляющая гильза; *2*–линзы

Л и н з о в ы е к о м п е н с а т о р ы состоят из 1-4 последовательно соединенных линз (рис. 4.53) и применяются на условное давление до 1,6 МПа. Толщина стенок линз 2,5-4 мм. Во избежание изгиба трубопровода в месте установки линзового компенсатора в нем монтируется направляющая гильза, приваренная только с одной стороны, которая уменьшает также гидравлическое сопротивление компенсатора, т.к. предотвращает завихрение движущейся среды.

Более совершенны по конструкции в о л н и с т ы е к о м п е н с а т о р ы (рис. 4.54). Гибкий элемент *4* в таких компенсаторах представляет собой эластичную тонкую гофрированную оболочку (наподобие шланга пиотивогаза), которая может сжиматься, растягиваться, изгибаться. Гибкий элемент изготовляют из высоколегированных сталей, никеля, медноникелевых сплавов с лирообразным или U-образным профилем волны. Концы гибкого элемента приварены к патрубкам 1. Ограничительные кольца *3* предотвращают выпучивание гибкого элемента под действием давления и ограничивают изгиб его стенки, а опорные кольца 7 прижимают его к патрубку. Для защиты гибкого элемента предусмотрен кожух *5*, приваренный к стойкам *8*. Для уменьшения завихрения среды предусмотрена внутренняя обечайка *6*, приваренная только одним концом к патрубку. Шпильки *2* служат для растяжения и сжатия компенсатора при монтаже; они удаляются после установки компенсатора.

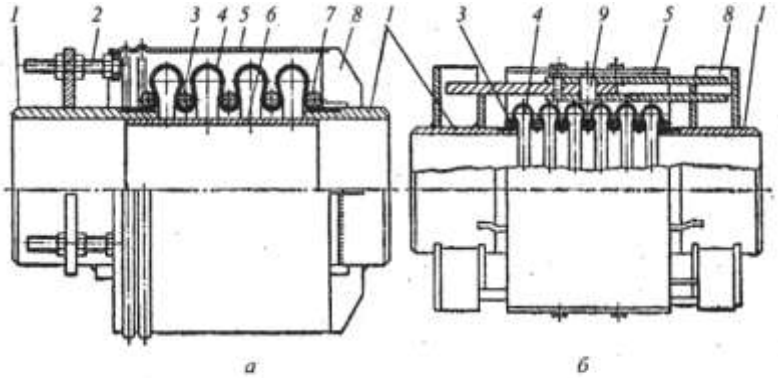


Рис. 4.54. Волнистые компенсаторы: *а* – осевой; *б* – универсальный (угловой)

Универсальный компенсатор (рис. 4.54, *б)* воспринимает деформации не

только в осевом направлении, но и позволяет оси трубопровода изогнуться на некоторый угол относительно осей шарниров *9,* которыми он снабжен.

Деформацию компенсатора, $\sigma_л$, м, состоящего из *z* линз или волн, определяют из выражения

$$\sigma_л = m*\alpha*\Delta T*z, \qquad (4.16)$$

где *m* - параметр компенсатора, характеризующий его податливость;

$$m = 0{,}06*a*(1 - \beta)*D_1^2 / (\pi*S^3); \qquad (4.17)$$

z - количество линз или волн в компенсаторе; β - отношение внутреннего диаметра D_1 линзы к наружному диаметру D_2 ($\beta = D_1 / D_2$); *a* - коэффициент, определяемый по табл. 4.6;

Таблица 4.6

p	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,92
a	6,03	3,95	2,5	1,6	0,99	0,58	0,32	0,145	0,06	0,036

S - толщина стенки линзы (волны) компенсатора, м; $\Delta T = T_{нач} - T_{кон}$ - максимальная разность температур, К.

Компенсатор надежно защищает трубопровод, если выполняется соотношение:

$$\delta_л \geq \Delta L. \qquad (4.18)$$

где ΔL - изменение длины трубопровода при максимально возможном перепаде температур.

В сальниковом компенсаторе, приведенном на рис. 4.55, компенсация теплового удлинения происходит не в результате упругой деформации, а путем перемещения конца трубы в сальнике. Сальниковые компенсаторы на трубопроводах с пожаровзрывоопасными средами применяются очень редко, т.к. они недостаточно надежны, сложны в эксплуатации, а рабочее давление среды при их использовании не должно превышать 0,5 МПа (изб.).

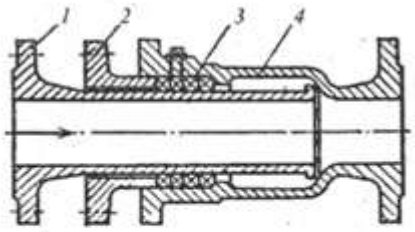


Рис. 4.55. Сальниковый компенсатор:
1–внутренняя труба; *2*–нажимная втулка;
3–мягкая набивка; *4*–корпус

Контрольные вопросы

Какие смеси называются дисперсными.и какие виды дисперсных систем Вы знаете?

Чем отличается суспензия от эмульсии или пены?

Чем отличается пыль от дыма или тумана?

Для каких целей производят перемешивание жидкостей и какими способами это можно сделать?

Как работает барботажный смеситель, его достоинства и недостатки?

Как работает смеситель с циркуляционным насосом, его достоинства и недостатки?

Как работает ленточный мешатель, его достоинства и недостатки?

Для каких целей производят отстаивание жидкостей и газов?

Как работает гребковый отстойник, его достоинства и недостатки?

Как работает непрерывно действующий отстойник эмульсий, его достоинства и недостатки?

Как устроен и работает электродегидратор?

Как устроена и работает пылеосадительная камера, ее достоинства и недостатки?

Как устроены и работают циклоны и гидроциклоны, их достоинства и недостатки?

Как устроен и работает жалюзийный пылеуловитель, его достоинства и недостатки?

Как устроен и работает электрофильтр, его достоинства и недостатки?

Для каких целей производят фильтрование жидкостей и газов?

Какие материалы используются в качестве фильтров?

Как устроен и работает нутч-фильтр, его достоинства и недостатки?

Как устроен и работает патронный фильтр, его достоинства и недостатки?

Как устроена и работает фильтрующая центрифуга, ее достоинства и, недостатки?

Как устроен и работает рукавный фильтр, его достоинства и недостатки?

Каким образом осуществляют перемещение газов по трубопроводам?

Как классифицируются машины для сжатия и перемещения газов?

Какие типы компрессоров Вы знаете?

Как устроен и работает поршневой компрессор, его достоинства и недостатки?

Как устроен и работает ротационный компрессор, его достоинства и недостатки?

Какие достоинства и недостатки по сравнению с поршневым компрессором имеет турбокомпрессор? .

Как устроен и работает пароструйный компрессор?

Какие аппараты используются для хранения газов?

Как устроен и работает мокрый газгольдер, его достоинства и недостатки?

Как устроены и работают сухие газохранилища?

Какие конструктивные отличия имеют баллоны для хранения различных газов?

Какие внешние отличия имеют баллоны для хранения различных газов?

Какими способами можно транспортировать жидкости по трубопроводам?

Какие устройства для перемещения жидкостей Вы знаете?

Как устроен и работает диафрагмовый насос, его достоинства и недостатки?

Как устроен и работает шестеренный насос?

Для чего предназначен и как работает газлифт?

Для чего предназначен и как работает монтежю?

Для чего предназначен и как работает сифон?

Какое оборудование используется для хранения жидкостей?

Как устроен и работает вертикальный стальной резервуар с плавающей крышей?

Как устроено и работает изотермическое хранилище сжиженного газа?

Какими способами можно транспортировать твердые и волокнистые материалы?

Как устроен и работает ленточный транспортер?

Как устроен и работает ковшовый элеватор?

Как устроена и работает комбинированная система пневмотранспорта?

Как устроено и работает зернохранилище?

Для чего предназначены технологические трубопроводы и как они устроены?

Как классифицируют трубопроводы?

Для чего трубопроводы оборудуют теплоизоляцией?

Какие конструкции фланцевых соединений обладают, повышенной герметичностью в условиях пожара?

Какие виды трубопроводной арматуры Вы знаете?

Для чего предназначена запорная арматура и какие устройства к ней относятся?

Для чего предназначена предохранительная арматура и какие устройства к ней относятся?

Для чего предназначена регулирующая арматура?

Какие требования предъявляются к трубопроводной арматуре?

Как устроена и работает клиновая задвижка, ее достоинства и недостатки?

Как устроен и работает запорный вентиль, его достоинства и недостатки?

Как устроен и работает пробковый кран, его достоинства и недостатки?

Для чего предназначены обратные клапаны и какие их виды Вы знаете?

Как устроен и работает пружинный обратный клапан?

Для чего предназначены скоростные клапаны и какие их виды Вы знаете?

Как устроен и работает пружинный скоростной клапан?

Как устроен и работает поплавковый скоростной клапан?

Для чего служат предохранительные клапаны?

Какие виды предохранительных клапанов Вы знаете?

Как устроен и работает рычажно-грузовой предохранительный клапан, его достоинства и недостатки?

Как устроен и работает пружинный предохранительный клапан, его достоинства и недостатки?

Как устроен и работает гидравлический предохранительный клапан?

Где и каким образом размещают предохранительные клапаны?

Куда направляют сбросы с предохранительных клапанов?

От чего зависит пропускная способность предохранительного клапана?

Что определяет максимальную пропускную способность предохранительного клапана, установленного в верхней части ректификационной колонны?

Что определяет максимальную пропускную способность предохранительного клапана, установленного на аппарате, полностью заполненном жидкостью?

Что определяет максимальную пропускную способность предохранительного клапана, установленного на нагнетательном трубопроводе после насоса или компрессора?

Что определяет максимальную пропускную способность предохранительного клапана, установленного на складской емкости для сжиженного газа?

Каким образом предотвращают коррозию деталей предохранительного клапана от воздействия находящейся в защищаемом аппарате среды?

Каким образом предотвращают утечку взрывопожароопасной или токсичной среды через предохранительный клапан?

Каким образом предотвращают вредное воздействие среды со стороны сбросной системы на точность срабатывания предохранительного клапана?

Для чего предназначены температурные компенсаторы?

Как обосновать необходимость применения температурного компенсатора?

Как устроен и работает П-образный компенсатор, его достоинства и недостатки?

Как устроен и работает линзовый компенсатор?

Как устроен и работает волнистый компенсатор и чем он отличается от линзового?

Как устроен и работает сальниковый компенсатор, его достоинства и недостатки?

Литература

Основная

Рабочая программа курса пожарная профилактика технологических процессов (5 лет обучения). -М.: ВИПТШ МВД России, 1995.

А л е к с е е в М. В., В о л к о в О. М., Ш а т р о в Н. Ф. Пожарная профилактика технологических процессов производств. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985.

Основы пожарной безопасности: Учебное пособие / Под ред. канд. техн. наук В.А. Копылова. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1990.

Дополнительная

Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. -М.: Изд-во «Химия», 1975.

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 10-115-96). -М.: Госгортехнадзор России, 1996.

В **и** х м а н **Г.** Л., Кр у г л о в С. А. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов: Учебник для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. -М: Изд-во «Машиностроение», 1978.

Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов (ПБ 03-108-96). -М.: Госгортехнадзор России, 1996.

ГОСТ 12.2.085-82. Сосуды работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности. -М.: Госстандарт России, 1983.

ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

5.1. СПОСОБЫ НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Тепловые процессы являются одними из наиболее распространенных процессов во всех без исключения отраслях промышленности, в сельском хозяйстве и быту. Например, нагревание необходимо для ускорения химических реакций, концентрирования (выпаривания) растворов, перегонки, сушки и других процессов; охлаждение применяется для конденсации паров, кристаллизации, разделения газовых смесей, сжижения газов и в тому подобных процессах.

Для нагревания веществ и материалов могут использоваться как прямые источники тепла, так и промежуточные теплоносители. Прямой нагрев в технике осуществляют с использованием теппа химических и ядерных реакций, электрической и солнечной энергий. Косвенный нагрев производят с использованием теплоносителей, к которым относятся: горячая вода; водяной пар; горячий воздух; топочные газы; нагретые зернистые материалы и насадки;

высокотемпературные теплоносители; горячие продукты производства. Прямое охлаждение веществ осуществляется с помощью холодильных агентов (хладагентов), которые используются в рабочих циклах холодильных машин (пары воды, аммиак, пропан, фреоны и другие хладагенты). Для охлаждения веществ широко применяются следующие хладоносители: атмосферный воздух; вода; холодильные рассолы и антифризы; охлажденные насадки; холодные продукты производства.

В каждом теплообменном процессе, реализующем косвенные способы теплообмена, принимают участие как минимум два агента: теплоноситель и хладоноситель. Теплоноситель отдает избыточное тепло и сам при этом охлаждается, хладоноситель, принимая тепло, охлаждает вещества и материалы.

Подвод тепла к нагреваемым продуктам в технике осуществляют теплопроводностью, конвективным и радиационным теплообменом, индукцией, а чаще - комбинацией указанных способов. Отвод тепла от охлаждаемых продуктов осуществляют, в основном, теплопроводностью и конвективным теплообменом.

Общее название аппаратов, используемых для осуществления теплообмена между двумя теплоносителями, - теплообменники. В зависимости от основного назначения теплообменного процесса (указан в скобках) наиболее часто встречающиеся в промышленности теплоиспользующие аппараты имеют следующие названия:

нагреватели, подогреватели (нагревание);
испарители (испарение);
кипятильники (кипячение);
выпарные аппараты (выпаривание);
плавильные печи (плавление);
холодильники (охлаждение);
морозильные камеры (замораживание);
конденсаторы, дефлегматоры (конденсация);
кристаллизаторы (кристаллизация).

В современной технике и технологии часто применяются аппараты, в которых одновременно протекает несколько процессов. Например, холодильники-конденсаторы (охлаждение и конденсация паров), паровые котлы (нагревание, кипячение и испарение) и другие аппараты.

5.2. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ

5.2.1. Тепловой баланс теплообменного аппарата

Тепловой баланс аппарата с учетом потерь тепла в окружающую среду записывается в виде:

$$Q_{гор} = Q_{хол} + Q_{п}, \qquad (5.1)$$

где $Q_п$ - потери тепла в окружающую среду.

В теплообменных процессах потери тепла не превышают 2-3 % и ими можно пренебречь. Тогда уравнение теплового баланса примет вид:

$$Q = Q_{гор} = Q_{хол} \qquad \textbf{(5.2)}$$

Учитывая, что при теплообмене между теплоносителями происходит уменьшение энтальпии (теплосодержания) горячего теплоносителя и увеличение энтальпии холодного теплоносителя, можно записать

$$Q = G_г (I_1 - I_2) = G_х (i_2 - i_1) \qquad (5.3)$$

где $G_г$ и $G_х$ - соответственно расход горячего и холодного теплоносителей; I_1 и I_2 - начальная и конечная энтальпии горячего теплоносителя; i_1 и i_2- начальная и конечная энтальпии холодного теплоносителя.

При нагревании и охлаждении веществ без изменения их агрегатного состояния тепловая нагрузка аппарата определяется из выражений:

$$Q_{гор} = G_г C_г (t_{г1} - t_{г2}) \quad и \quad Q_{хол} = G_х C_х (t_{х2} - t_{х1}) \qquad (5.4)$$

где $C_г$ и $C_х$ - средние удельные теплоемкости соответственно горячего и холодного теплоносителей.

При конденсации парообразного теплоносителя тепловую нагрузку аппарата определяют из выражения

$$Q_{гор} = G_г (I_1 - I_2) = Q_{пер} + Q_{конд} + Q_{охл} \qquad (5.5)$$

где $Q_{пер}$ - тепло, отдаваемое при охлаждении перегретого пара;

$$Q_{пер} = G_г C_п (t_1 - t_н) \qquad (5.6)$$

$Q_{конд}$ - тепло, отдаваемое при конденсации пара;

$$Q_{конд} = G_г r \qquad (5.7)$$

$Q_{охл}$ - тепло, отдаваемое при охлаждении конденсата;

$$Q_{охл} = G_г C_ж (t_н - t_2) \qquad (5.8)$$

$C_п$ и $C_ж$ - средние удельные теплоемкости пара и жидкости; r - теплота испарения; $t_н$ - температура насыщения; t_1 *и* t_2- начальная и конечная температуры соответственно пара и жидкости.

5.2.2. Передача тепла в теплообменном аппарате

Протекание процесса передачи тепла происходит самопроизвольно при наличии некоторой разности температур между горячим и холодным теплоносителями, которая называется движущей силой процесса теплопередачи, или температурным напором, $\Delta t_{ср} = t_r - t_x$. Чем больше температурный напор, тем выше скорость передачи тепла. Связь между количеством передаваемого в аппарате тепла и поверхностью теплообмена (основным размером теплообменной аппаратуры) определяется кинетическим соотношением, называемым основным уравнением теплопередачи, которое для установившегося процесса имеет вид:

$$Q = K \Delta t_{ср} F \tau \qquad (5.9)$$

где Q - количество тепла, передаваемое через всю поверхность теплообмена; K - среднее значение коэффициента теплопередачи между средами; F - поверхность теплообмена; τ - длительность теплообмена.

Коэффициент теплопередачи представляет собой количество тепла, передаваемое через единицу поверхности в единицу времени при температурном напоре, равном единице. Определение коэффициента теплопередачи представляет наибольшие трудности при расчете теплообменного аппарата, т.к. он зависит от характера и скоростей движения сред, участвующих в процессе теплообмена, от условий протекания теплообмена. Численную величину коэффициента теплопередачи через плоскую многослойную стенку можно найти из выражения

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \qquad (5.10)$$

где α_1 и α_2 - коэффициенты теплоотдачи от первой среды к стенке и от стенки ко второй среде соответственно; δ_i - толщина ***i****-го* слоя стенки; λ_i - коэффициент теплопроводности i-го слоя; n- число слоев.

Передача тепла теплопроводностью

Количество тепла, которое переносится путем теплопроводности через стенку, определяется в соответствии с законом Фурье и при установившемся

тепловом режиме для однослойной плоской стенки имеет вид:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{ст.1} - t_{ст.2})F \qquad (5.11)$$

где λ - коэффициент теплопроводности стенки; i_{ct1} и i_{ct2} - температуры наружных поверхностей стенки, находящейся в контакте с первой и второй средами соответственно; δ - толщина стенки.

Коэффициент теплопроводности показывает, какое количество тепла проходит в единицу времени через единицу поверхности при разности температур 1 град на единицу толщины стенки.

Коэффициенты теплопроводности металлов в Вт/(м*К): конструкционные стали обыкновенного качества и качественные - 46, стали легированные и высоколегированные - 17, чугуны - 45-90, алюминий - 200, медь - 350, латунь - 80. (Для сравнения коэффициенты теплопроводности газов находятся в пределах 0,006-0,16 Вт/(м*К); жидкостей 0,09-0,7 Вт/(м*К).)

Коэффициенты теплопроводности некоторых теплоизоляционных материалов в Вт/(м*К): асбест - 0,15; войлок шерстяной - 0,05; кладка из огнеупорного кирпича (при 1000 °С)- 1,05; магнезия в порошке - 0,07; стекловата - до 0,07; шлаковата - 0,076. Коэффициенты теплопроводности некоторых видов отложений в Вт/(м*К): водяной камень (накипь) - 1,2-3,5; окалина - 1,16; кокс-0,7; сернистое железо - 6,5; лед-2,3.

Передача тепла конвекцией

При передаче тепла конвекцией у поверхности стенки, вдоль которой движется теплоноситель и через которую проходит тепло, образуется пограничный слой. Через этот слой тепло передается за счет теплопроводности, а от пограничного слоя в массу (ядро) теплоносителя - преимущественно конвекцией. На теплоотдачу от стенки к теплоносителю (или от теплоносителя к стенке) существенное влияние оказывает характер движения теплоносителя. С повышением турбулентности потока перемешивание усиливается, что приводит к уменьшению толщины пограничного слоя и увеличению количества передаваемого тепла. Свободное движение теплоносителя, или естественная конвекция, возникает вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц теплоносителя. Вынужденное, или принудительное, движение теплоносителя возникает под действием насоса, компрессора, вентилятора или иного побудителя расхода.

Количество тепла, передаваемого конвекцией, для установившегося процесса (при условии, что коэффициент теплоотдачи имеет постоянное значение вдоль теплообменной поверхности) определяют по формуле

$$Q = \alpha (t_1 - t_{ст.1}) F \tau \qquad (5.12)$$

где α - коэффициент пропорциональности, который называется коэффициентом теплоотдачи (размерность совпадает с размерностью коэффициента теплопередачи).

На теплоотдачу влияет много факторов: режим и скорость движения теплоносителя, его физические свойства, форма и размеры теплообменной поверхности и другие факторы, что существенно затрудняет определение коэффициента теплоотдачи.

/Для определения коэффициентов теплоотдачи прибегают к экспериментам, а опытные данные обрабатывают при помощи теории подобия, в результате чего получают критериальные уравнения, выражающие зависимость между критериями подобия. Критерии подобия при передаче тепла конвекцией приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Критерий	Формула	Физический смысл
Нуссельта	$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$	Характеризует процесс теплообмена между теплоносителем и стенкой
Рейнольдса	$Re = \frac{\omega l}{\nu}$	Характеризует гидродинамический режим движения теплоносителя
Прандтля	$Pr = \frac{\nu}{a}$	Характеризует физические свойства теплоносителя
Грасгофа	$Gr = \frac{l^3 g \beta \theta_{част.}}{\nu^2}$	Характеризует режим движения теплоносителя при свободной конвекции

Все критерии подобия являются безразмерными. В них входят следующие величины:

ν - коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, м^2/с;

a - коэффициент температуропроводности, м^2/с;

β - коэффициент объемного расширения теплоносителя, 1/К;

ω - скорость движения теплоносителя, м/с;

l - определяющий геометрический размер, м;

$\boldsymbol{g}$ — ускорение силы тяжести, м/с^2; $\boldsymbol{g}$ = 9,81 м/с^2;

$\Theta_{част}$ - частный температурный напор, град.; $\Theta_{част} = t_1 - t_{ст.1}$. Ниже приводятся данные по основным, наиболее часто встречающимися видам конвективного теплообмена.

Теплоотдача при естественной конвекции. Естественная конвекция характеризуется движением отдельных частиц теплоносителя, возникающим вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц: частицы жидкости, соприкасающиеся с горячими стенками, нагреваются и становятся легче, в результате чего они поднимаются кверху, при контакте с холодными

стенками - они опускаются вниз.

Для определения коэффициента теплоотдачи а при свободном движении (при естественной конвекции) теплоносителя снаружи различных поверхностей пользуются следующим критериальным уравнением:

$$Nu = c\,(Gr\,Pr)^{n}\,(Pr/Pr_{ст})^{0,25} \qquad (5.13)$$

где ***c*** и n - константы, численные значения которых приведены ниже.

Таблица 5.2

Поверхность теплообмена	Gr Pr	*c*	*n*
Горизонтальные трубы	10^3–10^9	0,5	0,25
Вертикальные поверхности	10^3–10^9	0,76	0,25
То же	$>10^9$	0,15	0,33

В качестве определяющих геометрических размеров приняты: для сферических тел и горизонтальных цилиндрических поверхностей - диаметр, для вертикальных поверхностей - высота. В качестве определяющей температуры принята температура стенки при определении критерия $Pr_{ст}$ и средняя температура пограничного слоя, равная $0,5(\mathbf{t_1} + \mathbf{t_{ст.1}})$, где t_1 - температура жидкости в ядре, $\mathbf{t_{ст.1}}$ - температура стенки. Значение разности температур в критерии Грасгофа $\mathbf{\Theta_{част} = t_1 - t_{ст.1}}$.

Теплоотдача при вынужденной конвекции. При вынужденной конвекции теплоноситель движется вдоль поверхности теплообмена с определенной скоростью под действием внешней силы (например, силы давления, развиваемой насосом, компрессором, или силы тяжести).

1. Движение теплоносителя' по прямолинейным трубам и каналам:

- развитое турбулентное течение (Re > 10000):

$$Nu = 0,023\,Re^{0,8}\,Pr^{0,4}\,(Pr/Pr_{ст})^{0,25}\,\varepsilon \qquad (5.14)$$

- переходное движение (2300 < Re < 10000):

$$Nu = 0,008\,Re^{0,9}\,Pr^{0,43} \qquad (5.15)$$

- ламинарное движение (Re < 2300):

$$Nu = a\,(Re\,Pr)^{0,2}\,(Gr\,Pr)^{0,1}\,(Pr/Pr_{ст})^{0,25} \qquad (5.16)$$

где коэффициент *a* имеет следующие значения:
-для горизонтальных труб 0,74;
-для вертикальных труб при движении
-холодного теплоносителя вверх или
-горячего вниз 0,63;
-для вертикальных труб при движении
-холодного теплоносителя вниз или
-горячего вверх 0,85.

В представленных уравнениях определяющим геометрическим размером является внутренний диаметр трубы кольцевого сечения или эквивалентный диаметр канала. Определяющая температура при турбулентном или переходном режиме движения жидкости - средняя температура теплоносителя, при ламинарном режиме движения - температура пограничного слоя.

Коэффициент е учитывает влияние на коэффициент теплоотдачи дл и-ны каналов L и их диаметра *d* и изменяется в пределах от 1 *(L/d* $\geq$ 50) до 1,23 *(L/d=* 10 при $Re = 1*10^4$).

Для газов расчетные формулы упрощаются, т.к. для газов $Pr/Pr_{ст} = 1$.

Приближенные значения критериев Pr для газов следующие:
-одноатомные газы 0,67;
-двухатомные газы 0,72;
-трехатомные газы 0,8;
-четырех-и многоатомные газы 1,0.

2. Движение теплоносителя вне труб.

При движении теплоносителя в кольцевом канале между двумя трубами коэффициент а для теплообмена с поверхностью внутренней трубы определяют по уравнению

$$Nu = 0,023\,Re^{0,8}\,Pr^{0,4}\,(D_в/d_н)^{0,45}\,(Pr/Pr_{ст})^{0,25} \qquad (5.17)$$

где D_B - внутренний диаметр наружной трубы; $d_н$ - наружный диаметр внутренней трубы.

При движении в межтрубном пространстве кожухотрубного теплообменника, в котором отсутствуют поперечные перегородки:

$$Nu = 1,16\,(d_{экв}\,Re)^{0,6}\,Pr^{0,33}\,(Pr/Pr_{ст})^{0,25} \qquad (5.18)$$

где $d_{экв}$-эквивалентный диаметр межтрубного пространства.

Передача тепла лучеиспусканием

Количество тепла, переходящего от более нагретого тела с температурой T_1 к менее нагретому телу с температурой T_2 посредством лучеиспускания:

$$Q_л = C_{1-2}\,\varphi\,F\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \qquad (5.19)$$

где C_{1-2} - коэффициент лучеиспускания (излучения), Вт/(м^2*К^4); коэффициент C_{1-2} зависит от взаимного расположения и степени черноты ε излучающих поверхностей, имеющих температуры T_1 и T_2; φ - средний угловой коэффициент; F - площадь поверхности излучения, м .

Если одно тело, площадь поверхности излучения которого равна F_1, расположено внутри полого тела с площадью поверхности излучения F_2, то $F = F_1$, угловой коэффициент φ = 1 и

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_ч}\right)} \qquad (5.20)$$

где $C_1 = \varepsilon_1 * C_ч$ - коэффициент лучеиспускания меньшего тела; $C_2 = \varepsilon_2 * C_ч$ - коэффициент лучеиспускания охватывающего тела; ε_1 и ε_2 - степени черноты поверхностей меньшего и охватывающего тел; $C_ч$ = 5,68 Вт/(м^2*К^4) - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Если площадь F_2 очень велика по сравнению с площадью F_1, т.е. отношение F_1/F_2 близко к нулю, то коэффициент излучения $C_{1-2} = C_1$. Если $F_1 = F_2$ (две параллельные бесконечно большие поверхности), то

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_ч}} \qquad (5.21)$$

Значения степени черноты е для некоторых материалов:

-алюминий 0,05-0,07;
-железо оцинкованное 0,27;
-краска алюминиевая 0,27-0,67;
-краска масляная 0,78-0,96;

-сталь окисленная 0,74-0,96;
-сталь нержавеющая 0,64-0,76.

Суммарный коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией:

$$\alpha = \alpha_л + \alpha_к \qquad (5.22)$$

где $\alpha_л = Q_л / (T_1 - T_2) * F$ - коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием.

При расчете потерь тепла аппаратом, установленном в помещении, для определения общего коэффициента теплоотдачи можно применять следующее приближенное выражение (при 50 °С $\leq t_{ст} \leq$ 350 °С):

$$\alpha = 9{,}3 + 0{,}058 * t_{ст}\ , \text{Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}) \qquad (5.23)$$

5.2.3. Температурный напор

Для расчета поверхностных теплообменников помимо указанных выше величин, необходимо знать средний температурный напор (среднюю разность температур) *At* входящий в уравнение теплопередачи. При основных видах движения теплоносителей (прямотоке и противотоке) средний температурный напор определяют из выражения

$$\Delta t_{ср} = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{ln(\theta_{max} / \theta_{min})} \qquad (5.24)$$

Особенности определения максимального **(Θ_{max})** и минимального **(Θ_{min})** перепадов температур теплоносителей показаны на рис. 5.1.

Для прямотока: $\theta_{max} = t^{н}_{гор} - t^{н}_{хол}$ и

$$\theta_{min} = t^{к}_{гор} - t^{к}_{хол}\ , \qquad (5.25)$$

а для противотока: $\theta_{max} = t^{к}_{гор} - t^{н}_{хол}$ и

$$\theta_{min} = t^{н}_{гор} - t^{к}_{хол}\ . \qquad (5.26)$$

Здесь: индексы н и к показывают, что температура теплоносителя определяется на входе и на выходе из теплообменника (н - начало, к - конец процесса теплопередачи), а индексы гор и хол показывают, какой теплоноситель соответственно отдает тепло и принимает его.

Если отношение $\Theta_{max} / \Theta_{min} < 2$, то температурный напор с ошибкой не более 4 % можно вычислить по формуле

$$\Delta t_{ср} = \frac{\theta_{max} + \theta_{min}}{2} \qquad (5.27)$$

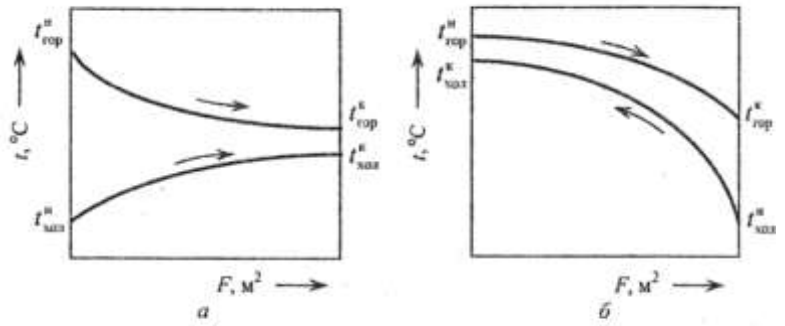


Рис. 5.1. Характер изменения температур теплоносителей:
а – прямоток; *б* – противоток

Значения физико-химических констант в критериальных уравнени: теплоотдачи отнесены к средней температуре теплоносителя, которая о ределяется из следующих соображений:

- для теплоносителя, у которого температура в теплообменнике изм няется на меньшее число градусов (индекс **м** в выражении):

$$\Delta t^{м}_{ср} = \frac{t^{н} + t^{к}}{2} \; ; \qquad (5.28)$$

-для второго теплоносителя, у которого температура в теплообменнике изменяется на большее число градусов (индекс б в выражении):

$$\Delta t^{б}_{ср} = t^{м}_{ср} \pm \Delta t_{ср} \; . \qquad (5.29)$$

Противоток выгоднее прямотока. Однако в следующих случаях противоток и прямоток практически равноценны: когда средний температурный напор значительно (более чем в 5 раз) превышает температурные перепады теплоносителей; когда температурный перепад одного из теплоносителей мал (на порядок и более) по сравнению с температурным перепадом второго теплоносителя или когда температура одного из теплоносителей не изменяется в процессе теплопередачи (например, при конденсации или кипении).

5.3. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛО- И ХЛАДОНОСИТЕЛЕЙ

Горячая вода, подогреваемая в водогрейных котлах или в теплообменниках - бойлерах, используется для нагревания продуктов до 130 - 150 °С. В некоторых случаях для нагревания до 300-350 °С используется перегретая вода под высоким давлением, близким к критическому ($р_{кр}$ = 22,5 МПа).

Достоинства горячей воды: высокий коэффициент теплоотдачи, хорошо транспортируется по трубопроводам, низкие требования к конструированию и устройству теплообменников (из-за относительно низкого давления горячей воды). Недостатки: значительное снижение температуры при транспортировке, трудность регулирования обогрева, а при использовании перегретой воды - опасность ее взрывного вскипания при нарушении герметичности системы. Поэтому при необходимости нагревания продуктов выше 120 °С предпочтение отдают водяному пару.

Водяной пар является наиболее распространенным теплоносителем для нагревания веществ и материалов до температур 150-170 °С. Преимущества водяного пара как нагревающего агента: высокий коэффициент теплоотдачи; большая скрытая теплота конденсации; возможность транспортировки по трубопроводам на значительные расстояния; равномерность обогрева, т.к. конденсация пара происходит при постоянной температуре; легкое регулирование обогрева.

Обычно применяют насыщенный пар небольшого давления (до 0,5-1,0 МПа), иногда перегретый на 20-30 °С пар (при большем перегреве снижается коэффициент теплоотдачи). В табл. 5.3 приведены параметры насыщенного водяного пара. Из этой таблицы видно, что для повышения температуры продукта примерно в два раза (со 100 до 200 °С) давление греющего насыщенного пара должно возрасти более чем в 15 раз.

Таблица 5.3

Теплотехнические свойства насыщенного водяного пара

Температура, °С	Давление, МПа	Плотность, кг/м^3	Теплота конденсации, кДж/кг
100	0,1033	0,598	2256,8
120	0,202	1,12	2202,4
140	0,369	1,97	2143,7
160	0,63	3,26	2085,1
180	1,02	5,16	2013,9
200	1,59	7,86	1938,6

Используемый в теплотехническом оборудовании водяной пар в зависимости от способа теплообмена называют «острым» или «глухим». Острый пар используют для нагревания продукта путем его непосредственного введения в жидкость и смешения с ней образующегося конденсата. Глухой пар нагревает продукт, не соприкасаясь с ним, а передает тепло через разделяющую их стенку.

Горячий воздух, предварительно подогретый в калориферах до относительно невысоких температур (50-150 °С), наиболее широко используется для

отапливания помещений и в процессах сушки. При использовании воздуха в металлургии (например, в производствах чугуна и стали) его нагревают в воздухонагревателях регенеративного типа (кауперах) до 900-1300 °С.

Топочные газы, представляющие собой газообразные продукты сгорания топлива различного вида с температурой от 400 до 1000 °С. Регулирование температуры топочных газов достигается разбавлением их свежим воздухом. Этот наиболее простой способ регулирования температуры топочных газов позволяет использовать их в качестве теплоносителя в сельском хозяйстве, на удаленных от промышленных центров объектах.

Недостатки обогрева горячим воздухом (или другими нагретыми газами) и топочными газами: низкий коэффициент теплоотдачи; малая объемная удельная теплоемкость газов, что вызывает необходимость использования значительных объемов газов; неравномерный обогрев нагреваемого материала; трудность регулирования обогрева, а при использовании топочных газов, кроме того, загрязнение нагреваемого вещества. В связи с указанными недостатками, а также трудностью транспортирования горячих газов без значительных потерь тепла топки для получения топочных газов располагают в непосредственной близи от обогреваемых аппаратов.

Высокотемпературные теплоносители (ВТТ) представляют собой группу веществ неорганического и органического происхождения, которые используются в интервале температур от 150 до 900 °С.

Различают три группы ВТТ.

а) жидкометаллические ВТ (литий, натрий, калий, ртуть, галлий, сплавы натрия и калия) обладают высокой термической стойкостью, но в то же время агрессивно воздействуют на конструкционные материалы. Кроме того, они обладают высокой токсичностью, а многие из них - пожа-ровзрывоопасны. Жидкометаллические ВТ используются в интервале температур 500-900 °С. В табл. 5.4 приведены свойства некоторых жидкоме-таллических высокотемпературных теплоносителей.

Жидкометаллические ВТ применяются, в основном, в атомной про-мышленности и энергетике.

Таблица 5.4

Характеристика жидкометаллических теплоносителей

Показатель	Жидкометаллические ВТ				
	Литий	Натрий	Калий	Ртуть	Галлий
Плотность, кг/м^3	534	968	862	13520	5904
Температура плавления, °С	180,5	97,98	63,55	–38,97	29,8
Температура кипения, °С	1336	883	–	357,25	2230
Температура самовоспл., °С	640	330–360	440–455	–	–
Температура горения, °С	1300	900	700	–	–
Особые свойства	С водой реагирует со взрывом; горит в CO_2	С водой реагирует со взрывом	С водой реагирует со взрывом	Ядовита	Агрессивен по отношению к железу, меди, титану

б) ионные ВТ, или расплавы солей, ($TiCl_4$, сплавы СС-1, СС-3, СС-4 и другие) применяются в интервале температур 350-550 °С. В табл. 5.5 приведены свойства некоторых ионных ВТ.

Таблица 5.5

Характеристики ионных теплоносителей

Показатель	Ионные ВТ			
	Четыреххлористый титан ($TiCl_4$)	СС-1 [x)]	СС-3 [xx)]	СС-4 [xxx)]
Температура плавления, °С	–23	–	–	142
Температура кипения, °С	135	–	–	–
Температура разложения, °С	2000	400	550	550
Особые свойства	Не горюч	Не горюч	Окисляют и нитруют органические вещества; при 700 °С и выше окисляют стали	

Примечания: x) состав: (22-25) % $AlCl_3$ + (75-78) % $AlBr_3$;
xx) состав: 50 % $NaNO_2$ + 50 % KNO_3;
xxx) состав: 40 % $NaNO_2$ + 7 % $NaNO_3$ + 53 % KNO_3.

в) органические высокотемпературные теплоносители (ВОТ) (минеральные масла, глицерин, дифенил, даутерм, силиконовые масла и кремнийорганические соединения и другие) применяются при температурах 250-400

°С. В табл. 5.6 приведены свойства некоторых ВОТ.

Таблица 5.6

Характеристики органических теплоносителей

Теплоноситель	Показатель				
	t. плавления, °С	*t*. кипения, °С	*t*. самовоспл., °С	*t*. вспышки, °С	*t*. разложения, °С
Глицерин $C_3H_5(OH)_3$	17,9	290	400	198	–
Дифенил $(C_6H_5)_2$	67–69	256	566	105	–
Дифенилоксид $(C_6H_5)_2O$	26,9	259,3	618	115	–
Даутерм [x)]	12,3	258	599	111	380
Масло АМТ–300	Выше –30	Выше 330	334	Выше 189	160–180
Масло Мобильтерм–600	Выше –17	Выше 350	296	Выше 185	160–180
Масло Мобильтерм–594	Выше –25	Выше 268	235	Выше 128	160–180
Силиконовые масла	–	350–450	–	80–250	–
Тетраметакрезоксилан	–36	440	–	225	–

Примечание. х) состав: 26,5 % $(C_6H_5)_2$+ 73,5 % $(C_6H_5)_2O$.

Все ВОТ являются горючими веществами, при. эксплуатации постепенно разлагаются с образованием твердых продуктов, загрязняющих теп-лообменные поверхности, и газообразных продуктов, что приводит к повышению давления в системах нагрева и снижению температуры вспышки ВОТ.

Жидкометаллические и органические высокотемпературные теплоносители, а также сплав СС-1 используются как в жидком, так и в парообразном состоянии. Остальные ВТТ - в жидком виде. В жидком виде ВТТ используются в замкнутых системах с одноконтурной и двухконтурной схемами обогрева.

Горячие продукты производства, или отходящие горячие продукты, применяются для нагрева поступающего на производство сырья с целью утилизации тепла и повышения экономической эффективности производства. В качестве примера можно отметить ступенчатый подогрев сырой нефти, поступающей на установку первичной перегонки, отходящими с установки продуктами: мазутом с t_p= 350 °С, фракциями от 350 до 100 °С и ниже. С другой стороны отходящие с производства горячие продукты предварительно охлаждаются сырой нефтью, что позволяет экономить хладоносители для охлаждения товарных нефтепродуктов до 30-40 °С перед подачей их в резервуары на хранение.

Атмосферный воздух в зависимости от времени года и места расположения предприятия может иметь температуру от минус 45 °С и ниже до плюс 35 °С и выше. Атмосферный воздух используется для конденсации паров и предварительного охлаждения горячих продуктов до 60-80 °С с целью экономии других хладоносителей.

Вода используется для конденсации паров и охлаждения горячих продуктов до температуры 15-30 °С. Вода рек, озер или из артезианских скважин после ее специальной подготовки (фильтрации и обессоливания) используется только для первоначального заполнения и подпитки систем охлаждения с, так называемой, оборотной водой. Температура оборотной воды летом достигает 30 °С и более. Во избежание выделения растворенных в воде солей и отложения их в виде накипи на тешюобменных поверхностях конечная температура не обессоленной воды на выходе из теп-лоиспользующих аппаратов не должна превышать 50 °С.

Холодные продукты производства, или отходящие холодные продукты, применяются для охлаждения поступающего на производство сырья с целью экономии энергетических затрат. В качестве примера можно привести использование холода газообразного чистого азота, выходящего из ректификационной колонны воздухоразделительной установки, применяемого для охлаждения сжатого в компрессоре воздуха в промежуточных теплообменниках до минус 50 °С.

Холодильные рассолы и антифризы используются для создания температуры ниже 5-20 °С. В качестве холодильных рассолов применяются водные растворы CaCl, NaCl и других солей. Примерами антифризов могут служить водные растворы этанола, глицерина, этиленгликоля или сами чистые продукты. Ниже, в табл. 5.7 и 5.8, приведены температуры замерзания некоторых низкотемпературных хладоносителей в зависимости от концентрации содержащегося в них основного продукта.

Следует еще раз отметить, что одни и те же переносчики тепла в одном случае могут использоваться как теплоносители, а в другом - как хладоносители в зависимости от вида протекающего процесса и его прямого предназначения.

Таблица 5.7

Характеристика рассолов

Концентрация, % масс.	Температура замерзания, °С	
	NaCl	$CaCl_2$
0,1	0,0	0,0
11,2	–7,7	–6,9
20,0	–16,6	–17,3
23,1	–21,2	–24,5
24,8	–9,3	–28,5
26,3	0,0	–33,2
29,9	–	–55,0
33,9	–	–21,2
37,3	–	0,0

Таблица 5.8

Характеристика антифризов

Концентрация, % (масс.)	Температура замерзания, °С		Концентрация, % (об.)	Температура замерзания, °С
	C_2H_5OH	$C_3H_5(OH)_3$		$C_2H_4(OH)_2$
40	–28,8	–	38,5	–23,3
50	–36,8	–23,0	44,0	–28,9
60	–44,1	–34,7	49,0	–34,4
70	–50,5	–38,9	52,5	–40,0
80	–	–20,3	–	–
90	–	–1,6	–	–

Следует еще раз отметить, что одни и те же переносчики тепла в одном случае могут использоваться как теплоносители, а в другом - как хладоносители в зависимости от вида протекающего процесса и его прямого предназначения.

5.4. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ДЛЯ НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ И ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В зависимости от агрегатного состояния теплоносителя существуют системы нагревания и охлаждения газами, парами и жидкостями. Для получения парообразного теплоносителя (греющего пара) используются паровые котлы, парогенераторы; для нагревания газообразного или жидкого теплоносителя используются различного типа подогреватели; для охлаждения газообразных или жидких хладоносителей используются холодильники.

Системы обогрева и охлаждения аппаратов могут быть *циркуляционного* и

открытого исполнения. В свою очередь циркуляционный обогрев может быть с *естественно!!* и *принудительной циркуляцией* теплоносителя. В схемах с циркуляционным обогревом теплоноситель постоянно циркулирует по замкнутому циклу за счет разности плотностей нагретого в теп-лоагрегате и затем охлажденного в теплоиспользующем аппарате теплоносителя (естественная циркуляция) или с помощью насоса (принудительная циркуляция) (рис. 5.2).

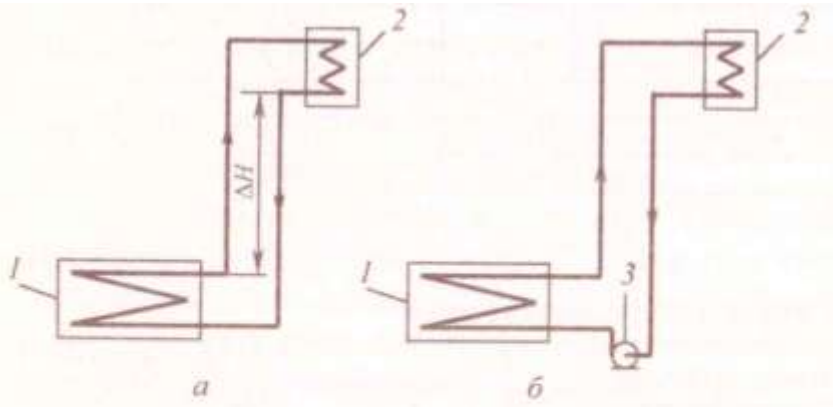


Рис. 5.2. Схемы циркуляционного обогрева аппаратов:
а – с естественной циркуляцией и *б* – с принудительной циркуляцией теплоносителя;
1–тепловой агрегат; *2*–теплообменный аппарат; *3*–насос

Для обеспечения естественной циркуляции перепад ΔH должен быть не менее 4-5 м; при этом скорость циркуляции составит около 0,2 м/с. Показанные на рис. 5.2 схемы называются также одно ко нту р н ы м и. В некоторых случаях (например, при проведении химических процессов с разнородными теплоносителями или на атомных электростанциях) применяются двухкон-турные схемы обогрева (рис. 5.3).

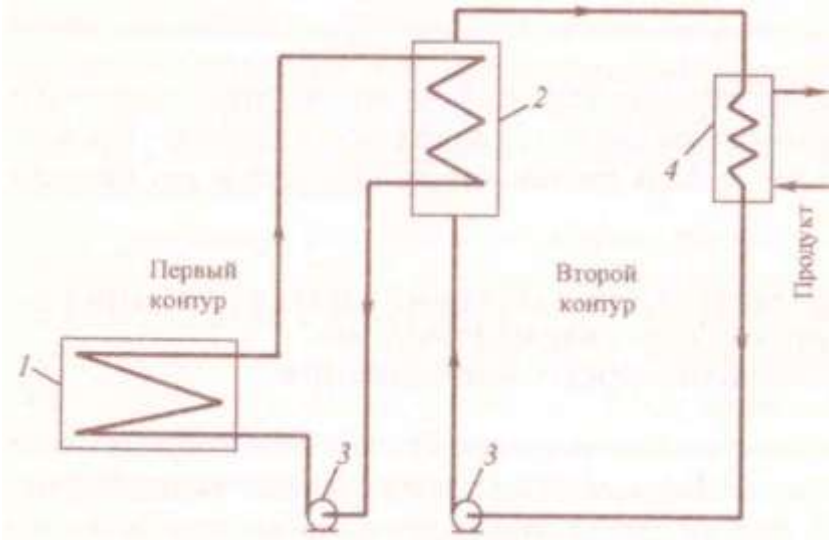


Рис. 5.3. Двухконтурная схема обогрева:
1–тепловой агрегат; *2*–теплоиспользующий аппарат первого контура; *3*–насосы; *4*–теплоиспользующий аппарат второго контура

При открытой схеме обогрева теплоноситель используется однократно без последующего использования или ИСпользуется в дальнейшем не для целей нагрева (например, в системах нагрева с использованием горячих отходящих продуктов производства или охлаждения с использованием холодных отходящих продуктов производства).

На рис. 5.4 приведена схема установки для нагрева жидкости острым паром. Барботер 7 представляет собой трубу с небольшими отверстиями, уложенную на дне емкости в виде спиралей, колец или нескольких прямолинейных участков. Барботажное устройство работает шумно с сильными вибрациями. Поэтому чаще применяют бесшумные нагреватели, в которых на паропроводе внутри аппарата (емкости) устанавливается смешивающее сопло с боковыми отверстиями. В сопле происходит смешение пара с жидкостью, которая подсасывается в него через боковые отверстия. Установленный на паропроводящей линии обратный клапан *4* предотвращает передавливание в нее жидкости из емкости 5, когда давление в паровой линии упадет ниже давления в емкости.

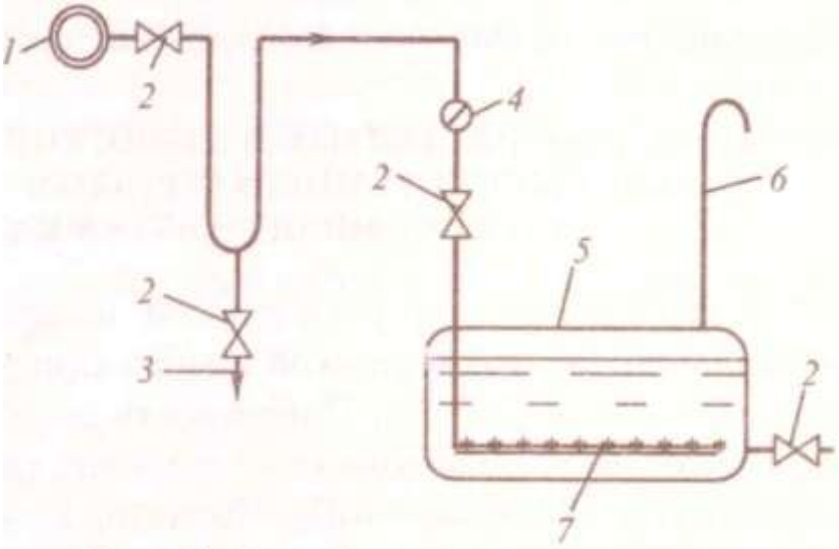


Рис. 5.4. Устройство для нагрева жидкости «острым» паром:
1–магистральный (заводской) паропровод; *2*–запорная арматура; *3*–дренажная линия; *4*–обратный клапан; *5*–емкость; *6*–дыхательная линия; *7*–барботер

В современных производствах используются разнообразные теплообменные аппараты, которые классифицируются по следующим признакам:

а) по способу подвода тепла различают следующие теплообменные аппараты:

поверхностные, в которых передача тепла осуществляется через стенку;

смесительные, в которых теплообмен происходит при непосредственном соприкосновении теплоносителей (см. рис. 5.4);

регенеративные, в которых теплопередача происходит циклически при попеременном прохождении греющего и охлаждающего агентов через специальный слой насадки;

б) по назначению различают холодильники, подогреватели, испарители, конденсаторы и другие аппараты;

в) по направлению движения теплоносителей различают прямоточные, противоточные и перекрестно-точные теплообменники;

г) по виду поверхности теплообмена и способу ее изготовления различают теплообменники:

с поверхностью теплообмена из труб: кожухотрубные, типа «труба в трубе», оросительные, змеевиковые, витые и другие;

с поверхностью теплообмена из листа: спиральные, пластинчатые, рубашечные, сотовые;

д) по виду конструкционного материала теплообменники бывают металлические, эмалированные, графитовые, стеклянные и т.д.

К теплообменникам предъявляются определенные требования (помимо общих требований к технологическому оборудованию, изложенных в главе **1):** компактность при высокой производительности и малом гидравлическом сопротивлении; высокий коэффициент теплопередачи; герметичность узлов,

разделяющих среды; возможность очистки теплообменных поверхностей; разборность конструкции для осмотра и ревизии.

5.5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАГРЕВАНИЯ ГОРЯЧЕЙ ВОДОЙ, ВОДЯНЫМ ПАРОМ, ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ И ГОРЯЧИМИ ПРОДУКТАМИ ПРОИЗВОДСТВА

А п п а р а т с р у б а ш к о й имеет теплообменную поверхность, образуемую наружной стенкой самого аппарата. Схема аппарата с рубашкой показана на рис. **5.5.** Поверхность теплообмена у такого аппарата не превышает **10** м^2, максимальное давление греющего пара (или иного теплоносителя) - не более **1** МПа. Несмотря на указанные недостатки, аппараты с рубашками находят применение в качестве реакторов, смесителей и тому подобных аппаратов, у которых внутри имеются различного рода приспособления: скребки, мешалки или другие устройства.

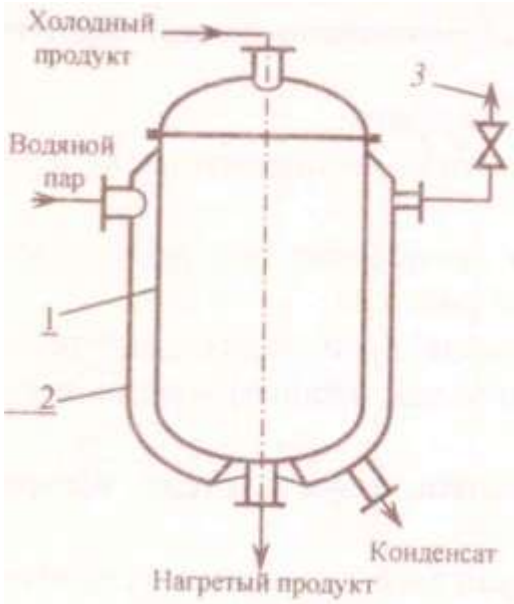


Рис. 5.5. Схема аппарата с рубашкой: *1*–обогреваемый аппарат; *2*–рубашка; *3*–продувочная линия

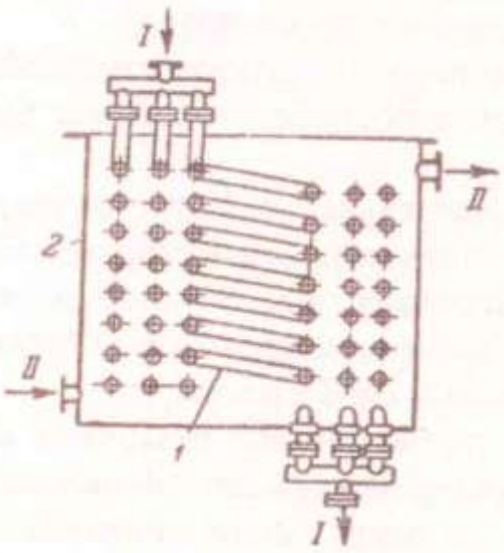


Рис. 5.6. Погружной теплообменник с внутренним спиральным змеевиком: *I*–теплоноситель; *II*–хладоагент

З м е е в и к о в ы й т е п л о о б м е н н и к представляет собой аппарат с приваренными к наружной поверхности корпуса трубами в виде спирали (змеевика) или со спиральным змеевиком *1,* размещенным внутри корпуса *2* аппарата (рис. 5.6). Поверхность теплообмена у змеевиковых теплообменников больше, чем у аппаратов с рубашками, но значительно больше и гидравлическое сопротивление. К недостаткам также надо отнести трудность очистки внутренней поверхности теплообмена змеевиков от отложений. Достоинства змеевиковых теплообменников: простота устройства и

доступность для осмотра внешней поверхности теплообмена.

Змеевики в виде соединенных коленами прямолинейных участков труб используются в качестве теплообменных поверхностей при изготовлении погружных, оросительных теплообменников, трубчатых печей, а также калориферов. Эти типы теплообменной аппаратуры будут рассмотрены ниже.

Теплообменник типа «труба-в-трубе»(ТТ)жесткого типа показан на рис. 5.7. Он представляет собой устройство, обычно сваренное из аксиально расположенных друг в друге труб *2* и *1* разного диаметра. Звено образуется из двух таких конструкций, соединенных вместе на сварке или фланцах с помощью двойников *3*.

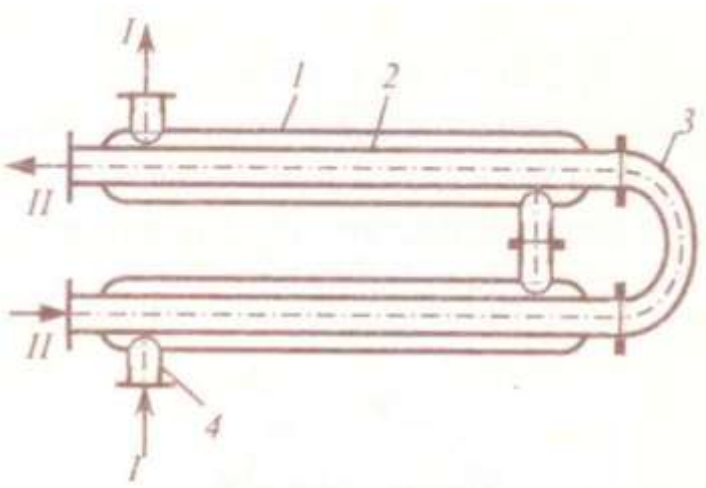


Рис. 5.7. Звено теплообменника типа ТТ жесткого типа:
1–наружная труба; *2*–внутренняя труба; *3*–двойник; *4*–патрубок

Для увеличения поверхности теплообмена звенья собирают в вертикальный ряд - секцию. Поверхность теплообмена многосекционных теплообменников типа ТТ (по внутренним трубам) достигает 150 м". Данный тип теплообменников имеет простую конструкцию, выдерживает высокие

давления, имеет большое значение коэффициента теплопередачи и широко применяется в качестве конденсаторов в производствах метанола, аммиака и других продуктов, получаемых под высоким (до 150 МПа и выше) давлением. Недостатки: громоздкость, большой удельный расход металла, трудность очистки межтрубного пространства.

При значительной разности температур теплоносителей, превышающей 70 °С, а также при необходимости частой очистки кольцевого пространства применяют компенсирующие устройства сальникового типа. В этом случае рабочее давление теплоносителя в межтрубном пространстве не должно превышать 1,0-1,5 МПа.

Спиральный теплообменник (рис. 5.8) изготовляется из двух металлических листов, свитых вместе и образующих два спиральных пространства прямоугольного сечения. Преимущества: компактность, большой

коэффициент теплопередачи (благодаря высокой скорости движения продуктов), небольшое гидравлическое сопротивление. Недостатки: сложность изготовления и ремонта; работа под небольшим давлением (до 0,6 МПа); небольшая поверхность теплообмена, обычно не превышающая 20-30 $м^2$ при ширине листов 750 мм и ширине каналов 7 мм.

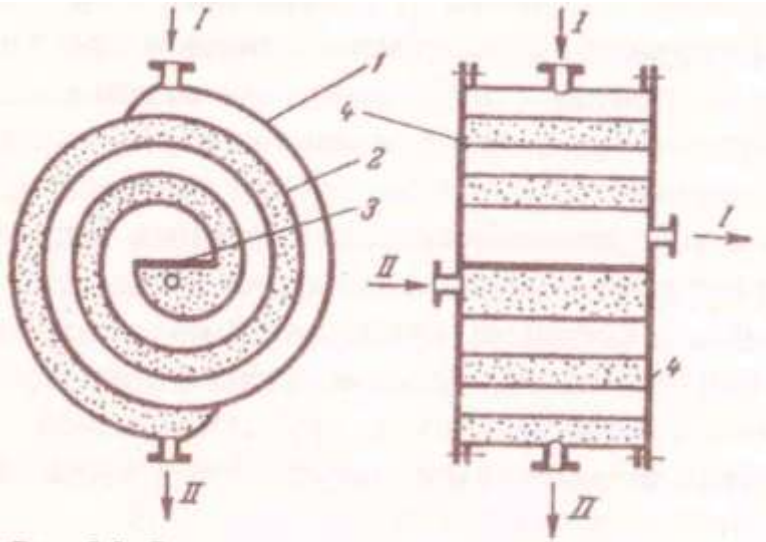


Рис. 5.8. Схема спирального теплообменника:
1, *2*–листы; *3*–перегородка; *4*–крышки;
I и *II*–теплоносители

К о ж у х о т р у б н ы е т е п л о о б м е н н и к и являются самыми распространенными в промышленности. Они состоят из цилиндрического корпуса (кожуха) и помещенного в него пучка труб, закрепленных в трубных решетках. Один из теплоносителей движется по трубам, а другой - в пространстве между кожухом и трубами (в межтрубном пространстве). На рис. 5.9, *а* показана схема одноходового вертикального кожухотрубного теплообменника «жесткого» типа, в котором трубы *3* посредством трубных решеток *2* жестко прикреплены к корпусу аппарата *I*. В этом теплообменнике теплоноситель *I* движется по трубам в одном направлении, в одном направлении движется и теплоноситель *II* в межтрубном пространстве.

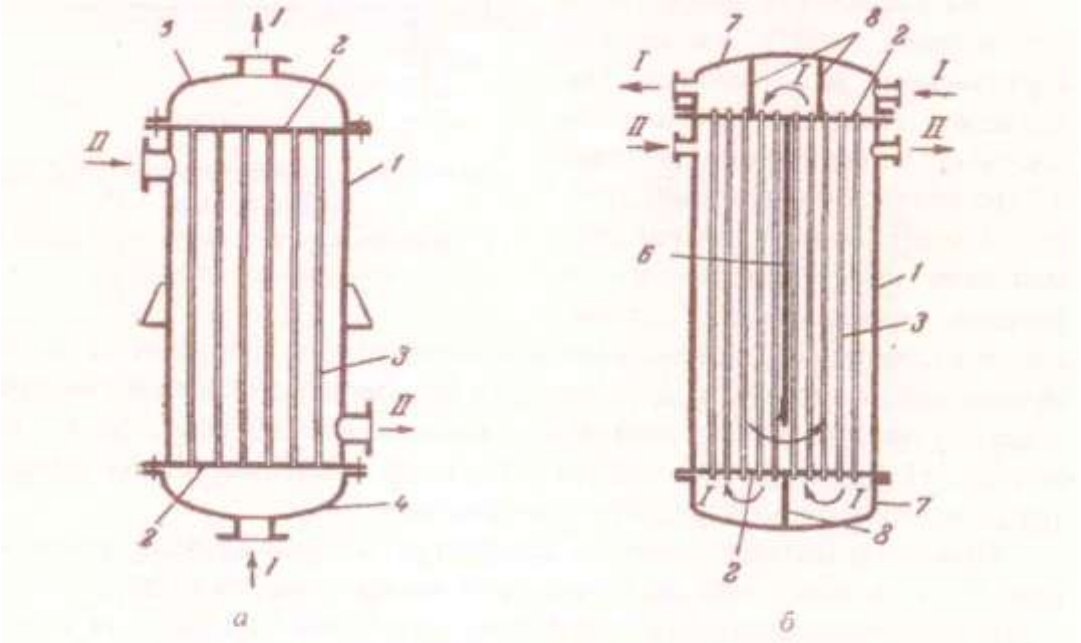


Рис. 5.9. Кожухотрубные теплообменники:
а – одноходовой; *б* – многоходовой; *1*–корпус (кожух); *2*–трубные решетки; *3*–трубы; *4, 5, 7*–днища (крышки); *6*–межтрубная перегородка; *8*–трубные перегородки

Для повышения эффективности теплообмена широко используются многоходовые теплообменники как по трубному, так и по межтрубному пространствам. На рис. 5.9, *б* показан многоходовой теплообменник (четырехходовой по трубному пространству и двухходовой по межтрубному пространству), работающий по принципу смешанного тока теплоносителей. Поверхность теплообмена в кожухотрубных теплообменниках достигает 1000 м^2, давление до 2,5 МПа в трубном пространстве и до 1,6 МПа -в межтрубном пространстве.

Для компенсации температурных напряжений, возникающих в трубках и корпусе теплообменника при разности температур теплоносителей более 40-50 °*C,* применяют линзовые компенсаторы и специальные конструкции в теплообменниках (плавающие головки (рис. 5.10), U-образные трубы и др. устройства).

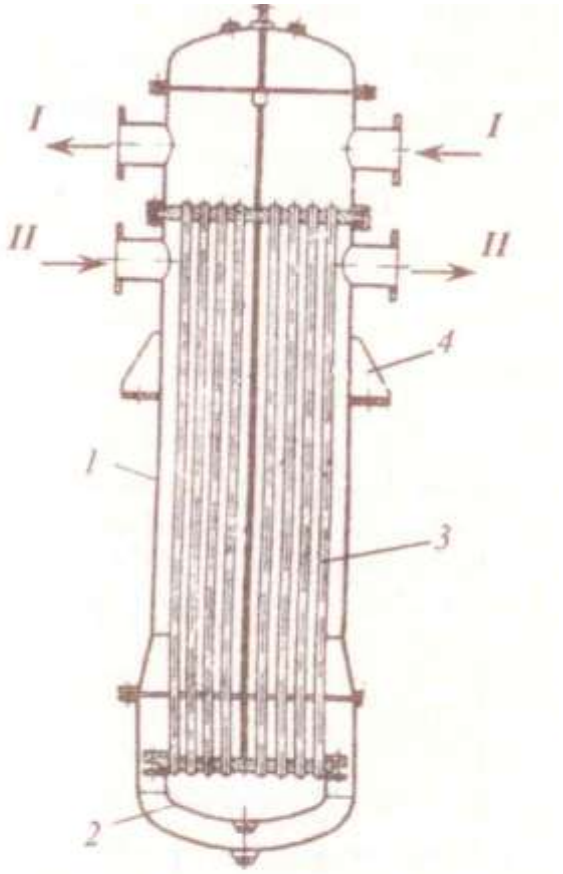


Рис. 5.10. Кожухотрубный теплообменник с плавающей головкой (типа ТП):
1–корпус; *2*–плавающая головка;
3–трубы; *4*–опоры (лапы)

К достоинствам кожухотрубных теплообменников относятся: компактность, небольшой удельный расход металла, легкость очистки внутренней поверхности труб (за исключением U-образных труб). Недостатки: относительно небольшие скорости движения продуктов, трудность очистки межтрубного пространства и недоступность его для осмотра и ремонта, а также недостаточно прочное крепление труб в трубной решетке.

При решении вопроса о том, какой теплоноситель пропускать по трубам, а какой по межтрубному пространству, придерживаются следующих правил:

- теплоносители с более высокой температурой пропускают по трубам, чтобы снизить потери тепла (в холодильниках - наоборот);

-теплоносители с более высоким давлением пропускают по трубам;

-загрязняющий теплообменные поверхности теплоноситель пропускают с той стороны, с которой легче производить очистку (для кожухотрубных теплообменников - по трубам);

-коррозионно-активные теплоносители пропускают по трубам, чтобы кожух можно было сделать из обычного конструкционного материала.

Помимо указанных правил соблюдают следующие рекомендации: конденсирующиеся пары направляют в верхнюю часть аппарата, а стекающий конденсат отводят снизу; жидкости обычно подают снизу, а отводят сверху,

чтобы предотвратить образование газовых пробок. При использовании водяного пара в качестве теплоносителя в верхней части парового пространства теплообменника устанавливают на специальном патрубке продувочный вентиль для периодического сброса воздуха, попадающего в аппарат вместе с паром, наличие которого резко снижает коэффициент теплопередачи.

Регенеративные теплообменники применяют преимущественно при температурах теплоносителей более 500 °С или ниже минус 200 °С. На рис. 5.11 показана схема работы двух периодически действующих регенераторов с неподвижной насадкой. Цикл работы каждого регенератора состоит из следующих периодов: нагревания насадки, переключения шиберов, охлаждения насадки, переключения шиберов. В течение первого периода (периода нагревания насадки) через правый регенератор *1* пропускают горячий теплоноситель, который отдает свое тепло, нагревая насадку. Одновременно с этим через левый регенератор 2 проходит холодный теплоноситель, который отбирает тепло от предварительно нагретой горячей насадки. Затем шиберы *3* поворачивают на 180 градусов.

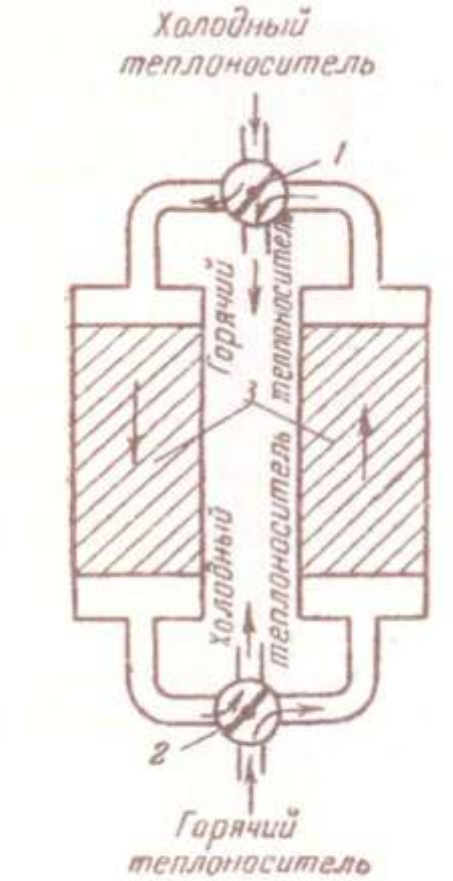


Рис. 5.11. Схема регенератора с неподвижной насадкой: *1* и *2*–шиберы (заслонки); *3*–насадка

В течение второго периода (периода охлаждения) через правый регенератор *1* пропускают холодный теплоноситель, который нагревается за счет тепла, аккумулированного насадкой. Одновременно с этим в левом

регенераторе *2* происходит нагрев насадки горячим теплоносителем. Таким образом, для обеспечения непрерывности подачи теплоносителей устанавливают не менее двух регенераторов указанного типа. В качестве насадки используют кирпичи, металлические листы, металлическую фольгу и другие теплоемкие материалы.

Непрерывно действующие регенераторы имеют две секции, в каждой из которых протекает тепловой процесс только в одном направлении (нагрев или охлаждение), а аккумулирующая тепло насадка движется из одной секции регенератора в другую. Насадка в этом случае выполняется в виде металлических шаров.

5.6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДОЙ И АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДУХОМ

Для охлаждения жидкостей и газов водой обычно используются те же типы теплообменников, которые применяются для проведения процессов нагревания указанных веществ (некоторые из них приведены на рисунках 5.5-5.10), в то же время для охлаждения и конденсации паров широкое распространение получили оросительные и погружные холодильники и конденсаторы. Теплообменная поверхность указанных аппаратов выполнена из изогнутых в виде змеевиков труб или из прямолинейных труб, соединенных между собой в змеевик с помощью приварных гнутых двойников или ретурбендов. Современные погружные конденсаторы и холодильники собирают из отдельных секций змеевиков, что позволяет добиться большей компактности аппаратов и большей скорости движения воды. Поверхность теплообмена каждой секции составляет 100 $м^2$, а число секций варьируется от 1 до 10-12. Рабочее давление продукта в стальных змеевиках погружных теплообменников достигает 4 МПа без ограничения его температуры, в чугунных - не превышает 1 МПа при температуре среды не выше 250 °С.

Погружные холодильники-конденсаторы отли-чаются простотой конст-рукции, надежностью в эксплуатации, но по экономичности и эффективности работы уступают другим аппаратам. Оросительный теплооб-менник (рис. 5.12) представляет собой ряд расположенных одна над другой горизонтальных труб *3,* соединенных ретурбендами или двойниками *2* в змеевик, орошаемый водой из распределительного желоба или перфорированной трубы 1. Стекающая сверху вниз по наружным поверхностям труб вода интенсивно испаряется, благодаря чему обеспечивается охлаждение движущегося внутри труб продукта при значительно меньшем расходе охлаждающей воды, чем в теплообменниках других типов. Излишки воды стекают в поддон (бассейн) *4.*

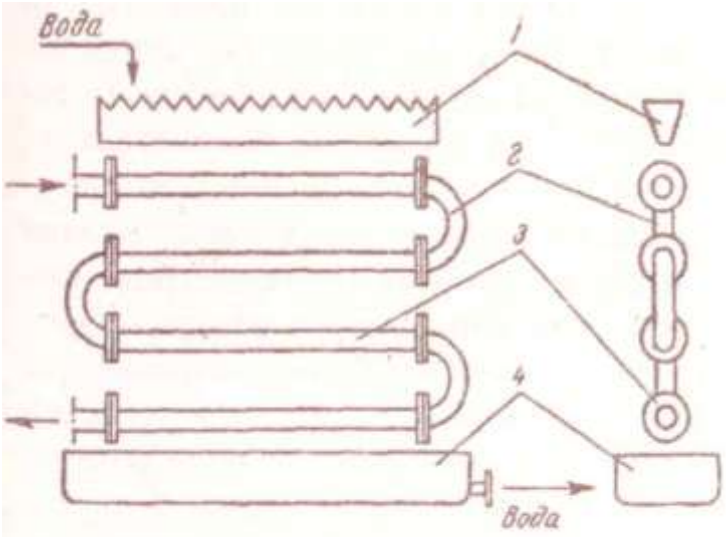


Рис. 5.12. Оросительный теплообменник

К достоинствам теплообменников данного типа, помимо сокращения расхода воды, относятся простота конструкции и легкость очистки теплообменных поверхностей. Недостатки: относительная громоздкость по сравнению с теплообменниками других типов, интенсивная атмосферная коррозия наружной поверхности труб, отложение накипи (водяного камня) на трубах при высокой температуре охлаждаемого продукта.

Для охлаждения паров, сопровождаемого их конденсацией, целесообразно применять холодильники-конденсаторы, в которых в качестве охлаждающего агента используется воздух - аппараты воздушного охлаждения (АВО). Ввиду низкого значения коэффициента теплоотдачи от поверхности труб к воздуху обеспечивают принудительное (с помощью осевых вентиляторов пропеллерного типа, имеющих диаметр лопастей от 0,8 до 7,0 м, производительность до 1,5 млн. м7час и частоту вращения лопастей 2,5-8,5 с"') движение воздуха, а внешнюю поверхность труб делают с поперечным оребрением. Коэффициент оребрения, равный отношению поверхности оребренной трубы к наружной поверхности гладкой трубы составляет 10-20 и более. Стандартные аппараты воздушного охлаждения в зависимости от конструкции и назначения бывают горизонтальные (АВГ), с зигзагообразным расположением секций (АВЗ), трехконтурные (АВГ-Т) и др. Поверхность теплообмена стандартных АВО достигает: внутренних поверхностей труб - 8-1200 м", наружных поверхностей труб (по оребрению) - 100-25000 м^2.

Аппараты воздушного охлаждения типов АВГ и АВЗ показаны на рис. 5.13. Проходя внутри труб змеевиковых секций / (рис. 5.13.а), пары охлаждаются воздухом, продуваемым с помощью вентиляторов через межтрубное пространство каждой секции, и конденсируются. Обеспечить эффективность теплообмена при повышении температуры окружающего воздуха позволяет его увлажнение путем впрыскивания химически очищенной воды через перфорированные трубы 7, смонтированные над колесом вентилятора *2.* Регулирование работы аппаратов воздушного охлаждения при суточных или сезонных колебаниях температуры осуществляют изменением

частоты вращения и угла наклона лопастей вентилятора, жалюзийными устройствами *8,* рециркуляцией части воздуха и его увлажнением, отключением части или всех вентиляторов. В случае внезапного отключения электроэнергии исключается опасность аварий, так как съем тепла полностью не прекращается, а сокращается только на 70-75 % благодаря естественной конвекции воздуха, что позволяет произвести аварийное отключение установки.

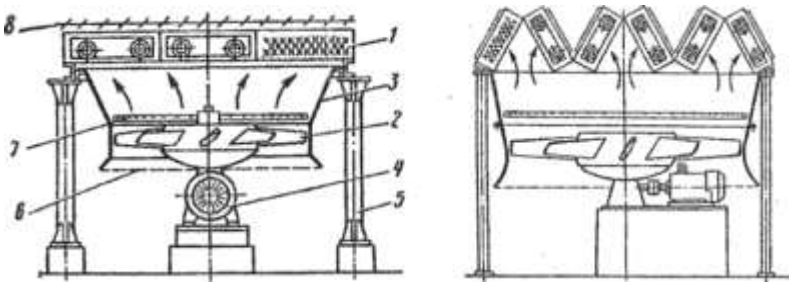


Рис. 5.13. Аппараты воздушного охлаждения: а - *горизонтальный;* б - *зигзагообразный; 1-змеевиковая секция; 2-колесо вентилятора; 3-диффузор; 4-привод вентилятора (элекгродвигатель, редуктор); .5-опорные стойки; 6-решетка ограждения; 7-перфорированные трубы для подачи воды; 5-жалюзи*

Аппараты воздушного охлаждения имеют ряд преимуществ по сравнению с водяными холодильниками и конденсаторами: не используется дефицитная вода, не загрязняются наружные поверхности труб и отсутствует их коррозия, легко регулируется процесс охлаждения. Эти аппараты можно использовать в качестве дефлегматоров и устанавливать непосредственно наверху ректификационных колонн для снижения гидравлического сопротивления паровых линий, что особенно важно при проведении процессов перегонки и ректификации под вакуумом.

5.7. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАГРЕВАНИЯ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ ПЛАМЕНЕМ И ТОПОЧНЫМИ ГАЗАМИ

Открытый огонь, как прямой источник тепла, и горячие топочные газы используются для нагревания веществ в интервале температур от 400 до 700-1000 °С. При большом избытке воздуха, подаваемого в камеру сжигания топлива, температуру нагревания можно значительно снизить (до 50-100 °С), что позволяет использовать топочные газы в процессах сушки различных материалов, в том числе и таких сельскохозяйственных продуктов, как зерно, травяная мука и других. Для нагревания горючих веществ пламенем и топочными газами служат котлы, печи и теплогенераторы, которые очень разнообразны по своему конструктивному устройству и работают на любых видах топлив: газообразных, жидких и твердых.

На рис. 5.14 показана принципиальная схема нагрева продукта топочными газами. Топочные газы получаются в топке *2* при сжигании газообразного (в горелках) или жидкого (в форсунках) топлива и направляются в золоулавливатель *6,* в котором от них отделяются зола, твердые продукты пиролиза топлива, а также раскаленная окалина. Требуемая температура газов

перед подачей их в теплоиспользующий аппарат *4* достигается регулированием подачи вторичного воздуха в камеру смешения зо-лоулавливателя с помощью шибера *3.* Отдав свое тепло нагреваемому продукту П, отработанные газы дымососом *5* направляются в дымовую трубу для сброса в атмосферу.

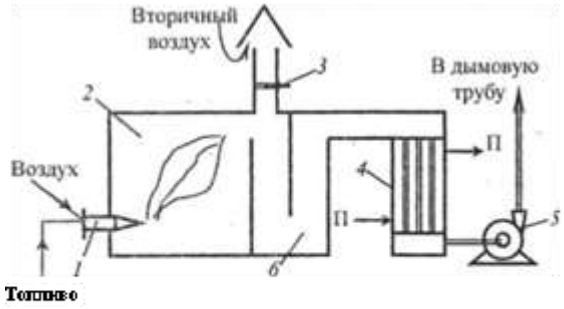


Рис. 5.14. Схема нагрева продукта А топочными газами: 1-горелка или форсунка; 2-топка; 3-шибер; 4-теплоиспользующий аппарат; 5-дымосос; 6-золоулавливатель

Недостатки этого способа нагрева: низкий коэффициент теплоотдачи; неравномерный нагрев; малая объемная удельная теплоемкость газов; трудность регулирования нагрева. Вследствие того, что топочные газы имеют большой объем и высокую температуру, их транспортирование на большие расстояния затруднено. Поэтому топки для получения топочных газов располагают в непосредственной близости от обогреваемого аппарата. Помимо указанных недостатков необходимо отметить, что при использовании способа нагревания материалов путем их непосредственного соприкосновения с топочными газами (например, в дымогазовых зерносушилках) происходит загрязнение нагреваемого вещества сажей, золой и смолообразными продуктами термического разложения топлива.

Рассмотрим более подробно устройство и работу некоторых агрегатов для нагревания веществ пламенем и топочными газами. Трубчатые печи могут работать либо только на газе, либо на комбинированном топливе -жидком и газообразном. По способу сжигания топлива и особенностям передачи тепла различают следующие типы печей: со свободным факелом; беспламенного горения; с объемно-настильным факелом и других типов. Основными конструктивными признаками трубчатых печей являются: форма корпуса (печи коробчатые и цилиндрические); число топок (однокамерные и многокамерные); расположение труб в камерах (вертикальное, горизонтальное); способ соединения труб (на приварных гнутых двойниках и на ретурбендах) и другие.

На рис. 5.15 показана схема трубчатой печи беспламенного горения с излучающими стенами. Панельные горелки *6* расположены рядами на боковых стенах камеры радиации А печи. Газовое топливо к горелкам подводится по индивидуальным коллекторам, что обеспечивает возможность регулирования тепло-производительности горелок каждого ряда. Змеевик (трубчатка) разделен на два пучка: один размещен в камере конвекции **Б** (до 70 % от общего количества тепла передается путем конвекции) и служит для предварительного подогрева сырья, движущегося в трубах; второй пучок размещен в радиант-ной камере А (до 90 % тепла к трубам передается излучением), где происходит

окончательный нагрев продукта до требуемой температуры. Нагреваемый продукт подается в верхнюю часть змеевика 7, расположенного в камере конвекции, затем поступает в трубы камеры радиации и выводится снизу печи.

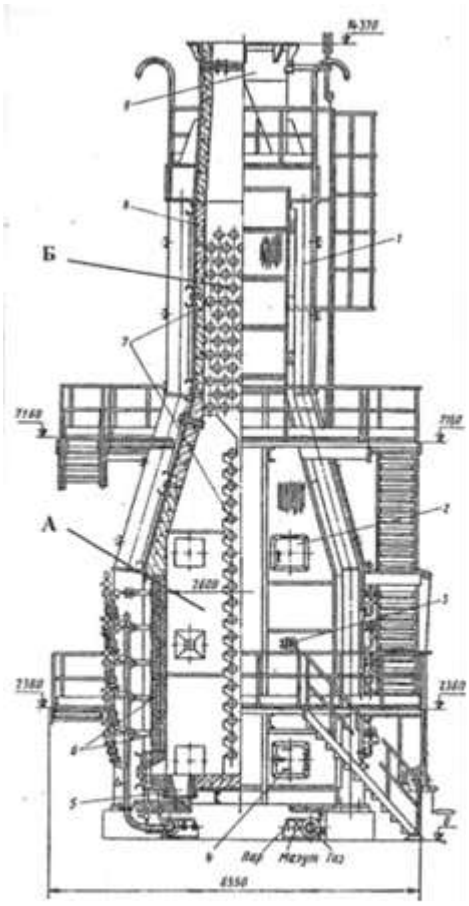


Рис. 5.15. Трубчатая печь беспламенного горения с излучающими стенами (высота печи около 12 м):
А - камера радиации; Б - камера конвекции; 1-каркас; 2-наклонное окно; 3-смотровое окно; 4-люк-лаз; 5-резервная горелка; 6-панельные горелки; 7-змеевик; 8-футеровка; 9-газосборник

В настоящее время змеевики трубчатых печей изготавливаются в основном цельносварными с применением изогнутых двойников. В тех случаях, когда требуется частая очистка труб от отложений кокса (например, змеевики печей вакуумной разгонки мазута установок первичной перегонки нефти и подобных процессов), змеевик выполняют из прямых труб, соединенных между собой коваными или литыми двойниками (ретурбендами). В печах применяются бесшовные трубы с наружным диаметром 60-325 мм (наиболее распространены трубы диаметром 102, 127 и 152 мм), длиной от 6 до 24 м с толщиной стенок от 4 до 15 мм. Трубы изготовляют из качественных конструкционных сталей марок 10 и 20 (для сырья, не обладающего коррозионной активностью), работающих при температурах 300-400 °С, а также из легированных и высоколегированных сталей марок Х8, 12Х18Н10Т, 15Х5М, 45Х25Н20С2 и других, работающих в коррозионных средах под повышенным давлением (до 5 МПа) и при температурах 500-750 °С.

Трубные решетки и подвески, служащие опорами труб, работают в

чрезвычайно сложных условиях (температура в печи достигает 1000 °С). Поэтому их изготовляют из высоколегированных ясаростойкой стали (например, из стали марки 25Х23Н7СЛ). Кладка (футеровка) печи выполняется из специального огнеупорного кирпича или из теплоизоляционных панелей толщиной 100-200 мм. К гарнитуре трубчатых печей относятся: регистры для регулирования потока воздуха; смотровые окна для наблюдения за факелом и состоянием внешней поверхности радиантных труб (трубы должны иметь равномерное свечение темно-вишневого цвета, не должны провисать и иметь утолщений - отдулин); лазы для проникновения в печь при ремонте; выхлопные окна (взрывные клапаны откидного типа) для выпуска газов при возникновении «хлопка» в печи.

Печные двойники (ретур-бенды) служат для соединения труб печи в непрерывный змеевик. В зависимости от конструктивных особенностей они могут быть двухтрубными (рис. 5.16), четырехтрубными, угловыми. Их изготовляют литыми или коваными. Трубы крепятся в двойниках развальцовкой с разбортовкой конца трубы. Соединение на развальцовке допускается применять при температуре стенки трубы не выше 560 °С. При более высоких температурах соединение следует выполнять с помощью изогнутых двойников на сварке.

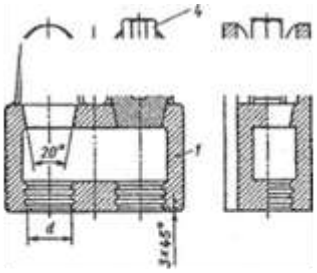


Рис. 5.16. Двойник двухтрубный литой (ретурбенд): 1-корпус; 2-пробка; 3-траверса; 4-болт

В печах беспламенного горения с излучающими стенами для сжигания газообразного топлива применяют панельные горелки размером 500х500 или 605х605 мм с числом туннелей 100, 144 или 196 диаметром 20 мм.

На рис. 5.17 показана панельная горелка. Газ подается по трубе *1* в смеситель *3* через инжектор *2* с заслонкой *4* для регулирования расхода первичного воздуха.

Топливная смесь равномерно распределяется в камере *5* по трубкам *6*, на которые надеты керамические шамотные блоки с туннелями. В туннелях блоков газовоздушная смесь нагревается до температуры самовоспламенения и сгорает, благодаря чему панели раскаляются и излучают тепло. Шамотные блоки заключены в каркасе *8* с теплоизоляционной засыпкой *9*.

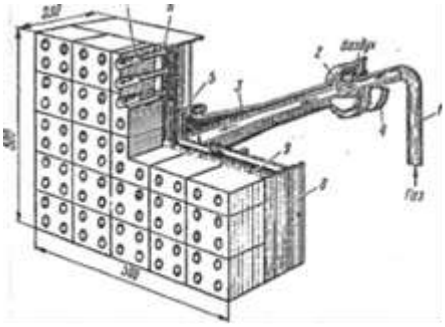


Рис .5.17. **Горелка беспламенная панельная**

Помимо панельных горелок в печах используются форсунки для **сжи**гания жидкого топлива (в основном мазута). Распыление жидкого топлива производится водяным паром, сжатым воздухом или механическим **спосо**бом. В последнее время используются комбинированные газо-мазутные горелки типа ФГМ-120 и ГВЭК-500 (цифра характеризует производительность горелки по мазуту в кг/ч). Буквы ФГМ означают факельная горелка мазутная, ГЭВК - горелка эмульсионно-вихревая комбинированная.

Схема т е п л о г е н е р а т о р а типа ТГ показана на **рис.** 5.18. В цилиндрическом корпусе теплогенератора *9* аксиально расположена цилиндрическая камера сгорания 2, в которой сжигаетсяжидкое топливо, поступающее **в** распыленном виде из форсунки 7. Образующиеся дымовые газы проходят через теплообменник *5* и направляются в дымовую трубу. Для обеспечения притока воздуха в теплогенераторе имеются осевой и центро-бежный вентиляторы. Основной поток воздуха засасывается в теплогенератор осевым вентилятором *1* через жалюзи *10,* с помощью которого можно регулировать его расход. Холодный воздух движется к противоположному торцу теплогенератора по кольцевым зазорам между корпусом *9,* стенкой камеры сгорания 2 и теплообменником 5, постепенно нагреваясь, и с температурой 60-70 °С нагнетается в помещение, сушилку или иной теплоиспользующий агрегат. Благодаря такой конструкции обеспечивается достаточно надежное охлаждение камеры сгорания и исключается чрезмерный нагрев внешних поверхностей агрегата. Центробежный вентилятор *8* предназначен для подачи воздуха в камеру сгорания, а также для подачи воздуха в межтрубное пространство теплообменника *5,* что позволяет более полно использовать тепло дымовых газов. Регулирование расхода топлива и воздуха в камеру сгорания и в теплообменник в процессе работы теплогенератора производится автоматически с помощью регуляторов расхода топлива (на схеме не показаны) и жапюзи *10.* Тепловая производительность теплогенераторов типа ТГ составляет 2-10 ГДж/ч при расходе нагретого воздуха 25000 $м^3$/ч и более.

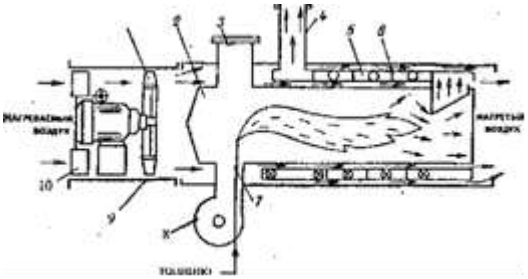


Рис. 5.18. Схема теплогенератора ТГ-2,5 А: 1-вентилятор осевой; 2-камерасгорания; 3-взрывной клапан; 4-дымовая труба; 5-теплообменник; 6-спиралеобразная перегородка; 7-форсунка; 8-вентилятор центробежный; 9-корпус; 10-жалюзи.

В водогрейном котле (рис. 5.19), также как и в теплогенераторе, имеется камера сгорания 7, аксиально расположенная внутри цилиндрического корпуса *3.* В камере сгорания имеются трубы кипятильника 5, по которым благодаря естественной конвекции циркулирует вода. В верхней части корпуса *3* смонтирована камера паросборника *4,* откуда по мере необходимости отбирается водяной пар под давлением до 0,4 МПа.

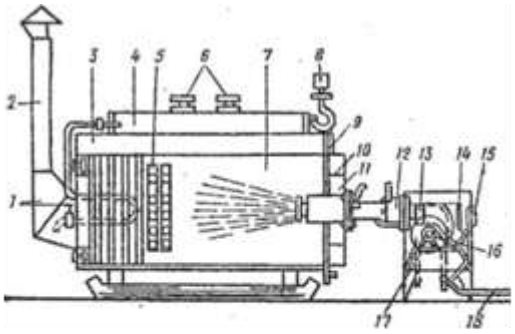


Рис. 5.19. Схема водогрейного котла типа КВ: 1-взрывной клапан; 2-дымовая труба; 3-кожух котла; 4-паросборник; 5-кипятильник; 6-предохранительные клапаны; 7-камера сгорания; 8-манометр; 9-водомерная колонка; 10-дверка; 11-экран; 12-горелка; 13-поплавковая камера; 14-датчик пламени; 15-магнитный пускатель; 16-вентилятор; 17-дренажная трубка; 18-топливопровод

Подача воздуха в камеру сгорания производится с помощью центробежного вентилятора *16,* а топливо в горелку *12* поступает по линии *18.* Выделяющееся при сгорании топлива тепло нагревает воду, находящуюся в кольцевом пространстве между стенкой камеры сгорания 7 и корпусом котла *1,* что исключает чрезмерный нагрев внешних поверхностей котла. Для этих же целей служит экран *11.* Раскаленные дымовые газы проходят через межтрубное пространство встроенного кипятильника 5, нагревая до кипения находящуюся в них воду. Образующийся здесь пар поступает в паросборник *4.* Охлажденные дымовые газы через дымовую трубу *2* сбрасываются в атмосферу. Водогрейный котел снабжен приборами автоматического регулирования расхода топлива в зависимости от расхода горячей воды и пара, а также предохранительными устройствами.

5.8. НАГРЕВАНИЕ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ

Нагревание электрическим током производят в электрических печах, которые в зависимости от способа превращения электрической энергии в тепловую бывают трех видов: печи сопротивления, индукционные печи и дуговые печи, а также с помощью электронагревателей различного назначения и конструкции.

В печах сопротивления нагревание может производиться непосредственным пропусканием электрического тока через нагреваемый продукт *(в печах прямого действия)* или пропусканием тока через специальные нагревательные элементы (в *печах косвенного действия).* Примерами печей прямого действия служат стекловаренные, карборундовые и другие печи. Печи косвенного действия более распространены. В них тепло передается нагреваемому продукту путем лучеиспускания и конвекции.

Схема электропечи сопротивления косвенного действия показана на рис. 5.20. Вокруг обогреваемого аппарата 1 размещаются не соприкасающиеся с его стенками нагревательные элементы *3,* через которые пропускается электрический ток. Такой способ позволяет равномерно нагревать продукты до 1000-1100 °С и обеспечивает точное регулирование температуры посредством изменения напряжения или отключения части элементов. Нагревательные элементы *3* изготовляются из специальных металлов и сплавов, обладающих высоким электрическим сопротивлением (вольфрама, платины, нихрома и других сплавов), в виде ленты или витыми из проволоки.

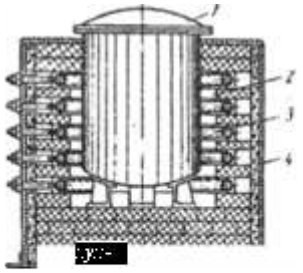


Рис .5.20. Схема электропечи сопротивления: 1-обогреваемый аппарат; 2-камера; 3-нагревательные элементы; 4-корпус с теплоизоляцией

Нагрев небольших количеств жидкостей до температуры не выше 500 °С осуществляют с помощью трубчатых электрических нагревателей (ТЭНов). Т Э Н представляет собой металлическую трубу *1* (рис. 5.21), в которой расположен нагревательный элемент сопротивления в виде спирали *2.* Пространство между спиралью и стенкой трубы заполнено кристаллической окисью магния, обладающей хорошей теплопроводностью и высокими электроизоляционными свойствами.

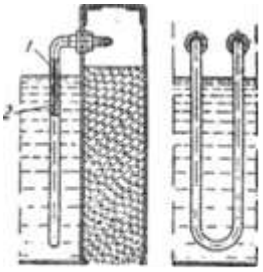


Рис. 5.21. Трубчатый электронагреватель

Переносные электронагревательные устройства широко используются для подогрева

различного технологического оборудования (трубопроводов, задвижек, сливо-наливных приборов и др.), отопления зданий и сооружений, удаления снега и льда с оборудования, разогрева вязких и застывающих нефтепродуктов перед отпуском потребителю в стационарных и передвижных резервуарах, железнодорожных и автомобильных цистернах, бочках и другой таре.

Ленточные гибкие переносные электронагреватели служат для подогрева технологического оборудования снаружи и изготовляются в виде гибкой герметичной ленты шириной 30 мм, толщиной 3-4 мм и длиной 2,5-3,2 м и более, внутри которой встроены электронагревательные провода с высоким омическим сопротивлением. Удельная мощность нагревателей составляет 10-100 Вт/м, рабочая температура не превышает 180 °С.

Высокотемпературные гибкие электронагреватели монтируются стационарно на трубопроводах или аппаратах (наматываются спирально, либо прокладываются линейно вдоль обогреваемого оборудования) под слоем теплоизоляции, т.к. их рабочая температура достигает 600 °С.

Электрогрелки предназначены для разогрева вязких и застывающих нефтепродуктов (мазута, масел) в железнодорожных и автомобильных цистернах, горизонтальных резервуарах и другом подобном оборудовании. В сложенном виде одна или несколько грелок поочередно вводятся через горловину в аппарат, где разворачиваются под действием торсионов. Мощность одной грелки достигает 18 кВт. Электрогрелки снабжаются блокировкой, отключающей подачу электроэнергии при разогреве продукта выше 80 °С, а также при высоте слоя нефтепродукта над грелкой менее 500 мм.

Схема использования однотрубных электронагревателей для разогрева нефтепродуктов (масел) при сливе из железнодорожных цистерн показана на рис. 5.22. Нагреватель *2* состоит из корпуса, присоединительного патрубка, трубчатой штанги *4* и пульта управления *6*. В корпусе, заполненном теплопроводным диэлектрическим материалом, размещен нагревательный элемент. Нагрев нефтепродукта в цистерне (нагреватель можно также использовать для разогрева вязких нефтепродуктов в стационарных резервуарах на нефтебазах) осуществляется двумя нагревателями, которые опускаются в цистерну через горловину или поднимаются из нее с помощью крана-укосины и лебедки (на схеме не показаны). Мощность подогревателя 40 кВт. Автоматическое срабатывание блокировочного устройства и отключение

нагревателя происходит при температуре нефтепродукта выше 80 °С и при высоте его слоя над нагревателем менее 500 мм.

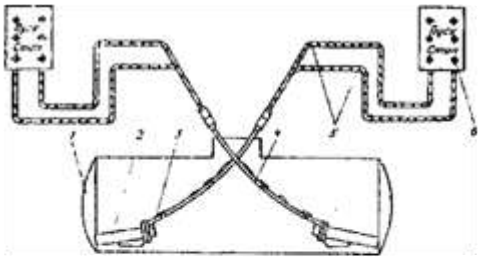


Рис. 5.22. Схема использования одно трубных электронагревателей: 1-железнодорожная цистерна; 2-нагреватель; 3-бло-кировочное устройство; 4-трубчатая штанга; 5-Сило-вой и контрольный кабели; 6-пульт управления

Индукционная печь внешне напоминает печь сопротивления (см. рис. 5.20). Разница заключается в том, что вокруг аппарата укладывается обмотка соленоида (индуктор), к которой подводится переменный электрический ток, а не нагревательный элемент сопротивления. При этом в стенках аппарата возникают вихревые токи, возбуждаемые переменным магнитным полем индуктора. В результате стенки аппарата равномерно прогреваются, нагревая находящийся в аппарате продукт.

Для нагрева продуктов до температуры 1500-2000 °С и выше используются электродуговые печи, которые могут быть с *открытой* и *закрытой* дугой. В печах с открытой дугой пламя дуги образуется между электродами, расположенными над нагреваемым материалом, тепло к которому передается лучеиспусканием (косвенный нагрев). Известны конструкции комбинированных печей, которые работают на сочетании принципов нагрева в печах сопротивления (с использованием сопротивления нагреваемого материала) и в электродуговых печах. В печах с закрытой дугой (см. рис. 7.3) пламя дуги образуется между электродом и самим нагреваемым материалом (прямой нагрев).

К недостаткам дуговых печей относятся трудность равномерного обогрева и точного регулирования температуры.

Контрольные вопросы

Для каких целей производят нагревание и охлаждение веществ?

Укажите способы нагревания и охлаждения веществ.

Укажите основные виды теплоносителей.

Укажите основные виды хладоносителей.

Какими способами в технике осуществляют подвод тепла к нагреваемым продуктам?

Какими способами в технике осуществляют отвод тепла от охлаждаемых продуктов?

Укажите основные виды теплоиспользующих аппаратов и их назначение.

Напишите уравнение теплового баланса для установившегося теплообменного процесса и поясните его.

Напишите основное уравнение теплопередачи и поясните его.

Что понимают под коэффициентом теплопередачи и от чего он зависит?

Напишите уравнение переноса тепла через стенку и поясните его.

Что показывает коэффициент теплопроводности и от чего он зависит?

Как влияет наличие отложений на стенке на ее теплопроводность?

Поясните механизм передачи тепла конвекцией.

Напишите уравнение передачи тепла конвекцией и поясните его.

Какие факторы влияют на теплоотдачу и каким образом можно определить коэффициент теплоотдачи?

Вследствие чего возникает естественная конвекция продукта в обогреваемом аппарате?

Вследствие чего происходит вынужденная конвекция продукта **в** обогреваемом аппарате?

От чего зависит количество тепла, переходящего от более нагретого тела к менее нагретому посредством лучеиспускания?

Что понимают под температурным напором и от чего он зависит?

Какой способ организации движения теплоносителей относительно друг друга наиболее выгоден?

Какие достоинства и недостатки имеет горячая вода как теплоноситель?

Какие достоинства и недостатки имеет насыщенный водяной пар как теплоноситель?

Какие достоинства и недостатки имеет горячий воздух как теплоноситель?

Какие достоинства и недостатки имеют топочные газы как теплоноситель?

Какие виды высокотемпературных теплоносителей Вы знаете?

Какие достоинства и недостатки имеют жидкометаллические высокотемпературные теплоносители?

Какие достоинства и недостатки имеют ионные теплоносители?

Какие достоинства и недостатки имеют органические высокотемпературные теплоносители?

Для какой цели используются отходящие горячие и холодные продукты производства?

Какие достоинства и недостатки имеет атмосферный воздух как хладоноситель?

Какие достоинства и недостатки имеет вода как хладоноситель?

Какие достоинства и недостатки имеют холодильные рассолы и антифризы как хладоносители?

Поясните особенности работы циркуляционной и открытой систем обогрева или охлаждения аппаратов.

Поясните сущность процесса нагрева жидкости острым паром.

По каким признакам классифицируют теплообменные аппараты?

Какие достоинства и недостатки имеет аппарат с рубашкой?

Какие достоинства и недостатки имеют змеевиковые теплообменники?

Какие достоинства и недостатки имеют теплообменники типа «труба в трубе»?

Какие достоинства и недостатки имеют спиральные теплообменники?

Как устроен и работает кожухотрубный теплообменник?

Какие достоинства и недостатки имеют кожухотрубные теплообменники?

Для чего применяются плавающие головки и U-образные трубы в кожухотрубных теплообменниках?

Как устроен и работает регенеративный теплообменник?

Какие достоинства и недостатки имеет оросительный теплообменник?

Какие достоинства и недостатки имеют аппараты воздушного охлаждения?

Поясните устройство системы нагрева продукта топочными газами, достоинства и недостатки такой системы.

Как устроена и работает трубчатая печь?

Для чего служат смотровые и выхлопные окна в трубчатой печи?

Укажите назначение, устройство и область применения двойников (ретурбендов).

Как устроена и работает беспламенная панельная горелка?

Как устроен и работает теплогенератор?

Как устроен и работает водогрейный котел?

Укажите виды электронагревателей.

Как устроена и работает электропечь сопротивления?

Как устроены и работают ТЭНы?

Как устроены и работают гибкие переносные электронагреватели и электрогрелки?

Поясните устройство и работу системы электронагрева темных нефтепродуктов в железнодорожных цистернах.

Литература

1. Основная.

Рабочая программа курса пожарная профилактика технологических процессов (5 лет обучения). -М.: ВИПТШ МВД России, 1995.

Алексеев М. В., Волков О. М., Шатров Ы. Ф. Пожарная профилактика технологических процессов производств. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985.

Основы пожарной безопасности: Учебное пособие / Под ред. канд. техн. наук В.А. Копылова. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1990.

2. Дополнительная.

1.Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. -М.: Изд-во «Химия», 1975.

2. Вихман Г. Л., Круглое С. А. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов: Учебник для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. -М.: Изд-во «Машиностроение», 1978.

Глава **6.** ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССАХ

6.1.1. Виды массообменных процессов

Диффузионными (массообменными) называются процессы, которые сопровождаются переносом массы веществ за счет диффузии. Различают два основных вида процессов массообмена: массообмен между жидкостью и газом (паром) или между двумя несмешивающимися жидкостями, а также массообмен между твердым телом и жидкостью, газом или паром. К массообменным, в частности, относятся процессы перегонки и ректификации жидкостей, газофракционирования сжиженных газов, сорбционные процессы, процессы сушки веществ и материалов. Для проведения этих процессов используются различные по устройству и принципу действия ректификационные колонны, абсорберы и адсорберы, сушилки.

Общими признаками диффузионных процессов являются:

-участие в процессе, по крайней мере, двух фаз (жидкости и пара, жидкости и газа, твердого тела и жидкости и т.п.);

-перенос вещества из одной фазы в другую через границу раздела фаз за счет разности концентраций;

-обратимость переноса вещества из одной фазы в другую. Диффузионный процесс, иначе называемый массообменом или массопередачей, в изолированной замкнутой системе возникает самопроизвольно и протекает до тех пор, пока между обеими фазами при данных условиях температуры и давления не установится подвижное фазовое равновесие. Фазовое равновесие характеризуется равенством скоростей перехода вещества из одной фазы в другую. В этом состоянии системы явного перехода распределяемого вещества из одной фазы в другую не наблюдается. В состоянии равновесия существует определенная зависимость между концентрациями распределяемого вещества в обеих фазах: любой концентрации $\bar{x}$ этого вещества в фазе Φ_x соответствует концентрация его $\bar{y}_p$ в фазе Φ_y т.е.

$$\bar{y}_p = f(\bar{x}). \qquad (6.1)$$

Равновесие между фазами представлено графически на рис. 6.1.

В случае массообмена между жидкостью и газом или между двумя не-смешивающимися жидкостями процесс переноса вещества из одной фазы в другую до установления равновесия можно представить схемой, приведенной на рис. 6.2. В фазе Φ_y концентрация распределяемого вещества $\bar{y}$ выше равновесной $\bar{y}_p$, поэтому вещество переходит в фазу Φ_x. Распределяемое

вещество в фазе Φ_y переносится к поверхности раздела фаз, а в фазу Φ_x оно переносится от этой поверхности. Перенос вещества в обеих фазах осуществляется путем молекулярной диффузии (т.е. диффузии молекул через слой носителя) и путем конвективной диффузии (т.е. движущимся носителем с распределяемым веществом).

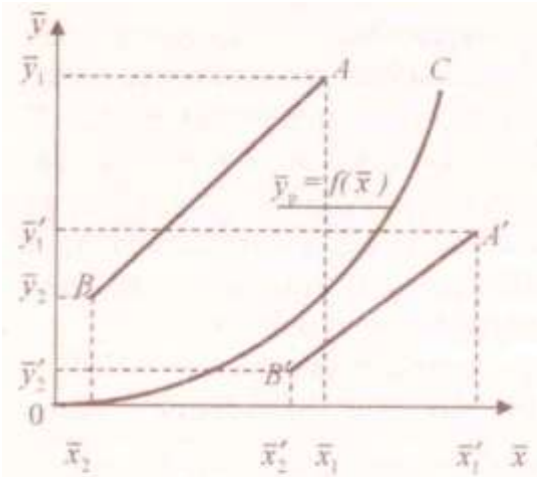


Рис. 6.1. Диаграмма $\bar{x} - \bar{y}$:
OC – линия равновесия;
AB и $A'B'$ – рабочие линии

Рис. 6.2. Схема переноса вещества из одной фазы в другую

В каждой фазе различают две области: ядро (основную массу носителя с распределяемым веществом) и пограничный слой (п. сл.). В ядре фазы перенос вещества осуществляется преимущественно путем конвективной диффузии, т.к. в нем обычно происходит интенсивное перемешивание. Перенос вещества в пограничном слое осуществляется путем конвективной и молекулярной диффузии, причем по мере приближения к поверхности раздела фаз преобладает молекулярная диффузия. В пограничном слое происходит резкое изменение концентрации распределяемого вещества.

При молекулярной диффузии, согласно закону Фика, количество диффундирующего через слой носителя вещества *M,* кг, пропорционально поверхности слоя *F,* изменению концентрации по толщине слоя $\Delta_{сл}$, времени τ и обратно пропорционально толщине слоя δ, т.е.

$$M = \frac{DF\Delta_{сл}\tau}{\delta}, \qquad (6.2)$$

где *D* - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом диффузии, размерность которого выражается в $м^2/с$.

Коэффициент диффузии представляет собой количество вещества, переходящее в единицу времени через единицу поверхности при единице падения концентрации данного вещества на единицу длины по направлению диффузии. Коэффициент диффузии зависит от свойств диффундирующего (распределяемого) компонента и среды (носителя), в которой происходит

диффузия, а также от температуры и давления. Коэффициенты диффузии в жидкостях значительно меньше, чем в газах.

При конвективной диффузии количество переносимого вещества (от фазы $\Phi_г$ к поверхности раздела фаз или от нее к фазе Φ_x) пропорционально поверхности F, разности концентраций $\Delta_{сл}$ распределяемого вещества в фазе и у поверхности раздела, времени τ, т.е.

$$M = \beta F \Delta_{сл} \tau \qquad (6.3)$$

где β - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом массоотдачи и имеющий размерность в м/с.

При массообмене с участием твердой фазы необходимо учитывать, что в твердой фазе конвекция отсутствует, а перенос вещества характеризуется уравнением массопроводности, аналогичным уравнению молекулярной диффузии:

$$M = \frac{\alpha F \Delta_{сл} \tau}{\delta} \qquad (6.4)$$

где α - коэффициент пропорциональности, имеющий размерность коэффициента диффузии ($м^2/с$) и называемый коэффициентом массопроводности.

В пределах твердой фазы вещество перемещается вследствие массопроводности к поверхности раздела фаз, а в пределах омывающей ее жидкой, газовой или паровой фазы - путем молекулярной и конвективной диффузии.

Скорость перехода вещества из фазы в фазу пропорциональна степени отклонения от равновесия, которую можно выразить как разность концентраций Δy или Δx: рабочей концентрации вещества в одной из фаз и равновесной концентрации в ней данного вещества. Эта разность концентраций является движущей силой процесса массопередачи.

Для фазы Φ_y

$$\Delta y = \bar{y}_р - \bar{y} \quad \text{или} \quad \Delta y = \bar{y} - \bar{y}_р \qquad (6.5)$$

а для Φ_x

$$\Delta x = \bar{x}_р - \bar{x} \quad \text{или} \quad \Delta x = \bar{x} - \bar{x}_р \qquad (6.6)$$

где $\bar{y}_p$, $\bar{x}_p$ - равновесные концентрации распределяемого вещества в соответствующих фазах Φ_y и Φ_x ; $\bar{y}$, $\bar{x}$ - фактические (рабочие) концентрации распределяемого вещества в тех же фазах.

Если фактическая (рабочая) концентрация в данной фазе выше равновесной концентрации, то вещество будет переходить из этой фазы в другую, а движущая сила будет равна разности фактической и равновесной концентрации. И наоборот. Т.е. массообменные процессы в этом смысле являются обратимыми.

6.1.2. Способы выражения состава фаз двухкомпонентных систем

Состав фаз выражают обычно в объемных долях φ (или в объемных процентах) и в массовых долях **С** (или в массовых процентах).

Перечет из объемных долей в массовые (или обратный пересчет) для двухкомпонентных систем, состоящих из компонентов *a* и *b*, производят по следующим формулам:

$$\varphi_a = V_a / V \; ; \quad \varphi_b = 1 - \varphi_a \qquad (6.7)$$

где φ_a и φ_b - объемные концентрации соответственно компонентов *a* и *b*, об. доли; V_a - объем компонента *a* в системе, м^3; V - общий объем системы, м^3;

$$C_a = m_a / m \; ; \quad C_b = 1 - C_a \qquad (6.7)$$

где C_a и C_b - массовые концентрации соответственно компонентов *a* и *b*, масс, доли; m_a - масса компонента *a*, кг; m - общая масса системы, кг.

При выражении составов фаз в молярных долях принято обозначать концентрацию в газовой (паровой) фазе буквой *y*, а в жидкой и твердой фазах – *x*.

Состав системы в молярных долях в жидкой (твердой) фазе:

$$x_a = \frac{C_a / M_a}{C_a / M_a + (1 - C_a) / M_в} \text{, долей моля}$$

$$x_b = 1 - x_a \text{, долей моля.} \qquad (6.9)$$

То же в газовой (паровой) фазе:

$$y_a = \frac{C'_a / M_a}{C'_a / M_a + (1 - C'_a) / M_в}$$, долей моля

$$y_b = 1 - y_a$$, долей моля, (6.10)

где M_a и M_b, - молекулярные массы компонентов *a* и *b* соответственно; C_a - содержание компонента *a* в жидкой (твердой) фазе в массовых долях; C'_a - содержание компонента *a* в газовой (паровой) фазе в массовых долях.

При проведении расчетов сорбционных процессов состав фаз часто выражают в относительных массовых единицах. Связь между относительным массовым составом $\bar{x}_a(\bar{y}_a)$, и массовой долей $C_a(C'_a)$ выражается следующими соотношениями:

$$\bar{x}_a = \frac{C_a}{1 - C_a}$$, кг компонента *a*/кг поглотителя (6.11)

$$\bar{y}_a = \frac{C'_a}{1 - C'_a}$$, кг компонента *a*/кг носителя (6.12)

Выражение 6.12 с учетом парциального давления компонентов и общего давления системы можно преобразовать к виду

$$\bar{y}_a = \frac{M_a}{M_н} \cdot \frac{p_a}{p_{общ} - p_a}$$ (6.13)

где M_a - молекулярная масса поглощаемого компонента а; $M_н$ - молекулярная масса не поглощаемого (инертного) компонента; p_a - парциальное давление поглощаемого компонента *a;* $P_{общ}$ - общее давление смеси.

6.1.3. Материальный баланс процессов массообмена

Рассмотрим элемент массообменного аппарата (рис. 6.3), в котором движутся потоки двух фаз: фазы $Ф_y$ (например, пара) и фазы $Ф_x$ (например, жидкости). Пар движется снизу вверх, жидкость - сверху вниз. Такой способ организации движения называется противоточным.

Расход поглотителя в $Ф_y$ фазе составляет *G* кг/с, а в фазе $Ф_x$ - *L* кг/с. Содержание распределяемого компонента в фазе $Ф_y$ составляет $\bar{y}$, а в фазе $Ф_x$ –

$\bar{x}$.

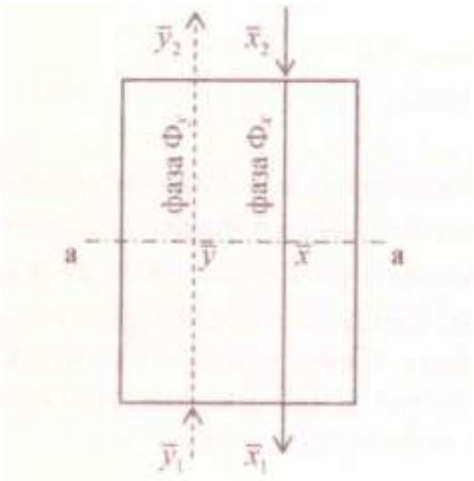


Рис. 6.3. Схема движения потоков в массообменном аппарате

Концентрации этого же компонента составляют:

-на входе в элемент аппарата: фазе Φ_y - $\bar{y}_1$, в фазе Φ_x - $\bar{x}_2$,

-на выходе из элемента аппарата: в фазе Φ_y - $\bar{y}_2$,, в фазе Φ_x - $\bar{x}_1$, .

Носители не участвуют в процессе массообмена и их расход не изменяется по высоте (длине) элемента аппарата.

Предположим, что распределяемый компонент переходит из фазы Φ_y, в фазу Φ_x, . Тогда расход компонента, переходящего из фазы Φ_y , составит:

$$m = G\bar{y}_1 - G\bar{y}_2 = G(\bar{y}_1 - \bar{y}_2) \quad (6.14)$$

а расход компонента, переходящего в фазу Φ_x, составит:

$$m = L\bar{x}_1 - L\bar{x}_2 = L(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \quad (6.15)$$

Оба этих расхода равны, поэтому можно записать уравнение материального баланса:

$$m = G(\bar{y}_1 - \bar{y}_2) = L(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \quad (6.16)$$

Находим соотношение между расходами носителей в обеих фазах:

$$l = \frac{L}{G} = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} \quad (6.17)$$

В любом произвольном сечении элемента аппарата (например, а-а) составы фаз будут равны $\bar{y}$ и $\bar{x}$. Составим уравнение материального баланса для части элемента аппарата, расположенной выше этого сечения:

$$G\bar{y} + L\bar{x}_2 = G\bar{y}_2 + L\bar{x} \quad (6.18)$$

откуда

$$\bar{y} = \bar{y}_2 + \frac{L}{G}(\bar{x} - \bar{x}_2) = \bar{y}_2 + l(\bar{x} - \bar{x}_2) \quad (6.19)$$

Полученное уравнение называется уравнением рабочей линии, которое выражает зависимость между неравновесными составами фаз ($\bar{y}$,.$\bar{x}$) в любом сечении массообменного аппарата.

Решая совместно уравнения (6.17) и (6.19), после простых преобразований получим выражение

$$\frac{\bar{y} - \bar{y}_2}{\bar{y}_1 - \bar{y}_2} = \frac{\bar{x} - \bar{x}_2}{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} \quad (6.20)$$

Это выражение является уравнением прямой, проходящей через точки $A(\bar{x}_1, \bar{y}_1)$ и $B(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ (см. рис. 6.1). В данном случае в соответствии с условием поставленной задачи рабочая линия расположена выше линии равновесия, т.к. рабочие концентрации распределяемого компонента в фазе Φ_y,. выше равновесных концентраций и он переходит из фазы Φ_y в фазу $\boldsymbol{\Phi_x}$.

При обратной постановке задачи, когда распределяемый компонент переходит из фазы Φ_x в фазу Φ_y рабочие концентрации в фазе Φ_y ниже равновесных. В этом случае рабочая линия ***A'B'*** расположена ниже линии равновесия.

6.1.4. Уравнение массопередачи

Количество вещества, переходящего из фазы, где его содержание выше равновесного, в фазу, где содержание этого вещества ниже равновесного, пропорционально степени отклонения от равновесия: разности концентраций - рабочей концентрации вещества в одной из фаз и равновесной концентрации в ней этого вещества, которая называется движущей силой процесса, а также пропорционально площади соприкосновения фаз и продолжительности процесса массообмена:

$$M = K*\Delta*F*\tau \qquad (6.21)$$

где *M* - количество вещества, перешедшего из одной фазы в другую, кг; *K* - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом массопередачи; Δ - движущая сила процесса массопередачи; *F*- поверхность соприкосновения (контакта) фаз, м^2; τ - продолжительность процесса массопередачи, с.

Размерность коэффициента массопередачи зависит от размерности движущей силы процесса, которая выражается в виде разностей объемных концентраций ($\Delta = \varphi_p - \varphi$, кг/м^3), в виде разности молярных долей ($\Delta = x_p - x$, долей моля), в виде разности парциальных давлений ($\Delta = p_p - p$, Па), в виде разности относительных массовых долей ($\Delta = \overline{y}_p - \overline{y}$, кг/кг) и

т.д. В указанных выражениях движущей силы процесса индекс р означает, что данная величина имеет отношение к равновесному состоянию.

6.2. АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

6.2.1. Виды сорбционных процессов

Для разделения однофазных (гомогенных) смесей в промышленности часто используются сорбционные процессы *(sorbere* - по лат. поглощать). Под сорбционными понимают процессы, в которых поглощение вещества происходит на границе раздела двух фаз. К таким процессам относятся: адсорбция и абсорбция, которые часто сопровождаются химическими превращениями (хемосорбцией). Адсорбция, к тому же, может сопровождаться капиллярной конденсацией.

Абсорбцией называется процесс поглощения газов, паров или жидкостей поверхностью пористых твердых тел - адсорбентов.

Абсорбцией называется процесс поглощения газа или пара жидким поглотителем - абсорбентом.

Хемосорбцией называется такой сорбционный процесс, который сопровождается химическим взаимодействием поглощенного вещества с поглотителем с образованием нового химического соединения.

Капиллярной конденсацией называется процесс конденсации паров в тончайших порах (капиллярах) твердого вещества.

Обратный процесс (процесс выделения вещества из поглотившей его фазы) называется *десорбцией.*

Поглощаемое (распределяемое) вещество в зависимости от вида процесса называется *адсорбтивом* или *абсорбтивом,* а поглощающее его вещество - *адсорбентом* или *абсорбентом.*

Процессы сорбции обладают *селективностью,* т.е. каждый сорбент способен избирательно поглощать какие-либо определенные вещества и не поглощать вовсе или незначительно поглощать другие вещества.

При выборе абсорбционного или адсорбционного способа разделения газовых смесей учитывают то обстоятельство, что при адсорбции конечная концентрация поглощаемого компонента в уходящем газе не поддается регулированию и практически равна нулю ($\varphi_к \approx 0$), а при абсорбции - конечная концентрация того же компонента в уходящем газе зависит от технологических параметров процесса и легко может быть изменена. Следует учитывать, что при адсорбции газов с высоким начальным содержанием поглощаемого компонента адсорбент будет быстро насыщаться последним и также быстро должен будет регенерирован или заменен. Следовательно, рациональная область применения процессов адсорбции ограничена малыми начальными концентрациями поглощаемого компонента в парогазовой смеси, когда необходимо полное поглощение этого компонента из смеси. Абсорбционными же методами полного поглощения достигнуть нельзя, зато газовая (парогазовая) смесь может поступать в процесс с высоким начальным содержанием поглощаемого компонента.

6.2.2. Аппараты для проведения процессов адсорбции

Сущность процесса адсорбции

О способности твердых тел поглощать своей поверхностью примеси из газовых смесей и растворов жидкостей знали давно. Российский ученый Иоганн Ловиц (1757-1804) впервые изучил этот процесс в 1785 году и на**шел** ему практическое применение. Первым адсорбентом, нашедшим практическое применение, стал древесный уголь. Уголь применяли во флоте для очистки питьевой воды, на водочных заводах для очистки спирта, а затем и на сахарных заводах. В 1915 г. академик Н.Д. Зелинский (1861-1953) создал первый универсальный угольный противогаз для защиты органов дыхания от отравляющих веществ. Н.Д. Зелинский разработал способ активизации угля водяным паром и органическими веществами и ввел термин *активированный уголь*.

Процессы адсорбции в настоящее время применяются в различных отраслях промышленности для очистки и осушки газов, для очистки растворов от примесей и разделения смесей газов и паров. В качестве примеров можно привести очистку воздуха в противогазе, разделение газообразных углеводородов, осушку природного газа от воды и высокомолекулярных углеводородов, очистку жидких нефтепродуктов от примесей и другие процессы. Процесс адсорбции применяется также для улавливания паров летучих растворителей из паровоздушных смесей, образующихся в различных технологических процессах, с целью повторного их использования в производстве, что имеет большое экономическое значение и способствует охране окружающей среды. Высокая значимость этого процесса видна из следующих примеров.

Так, при производстве 1 кг ацетатного волокна расходуется до 3 кг ацетона, при производстве 1 кг вискозного волокна - до 0,5 кг сероуглерода, при производстве 1 кг целлулоида - до 1 кг этилового спирта, при производстве

1кг искусственной кожи - до 1,5 кг бензина. В готовой продукции растворитель не содержится, т.к. он весь испаряется на конечных стадиях производства.

Выделения больших количеств паров летучих растворителей в воздух приводят не только к потерям этих ценных продуктов и загрязнению окружающей среды, но и к образованию взрывоопасных паровоздушных смесей в производственных помещениях. Поэтому неудивительно, что проблеме улавливания отработанного растворителя придается очень большое значение. Процесс улавливания отработанного растворителя называется *рекуперацией паров* летучих растворителей.

Схема процесса адсорбции в близком к равновесному состоянию изображена на рис. 6.4.

Рис. 6.4. Схема процесса адсорбции (*a*–поглощаемый компонент смеси)

При соприкосновении газа (или жидкости) с поверхностью твердого тела происходит избирательное поглощение (адсорбция) содержащегося в этом газе (или жидкости) компонента *a.* Одновременно происходит обратный процесс: выделение (десорбция) какого-то количества компонента *a* с поверхности твердого тела в газовую (жидкостную) среду. При достаточном времени соприкосновения фаз скорости прямого (адсорбции) и обратного (десорбции) процессов уравниваются, т.е. наступает адсорбционное равновесие.

Адсорбенты и их характеристика

В качестве адсорбентов используются обладающие высокой пористостью твердые материалы, т.е. материалы с большой удельной поверхностью. Наиболее распространены активные (активированные) угли, силика-гель, активная окись алюминия, цеолиты, диатомиты, трепелы и некоторые другие материалы.

Активные угли изготовляются в виде гранул размером от 1 до 7 мм, либо в виде порошка. Общая поверхность 1 г активированных углей достигает 400 м^2 и более. В промышленности они применяются для поглощения паров органических жидкостей из парогазовых смесей, для очистки растворов от примесей. Недостатком углей является их горючесть и склонность некоторых марок углей к самовозгоранию, что не позволяет использовать активные угли

при температурах выше 200 °С. По назначению активные угли, выпускаемые промышленностью, делятся на три основные группы.

-осветляющие угли, предназначенные для адсорбции из растворов окрашивающих примесей, марок А и Б (удельная поверхность 138 $м^2$/г), МД (90 $м^2$/г), АГС-4 и др.

-рекуперационные угли, используемые для адсорбции из газовой фазы паров органических растворителей, марок АР-3 (удельная поверхность 48 $м^2$/г), АРТ, СКТ-3 и др.

-активные угли газового типа, предназначенные для тонкой очистки и разделения газов или адсорбции из растворов веществ при небольших концентрациях, марок СКГ (удельная поверхность 108 $м^2$/г), СКТ-6А (178 $м^2$/г), АГ-2, КАД-водный, БАУ и др.

Силикагель (ксерогель кремниевой кислоты - $nSi0_2$) изготовляется в виде зерен и шариков размером от 0,2 до 7 мм и применяется в процессах осушки воздуха и промышленных газов, осушки различных жидкостей, рекуперации паров органических веществ, очистки масел, удаления из нефти смолистых веществ, очистки промышленных сточных вод от ионов различных металлов, для разделения радиоактивных изотопов и в др. процессах. Общая поверхность 1 г сипикагеля достигает 300-700 $м^2$.

Примеры некоторых марок силикагеля: КСМ-6П (крупнозернистый силикагель мелкопористый) с диаметром шариков 2,8-7 мм, имеющий удельную поверхность 527 $м^2$/г и средний радиус пор 1,12 нм (1,12 $10\sim^9$ м), МСК (мелкозернистый силикагель крупнопористый), имеющий размер зерен 0,25-2 мм, удельную поверхность 380 м7г и средний радиус пор 6,2 нм, КСС-5 (крупнозернистый силикагель специальный) с диаметром шариков 2,8-7 мм, имеющий удельную поверхность 715 м7г и средний радиус пор 1,61 нм, АСК (активированный силикагель крупнопористый) и др.

Активная окись алюминия изготовляется в виде гранул цилиндрической формы диаметром 4-6 мм и длиной 4-25 мм и используется для осушки газов, очистки масел, очистки газов и жидкостей от фторсодержа-щих соединений и в др. процессах. Удельная поверхность активной окиси алюминия марки А-1 достигает 180-200 $м^2$/г с преобладающими радиусами пор 7 и 300 нм.

Цеолиты (молекулярные сита) изготовляются с размером зерен 0,5-2 мм и имеют с удельную поверхностью более 150 $м^2$/г. Они представляют собой пористые искусственные или синтетические алюмосиликаты со строго регулярной кристаллической структурой и поэтому применяются для разделения газов или жидкостей по размерам молекул, например, для разделения нормальных парафиновых углеводородов и углеводородов изостроения, для глубокой осушки и очистки газов и жидкостей и в др. процессах. Цеолиты изготовляются в виде кристаллических порошков, гранул или таблеток. Цеолиты классифицируются по различным признакам и имеют обозначения *LiA, NaA, NaX, CaX* и др.

Понятие об изотерме адсорбции, динамической и статической активности адсорбента

Природа сил, вызывающих адсорбцию, сложна и изучена еще недостаточно полно. В то же время известно, что при длительном соприкосновении адсорбента с фазой, в которой находится поглощаемое вещество, наступает равновесие, т.е. в единицу времени поверхностью твердого тела адсорбируется столько же вещества, столько удаляется с его поверхности. Это состояние для малых концентраций поглощаемого вещества в парогазовой смеси может быть выражено соотношением

$$\bar{x}_p = A\,\bar{y}_p^{1/n} \qquad (6.22)$$

где $\bar{x}_p$ - равновесная концентрация адсорбированного вещества, кг/кг адсорбента; $\bar{y}_p$ - равновесная концентрация поглощаемого вещества в фазе,

соприкасающейся с адсорбентом, кг/кг инертной части парогазовой смеси или раствора; A и n - опытные коэффициенты, причем $n \geq 1$.

Процессы адсорбции сопровождаются выделением тепла, т.е. они экзотермические.

Приведенная зависимость 6.22 соответствует определенной температуре и изображается кривой, носящей название *изотермы адсорбции* (рис. 6.6).

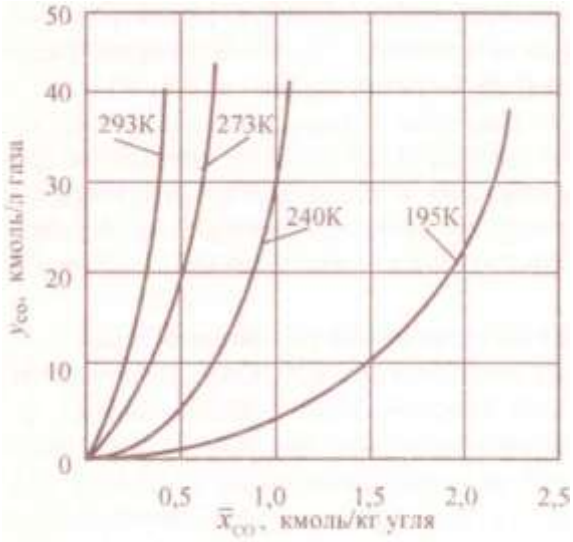


Рис. 6.6. Изотермы адсорбции оксида углерода (CO) активированным углем

Вид и характер изотерм адсорбции зависит от многих факторов, но в первую очередь от природы адсорбента, поглощаемого вещества и инертной фазы, из которой поглощается вещество.

Поглотительная способность адсорбентов характеризуется статической и динамической активностью. Отмечено, что при пропускании парогазовой смеси или раствора сквозь слой адсорбента через некоторое время адсорбент перестает полностью поглощать извлекаемый компонент - наблюдается так называемый «проскок» компонента через слой адсорбента: начиная с какого-то

момента времени, концентрация компонента в отходящей смеси или в растворе растет.

Количество вещества, поглощенное единицей массы (или объема) адсорбента за время от начала адсорбции до начала «проскока», называется *динамической* активностью адсорбента. Если изменить условия процесса поглощения, обеспечив длительный контакт неподвижной парогазовой смеси или раствора с адсорбентом, то количество вещества, поглощенное тем же, что и в первом случае, объемом адсорбента за время от начала адсорбции до установления равновесия, увеличится. Эта характеристика адсорбента называется *статической* активностью. Из определений видно, что динамическая активность меньше статической.

Влияние технологических параметров на протекание процессов адсорбции и десорбции

Концентрация адсорбируемого вещества в парогазовой смеси при постоянной температуре пропорциональна его давлению. Поэтому уравнение изотермы адсорбции в этом случае можно представить в виде:

$$\bar{x}_p = A' p^{1/n} \qquad (6.23)$$

где p - равновесное давление поглощаемого вещества в парогазовой смеси, Па; A' - опытный коэффициент.

На рис. 6.7 показаны изотермы адсорбции метана, этана и паров бензола при одной и той же температуре активным углем. Приведенные закономерности поясняют влияние температуры, давления, а также вида поглощаемого компонента на процесс адсорбции. С уменьшением температуры процесса поглотительная способность адсорбента увеличивается (см. рис. 6.6). Увеличение давления, как видно из выражения 6.23 и рис. 6.7, также приводит к росту поглотительной способности адсорбента. При одних и тех же значениях температуры и давления (p_1 на рис. 6.7) пары бензола поглощаются больше, чем этана, а этана - больше, чем метана. Эти вещества имеют различные температуры кипения и молекулярные массы (метан: темп. кип. -161,58 °С и М= 16,04; этан: темп. кип. -88,63 °С и M = 30,07; бензол: темп. кип. 80,1 °С и M = 78,11). Выявлено, что при прочих равных условиях в большей степени поглощаются те компоненты, которые имеют большие температуры кипения.

Таким образом, адсорбции способствует понижение температуры и повышение давления процесса.

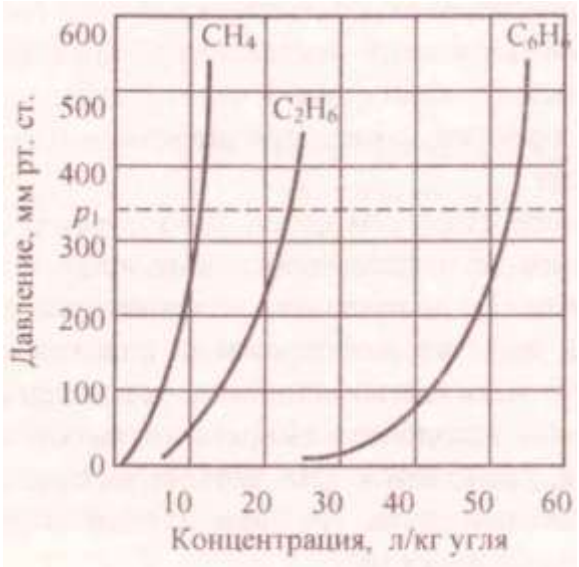


Рис. 6.7. Изотермы адсорбции газов и паров активированным углем

Процесс десорбции обычно проводится после адсорбции с целью выделения поглощенного компонента и регенерации поглотителя. Десорбции способствуют: повышенная температура, пониженное давление и наличие вещества, вытесняющего поглощенное вещество из адсорбента. Такими свойствами обладает водяной пар, который часто используют при проведении процесса десорбции.

Основные типы адсорберов

Для проведения процессов адсорбции веществ из парогазовых смесей применяются адсорберы следующих типов:

с неподвижным зернистым адсорбентом;

с движущимся зернистым адсорбентом;

с кипящим (псевдоожиженным) слоем мелкозернистого адсорбента. Адсорберы с неподвижным слоем зернистого адсорбента работают

периодически и выполняются в виде полых вертикальных или горизонтальных аппаратов, в которых на решетках находится слой адсорбента.

На рис. 6.8 показан *вертикальный угольный адсорбер,* который используется на установках рекуперации. Исходная паровоздушная смесь поступает в адсорбер через верхний штуцер, проходит через находящийся на решетке *3* слой адсорбента *6,* а очищенный воздух удаляется через штуцер в коническом днище адсорбера. По завершении процесса адсорбции проводится десорбция, для чего в аппарат подают перегретый водяной пар (или другой конкурирующий агент), который движется по адсорберу снизу вверх.

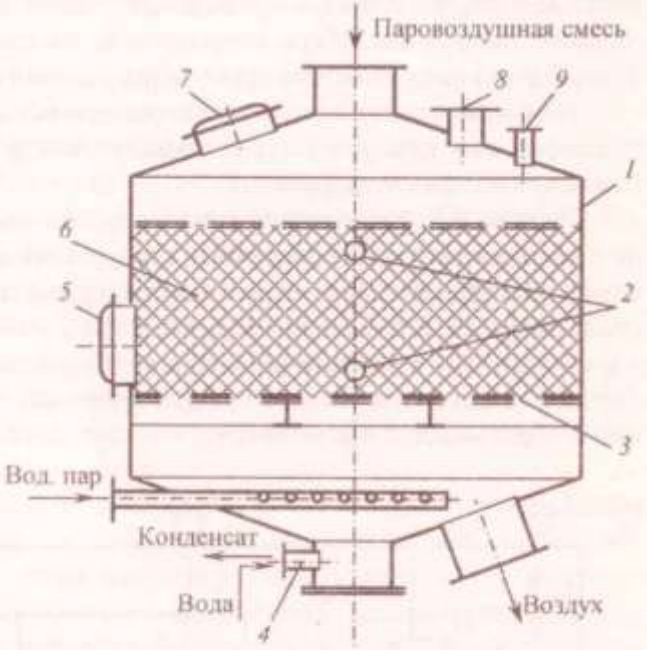


Рис. 6.8. Схема вертикального угольного адсорбера: *1*–корпус; *2*–гнезда для термопар; *3*–опорная решетка; *4*–штуцер подвода воды; *5*–разгрузочный люк; *6*–адсорбент; *7*–загрузочный люк с взрывным мембранным устройством; *8*–штуцер отвода пара при десорбции; *9*–штуцер предохранительного клапана

Паровая смесь, выходящая из штуцера *8,* направляется на конденсацию и разделение, куда также подается стекающий в днище адсорбера конденсат. По завершении процесса десорбции сквозь слой адсорбента для его осушки пропускают горячий воздух, который вводится в аппарат через штуцер подачи водяного пара и удаляется через штуцер *8.* Высушенный адсорбент охлаждают холодным воздухом, движущимся по тому же пути, что и горячий воздух. После этого операции поглощения, десорбции, сушки и охлаждения возобновляются.

Загрузка свежего и выгрузка отработанного адсорбента производится через люки 7 и 5. В случае самовозгорания активированного угля для его тушения используется вода, подаваемая в нижнюю часть адсорбера по штуцеру *4.* Для предотвращения разрушения адсорбера при возможном «хлопке» паровоздушной смеси на крышке загрузочного люка 7 имеется взрывное мембранное устройство.

Так как адсорбер работает периодически, то для обеспечения непрерывности производственного процесса в технологической схеме должно быть установлено несколько параллельно работающих однотипных аппаратов, чтобы соблюдалось следующее условие:

$$\tau_{ад} \geq (\tau_{д} + \tau_{с} + \tau_{охл}) / (n - 1) \qquad (6,24)$$

где τ - продолжительность операции; индексы **ад, д, с** и **охл** означают соответственно адсорбция, десорбция, сушка и охлаждение; *n* - количество однотипных аппаратов.

Продолжительность операции адсорбции оценивается расчетом и уточняется опытным путем, продолжительность вспомогательных операций (десорбции, сушки и охлаждения) определяется экспериментально.

Если принять, что длительность периода адсорбции приближенно равна продолжительности остальных периодов, т.е. $\tau_{ад} \approx (\tau_д + \tau_с + \tau_{охл})$, то для обеспечения непрерывной работы станции понадобится 2 адсорбера. В то время, когда в первом адсорбере будет проходить процесс поглощения, во втором адсорбере - вспомогательные операции по подготовке его к работе: десорбция, сушка и охлаждение. После завершения процесса поглощения в первом адсорбере переключают на поглощение второй, а первый адсорбер переключают для проведения вспомогательных операций.

В большинстве случаев рекуперационные станции работают не по четырехфазному циклу, а по двухфазному, когда фазы сушки и охлаждения совмещены с фазой адсорбции.

На рис. 6.9 приведена технологическая схема *рекуперационной станции,* работающей по двухфазному циклу. Паровоздушная смесь (ПВС) поступает на станцию рекуперации по воздуховоду *1,* защищенному огнепре-градителем *13,* и с помощью вентилятора *2* направляется в адсорбер *6,* который работает в режиме поглощения. Очищенный от паров воздух выходит из нижнего патрубка адсорбера, проходит через сепаратор *12* и по линии *8* сбрасывается в атмосферу.

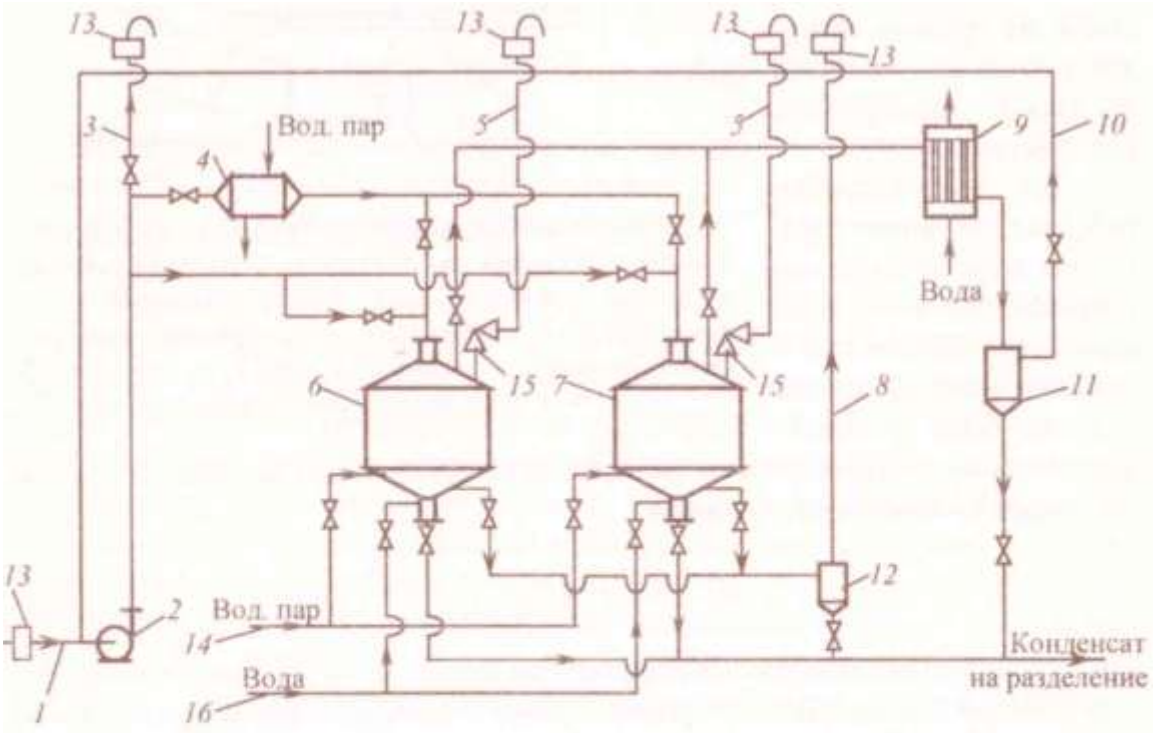


Рис. 6.9. Схема станции рекуперации паров растворителей:
1–воздуховод; *2*–вентилятор; *3*–линия аварийного выхлопа; *4*–теплообменник; *5*–линии сброса с предохранительных клапанов; *6* и *7*–адсорберы; *8*–линия сброса очищенного воздуха; *9*–конденсатор-холодильник; *10*–линия возврата паров; *11* и *12*–сепараторы; *13*–огнепреградители; *14*–коллектор водяного пара; *15*–предохранительные клапаны; *16*–линия подачи воды

В это время в адсорбере 7 производится процесс десорбции паров рас-.

творителей из активированного угля водяным паром, который подается в нижнюю часть адсорбера 7 по коллектору *14.* Водяной пар, проходя через слой адсорбента, насыщается парами растворителя и поступает в конденсатор-холодильник *9,* где пары конденсируются, а образующийся конденсат охлаждается и направляется на установку получения чистого растворителя (на схеме не показана). Конденсат частично сконденсировавшегося в адсорбере 7 водяного пара стекает в коническое днище аппарата и также направляется в сборник. В зависимости от свойств растворителя конденсат может представлять собой эмульсию (компоненты растворителя не растворимы в воде), раствор (все компоненты растворителя растворимы в воде) или сложную смесь эмульсий и растворов. Из эмульсии растворитель выделяют отстаиванием; раствор подвергают ректификации; выделение растворителя из сложной смеси производят последовательно отстаиванием и ректификацией. Рекуперированный растворитель или его отдельные компоненты возвращают в технологический цикл основного производства для повторного использования.

По завершении операции десорбции отключают подачу водяного пара в адсорбер 7. Затем открывают шибер на линии подачи ПВС в теплообменник *4* для ее нагрева водяным паром и проведения процесса сушки активированного угля. После окончания фазы сушки переключают шиберы на линиях подачи ПВС и в адсорбер 7 подается холодная паровоздушная смесь, которая охлаждает уголь. По мере охлаждения угля в адсорбере 7 начинается процесс поглощения паров растворителя из ПВС, т.е. фаза охлаждения автоматически переходит в фазу адсорбции. Одновременно с началом процесса поглощения паров в адсорбере 7 закрывают шибер на линии подачи ПВС в адсорбер *6* для проведения в нем процессов десорбции и регенерации адсорбента.

Количество паров растворителя, улавливаемое из паровоздушной смеси:

$$G_{\text{р}} = W_{\text{пвс}} (y_{\text{н}} - y_{\text{к}}) \tau_{\text{ад}} \qquad (6.25)$$

где G_p - количество улавливаемого растворителя, кг; $W_{\text{пвс}}$ - расход паровоздушной смеси, поступающей в адсорберы на улавливание паров растворителя, м^3/с; $y_н$ и $y_к$- соответственно начальная и конечная концентрации паров растворителя в паровоздушной смеси до и после адсорбции, кг/м^3; $\tau_{ад}$ - продолжительность адсорбции, с.

В то же время величину $G_р$ можно найти из выражения

$$G_p = G_{ao} (\bar{x}_{\text{к}} - \bar{x}_{\text{н}}) \qquad (6.26)$$

где $С_д$ - масса адсорбента в адсорбере; $\overline{x_к}$, и $\overline{x_н}$ - средние концентрации адсорбированного вещества в адсорбере соответственно в конечный и начальный моменты времени, кг/кг адсорбента.

Из выражений 6.25 и 6.26 можно найти продолжительность фазы адсорбции до момента проскока паров растворителей через слой адсорбента, т.е. когда $у_к$ =

0:

$$\tau_{ад} = G_{ад}(\bar{x}_к - \bar{x}_н) / W_{пвс} y_н \quad (6.27)$$

В полученном выражении массу адсорбента в адсорбере определяют по формуле

$$G_{ад} = \frac{\pi D^2 H \rho_{нас}}{4} \quad (6.28)$$

где D и H - соответственно диаметр адсорбера и высота слоя адсорбента, м; $\rho_{нас}$ - насыпная плотность адсорбента; кг/м; величина $\rho_{нас}$ зависит от вида адсорбента и размера его зерен; для гранулированного активного угля принимают $\rho_{нас} = 500$ кг/м^3.

На рис. 6.10 показана схема непрерывно действующего адсорбера с движущимся зернистым адсорбентом, которые применяются в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Адсорбер представляет собой сложный по конструкции аппарат колонного типа со встроенными холодильником *1,* распределительными тарелками *2* и *5* и подогревателем *6.* Зернистый адсорбент, поступающий в аппарат через верхний патрубок, движется самотеком сверху вниз и проходит последовательно через зоны охлаждения, адсорбции и десорбции. Регенерированный адсорбент, охлажденный в трубах холодильника *1,* проходит через распределительную тарелку *2* и поступает в зону адсорбции, куда подается исходная парогазовая смесь через перфорированный патрубок *4.* После взаимодействия с адсорбентом не поглощенная часть смеси выводится из адсорбера через патрубок *10,* а насыщенный поглощенными компонентами адсорбент проходит через распределительную тарелку *5* и поступает в трубы подогревателя *6* зоны десорбции адсорбера. В эту зону через перфорированный патрубок 7 подается конкурирующий агент - водяной пар, который вытесняет из адсорбента поглощенные компоненты и выходит в смеси с ними через патрубок *9.* В нижней части адсорбера имеется затвор *8,* аналогичный по устройству с секторным питателем, с помощью которого регулируется скорость движения адсорбента.

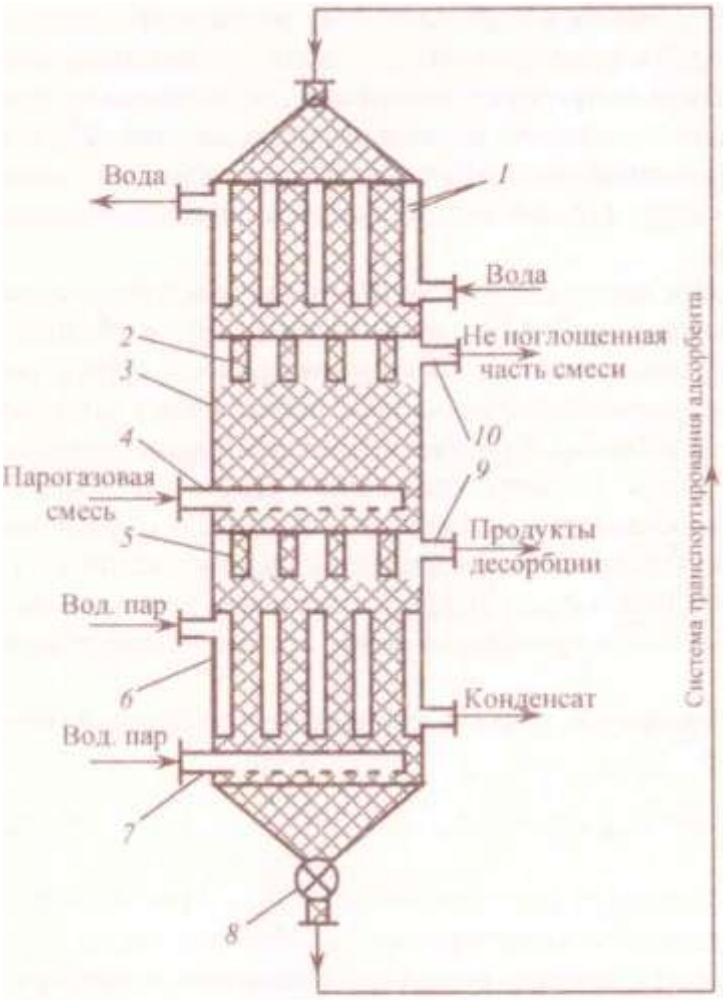


Рис. 6.10. Схема адсорбера с движущимся слоем зернистого адсорбента:
1–холодильник; *2*, *5*–распределительные тарелки; *3*–адсорбционная секция; *4* и *7*–перфорированные патрубки; 6–подогреватель секции десорбции; *8*–затвор; *9*, *10*–отводящие патрубки

Регенерированный адсорбент поступает в приемное устройство элеватора или пневмоподъемника (на схеме не показаны) и транспортируется к верхнему патрубку адсорбера. Далее процесс повторяется.

6.2.3. Аппараты для проведения процессов абсорбции

Сущность процесса абсорбции

Процессы абсорбции, также как и процессы адсорбции, используются в промышленности для выделения из газовых или парогазовых смесей ценных компонентов, для очистки технологических и горючих газов от вредных примесей, для санитарной очистки отходящих газов производств.

Схема процесса абсорбции в близком к равновесному состоянии показана на рис. 6.11.

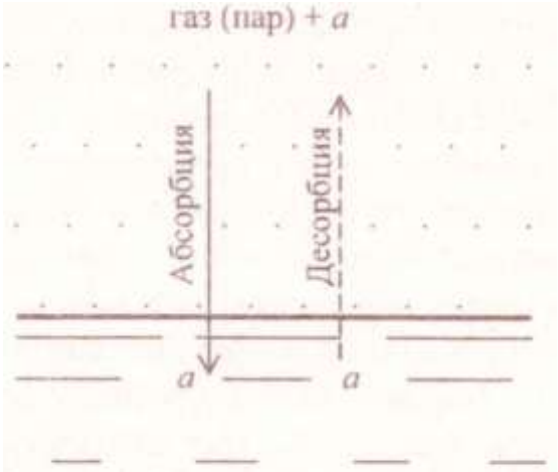


Рис. 6.11. Схема процесса абсорбции
(*а*–поглощаемый компонент смеси)

При соприкосновении газовой (парогазовой) фазы с жидкостью происходит избирательное растворение (абсорбция) содержащегося в этом газе компонента *а*. По мере насыщения жидкости компонентом *а* ускоряется обратный процесс - процесс десорбции компонента *а* из жидкости (абсорбента) и через определенный промежуток времени установится равновесие.

Влияние технологических параметров на протекание процессов абсорбции и десорбции

Растворимость газов в жидкостях зависит от физико-химических свойств этих газов и жидкостей, температуры процесса и парциального давления в газовой смеси поглощаемого компонента. Растворимость газов и паров в жидкостях сопровождается выделением тепла, так как процессы абсорбции экзотермические.

Зависимость между растворимостью газа и его парциальным давлением в состоянии равновесия выражается законом Генри:

$$p_a = \Psi\ \overline{X}_a \qquad (6.29)$$

где p_a - равновесное парциальное давление поглощаемого компонента *а* над абсорбентом, Па; Ψ - коэффициент пропорциональности (константа Генри), зависящий от свойств растворяемого газа, вида абсорбента и температуры, Па; $\overline{X_a}$ - содержание растворенного компонента *а* в абсорбенте, кг/кг абсорбента.

Константа Генри зависит от природы растворяемого компонента и температуры:

$$\ln \Psi = -\frac{q}{RT} + C \qquad (6.30)$$

где *q* - теплота растворения газа, Дж/моль; *R* = 8,314 Дж/(моль*К) - универсальная газовая постоянная; Т - температура процесса, К; *С* - постоянная,

зависящая от природы газа и жидкости.

Константа Генри увеличивается с ростом температуры, асимптотически приближаясь к значению постоянной *C*. Анализ выражений 6.29 и 6.30 показывает, что с повышением температуры процесса растворимость поглощаемого компонента в жидкости уменьшается, а с повышением его парциального давления - растет. Парциальное давление компонента можно увеличить за счет повышения его концентрации в смеси или за счет повышения общего давления системы.

Таким образом, процессу абсорбции способствуют: повышенное давление среды, высокая концентрация поглощаемого компонента и пониженная температура (процесс должен протекать с отводом тепла).

Для практических расчетов необходимо знать связь между содержанием абсорбируемого компонента в газовой фазе и в растворе.

Относительное весовое содержание компонента а в газовой (парогазовой) смеси определяется по формуле

$$\bar{y}_a = \frac{m_a}{m_н}\ , \text{кг/кг инертного газа,} \qquad (6.31)$$

где m_a - масса поглощаемого компонента *а* в смеси, кг; $m_н$ - масса не поглощаемого (инертного) компонента, кг. Вспомним, что

$$m_a = \rho_a \varphi_a \quad \text{и} \quad \varphi_a = p_a / p_{общ},$$

а

$$m_н = \rho_н \varphi_н \quad \text{и} \quad \varphi_н = p_н / p_{общ} = (p_{общ} - p_a) / p_{общ}.$$

В этих выражениях: $\rho_а$ и $\rho_н$ - плотности соответственно поглощаемого и не поглощаемого компонентов смеси; $\boldsymbol{\varphi_а}$ и $\boldsymbol{\varphi_н}$ - объемные концентрации этих компонентов в смеси; p_a и $p_н = p_{общ} - p_a$ - парциальные давления компонентов и $p_{общ}$ - общее давление парогазовой смеси.

Подставляя значения найденных величин в выражение 6.31, получаем:

$$\bar{y}_a = \frac{\rho_a \varphi_a}{\rho_н \varphi_н} = \frac{\rho_a p_a}{\rho_н (p_{общ} - p_a)} \qquad (6.32)$$

В этом выражении в соответствии с законом Дальтона отношение $p_а/p_н$ можно заменить на $M_a/M_н$ (здесь M_a и $M_н$ - молекулярные массы соответственно поглощаемого компонента *а* и инертного (не поглощаемого) компонента смеси).

Известно, что при небольших значениях p_a по сравнению с $p_{обт}$, что часто имеет место на практике, величиной p_a в знаменателе выражения 6.32 можно пренебречь.

Тогда с учетом зависимости 6.29 окончательно имеем:

$$\overline{y}_a = \frac{M_a p_a}{M_н p_{общ}} = \frac{M_a}{M_н}\frac{\Psi_a \overline{X}_a}{p_{общ}} = K\overline{X}_a \qquad (6.33)$$

где $K = \frac{M_a}{M_н}\frac{\Psi_a}{p_{общ}}$ - константа фазового равновесия процесса абсорбции.

Последнее уравнение показывает, что для идеальных газов линия равновесия в координатах $\overline{y} - \overline{x}$ представляет собой прямую 1, проходящую через начало координат под углом, тангенс которого равен *K* (рис. 6.12).

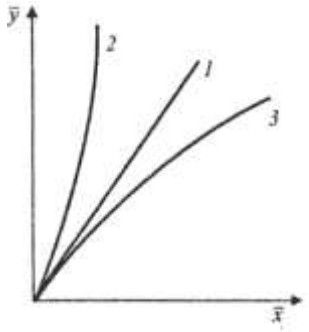


Рис. 6.12. Линии равновесия процесса абсорбции

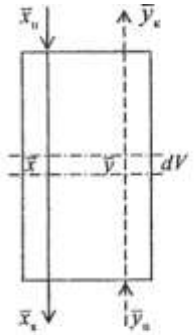


Рис. 6.13. Схема материальных потоков в элементе абсорбера

Закон Генри хорошо согласуется с данными опытов и для реальных газов при незначительных концентрациях поглощаемого компонента, а также при его малой растворимости в абсорбенте (линия *1)*. Для систем, не подчиняющихся закону Генри, коэффициент фазового равновесия K является переменной величиной, зависящей от состава раствора $\overline{x}$. Линия равновесия в этом случае изображается выпуклой *(3)* или вогнутой (2) кривыми, которые на диаграмме $\overline{y} - \overline{x}$ строятся по опытным данным.

Для определения расхода абсорбента рассмотрим процесс абсорбции, протекающий в элементарно малом объеме абсорбера *dV(*рис. 6.13).

Примем следующие обозначения:

$\overline{x}$ и $\overline{y}$ - текущие концентрации поглощаемого компонента в растворе и газе, кг/кг;

$\overline{x_н}$, $\overline{x_к}$ - начальная и конечная концентрации абсорбированного компонента в растворе, кг/кг чистого абсорбента;

$\overline{y_н}$, $\overline{y_к}$ - начальная и конечная концентрации абсорбированного компонента в газе, кг/кг инертного газа;

L - количество чистого абсорбента протекающего через абсорбер, кг/с;

G - количество газа, поглощенного абсорбентом, кг/с;

$G_н$ - количество не поглощаемого (инертного) компонента в газовой (парогазовой) смеси, проходящей через абсорбер, кг/с.

Количество компонента, поглощаемого абсорбентом при прохождении газового потока через элемент объема в единицу времени:

$$-dG = G_н\, d\bar{y} = L\, d\bar{x} \qquad (6.34)$$

где $d\bar{y}$ и $d\bar{x}$ - изменения концентрации поглощаемого компонента соттветственно в газе и растворе в элементе объема абсорбера dV.

Отсюда

$$G = -G_н \int_{\bar{y}_н}^{\bar{y}_к} d\bar{y} = -L \int_{\bar{x}_н}^{\bar{x}_к} d\bar{x} \qquad (6.35)$$

или

$$G = G_н(\bar{y}_н - \bar{y}_к) = L(\bar{x}_к - \bar{x}_н) \qquad (6.36)$$

Тогда общий расход абсорбента

$$L = \frac{G}{\bar{x}_к - \bar{x}_н} = \frac{G_н(\bar{y}_н - \bar{y}_к)}{\bar{x}_к - \bar{x}_н} \qquad (6.37)$$

Теоретически при полном извлечении компонента его содержание смеси на выходе из абсорбера составило бы $\overline{y_к}$ = О, а количество погл щенного компонента было бы равно $G_н \overline{y_н}$. Однако это состояние недостижимо и фактическое количество поглощенного компонента равно $G_н = (\overline{y_н} - \overline{y_к})$.

Отношение фактического количества извлеченного компонента из газовой смеси к его теоретическому количеству при полном извлечении н зывается *степенью извлечения* ε (ε всегда меньше 1):

$$\varepsilon = G_н(\bar{y}_н - \bar{y}_к)/G_н\bar{y}_н = (\bar{y}_н - \bar{y}_к)/\bar{y}_н = 1 - \bar{y}_к/\bar{y}_н \qquad (6.38)$$

Степень извлечения является одним из критериев оценки эффективности однотипных производств на различных предприятиях.

Основные типы абсорберов

Аппараты, в которых протекают процессы поглощения газа и пара жидкостью называются *абсорберами* и *скрубберами.* Поскольку при абсорбции

процессы массопередачи протекают на поверхности раздела фаз, эта поверхность должна быть максимально развитой. По способу образо

вания поверхности соприкосновения фаз различают три типа абсорберов: поверхностные, барботажные и распыливающие.

Поверхностные абсорберы используются для поглощения хорошо растворимых газов. В таких абсорберах поверхностью соприкосновения фаз является зеркало жидкости или поверхность текущей по внутренней поверхности труб *1* жидкостной пленки (рис. 6.14).

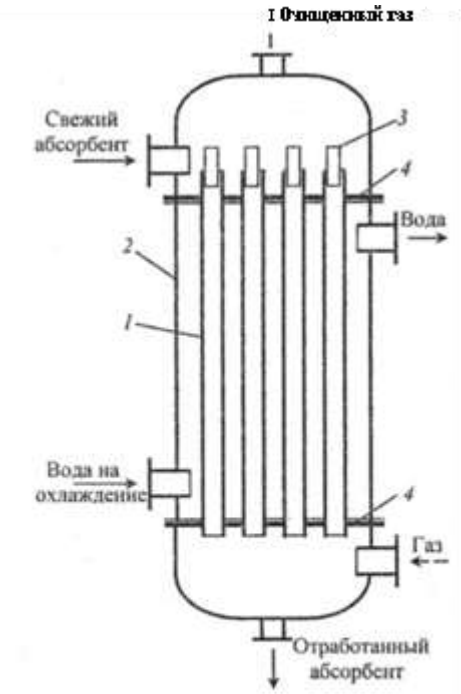


Рис. 6.14. Схема трубчатого пленочного абсорбера:
1–трубы; *2*–корпус; *3*–распределительное устройство; *4*–трубные решетки

Наибольшее распространение получили иасадочные абсорберы (см. рис. 6.28). Насадочный абсорбер представляет собой колонну, заполненную специальными твердыми телами - насадкой. Насадка должна обладать развитой поверхностью и оказывать малое гидравлическое сопротивление потоку газа. Наиболее известным типом насадок являются *кольца Рашига,* у которых диаметр равен высоте *(*d_K = h_K = 15-150 мм). Материалом для изготовления таких колец служит керамика, фарфор. В качестве насадки применяют дробленый кокс и кварц с размером кусков 25-100 мм. Распространена также хордовая насадка - многослойная решетка из досок, поставленных на ребро, причем слои повернуты относительно друг друга на определенный угол. Преимуществом насадочных колонн является простота устройства, особенно важная при работе с агрессивными средами, т.к. в этом случае требуется защита от коррозии только корпуса колонны, а насадка выполняется из химически стойкого материала. К тому же иасадочные колонны обладают низким, по сравнению с барботажными колоннами, гидравлическим сопротивлением. Однако насадочные колонны мало пригодны для работы с загрязненными механическими примесями абсорбентами,

с небольшими расходами абсорбента, в этих колоннах затруднен отвод выделяющегося тепла.

В *барботажных {тарельчатых) абсорберах* поверхность соприкосновения фаз создается потоком газа, распределяемого в жидкости в виде пузырьков и струй на специальных устройствах - тарелках. Такое движение газа называется барботажным. В промышленности применяются колпач-ковые, ситчатые, провальные и другие тарелки.

В колоннах с колпачковы-ми тарелками (рис. 6.15) газ барботирует через жидкость, выходя из прорезей колпачков, расположенных на каждой тарелке. В прорезях газ дробится на мелкие струйки и, поднимаясь вверх, проходит через слой движущейся вдоль тарелки жидкости, вспенивая ее. Очищенный газ удаляется из верхней части колонны.

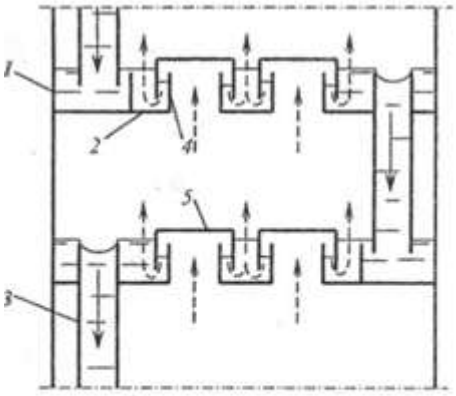


Рис. 6.15. Схема колпичковой тарелки:
– – – → пар; ——→ жидкость;
1–корпус колонны; *2*–дно тарелки; *3*–перелив-ной патрубок; *4*–паровой патрубок; *5*–колпачок

По конструкции различают круглые (капсульные) колпачки и прямо-угольные (туннельные) колпачки. Круглые колпачки обычно имеют диаметр 80-100 мм, а при работе с загрязненными жидкостями — до 200-300 мм. Ширина туннельных колпачков составляет 70-150 мм. Количество капсульных колпачков на тарелке превышает 270 штук при диаметре колонны 3000 мм и более. К достоинствам колпачковых тарелок относится возможность регулирования высоты слоя жидкости, а к недостаткам -сложность устройства и трудность быстрого опорожнения от жидкости при возникновении аварийной ситуации.

В *распиливающих абсорберах (скрубберах)* (рис. 6.16) поверхность соприкосновения фаз создается путем распыления жидкости на мелкие капли в массе газа. Эти абсорберы изготовляются в виде пустотелых аппаратов колонного или башенного типов, в верхней части которых имеются устройства для распыления жидкости, а газ подается снизу. Область применения таких абсорберов ограничена: поглощаемые газы должны иметь хорошую растворимость в применяемых абсорбентах.

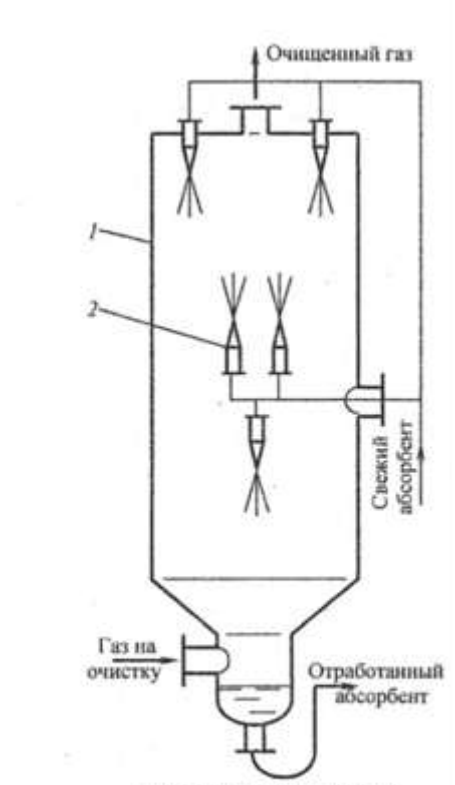


Рис. 6.16. Схема скруббера:
1–корпус; *2*–форсунки для разбрызгивания жидкости

Распыление жидкостей производят гидравлическими или пневматическими форсунками, а также центробежными распылителями. Центробежные распылители изготовляются в виде турбинок или дисков, вращающихся со скоростью 4000-20000 об/мин. Схема дискового центробежного распылителя показана на рис. 6.17. Дисковые распылители в отличие от форсунок могут использоваться для распыления суспензий и загрязненных жидкостей. Преимуществами распыливающих абсорберов являются: простота их конструкции и дешевизна при изготовлении, низкое гидравлическое сопротивление и возможность использования газов и жидкостей, сильно загрязненных механическими примесями. К недостаткам относятся: необходимость затрат дополнительной энергии на распыление жидкости, трудность регулирования процесса и невозможность создания больших плотностей орошения.

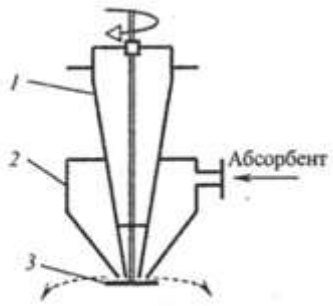


Рис. 6.17. Схема дискового центробежного распылителя: 1-корпус: 2-распределительный патрубок; 3-диск

Десорбция, или отгонка, то есть выделение растворенного газа из абсорбента, производится тремя способами: в токе инертного газа, выпариванием или перегонкой раствора в вакууме.

Десорбция в токе инертного газа (собственно десорбция) происходит при соприкосновении раствора с инертным газом, когда растворенный компонент переходит в газовую фазу вследствие того, что парциальное давление компонента над раствором выше, чем в инертном газе. В качестве инертного газа обычно используется воздух, а в случае десорбции нерастворимых в воде газов или паров - водяной пар. Десорберами в этом случае служат насадочные или барботажные колонны. Отработанный абсорбент поступает в такие колонны сверху, а инертный газ - снизу; из нижней части колонны отводится регенерированный раствор, а из верхней - смесь инертного газа с выделенным из раствора компонентом.

Отгонка путем выпаривания раствора производится его кипячением при атмосферном давлении или в вакууме. В этом случае из раствора выделяется не только поглощенный компонент, но и часть испаряющегося абсорбента. Отгонка в вакууме применяется в случаях, когда при атмосферном давлении невозможно достичь полного выделения компонента из поглотителя или имеется опасность термического разложения продуктов отгонки или абсорбента.

Принципиальная схема *абсорбционно-десорбционной установки* противоточного типа показана на рис. 6.18. В состав установки входят две последовательно работающих абсорбционных колонны насадочного типа -абсорбер первой ступени *1* и абсорбер второй ступени *2,* насадочная де-сорбционная колонна *11,* а также теплообменники кожухотрубного типа, сборники и насосы.

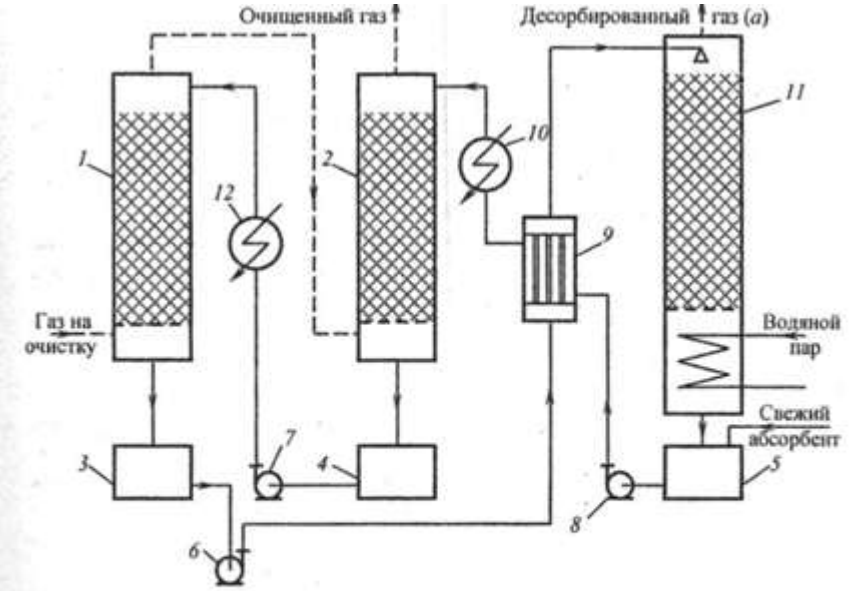


Рис. 6.18. Схема двухступенчатой абсорбционной установки с десорбцией

Регенерированный в десорбционной колонне *11* абсорбент забирается из сборника *5* насосом *8,* проходит через теплообменник *9,* где он отдает свое тепло отработанному абсорбенту, идущему на десорбцию, охлаждается в холодильнике *10* и подается на орошение абсорбера второй ступени 2, в нижнюю часть которого поступает газ, выходящий из верхней части абсорбера первой ступени *1.* Раствор из абсорбера *2* стекает в сборник *4,* из которого забирается насосом **7,** проходит через холодильник *12* и подается на орошение абсорбера первой ступени *1,* в нижнюю часть которого поступает исходная газовая (паровая или парогазовая) смесь с поглощаемым компонентом *а.* Насыщенный поглощенным компонентом абсорбент из абсорбера первой ступени *1* стекает самотеком в сборник *3,* откуда забирается насосом *6,* нагревается в теплообменнике *9* и подается в десорбцион-ную колонну *11.* Из верхней части десорбера *11* отводится выделившийся из абсорбента компонент *а,* входивший в состав исходной газовой смеси, а регенерированный абсорбент собирается в сборнике *5.*

6.3. АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕГОНКИ И РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСЕЙ ЖИДКОСТЕЙ

6.3.1. Сущность процессов перегонки и ректификации

Процессы перегонки и ректификации смесей жидкостей на составляющие их компоненты или отдельные фракции широко распространены в современной технологии. В качестве примеров можно привести процессы перегонки нефти в целях получения моторных топлив и смазочных масел, выделения индивидуальных газов из газовых смесей и т.п. процессы. Подавляющее большинство ЛВЖ и ГЖ (этиловый спирт, ацетон, уксусная кислота, бензол и многие другие продукты) получаются с использованием процессов перегонки и

ректификации.

Установки для перегонки и ректификации смесей жидкостей дорогостоящие и сложные по своему устройству агрегаты, в которых протекают массо- и теплообменные процессы.

В природе существуют жидкости взаимно растворимые друг в друге, ограниченно растворимые и нерастворимые. Процессы перегонки и ректификации используются для разделения на составляющие их компоненты (простые вещества или отдельные узкие фракции) смесей жидкостей (часто называемых растворами), взаимно растворимых друг в друге. В свою очередь растворы подразделяются на идеальные и неидеальные.

Рассмотрим простейший случай - поведение *бинарной* (состоящей из двух компонентов: *a* и *b)* идеальной смеси, нагретой до кипения в условиях постоянной температуры и давления. Если такую смесь достаточно долго выдержать в замкнутом объеме, то система, состоящая из жидкости и пара, придет в состояние равновесия. Потоки компонентов *a* и *b,* из жидкой фазы в паровую фазу и обратно будут одинаковы. Но при этом состав пара будет отличатся от состава жидкости.

Введем обозначения:

-компонент *a* имеет меньшую температуру кипения t_{ka}, и называется *низкокипящим* или легколетучим компонентом (сокращено НК);

-компонент *b* имеет большую температуру кипения t_{kb} и называется *высококипящим* или труднолетучим компонентом (сокращенно ВК).

Давление насыщенных паров чистых компонентов *a* и *b* при данной температуре кипения смеси $t_{кип}$ соответственно обозначим p_a и p_b. Таким образом, $t_{ka} < t_{kb}$, а $p_a > p_b$.

Идеальные смеси подчиняются закону Рауля и для них можно записать:

$$P_a = p_a x_a \qquad (6.39)$$

$$P_b = p_b x_b = p_b (1 - x_a) \qquad (6.40)$$

где P_a и P_b- парциальные давления компонентов *a* и *b;* x_a и x_b- молярные доли компонентов а и 6 в растворе, доли моля, причем $x_a + x_b = 1$.

$$\frac{P_a}{p_{общ}} = \frac{p_a x_a}{p_{общ}} \quad \text{и} \quad \frac{P_b}{p_{общ}} = \frac{p_b x_b}{p_{общ}} = \frac{p_b (1 - x_a)}{p_{общ}} \qquad (6.41)$$

В этих уравнениях левые части представляют собой (согласно закону Дальтона) содержание компонентов *a* и *b* в паровой фазе:

Разделим обе части выражений (6.39) и (6.40) на одну и ту же величину $p_{общ}$ (общее давление в системе) и получим:

$$\frac{P_a}{p_{общ}} = y_a \quad \text{и} \quad \frac{P_b}{p_{общ}} = y_b \qquad (6.42)$$

Тогда

$$y_a = \frac{p_a x_a}{p_{общ}} \quad \text{и} \quad y_b = \frac{p_b (1 - x_a)}{p_{общ}} = 1 - y_a \qquad (6.43)$$

т.к. $y_a + y_b = 1$.

Таким образом, зная состав раствора, можно найти равновесный состав пара и наоборот. Кроме того, из выражений (6.42) и (6.43) следует, что в паровой фазе содержится больше НК, чем в жидкой фазе. Это положение сформулировано в *первом законе Коновалова:* пар обогащается тем компонентом, прибавление которого к жидкости повышает давление пара над ней или понижает температуру кипения.

Смеси химически сходных веществ (например, смеси жидких углеводородов, смеси спиртов, смеси органических кислот и т.д.) имеют незначительные отклонения от закона Рауля и практически могут рассматриваться как идеальные. В то же время многие смеси жидкостей не относятся к идеальным, так как имеют отклонения от закона Рауля (положительные или отрицательные) в связи с различием сил сцепления между молекулами каждого из компонентов и между собой. Для бинарной смеси равновесную зависимость можно представить, используя две переменные величины. При $p_{общ}$= *const* (большинство процессов перегонки и ректификации проводят при постоянном давлении) равновесные закономерности обычно строят в координатах *t - x и t - y.* Зная температуры кипения смесей компонентов а й в различного состава, рассчитав значения *x* и *y* или найдя их значения в справочной литературе, можно построить совместную диаграмму *t - x - y,* характеризующую равновесие в системе (рис. 6.19).

Кривая *1* на рис. 6.19 отвечает температурам начала кипения жидкой смеси, кривая *2* - температурам начала конденсации паров. Имея такую диаграмму, довольно легко по составу жидкости (например, x_{a1}) найти равновесный состав п а р а y_{a1} и температуру в системе (температуру начала кипения жидкости t_1**).**

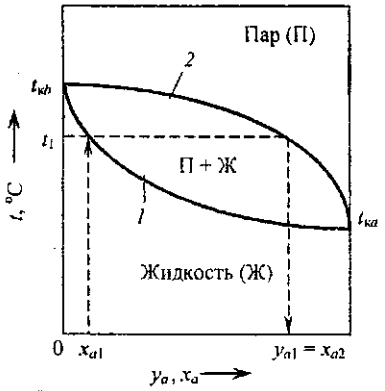


Рис. 6.19. Зависимость температуры парожидкостной системы от состава фаз в условиях равновесия

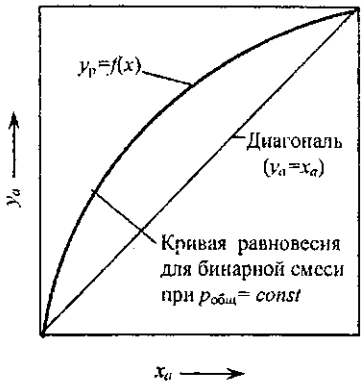


Рис. 6.20. Диаграмма $t - x - y$ для идеальной бинарной смеси

Для анализа процессов перегонки и ректификации более удобна диаграмма ***y -x,*** построенная на основе диаграммы ***t - x - y*** (рис. 6.20). Кривая зависимости $y_p = f(x)$ отвечает уравнению (6.43) и называется *равновесной кривой* для бинарной смеси.

Рассмотренные способы определения равновесного состава жидкой и паровой фаз (как аналитические, так и графические), позволяют произвести технологические расчеты процессов перегонки и ректификации, а также выполнить анализ их пожарной опасности.

Для неидеальных смесей при больших отклонениях от закона Рауля характерны зависимости с явно выраженными минимумами (рис. 6.21, *а)* и максимумами (рис. 6.21, б) температур кипения.

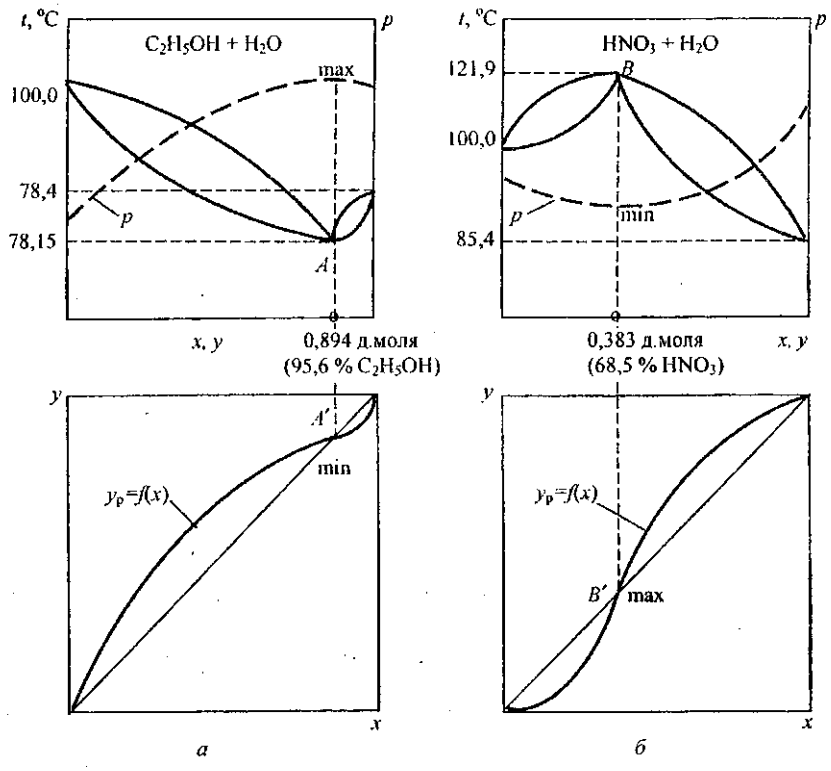


Рис. 6.21. Диаграммы равновесия для бинарных смесей жидкостей с минимумом (*а*) и максимумом (*б*) температуры кипения

Из рисунков хорошо видно, что линии кипения и конденсации на диаграммах *t-x-y* сливаются в одну точку А или В, а на диаграммах *x-y* линии равновесия в точках *A'* и *B'* пересекают диагонали. В этих точках состав пара не отличается от состава жидкости, а сами точки называются точками азеотропных составов. Азеотропные, или нераздельнокипящие, смеси обладают следующими особенностями:

-азеотропная смесь имеет минимальную (рис. 6.21.а) или максимальную (рис. 6.21.6) температуру кипения по сравнению со смесями этих компонентов любого другого состава. Бинарные смеси жидкостей органического происхождения обычно образуют системы с минимумом температуры кипения. Например, смеси ацетона и метилового спирта, бензола и уксусной кислоты, изопропилового спирта и воды, метилового спирта и бензола, сероуглерода и ацетона, толуола и уксусной кислоты, четыреххлори-стого углерода и этилового спирта, этилового спирта и бензола и т.д.;

-кипение азеогропыой смеси, как и чистого вещества, происходит при постоянной температуре;

-азеотропная смесь кипит (испаряется) без изменения состава. Свойства нераздельнокипящих смесей обобщаются *вторым законом*

Коновалова: максимум на кривой давления пара (пунктирная линия на диа-граммах *p — x — y)* отвечает минимуму на кривой температуры и наоборот.

Точки *A* и *B* определяют возможные границы разделения жидких смесей простыми методами перегонки и ректификации.

В зависимости от технологии производства, свойств разгоняемых веществ, степени (четкости) разделения и других факторов в промышленности нашли применение следующие способы разделения растворов: простая перегонка, перегонка с дефлегмацией пара, простая ректификация, перегонка с водяным паром, экстрактивная и азеотропная перегонки, газофракционирование и другие.

6.3.2. Простая перегонка растворов

Нагреем жидкость исходного состава x_{a1} по НК до температуры кипения t_1 (рис. 6.22). Образующийся при этом пар будет содержать y_{a1} долей НК, после полной конденсации которого при температуре t_k в получившейся жидкости будет содержаться x_{a2} долей НК $(x_{a2} = y_{a1})$- Из графика хорошо видно, что $x_{a2} > x_{a1}$, т.е. полученный конденсат обогащается низко-кипящим компонентом. В кипящей жидкости (остатке) содержание НК уменьшается - она обогащается высококипящим компонентом (ВК), а температура кипения остатка повышается, например, до температуры t_2. При этой температуре содержание НК в остатке будет равно x_{a3}, а в паровой фазе - y_{a2}. При полной конденсации этого пара образуется жидкость состава $x_{a4} = y_{a2}$- Собрав полученный конденсат, получим жидкость - дистиллят, выкипающий в интервале температур t_1-t_2, содержание НК в котором больше, чем в исходной смеси (фракция $[t_1$-$t_2]$).Содержание НК во фракции $[t_1$-$t_2]$ приблизительно равно $(x_{a2} + x_{a4})/2$.

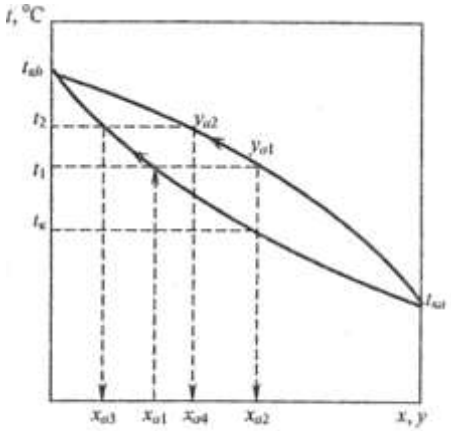


Рис. 6.22. Изображение процесса простой перегонки на диаграмме $t - x - y$

Процесс частичного испарения исходной смеси и полной конденсации образующихся паров называется *простой перегонкой.* Принципиальная схема периодического процесса простой перегонки представлена на рис. 6.23.

Емкость *2* (перегонный куб), снабженная кипятильником 7, заполняется исходной смесью состава x_{a1} по НК. Смесь доводится до кипения, пары отводятся по трубопроводу, полностью конденсируются в конденсаторе-холодильнике *3,* а образующийся дистиллят собирается в сборниках *4.* В первом сборнике собирается фракция t_1-t_2, затем во втором - фракция, выкипающая в диапазоне температур t_2-t_3 и т.д. После завершения процесса перегонки в кубе находится остаток, выкипающий при температуре выше t_3. Остаток сливают, куб заполняют свежей исходной смесью и процесс возобновляют.

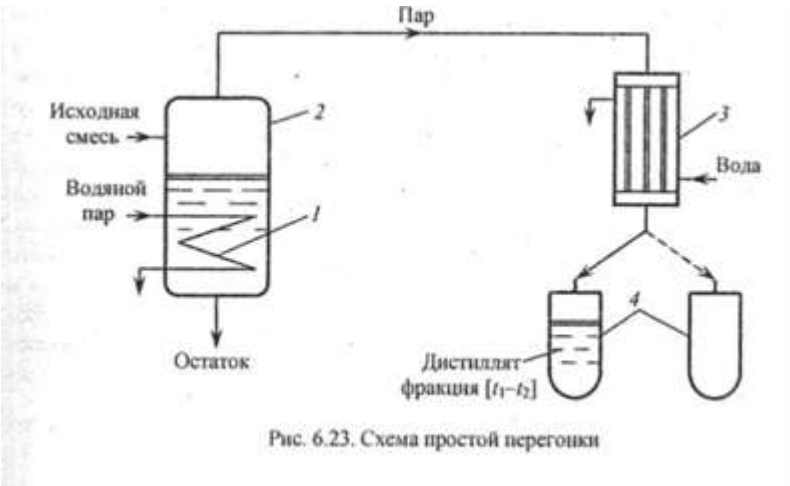


Рис. 6.23. Схема простой перегонки

6.3.3. Перегонка с дефлегмацией пара

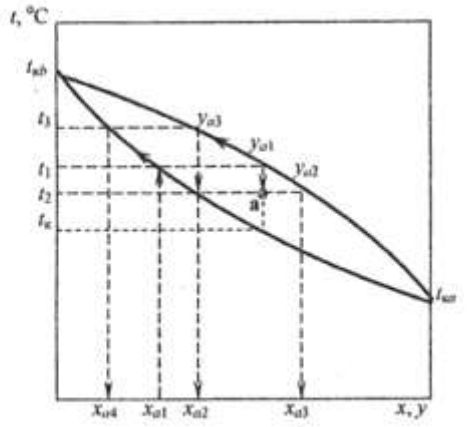


Рис. 6.24. Изображение процесса перегонки с дефлегмацией пара на диаграмме $t - x - y$

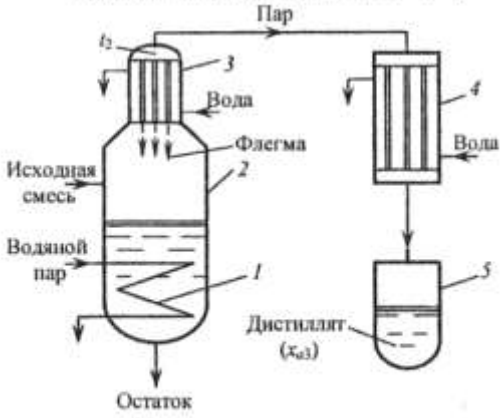


Рис. 6.25. Схема процесса перегонки с дефлегмацией пара

Как и в предыдущем случае, нагреем жидкость исходного состава x_{a1} по НК до температуры кипения t_1, (рис. 6.24). Образующийся пар, содержащий y_{a1} долей НК, будем охлаждать, но не до температуры $t_к$, когда происходит его полная конденсация, а до температуры t_2 (точка **а).** При этом образуется двухфазная система: дистиллят состава x_{a2} и не сконденсировавшийся пар состава y_{a2}. Содержание НК в них будет различно. Причем $y_{a2}>x_{a2}>x_{a1}$.

По мере выкипания исходной смеси содержание НК в ней уменьшается, а температура кипения смеси растет. Но, как видно из диаграммы, при частичной конденсации при температуре t_2 состав пара не изменяется до тех пор, пока температура остатка не превысит значения t_3**.** Это состояние системы будет соответствовать составу остатка по НК x_{a4} а пара y_{a3}.

Таким образом, процесс неполной конденсации, также как и процесс частичного испарения, приводит к обогащению пара низкокипя-щим компонентом, причем концентрация НК в отобранном дистилляте $x_{a3}=y_{a2}$ будет значительно выше, чем при проведении процесса частичного испарения при прочих равных условиях. Такой процесс частичного испарения исходной смеси и неполной конденсации образующихся паров называется *процессом перегонки с дефлегмацией пара.*

Принципиальная схема периодического процесса перегонки с дефлегмацией (неполной конденсацией) пара показана на рис. 6.25. Перегонный куб *2* заполняется исходной смесью состава x_{a1} по НК, которая с помощью

кипятильника *1* доводится до кипения. В верхней части куба имеется конденсатор *3,* на выходе которого поддерживается постоянная температура t_2 с помощью хладоносителя - воды. В конденсаторе *3* пары, выходящие из куба, частично конденсируются, и конденсат состава x_{a2} стекает обратно в перегонный куб.

Жидкость, образующаяся в результате неполной конденсации пара и стекающая в перегонный куб, называется *флегмой,* а аппарат, где происходит процесс неполной конденсации паров, - *дефлегматором.*

Не сконденсировавшиеся в дефлегматоре пары поступают в конденсатор-холодильник *4,* где полностью конденсируются и охлаждаются, а образующийся дистиллят состава x_{a3} собирается в сборнике *5.* После завершения процесса перегонки при достижении температуры в кубе значения t_3 остаток состава $\mathbf{x_{a4}}$ по НК сливают, куб заполняют свежей исходной смесью и процесс возобновляют.

6.3.4. Простая ректификация

Многократно чередуя процессы частичного испарения и неполной конденсации, можно получить достаточно чистый дистиллят (практически чистый НК) и кубовый остаток, т.е. разделить смесь на компоненты. В этом и заключается сущность *процесса простой ректификации.*

Процесс ректификации осуществляют в ректификационной колонне, в которой происходит многократное противоточное взаимодействие пара и кипящей жидкости, в результате чего исходная смесь разделяется на составляющие компоненты. Принципиальная схема процесса разделения смеси в ректификационной колонне показана на рис. 6.26.

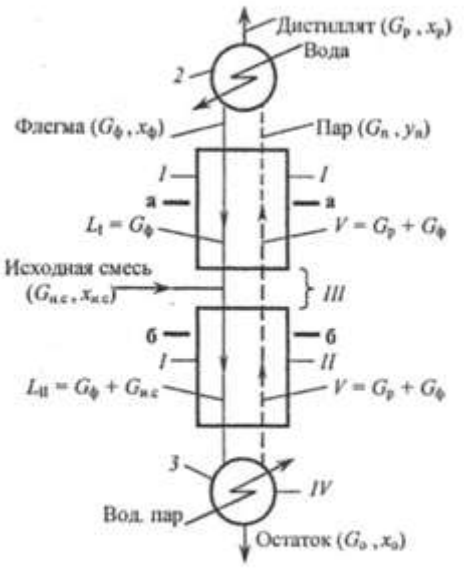


Рис. 6.26. Схема процесса ректификации:
1–ректификационная колонна; *2*–дефлегматор;
3–кипятильник

Простая ректификационная колонна состоит из *укрепляющей части (I)* и

отгонной (исчерпывающей) части (II). Среднюю часть колонны, куда поступает исходная кипящая смесь, называют *эвапорационным объемом (III),* а нижнюю часть колонны с кипятильником - *кубовой частью (IV).*

При проведении расчетов процессов ректификации приняты следующие допущения:

-количество пара, движущегося по колонне снизу вверх, одинаково в любом сечении аппарата;

-состав пара, уходящего из ректификационной колонны, равен составу дистиллята, т.е. $y_n = x_p$;

-состав пара, образующегося в кубовой части, равен составу остатка, т.е..$y_o = x_o$;

-количество стекающей жидкости по высоте каждой части колонны (I и II) не изменяется, а меняется лишь ее состав;

-исходная смесь подается в колонну подогретой до температуры кипения.

Введем обозначения:

V - расход паровой фазы, кмоль/с;

L - расход жидкой фазы, кмоль/с.

Индексы означают: и.с - исходная смесь, п - пар, о -остаток, ф - флегма, р - ректификат (дистиллят).

Уравнение материального баланса процесса ректификации для всего количества смеси имеет вид:

$$G_{и.с} = G_р + G_о \qquad (6,44)$$

а для низкокипящего компонента (НК)

$$G_{и.с}\, x_{и.с} = G_р\, x_р + G_о\, x_о \qquad (6,45)$$

Решая совместно уравнения (6.44) и (6.45), можно найти количество и составы веществ, участвующих в процессе ректификации (обычно определяют $G_р$ и G_0, задаваясь величинами $G_{и.с}$, $x_{и.с}$, $x_р$, x_o). Если количество обращающихся в процессе веществ выражено не в кмоль/с, а в кг/с , то составы потоков должны выражаться в весовых долях, а не в молярных.

Для определения материальных потоков фаз в любой части ректификационной колонны рассмотрим произвольные сечения **а-а** и **б-б.** В этих сечениях состав пара обозначим *y,* а жидкости - x; индекс **«1»** соответствует содержанию НК в паре и жидкости ниже сечений, а индекс **«2»** - выше сечений.

Тогда уравнения материального баланса по НК для частей колонны, расположенных выше рассматриваемых сечений, имеют вид:

$$V y + L x_2 = V y_2 + L x \quad \text{или} \quad y = y_2 - L/V(x_2 - x) \qquad (6,46)$$

Аналогично составим уравнения материального баланса по НК для частей колонны, расположенных ниже сечений:

$$V y_1 + L x = V y + L x_1 \quad \text{или} \quad y = y_1 + L/V\,(x - x_1) \qquad (6{,}47)$$

Уравнения (6.46) и (6.47) называются уравнениями рабочих линий процесса ректификации. Они характеризуют изменение рабочей концентрации НК в паровой фазе в зависимости от состава жидкой фазы.

$$G_п = G_ф + G_р = V. \qquad (6{,}48)$$

Разделим обе части уравнения (6.48) на $G_р$ и получим:

Составим уравнение материального баланса для дефлегматора:

$$\frac{G_п}{G_р} = \frac{G_ф}{G_р} + 1 \qquad (6{,}49)$$

Отношение количества возвращаемого в колонну продукта ***(флегмы)*** к количеству отбираемого дистиллята называется ***флегмовым числом*** $R = G_ф/G_р$.

Тогда $V = G_р(R+1)$, т.е. для отбора одного кмоля дистиллята необходимо испарить в кубовой части $(R+1)$ кмолей остатка.

В укрепляющей части колонны количество стекающей жидкости (флегмы)

$$G_ф = G_р R = L_1 \qquad (6{,}50)$$

Согласно допущению $x_ф = \mathbf{x_р} = y_п$, а в соответствии с принятыми обозначениями $y_n = y_2 = x_2$.

Подставляя значения L_I, V, y_2 и x_2 в уравнение 6.46 и учитывая, что $y_2 = x_2$, получим:

$$y = x_р - \frac{R}{R+1}(x_р - x) \quad \text{или} \quad y = \frac{R}{R+1}x + \frac{x_р}{R+1} \qquad (6{,}51)$$

Уравнение (6.51), являющееся ***рабочей*** *линией* ***верхней*** (укрепляющей) *части* ***колонны,*** представлено графически *в* y-x координатах на рис. 6.27.

При $x = x_р$ и $y = x_р$ рабочая линия укрепляющей части колонны проходит

через точку **c,** лежащую на диагонали. Тангенс угла наклона рабочей линии $tg\alpha = R/(R+1)$, а отрезок *b*, отсекаемый на оси ординат, равен $x_р/(R+1)$.

Количество жидкости, стекающей в нижней части колонны

$$L_{II} = G_{ф} + G_{и.с} \qquad (6,52)$$

Разделив обе части данного уравнения на G_p и обозначив $G_{и.с}/G_р = F$ (здесь F — число питания), получим:

$$L_{II} = G_р(R + F) \qquad (6,53)$$

Согласно допущению $y_o = x_o$. Тогда в соответствии с принятыми обозначениями $y_o = y_1$. Подставим значения L_{II}, V, y_1, x_1 в уравнение (6.47):

$$y = x_o + \frac{R+F}{R+1}(x - x_o) \quad \text{или} \quad y = \frac{R+F}{R+1}x - \frac{F-1}{R+1}x_o \qquad (6,54)$$

Уравнение (6.54) является *рабочей линией нижней* (исчерпывающей) *части колонны.* При $x = x_o$ и $y = x_o$ рабочая линия исчерпывающей части проходит через точку *a,* лежащую на диагонали (см. рис. 6.27). Рабочая линия исчерпывающей части колонны пересекает рабочую линию укрепляющей части в точке *d,* абсцисса которой равна составу исходной смеси $x_{и.с}$ (приравняв уравнения 6.51 и 6.54 и умножив обе части на (R+1), получим $x_p = Fx-(F-1)x_o$; подставив сюда $F = G_{и.с}/G_р$, получим $x = x_{и.с}$).

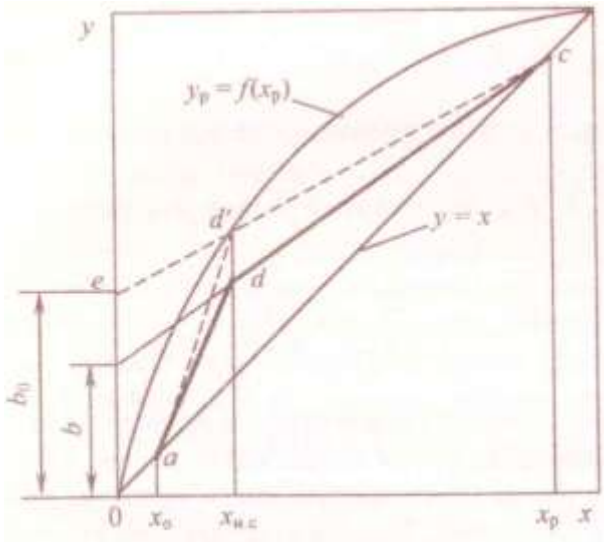


Рис. 6.27. Рабочие линии процесса ректификации

Из уравнений (6.51) и (6.54) видно, что при изменении флегмового числа

изменяется положение рабочих линий. При отсутствии отбора дистиллята (при пуске в работу колонна работает «на себя») рабочие линии совпадают с диагональю, так как при бесконечно большом флегмовом числе отрезок *b* обращается в нуль.

Флегмовое число может уменьшаться, но до определенного предела, когда $y = y_p$ (при этом движущаяся сила процесса Δy = 0 и для проведения процесса ректификации потребуется колонна бесконечно большой высоты).

Положение рабочих линий *ad'c* соответствует минимальному флегмовому числу R_{min}**.** Тангенс угла наклона линии *cd'*

$$tg\alpha = \frac{x_р - y_{и.с.р}}{x_р - x_{и.с}} \quad \text{или} \quad tg\alpha = R_{min}/(R_{min}+1)\ ,$$

что было показано ранее.

Отсюда

$$R_{min} = \frac{x_р - y_{и.с.р}}{y_{и.с.р} - x_{и.с}} \qquad (6,55)$$

Здесь $y_{и.с,р}$ - состав пара, который находится в равновесии с жидкостью состава $x_{и.с}$.

При графоаналитическом расчете процесса ректификации проводят прямую линию через точки *c* и *d'* до пересечения с осью ординат в точке *e.* Измеряют полученный отрезок 0e = b_0 и находят

$$R_{min} = \frac{x_о}{b_0} - 1$$

При $R = \infty$ для разгонки смеси требуется ректификационная колонна минимальной высоты, но при этом нет отбора готового продукта - дистиллята и имеет место большой расход тепла. Оптимальное значение флегмо-вого числа, при котором общие затраты минимальны, определяют из технико-экономических расчетов. Обычно принимают

$$1,2*R_{min} \le R \le 2,5*R_{min}.$$

6.3.5. Основные типы ректификационных колонн

Ректификационные колонны, представляющие собой вертикальные цилиндрические аппараты, бывают насадочные и тарельчатые (барботаж-ные), которые не отличаются по устройству от абсорберов аналогичных типов. Высота ректификационных колонн составляет 10-100 м и более, диаметр 0,5-6 м и более.

В насадочных ректификационных колоннах (рис. 6.28) в качестве насадки обычно применяются кольца Рашига размером 25х25х3 мм (диаметр-высота-толщина) из керамики, которые укладываются навалом на опорные решетки.

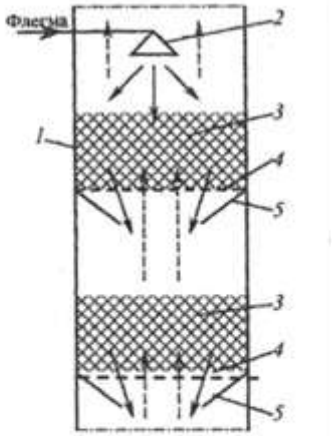


Рис. 6.28. Схема потоков пара и жидкости в насадочной колонне: ----► пар; ——► жидкость; *1*–корпус колонны; *2*–распределительное устройство; *3*–насадка; *4*–опорные решетки; *5*–направляющий конус

Достоинства и недостатки насадочных колонн были рассмотрены в п. 6.2.3. (стр. 197). При проведении процессов ректификации имеют значение: низкое гидравлическое сопротивление слоя насадки (этот фактор имеет значение при проведении ректификации в вакууме); возможность быстрого опорожнения от жидкости при остановке, а также неравномерное распределение жидкой фазы по сечению колонны в слое насадки, что требует устройства специальных направляющих конусов и ограничивает диаметр колонн (примерно до 1 м). В насадочных колоннах трудно добиться достаточно четкого разделения компонентов.

В *барботажных ректификационных колоннах* в качестве массотешюобменных устройств используются *тарелки* (горизонтальные диски специальной конструкции) как *с организованным,* так и *с неорганизованным переливом жидкости* (рис. 6.29).

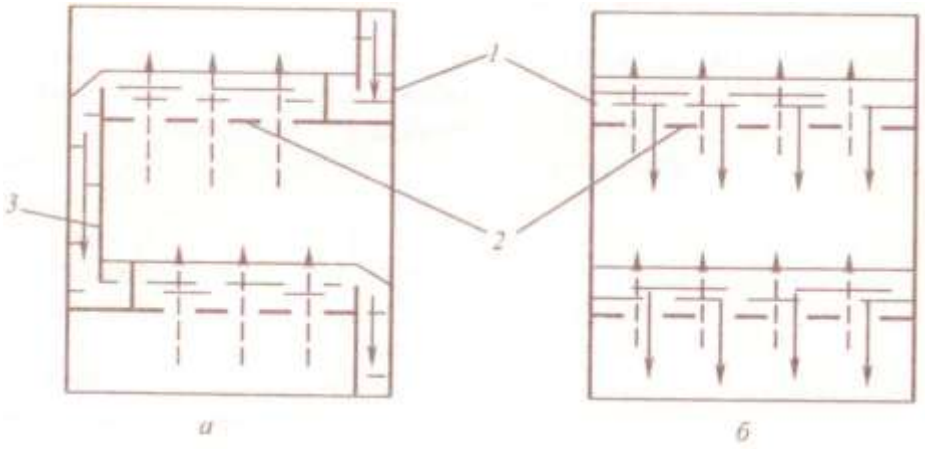


Рис. 6.29. Схемы потоков пара (- - - - ►) и жидкости (——►) в барботажных колоннах: *а* – с организованным переливом жидкости; *б* – с неорганизованным переливом жидкости;
1–корпус колонны; *2*–тарелка; *3*–переливное устройство

К основным достоинствам барботажных колонн относятся: хороший контакт между фазами; возможность разделения компонентов с высокой степенью четкости; возможность работы при значительном снижении расхода жидкости, а также с загрязненной механическими примесями жидкостью. Основной недостаток - сложность конструкции.

Габаритные размеры (диаметр и высоту) ректификационных колонн (так же, как и абсорберов) определяют в зависимости от физических свойств разгоняемых жидкостей, производительности колонны по пару, четкости ректификации, конструкции устройств, обеспечивающих массотеплообмен (насадка или барботажные тарелки).

Диаметр колонны определяют из уравнения расхода для потока паровой фазы:

$$D = \sqrt{\frac{4W}{\pi \omega}} \qquad (6,56)$$

где W- расход проходящего по колонне пара, м^3/с; $W = G_p(R+1)/\rho_п$; $\rho_п$ - плотность пара при рабочих условиях; со - скорость пара в свободном сечении колонны.

Для тарельчатых (барботажных) колонн оптимальную скорость пара рассчитывают по формуле

$$\omega = C\sqrt{\frac{\rho_ж - \rho_п}{\rho_п}} \qquad (6,57)$$

где C - коэффициент, зависящий от конструкции тарелок, расстояния между ними, рабочего давления, нагрузки колонны по жидкости; значения

коэффициента C изменяются от 0,02 (для колпачковых тарелок с капсуль-ными колпачками при расстоянии между тарелками 150 мм) до 0,1 (для ситчатых тарелок при расстоянии между ними 700 мм); $\rho_ж$ - плотность жидкости.

Так как скорость пара в колоннах небольшая (в тарельчатых она обычно не превышает 0,5 м/с, а в насадочных - 1,5 м/с), то диаметр колонн лимитируется расходом пара: чем больше массовая производительность колонны по пару, тем больше ее диаметр.

Высота ректификационных колонн зависит от многих факторов и, в первую очередь, от чистоты дистиллята (четкости ректификации) и разности температур кипения разделяемых компонентов. Чем выше чистота получаемого дистиллята и меньше разность температур кипения чистых компонентов, тем больше будет высота колонны.

Из приведенной на рис. 6.30 расчетной схемы определения высоты колонны видно, что

$$H_к = h_в + h_у + h_э + h_и + h_н \qquad (6,58)$$

где $h_в$ - высота колонны над ее укрепляющей частью; обычно принимают $h_в$ в пределах 0,5-1 м; $h_э$ - высота эвапорационного объема, принимаемая из конструктивных соображений; $h_э$ в метрах примерно равна удвоенной скорости пара в м/с (т.е. $h_э = 2\omega$); $h_н$ - высота нижней части колонны, зависящая от способа ее обогрева, но не менее 1 м.

Высоты укрепляющей $h_у$ и исчерпывающей $h_и$ частей колонны определяют расчетом в зависимости от теоретического числа тарелок, или числа единиц переноса (число единиц переноса - изменение рабочих концентраций на единицу движущей силы), $n_т$ и высоты теоретической тарелки (высоты единицы переноса) h, которые зависят от типа насадки или тарелки. Приближенно можно принимать h[м] = ω[м/с].

Теоретическое число тарелок $n_т$ можно определить графически как количество равновеликих ступенек, вписанных в пространство между рабочими линиями процесса и равновесной кривой (рис. 6.31). Построение ступенек ведут от точки a к точке d для определения числа тарелок в укрепляющей части ($n_{ту}$) и от точки d к точке c - в исчерпывающей части ($n_{ти}$) колонны.

В данном случае можно принять: $n_{ту} = 3$ и $n_{ти} = 2$. Для насадочных колонн значения величин h_y и h_u находят из выражений:

$$h_у = n_{ту}\, h \quad и \quad h_и = n_{ти}\, h \qquad (6,59)$$

Для барботажных колонн значения величин h_y и h_u определяют по фактическому числу тарелок с использованием коэффициента полезного действия (КПД) тарелки η:

$$n_{(у,и)} = n_{т(у,и)} / \eta \qquad (6,60)$$

Величина η учитывает реальные условия массообмена на тарелках: она зависит от конструкции тарелок, размера, гидродинамических факторов, физико-химических свойств пара и жидкости и определяется опытным путем (обычно КПД тарелки находится в пределах 0,3-0,8).

Высоты укрепляющей и исчерпывающей частей барботажной колонны определяют по формулам:

$$h_y = (n_y - 1)h \quad \text{и}$$

$$h_и = (n_и - 1)h \ . \qquad (6.61)$$

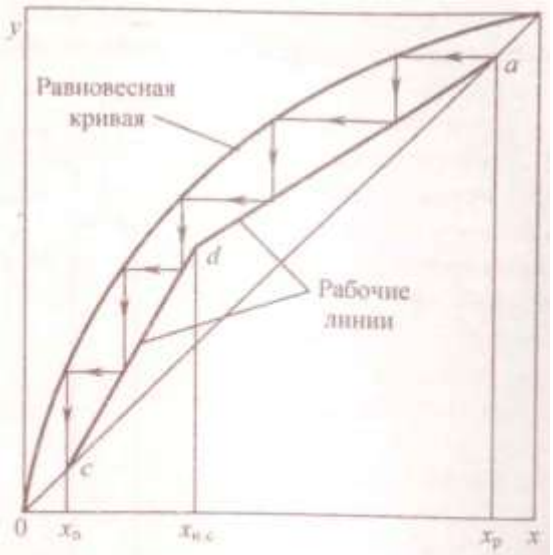


Рис. 6.31. Графическое определение теоретического числа тарелок

Для анализа пожарной опасности процесса ректификации в случае нарушения нормального режима конденсации паров в дефлегматоре необходимо знать тепловую нагрузку дефлегматора ($Q_{дф}$), которую при работе колонны по схеме с полной конденсацией паров можно рассчитать по формуле

$$Q_{дф} = G_р (R + 1) r_ф \qquad (6.62)$$

где $\mathbf{r_ф}$ - теплота испарения флегмы, Дж/моль; величину $\mathbf{r_ф}$ определяют из выражения

$$r_ф = r_{нк} x_р - r_{вк} (1 - x_р) \qquad (6.63)$$

где $\mathbf{r_{нк}}$ и $\mathbf{r_{вк}}$. - теплоты испарения НК и ВК, Дж/моль.

Ректификацию двухкомпонентных смесей производят на простой ректификационной колонне, которая является основной частью достаточно сложной установки, состоящей из различных по назначению и принципу действия

аппаратов. Схема непрерывно действующей ректификационной установки с горячим орошением показана на рисунке 6.32.

Исходная смесь забирается из сборника *1* насосом *2,* предварительно нагревается в подогревателе *3* и направляется в кипятильник *4.* Кипящая смесь с постоянным расходом поступает в эвапоратор ректификационной колонны 5, где она разделяется на паровую и жидкую фазы. С верхней части колонны пары отводятся в дефлегматор *6,* где частично конденсируются. Образующаяся в дефлегматоре *5* горячая флегма отделяется от пара в сепараторе 7 и направляется на орошение верхней части колонны. В конденсаторе-холодильнике *8* пары полностью конденсируются, образующийся конденсат охлаждается и поступает в сборник дистиллята *10.*

Для непрерывной генерации пара в нижней части колонны имеется кипятильник *9.* Отсюда же отводится кубовой остаток, который предварительно охлаждается в теплообменнике *3,* отдавая свое тепло холодной ис ходной смеси, затем окончательно охлаждается до необходимой температуры в холодильнике *12* и поступает в сборник остатка *11.*

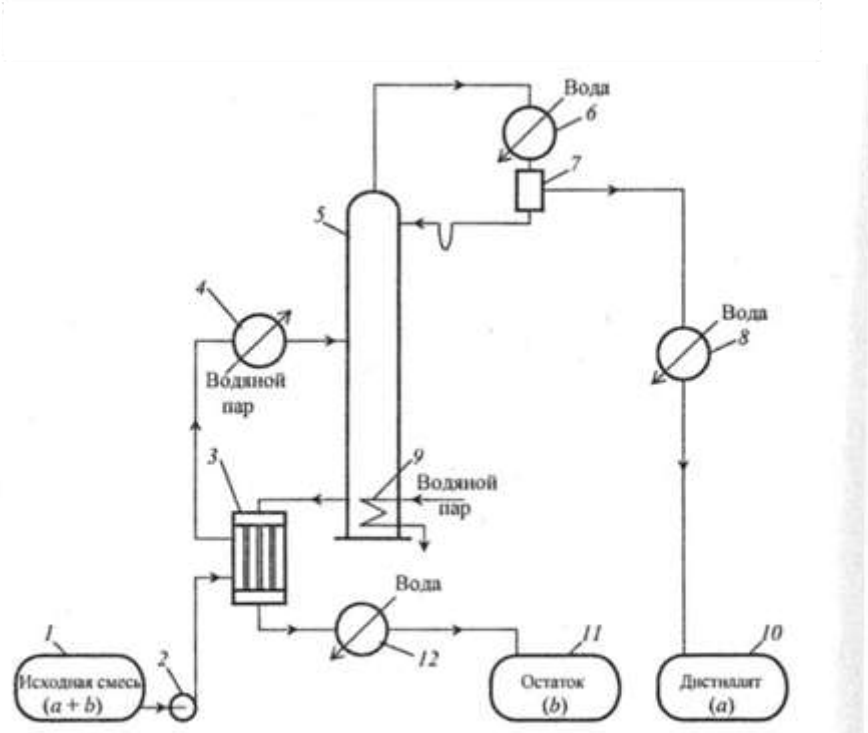


Рис. 6.32. Схема ректификационной установки непрерывного действия:
1, 10, 11–сборники соответственно исходной смеси, дистиллята и остатка; *2*–насос; *3*–подогреватель; *4*–кипятильник; *5*–ректификационная колонна; *6*–дефлегматор; *7*–сепаратор; *8*–конденсатор-холодильник; *9*–кипятильник; *12*–холодильник

Многокомпонентную смесь можно разогнать на составляющие компоненты на нескольких простых колоннах (рис. 6.33) или на одной сложной колонне. Сложные колонны применяют при переработке нефти.

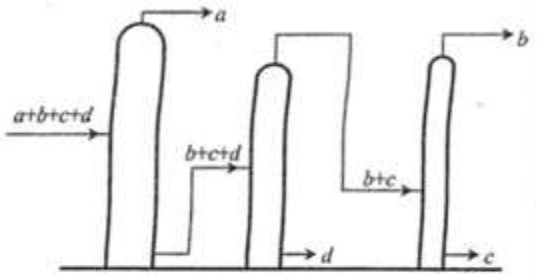


Рис. 6.33. Схема разделения четырехкомпонентной смеси на простых колоннах (*a*, *b*, *c*, *d* – компоненты)

Орошение ректификационных колонн может быть *горячим* (рис. 6.25) и *холодным* (рис. 6.32 и 6.34). Горячее орошение экономичнее холодного, но более сложного устройства. В качестве дефлегматоров применяются конденсаторы воздушного охлаждения, погружные или кожухотрубные конденсаторы с водяным охлаждением. Конденсаторы воздушного охлаждения экономичнее кожухот-рубных. Кроме того, в случае повреждения труб или трубных решеток кожухотрубного дефлегматора имеется опасность попадания хладоносите-ля (воды) в колонну.

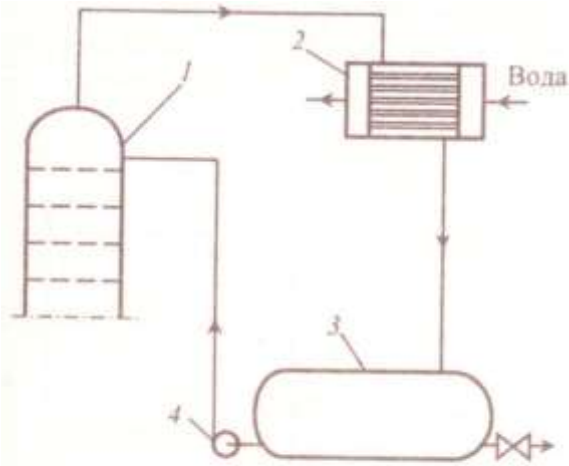


Рис. 6.34. Схема холодного орошения: *1*–ректификационная колонна; *2*–конденсатор-холодильник; *3*- сборник дистиллята; *4*–насос

Выбор способа воспроизводства пара в кубовой части колонны зависит от многих факторов. В периодически действующих или непрерывно действующих колоннах небольшой производительности по пару при температуре кипения остатка до 150 °С и при отсутствии в нем загрязняющих тешюобменные поверхности примесей используются встроенные в кубовую часть колонны кипятильники змееви-кового или трубчатого типа (поз. 9 на рис. 6.32), обогреваемые водяным паром.

Обогрев острым паром (рис. 6.35) производится в случаях, когда необходимо снизить температуру перегонки высококипящей смеси с целью предотвращения ее термического разложения (например, при разгонке мазута), выделить из смеси вещество с низкой температурой кипения (например, при выделения бензола из каменноугольного масла) или разделить

раствор, из которого выделяемое вещество отгоняется в виде азеотропной смеси с водой (например, при выделении скипидара из живицы).

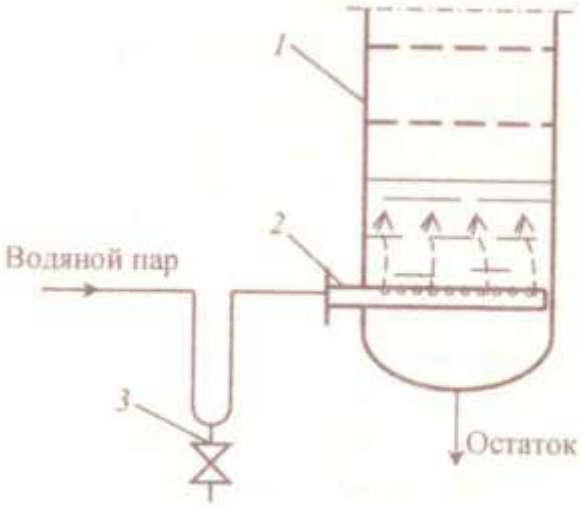


Рис. 6.35. Схема обогрева низа колонны острым паром:
1–корпус колонны; *2*–барботер; *3*–дренажная линия

При больших поверхностях теплообмена или наличии в кубовом остатке загрязняющих поверхности теплообмена примесей применяются выносные кипятильники с естественной или принудительной циркуляцией остатка (рис. 6.36.а). Обычно устанавливают два и более кипятильников, которые периодически останавливают для очистки теплообменных поверхностей от отложений.

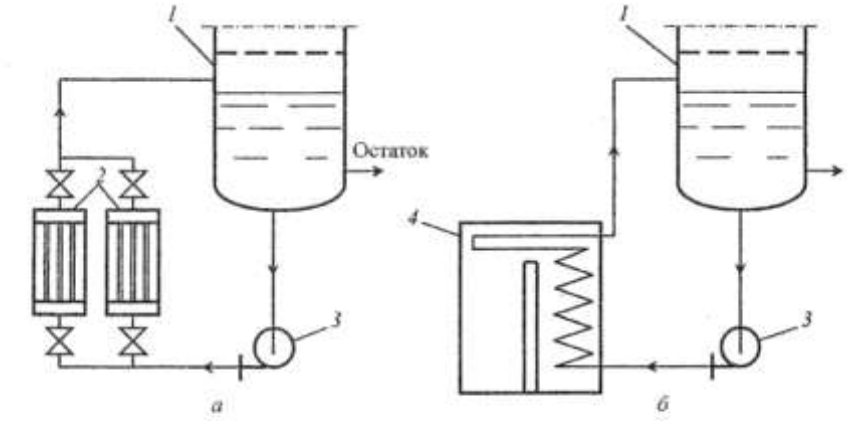


Рис. 6.36. Схемы устройств для обогрева низа колонн:
а – с выносными кипятильниками; *б* – с трубчатой печью;
1–ректификационная колонна; *2*–выносной кипятильник; *3*–насос; *4*–трубчатая печь

При высокой температуре кипения остатка вместо кожухотрубных кипятильников применяются трубчатые печи (рис. 6.36.б). Их широко используют в высокопроизводительных ректификационных установках нефтеперерабатывающей, нефтехимической и других отраслей промышленности для нагревадо кипения (150-350 °С и выше) нефти, продуктов ее перегонки или

других жидкостей.

При переработке коррозионно-активных и загрязненных механическими примесями жидкостей корпуса ректификационных колонн собирают из отдельных царг, соединяемых между собой фланцами на прокладках. Цельносварные колонны применяются на производствах, связанных с перегонкой и ректификацией сжиженных горючих газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. Для монтажа и демонтажа тарелок на корпусах цельносварных колонн имеются люки и лазы. В качестве материалов для изготовления ректификационных колонн применяются стали различных классов, чугуны, титановые сплавы, медь и другие материалы.

6.3.6. Тарелки ректификационных колонн

В отличие от непрерывного характера взаимодействия пара с жидкостью в насадочной колонне в барботажной ректификационной колонне пар и жидкость последовательно взаимодействуют между собой на специальных тарелках (ступенях). Поэтому процесс ректификации в барботажных колоннах носит ступенчатый характер.

Помимо колпачковых тарелок, устройство и работа которых были рассмотрены при изучении работы барботажных абсорберов, в ректификационных колоннах применяются также решетчатые, ситчатые, клапанные и струйные тарелки, тарелки с S-образными элементами и другие. Выбор типа тарелки зависит от многих факторов, к которым, в первую очередь, относятся: эффективность разделения компонентов, экономичность процесса, длительность эксплуатации, возможность быстрой эвакуации продуктов из колонны и ряд других факторов. Рассмотрим особенности устройства и работы некоторых типов тарелок, используемых в нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической, пищевой и других отраслях промышленности при проведении процессов перегонки и ректификации.

Рис. 6.37. Схема ситчатой тарелки:
----> пар; ——> жидкость
1–тарелка; *2*–корпус; *3*–переливная труба

Рис. 6.38. Схема провальной тарелки:
----> пар; ——> жидкость
1–тарелка; *2*–корпус

В колоннах с с и т ч а т ы м и т а р е л к а м и (рис. 6.37) жидкость, поступившая на верхнюю тарелку, после контакта с паром сливается на нижнюю тарелку через переливное устройство *3*. Пар движется навстречу жидкости из нижней части колонны вверх и проходит последовательно через отверстия каждой тарелки. При нормальной работе жидкость не перетекает через отверстия

в тарелках, т.к. поддерживается снизу давлением пара. При прохождении через жидкость пар образует на тарелке слой пены. Колонны с ситчатыми тарелками отличаются простотой устройства, высокой эффективностью и быстротой опорожнения от жидкости в случае возникновения аварийной ситуации. В то же время эти колонны имеют недостатки: требуют строгой горизонтальности тарелок, а отверстия в тарелках легко забиваются отложениями.

Р е ш е т ч а т ы е (провальные) т а р е л к и (рис. 6.38) в отличие от ситчатых тарелок не имеют переливных патрубков, вследствие чего и пар и жидкость проходят через одни и те же отверстия (отверстия в решетчатых и ситчатых тарелках делают круглыми диаметром 2-5 мм или щеле-видными шириной 3-4 мм и длиной 200-300 мм и более). Решетчатые тарелки имеют те же достоинства и недостатки, что и ситчатые, и к тому же работают лишь в ограниченном диапазоне нагрузок по пару во избежание возникновения режима «захлебывания» колонны, при котором движущийся снизу вверх по колонне пар препятствует перетеканию жидкости вниз с тарелки на тарелку.

К л а п а н н ы е т а р е л к и (рис. 6.39) характеризуются высокой стабильностью работы в широком диапазоне нагрузок по пару. Жидкость переливается с тарелки на тарелку по переливным трубам *4,* а пар проходит через отверстия в тарелках, в которых находятся клапаны *3.* При снижении паровой нагрузки некоторые клапаны опускаются, перекрывая отверстия, что позволяет обеспечить заданный режим барботажа пара через слой жидкости в открытых отверстиях. При прохождении пара через отверстия клапаны перемещаются и вибрируют, что способствует самоочищению тарелок от образующихся отложений кокса, термополимеров, накипи и других веществ.

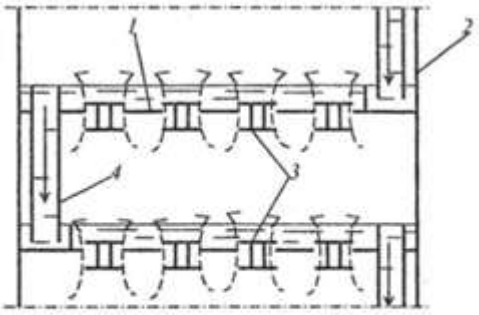


Рис. 6.39. Схема клапанной тарелки:
----> пар; ——> жидкость
1–тарелка; *2*–корпус; *3*–клапаны; *4*–переливная труба

С т р у й н ы е т а р е л к и, показанные на рис. 6.40, изготовляют в виде наклонных параллельных лопаток /, проходя между которыми пар меняет направление в сторону движения жидкости на тарелке. Это позволяет увеличить кинетическую энергию жидкости для ускорения ее перемещения к сливным устройствам *2* и снизить гидравлическое сопротивление. Допустимая скорость движения пара на этих тарелках почти в 2 раза больше, чем на колпачковых.

Независимо от типа тарелок к их изготовлению и монтажу предъявляются жесткие требования. Отклонение тарелки от горизонтальности не должно

превышать 0,1 % при диаметре колонны до 2 м и 0,8 % -при диаметре колонны более 6 м, прогиб тарелки не должен превышать 3-5 мм на диаметр, а отклонение высоты отдельных элементов друг относительно друга (патрубков, 5-образных элементов и других) - не более 1 мм.

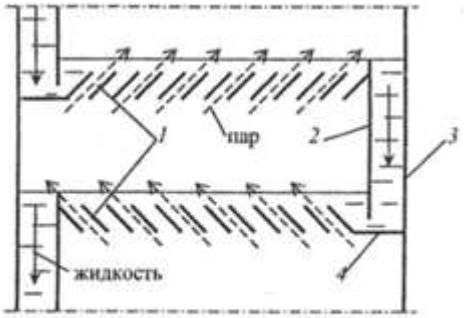


Рис. 6.40. Схема струйной тарелки:
1–лопатки; *2*–переливное устройство; *3*–корпус;
4–тарелка

6.4. АППАРАТЫ ДЛЯ ПОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ СУШКИ

6.4.1. Виды влаги в материале и способы ее удаления

В промышленности и сельском хозяйстве часто приходиться удалять влагу из твердых материалов (сырья, продуктов, полуфабрикатов, готовых изделий) при подготовке их к переработке, транспортировке, использованию и хранению с целью улучшения структурно-механических и термических свойств материалов, увеличения теплотворной способности топлива, уменьшения массы материалов, изменения их физико-химических свойств и других показателей.

В этом параграфе под влагой мы будем понимать любую жидкость, находящуюся в твердом материале, в суспензии или в растворе (например, вода в древесине, пищевых продуктах и тому подобных материалах; растворители и разбавители в лаках и красках; метанол в смеси с порошкообразным полиэтиленом; бензин в резиновом клее и т.д.).

В наиболее широком смысле влагу, находящуюся в твердом материале, можно классифицировать на свободную и связанную. Под *свободной* понимают такую влагу, скорость испарения которой из материала равна скорости испарения жидкости со свободной поверхности разлива (при этом $p_п \approx p_s$, где $p_п$ - парциальное давление паров влаги над поверхностью материала; p_s - парциальное давление насыщенного пара жидкости над свободной поверхностью испарения). Тогда как под *связанной* понимают влагу, скорость испарения которой из материала меньше скорости испарения жидкости со свободной поверхности разлива (при этом $p_п < p_s$).

Связь влаги с материалом может быть *механической, физико-химической и химической.* Механически с твердым материалом связана поверхностная влага и влага, заполняющая поры и крупные капилляры в материале при его

смачивании. Такая влага легко удаляется из материала и обычно называется внешней. Физико-химически с твердым материалом связана влага, поглощенная поверхностью мелких капилляров (адсорбционная влага) или проникшая внутрь клеток органического материала вследствие диффузии (структурная и осмотическая влага). Химически связана с твердым материалом гидратная влага (или кристаллизационная), которая в процессе сушки обычно не удаляется. В отличие от внешней, влагу, прочно связанную с материалом, называют *гигроскопической.*

В зависимости от формы связи влаги с материалом она может быть удалена различными способами:

-механическими - прессованием, отсасыванием, фильтрованием и центрифугированием. Эти способы используются в тех случаях, когда требуется частичное удаление внешней влаги;

-физико-химическими - путем поглощения влаги гигроскопическими веществами (хлористым кальцием, спиртом, серной кислотой и др.). Эти способы применяются главным образом для удаления влаги из газов;

-тепловыми - испарением, выпариванием, конденсацией и вымораживанием. Эти способы применяются, когда требуется практически полное удаление внешней влаги и частично гигроскопической.

6.4.2. Понятие о влажности материала и влагосодержании

Влажность материала может быть рассчитана как отношение количества влаги $\mathbf{G}_{вл}$ к общей массе влажного материала *G:*

$$\omega = \frac{G_{вл}}{G} \cdot 100\,\% = \frac{G_{вл}}{G_{вл} + G_{сух}} \cdot 100\,\% \qquad (6{,}64)$$

где $G_{сух}$ - масса абсолютно сухого вещества.

Влагосодержание материала выражается соотношением

$$\omega^c = \frac{G_{вл}}{G_{сух}} \cdot 100\,\% \qquad (6{,}65)$$

Величины ω и ω^c связаны соотношениями

$$\omega = \frac{100\,\omega^c}{100 + \omega^c} \quad и \quad \omega^c = \frac{100\,\omega}{100 + \omega} \qquad (6{,}66)$$

Количество влаги, удаляемой из материала в процессе сушки при изменении влажности от $\omega_н$ до $\omega_к$, определяют из выражения

$$G^*_{вл} = G_н \frac{\omega_н - \omega_к}{100 - \omega_к} = G_к \frac{\omega_н - \omega_к}{100 - \omega_н} \qquad (6,67)$$

где $G_н$ и $\omega_н$ - начальные масса и влажность материала, поступающего на сушку; $G_к$ и $\omega_к$ - конечные масса и влажность высушенного материала. Величину $G^*_{вл}$, можно также определить по формуле

$$G^*_{вл} = G_{сух} \frac{\omega^c_н - \omega^c_к}{100} \qquad (6.68)$$

Содержание влаги в сушильном агенте, т.е. в среде, с помощью которой подводится тепло к высушиваемому материалу и отводятся пары влаги от его поверхности, характеризуется относительной влажностью ф и паросодержанием (влагосодержанием)х парогазовой смеси:

$$\varphi = p_п / p_s \qquad (6.69)$$

где $p_п$ - парциальное давление паров влаги в сушильном агенте; p_s - давление насыщенного паратой же жидкости при данной температуре;

$$x = \frac{G_п}{G_{с.аг}} = \frac{M_п}{M_{с.аг}} \cdot \frac{p_п}{p_{общ} - p_п} = \frac{M_п}{M_{с.аг}} \cdot \frac{\varphi\, p_н}{p_{общ} - \varphi\, p_н} \qquad (6.70)$$

где $G_п$ - масса паров жидкости во влажном сушильном агенте; $G_{с.аг}$ - масса абсолютно сухого сушильного агента; $M_п$ и $M_{с.аг}$ - молекулярные массы соответственно паров влаги и сушильного агента; $p_{общ}$ - общее давление.

В случае, когда сушильным агентом является воздух, а парами влаги - водяные пары, связь между параметрами влажного воздуха *x, t,* φ и I (энтальпией) определяется *по I-x-* диаграмме Рамзина, которая приводится в справочной литературе.

6.4.3. Тепловая сушка горючих веществ и материалов

Тепловой сушкой, или просто сушкой, называется процесс удаления влаги из материала с использованием тепловой энергии для ее испарения. Различают естественную и искусственную сушку. *Естественную сушку* производят на открытом воздухе без искусственного нагревания и без принудительного подвода сушильного агента. Этот способ сушки достаточно продолжителен, не поддается регулированию, а материал имеет сравнительно большую конечную влажность.

Искусственная сушка производится путем искусственного подвода тепла к высушиваемому материалу, в том числе при помощи нагретого сушильного

агента, который после поглощения им испарившейся влаги из материала отводится специальными вытяжными устройствами (вентиляторами, дымососами и т.п. устройствами). В качестве сушильных агентов используются воздух, дымовые газы, водяной пар, азот и другие газы.

По своей физической сущности сушка является сложным тепломассообменным процессом, скорость которого лимитируется скоростью диффузии влаги из глубины высушиваемого материала к его поверхности. В процессе сушки влага перемещается из внутренних слоев материала к его поверхности, с которой она испаряется. Пар диффундирует через пограничный слой на границе раздела фаз в сушильный агент и отводится от поверхности материала. Таким образом осуществляется перенос до 90 % всей влаги. Скорость переноса влаги обусловливается движущей силой процесса, представляющей собой разность концентраций или разность парциальных давлений пара влаги у поверхности материала и в окружающей среде. Перенос незначительного количества влаги происходит также за счет термодиффузии вследствие перепада температур в пограничном слое.

На рисунках показаны факторы, влияющие на перемещение влаги в материале (6.42, *а)* и в пограничном слое (6.42, *б)*.

При $p_n > p_c'$ происходит сушка (испарение влаги с поверхности) материала;

при $p_n = p_c''$ устанавливается динамическое равновесие; при $p_{,,} < p''$ происходит поглощение паров влаги материалом из сушильного агента.

При $p_ц' > p_n$ происходит перенос влаги из центра к поверхности материала;

при $p_ц = p_n$ отсутствует перенос влаги;

при $p_ц'' < p_n$ происходит перенос влаги с поверхности вглубь материала.

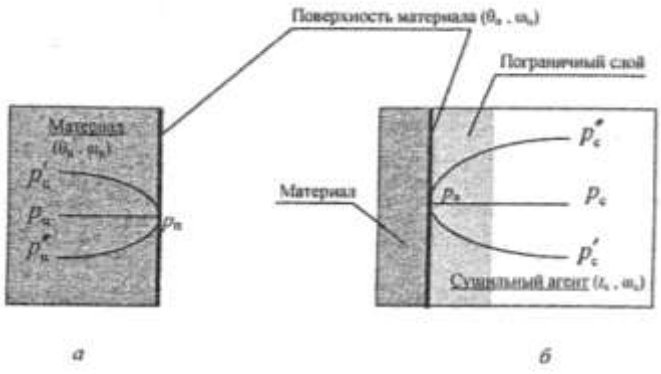


Рис. 6.42. Схемы перемещения влаги:
а – в материале; *б* – влаги в пограничном слое
(индексы: ц–центр материала; п–поверхность; с–сушильный агент)

Более высокая температура поверхности материала **($\Theta_п$)** по сравнению с температурой сушильного агента (t_c) ускоряет процесс сушки и наоборот: при $\Theta_п \le t_c$ происходит торможение процесса сушки.

Процессу перемещения влаги из внутренних слоев материала к его поверхности способствуют более высокие температура **(Θ_w),** давление ($p_ц$) и влажность ($\omega_ц$) в центре материала по сравнению с соответствующими параметрами на его поверхности.

6.4.4. Кинетика процесса сушки

Для того чтобы определить концентрацию паров влаги в сушилке, необходимо знать скорость сушки. Скорость сушки зависит от многих факторов (природы и формы высушиваемого материала, его начального и конечного влагосодержания, влажности, температуры и скорости сушильного агента, природы сушильного агента, конструкции сушилки, организации процесса сушки и других факторов) и определяется из выражения

$$N = \frac{d\omega^c}{d\tau}. \qquad (6.71)$$

Скорость сушки является переменной величиной и может быть найдена для каждого момента времени процесса сушки как тангенс угла наклона кривой сушки. На основании экспериментальных данных строятся кривая сушки (рис. 6.43) и кривая скорости сушки (рис. 6.44). Исследуя графики изменения апагосодержания и скорости сушки материала во времени, можно выявить основные периоды сушки материала:

τ_0 - период прогрева материала;

τ_1 - период постоянной скорости сушки;

τ_2 - период падающей скорости сушки;

τ_3 - период достижения динамического равновесия.

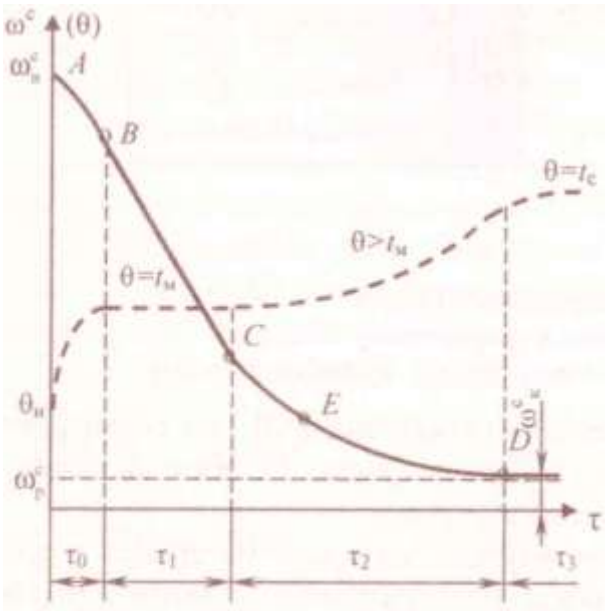


Рис. 6.43. Кривая сушки материала

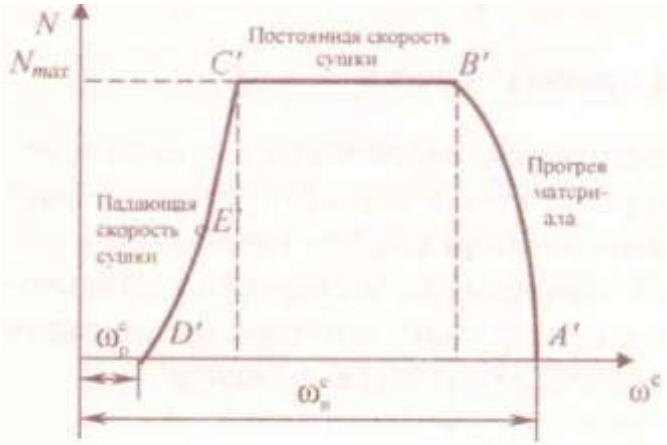


Рис. 6.44. Кривая скорости сушки

На рис. 6.43-6.44 обозна-чено: $\omega_н^c$ - начальное влагосо-держание материала; $\omega_к^c$ - ко-нечное влагосодержание мате-риала; $\omega_р^c$ - равновесное влаго-содержание материала; $\Theta_н$ - на-чальная температура; Θ - сред-необъемная температура; $t_м$ - температура мокрого термомет-ра, т.е. температура термометра, шарик которого покрыт влаж-ной тканью, с которой происхо-дит испарение влаги (это темпе-ратура, принимаемая испаряю-щейся жидкостью при достиже-нии теплового равновесия).

Период прогрева (кривая АВ на рис. 6.43) является ковременным и характеризует неустановившееся состояние процесса. За это время температура материала повышается до $t_м$, а его влажность снижается незначительно. Скорость сушки к концу периода прогрева достигает максимального значения (точка ***B′*** на рис. 6.44).

В период постоянной скорости сушки (прямолинейный отрезок *BC)* скорость сушки является максимальной и сохраняется постоянной в течение времени τ_1.

В период падающей скорости сушки (кривая *CD)* температура материала повышается и в конце периода (точка *D)* становится равной t_c - температуре среды, окружающей материал. Одновременно влажность материала по всей его толщине сначала равномерно, а затем неравномерно (точка *E)* снижается до равновесной. Скорость сушки быстро падает и в конце периода становится равной нулю (точка *D′* на рис. 6.44). При дальнейшем пребывании в сушилке материала его температура и влажность остаются постоянными.

При сушке разных видов материалов отдельные периоды сушки могут отличаться по времени или даже отсутствовать вовсе. Так, при сушке ок-рашенных изделий процесс заканчивается этапом равномерно падающей скорости сушки (линия *ABCE)*.

Таким образом в реальных условиях общая продолжительность сушки материала равна:

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 \qquad (6.72)$$

Фактическую длительность сушки материала достаточно точно можно

установить только опытным путем.

При известной средней скорости сушки $\overline{N}$ общая ее продолжительность выражается равенством.

$$\tau = \frac{K\left(\omega_н^c - \omega_к^c\right)}{\overline{N}} \qquad (6.73)$$

где ***K*** - поправочный коэффициент; ***K***= 1,5-2.

Этим выражением можно пользоваться со следующими оговорками: скорость сушки считают постоянной, периодом прогрева материала пренебрегают вследствие его кратковременности, а период падающей скорости не принимают во внимание вследствие того обстоятельства, что в процессе сушки влажные материалы отдают около 90 % своей влаги в течение периода постоянной скорости сушки, а остальные 10 % - в течение других периодов.

Максимальную интенсивность испарения влаги из материала ***J*** можно определить по формуле

$$J = \frac{N_{max}\, G_{сух}}{100\, F}\ , \text{кг/(м}^2\cdot\text{с)} \qquad (6.74)$$

где N_{MAX} - максимальная скорость сушки; F - свободная поверхность высушиваемого материала.

Количество необходимого для сушки материала сушильного агента, влажность которого изменяется от начальной $\omega_н$ до конечной влажности $\omega_к$, определяют из уравнения материального баланса при установившемся процессе сушки.

Поступление влаги в сушилку (кг):
-с высушиваемым материалом $G_н*\omega_н/100$
-с сушильным агентом $L_c*x_н$

Всего: $G_н*\omega_н/100+ L_c*x_н$

Здесь: L_c - количество абсолютно сухого агента; $x_н$ - начальное вла-госодержание сушильного агента (в кг влаги на кг сушильного агента).

Удаление влаги из сушилки (кг):
- с высушиваемым материалом $G_к*\omega_к/100$
- с сушильным агентом $L_c*x_к$

Всего: $G_к*\omega_к/100+ L_c*x_к$

Здесь: $x_к$ - конечное вла-госодержание сушильного агента (в кг влаги на кг

сушильного агента).

При отсутствии потерь влаги можно записать

$$G_н \omega_н /100 + L_с x_н = G_к \omega_к /100 + L_с x_к \qquad (6.75)$$

Количество удаляемой влаги из материала

$$G_{вл} = (G_н \omega_н - G_к \omega_к)/100 \qquad (6.76)$$

Решая совместно уравнения 6.75 и 6.76, получаем

$$G_{вл} = L_с (x_к - x_н) \qquad (6.77)$$

Откуда общее количество сушильного агента составит

$$L_c = G_{вл} / (x_к - x_н) \ , \text{кг} \qquad (6.78)$$

а его объем

$$V_с = \frac{G_{вл}}{\rho_t (x_к - x_н)} \ , \text{м}^3 \qquad (6.79)$$

где ρ_t - плотность сушильного агента при рабочей температуре.

Удельный расходсушильного агента на 1 кг удаляемой из материала влаги определяют из выражения

$$l_с = L_с / G_{вл} = 1/(x_к - x_н) \ , \text{кг / кг влаги.} \qquad (6.80)$$

6**.4**.5. **Основные типы сушилок Классификация сушилок**

На производствах встречается большое количество различных сушилок, отличающихся как по способу подвода тепла к высушиваемому материалу, так и по конструктивному устройству и по другим признакам.

По способу подвода тепла к высушиваемому материалу различают

следующие виды сушилок:

-конвективные сушилки, в которых нагретый сушильный агент передает тепло высушиваемому материалу при непосредственном соприкосновении с последним;

-контактные сушилки, в которых тепло от теплоносителя к высушиваемому материалу передается через разделяющую их стенку;

-радиационные сушилки, в которых высушиваемый материал нагревается инфракрасными лучами;

-высокочастотные (диэлектрические) сушилки, в которых материал нагревается в поле токов высокой частоты;

-комбинированные сушилки (радиационно-конвективные, контактно-конвективные, а также сушилки, в которых осуществляется несколько теплообменных процессов).

В зависимости от конструктивного устройства сушилки подразделяются на: камерные, туннельные, шахтные, ленточные, барабанные, вальцовые, сушилки с кипящим слоем и другие.

Указанные виды сушилок в свою очередь отличаются по ряду признаков: по организации процессов (периодические и непрерывные); по величине давления в сушильной камере (атмосферные и вакуумные); по видам транспортных устройств: с тележками, с вагонетками, с конвейером (ленточным, цепным, пластинчатым).

Конвективные сушилки

В конвективных сушилках, нашедших большое распространение в промышленности, высушиваемый материал может находиться в неподвижном или движущемся плотном слое (сушка в туннельных, камерных, ленточных и др. сушилках), а также во взвешенном и полу взвешенном состоянии (сушка в барабанных, шахтных сушилках, трубах-сушилках, сушилках с кипящим и виброкипящим слоем и т.д.).

Теплоносителями (которые одновременно являются и сушильными агентами) в конвективных сушилках служат: нагретый воздух, топочные газы и их смеси с воздухом, инертные газы, перегретый водяной пар. При движении сушильного агента вдоль материала, имеющего температуру меньшую, чем температура агента, происходит конвективный теплообмен между сушильным агентом и материалом, испарение влаги из материала и ее удаление вместе с влажным агентом из сушилки.

Существенным недостатком конвективного метода сушки является сравнительно низкая интенсивность вследствие движения влаги внутри материала к его поверхности только за счет перепада влажности между внутренними и наружными слоями материала. Так как температура в центре материала меньше, чем на поверхности, то температурный градиент оказывает отрицательное влияние и тормозит процесс сушки материала.

В качестве примеров рассмотрим устройство и работу калориферной туннельной сушилки, сушилки «кипящего слоя» (КС) и дымогазовой сушилки.

В калориферных конвективных сушилках (принципиальная схема ка-

лориферной сушилки показана на рис. 6.45) нагрев сушильного агента (газа или воздуха) производится в калориферах *2.* Этот тип сушилок используется для сушки твердых компактных и кусковых, волокнистых, сыпучих, измельченных, пастообразных и других материалов, для перемещения которых используются транспортные приспособления *4.* Калориферы могут располагаться внутри или снаружи сушильной камеры *3.* В качестве теплоносителей применяются водяной пар, горячая и перегретая вода, дымовые газы, органические теплоносители. Во многих случаях нагрев сушильного агента производится электронагревателями (ТЭНами).

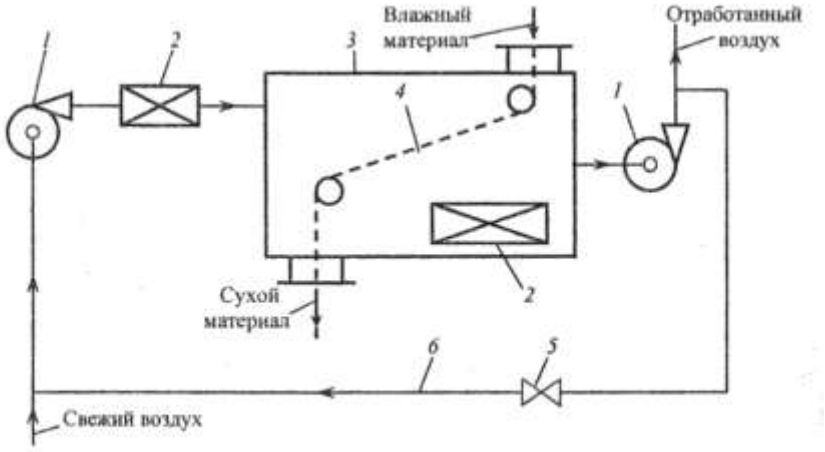


Рис. 6.45. Принципиальная схема калориферной сушилки:
1–вентиляторы; *2*–калориферы; *3*–сушильная камера; *4*–транспортное устройство; *5*–шибер; *6*–линия рециркуляции

Устройство каждой конкретной сушилки зависит от вида высушиваемого материала, длительности его сушки, способа транспортировки и других факторов. Укрытия сушилок имеют различную форму (камера, туннель, барабан, шахта и т.д.), бывают герметичными или имеют открытые проемы. Вентиляторы *1* размещаются как перед сушилкой, так и после или внутри нее, благодаря чему создается определенный режим давления в сушилке.

При необходимости создания «мягких» режимов работы, что очень важно для получения высушиваемых материалов высокого качества, или в целях экономии тепла сушилки могут работать с *рециркуляцией* ***сушильного*** *агента.* При сушке с рециркуляцией выходящий из сушилки отработанный сушильный агент не выбрасывается полностью наружу, а частично по линии рециркуляции 6 возвращается на вход в сушилку. Другая часть отработанного сушильного агента удаляется из системы, а взамен его подается свежий агент (частичная рециркуляция). Отношение количества агента, направляемого обратно в сушилку, к общему количеству агента, проходящего по сушилке, называется коэффициентом рециркуляции $\boldsymbol{K_p}$**:**

$$K_p = \frac{Q_p}{Q_{общ}} = \frac{Q_p}{Q_c + Q_p} \qquad (6.81)$$

где $Q_р$ - расход сушильного агента в линии рециркуляции; $Q_{общ}$ - общий расход сушильного агента; $Q_с$ - расход свежего сушильного агента.

С увеличением коэффициента рециркуляции снижаются затраты тепла (энергии) на проведение процесса сушки, улучшается качество сушки, но увеличивается концентрация паров влаги в сушилке, что может привести к образованию взрывоопасных смесей.

Туннельные сушилки применяются для сушки больших количеств долго сохнущих материалов. На рис. 6.46 показана схема конвективной калориферной туннельной сушилки.

Высушиваемый материал медленно перемещается в таких сушилках на вагонетках или тележках. Туннель / обычно представляет собой закрытый коридор, на вход в который через двери 6* подаются транспортные устройства (в данном случае вагонетки 7) с влажным материалом. Передвижение вагонеток по туннелю осуществляется с помощью лебедок или цепного конвейера (на схеме не показаны). Со стороны входа вагонеток в туннеле расположен вентилятор 5, при помощи которого воздух просасывается через туннель, что обеспечивает противоточное движение сушильного агента и материала. Нагревание воздуха производится в подогревателе 6. Выгрузка вагонеток с высушенным материалом производится через двери с противоположной стороны туннеля одновременно с загрузкой, по- еле чего двери с обоих концов туннеля закрываются. Длина туннеля достигает 60 м, ширина - 6 м, высота - 3 м.

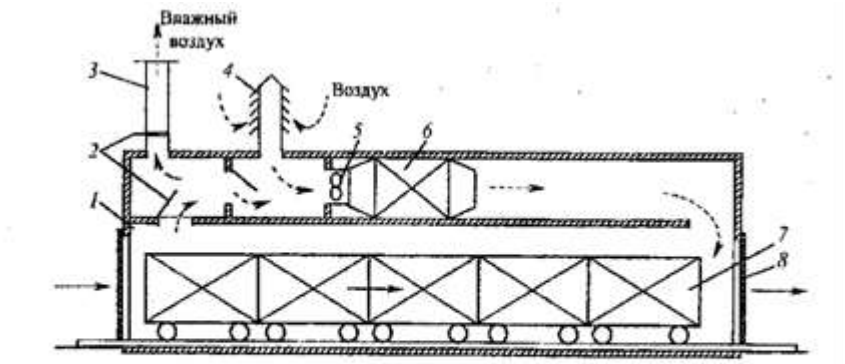


Рис. 6.46. Схема конвективной туннельной сушилки:
1–тушель (коридор); *2*–цинберы; *3*–вытяжная труба; *4*–приточная труба; *5*–вентилятор; *6*–воздухоподогреватель (калорифер); *7*–вагонетки с высушиваемым материалом; *8*–двери

Существенным недостатком туннельных сушилок является неравномерность сушки материала вследствие расслоения нагретого и холодного воздуха, что вызывает необходимость увеличения скорости движения сушильного агента и длины коридора.

Сушилки с кипящим (псевдоожиженным) слоем высушиваемого материала типа КС (КС - кипящий слой) успешно применяются в химической технологии для сушки сыпучих, зернистых и измельченных материалов, не подверженных комкованию (поливинилхлорида, полиэтилена и т.п. материалов). Процесс сушки материала в кипящем слое позволяет значительно увеличить поверхность контакта между частицами материала и сушильным агентом,

интенсифицировать испарение влаги из материала и сократить (до нескольких минут) продолжительность сушки. Сушилки КС имеют корпус цилиндрической или расширяющейся вверх конической формы, внутри которого на распределительной решетке находится в «кипящем» (псевдоожиженном) состоянии высушиваемый материал.

На рис. 6.47 показана однокамерная сушилка КС непрерывного действия. Для создания кипящего слоя воздух нагнетается вентилятором *8* в смеситель 7, где смешивается с топочными газами. Отсюда нагретый газ поступает в нижнюю часть сушильной камеры - под распределительную решетку *6*. Высушиваемый материал шнековым питателем *9* подается в верхнюю часть сушильной камеры *1* и образует «кипящий» слой в восходящем токе газа, проходящего через отверстия в решетке *6*. Благодаря возникновению подъемной силы частички материала витают в слое, гидродинамические свойства которого подобны жидкости. Высушенный материал пересыпается через порог 3 в приемный бункер *4*, а затем на транспортер *5*. Мелкие частицы материала, уносимые потоком сушильного агента, отделяются в циклоне *2*.

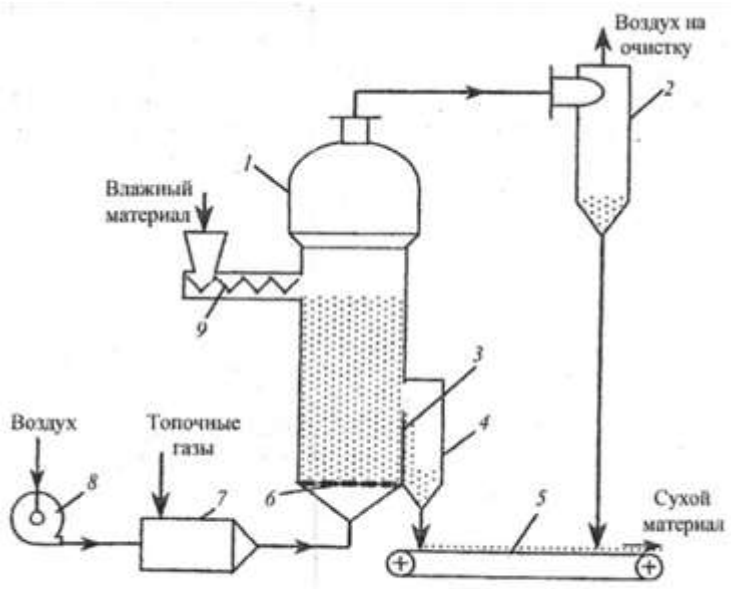


Рис. 6.47. Схема сушилки КС

К достоинствам сушилок с «кипящим» слоем высушиваемого материала относятся: высокая интенсивность сушки; высокая эффективность использования тепла сушильного агента; возможность использования сушильного агента с более высокой температурой (по сравнению с другими сушилками) вследствие кратковременности контакта с термочувствительным материалом; возможность автоматического регулирования процесса.

Недостатки таких сушилок связаны с невозможностью сушки материалов с высокой начальной влажностью и крупными размерами частиц (из-за трудности псевдоожижения), высоким гидравлическим сопротивлением, истиранием и уносом материала, а также необходимостью устройства сложной системы очистки отработанного сушильного агента от унесенной пыли

(выходящий из циклона *2* воздух направляется на дополнительную очистку от унесенной пыли в рукавный фильтр или гидроциклон).

Конвективные сушилки, работающие на смеси дымовых газов с воздухом, широко используются, в первую очередь, в сельском хозяйстве. Дымовые газы в большинстве случаев получаются в специальных топках при сжигании твердого, жидкого или газообразного топлива (иногда используют дымовые газы промышленных печей). Для получения сушильного агента с требуемой температурой дымовые газы разбавляют воздухом. Подобного рода сушилки применяются для сушки древесины (строительной и технологической), древесных отходов, хлопка, льна, тканей, зерна, сена, хвойной и сенной муки, каменного угля, торфа и т.п. материалов. В зависимости от вида сырья температура дымогазовой смеси, поступающей в зону сушки, обычно поддерживается в пределах 80-180 "С. Дымогазовые сушилки являются одними из наиболее экономичных типов сушилок.

Рассмотрим устройство и работу конвективной шахтной дымогазовой зерносушилки (рис. 6.48).

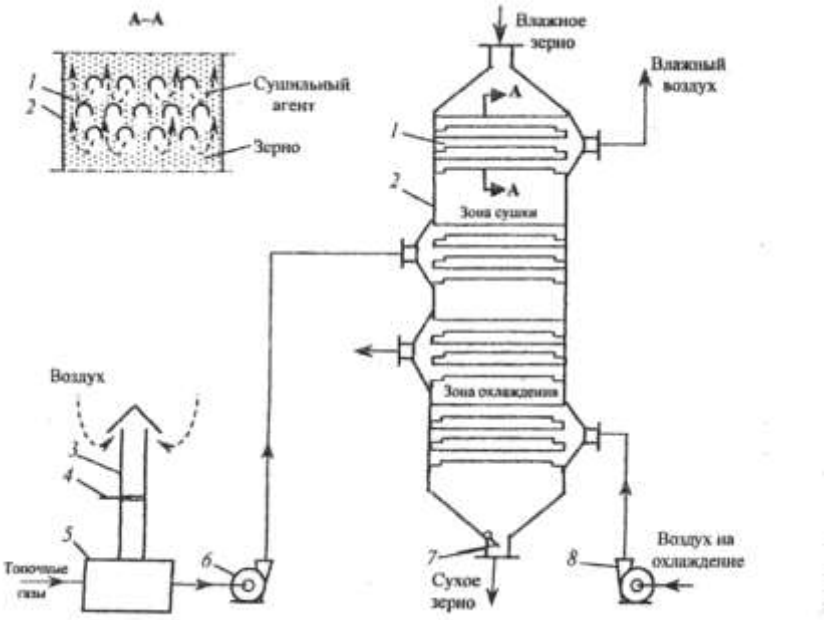


Рис. 6.48. Схема шахтной дымогазовой зерносушилки

Топочные газы, имеющие температуру 700-1000 °С, очищаются от золы, твердых несгоревших частиц топлива и искр и направляются в смесительную камеру 5, куда из атмосферы подсасывается свежий воздух. В воздухозаборнике *3* смесительной камеры имеется шибер *4* для регулирования подачи воздуха. Из смесительной камеры сушильный агент вентилятором *6* через распределяющие желоба / нагнетается в сушильную камеру 2, которая представляет собой вертикальную шахту обычно квадратного сечения (1х1 $м^2$ и более). Высота шахты достигает 6-8 м.

Влажное зерно загружается в верхнюю часть сушильной камеры и движется по ней вниз самотеком, проходя последовательно зоны сушки и

охлаждения. Регулирование времени пребывания зерна в сушилке производится с помощью клапана-мигалки (или шибера) 7. Охлаждение зерна производится воздухом, подаваемым в сушилку через распределяющие желоба вентилятором *8.* Дымогазовые сушилки имеют существенный недостаток: высушиваемые материалы загрязняются продуктами пиролиза топлив, золой и сажей.

Дымогазовые конвективные сушилки изготовляют стационарными и передвижными, периодического и непрерывного действия. По конструкции (форме корпуса и его расположению в пространстве) эти сушилки бывают: шахтные, камерные, барабанные, ленточные и др.

Контактные сушилки

В контактных сушилках передача тепла от теплоносителя к высушиваемому материалу осуществляется через разделяющую их стенку, а образующиеся пары влаги отсасываются из сушильной камеры с помощью вакуум-насоса. Простейшими контактными сушилками являются вакуум-сушильные шкафы - аппараты периодического действия, которые широко используются в лабораторной технике и малотоннажных производствах (рис. 6.49). Поддоны *4* с высушиваемым материалом устанавливают на греющих плитах (подогревателях) *2* сушильного шкафа *1.* Двери шкафа закрывают, включают подачу греющего пара и вакуум-насос. Выделяющиеся из материала пары влаги поступают в конденсатор *3,* откуда образующийся конденсат стекает в сборнике *5,* а неконденсирующиеся газы отсасываются вакуум-насосом. Вакуум-сушильные шкафы малопроизводительны и малоэффективны, поскольку сушится неподвижный слой материала и имеются плохо проводящие тепло зазоры между поддонами (противнями) и греющими плитами. В то же время эти аппараты просты по устройству и в них можно одновременно сушить различные материалы.

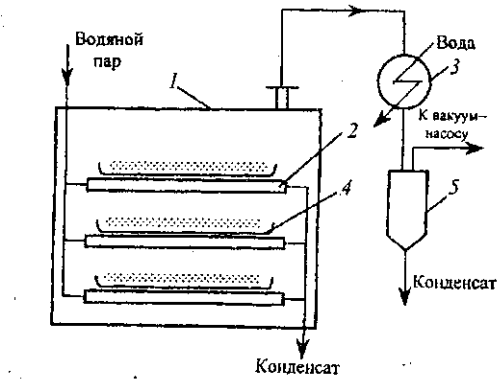


Рис. 6.49. Схема вакуум-сушильного шкафа

К контактным сушилкам непрерывного действия относятся одновальцовые и двухвальцовые сушилки, используемые для сушки паст и суспензий. Схема двухвальцовой сушилки показана на рис. 6.50. Сырье поступает через верхний патрубок в зазор между вальцами *1,* вращающимися

навстречу друг другу со скоростью 10-20 об/мин.ч Вальцы изнутри подогреваются паром, горячей водой или другим теплоносителем. Зазор между вальцами регулируется. Тонкий слой высушенного материала снимается ножами *3* с поверхности вальцов, ссыпается вниз и выводится из аппарата *4*. Вальцовые сушилки могут работать при атмосферном давлении и вакууме. В последнем случае отвод паров осуществляется через патрубок *2* так же, как при работе вакуум-сушильного шкафа. В вакуумных вальцовых сушилках можно эффективно сушить материалы, не выдерживающие длительного воздействия высоких температур. Помимо этого к достоинствам вальцовых сушилок относятся: экономичность сушки, чистота получаемого продукта, возможность полной герметизации внутреннего пространства. К недостаткам вальцовых сушилок можно отнести сравнительно высокую остаточную влажность высушенного материала и опасность его перегрева.

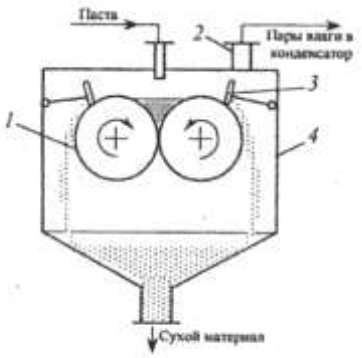


Рис. 6.50. Схема двухвальцовой сушилки

Радиационные сушилки

В радиационных сушилках высушиваемый материал нагревается инфракрасными лучами с длиной волны 4-10 мкм, генерируемыми специальными излучателями. Инфракрасные лучи широко применяются для сушки лакокрасочных покрытий на окрашенных металлических и деревянных изделиях (кузовах автомобилей, корпусах вагонов, электродвигателях и других изделиях), тонких бумажных и текстильных материалов, сыпучих и тому подобных материалов.

При сушке инфракрасными лучами интенсивность испарения влаги из материала в десятки раз выше по сравнению с конвективной или контактной сушкой за счет того, что количество тепла, передаваемое материалу при радиационной сушке, значительно больше. Например, при температуре поверхности инфракрасного излучателя 600 °С тепловой поток составляет 26200 Вт/м^2, а при конвективной сушке дымовыми газами с той же температурой при скорости их движения 2 м/с - только 9300 Вт/м^2.

По виду генераторов инфракрасного излучения радиационные сушилки бывают двух типов:

-сушилки с электрическими лампами инфракрасного излучения;

-сушилки с металлическими панельными излучателями.

На рис. 6.51 показан поперечный разрез ламповой камерной сушилки для сушки крупногабаритных окрашенных изделий (например, вагонов). Устанавливаемые в сушилках специальные зеркальные электрические лампы имеют мощность 250 или 500 Вт. Вольфрамовая нить в лампах раскалена до 2200-2250 °С. Около 70-80 % подводимой в эти лампы электроэнергии преобразуется в энергию инфракрасного излучения. Лампы располагаются на расстоянии 50-400 мм от изделия, температура поверхности которого в процессе сушки может достигать 165-170 °С, а отводимой паровоздушной смеси (ПВС) 100-110 °С.

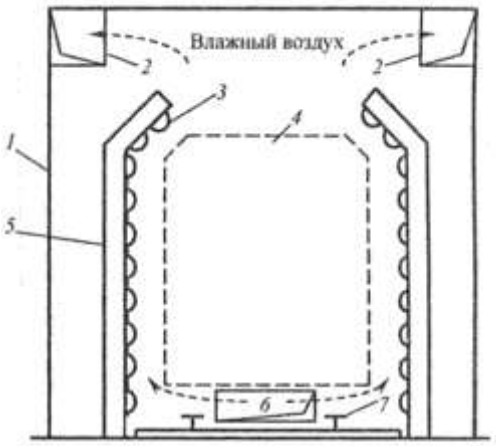


Рис. 6.51. Схема ламповой сушилки:
1–сушильная камера; *2*–каналы для отвода ПВС; *3*–лампы; *4*–окрашиваемое изделие (вагон); *5*–панели с отражателями; *6*–каналы для притока свежего воздуха; *7*–рельсы

К недостаткам ламповых сушилок относится низкий КПД и высокий расход электроэнергии.

Указанных недостатков лишены сушилки с панельными излучателями. В качестве излучателей в панельных сушилках применяются пустотелые панели (стальные, чугунные или керамические плиты), которые изнутри обогреваются электроэнергией (элементами сопротивления, запрессованными в керамической массе) или сгорающей газовоздушной смесью (открытым пламенем или продуктами сгорания топлив).

Газовый обогрев обычно проще и экономичнее электрического. На рис. 6.52 показана схема газовой радиационной сушилки. Дымовые газы (продукты сгорания топлива) из камеры *1* направляются в излучающую панель 5. В целях экономии топлива предусмотрен эжектор *3,* с помощью которого часть горячих отработанных дымовых газов подсасывается по линии рециркуляции. Тепло этих газов используется для нагрева воздуха, подаваемого в горелку *2,* в воздухонагревателе *6.* Сушильные камеры и камеры сгорания обычно работают под разрежением. В радиационных сушилках с газовым обогревом максимальная температура поверхности панелей может достигать 900-950 °С.

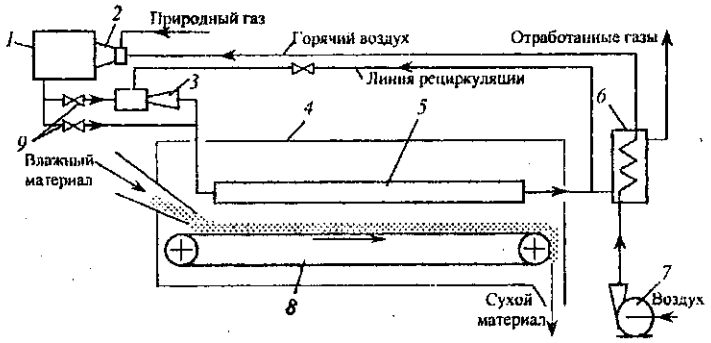


Рис. 6.52. Схема газовой радиационной сушилки:
1–топка; *2*–горелка; *3*–эжектор; *4*–сушильная камера; *5*–излучающая панель; *6*–воздухоподогреватель; *7*–вентилятор; *8*- транспортер; *9*-шиберы

Воздух или его смесь с топочными газами в радиационных сушилках не является сушильным агентом, так как его роль сводится к вентиляции сушильной камеры от удаляемых из материала паров влаги.

Высокочастотные сушилки

Материалы, требующие длительной сушки при использовании ранее рассмотренных способов сушки или имеющие большую толщину, сушат в поле токов высокой частоты (ТВЧ). Высушиваемый диэлектрический материал помещают между электродами, присоединенными к выходным клеммам генератора ТВЧ. На рис. 6.53 изображена схема возникновения тепловых эффектов в высушиваемом материале.

Состояние «*а*»: левая пластина заряжена положительно, правая - отрицательно. При этом свободный электрон $\bar{e}$ и ион $\bar{i}$ движутся влево, ион i^+ движется вправо; диполь d_1, поворачиваясь против часовой стрелки, стремится занять горизонтальное положение, а диполь d_2 сжимается. Через короткий промежуток времени (около $2*10^{-8}$ с) заряд пластин меняется.

Состояние «*б*»: левая пластина заряжена отрицательно, правая - положительно. При этом свободный электрон $\bar{e}$ и ион $\bar{i}$ движутся вправо, диполь d_1, поворачиваясь по часовой стрелке, стремится занять горизонтальное положение, а диполь d_2 растягивается. И так далее. Изменение полярности электродов происходит с частотой 10-25 МГц. При этом с такой же частотой меняется направления движения и вращения частиц в материале, что сопровождается трением и, как следствие, нагревом материала.

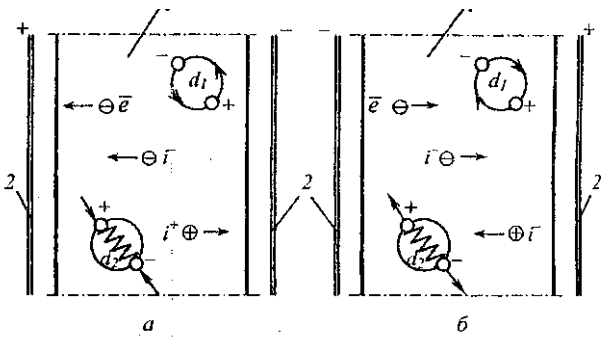


Рис. 6.53. Схема возникновения тепловых эффектов при сушке материала в поле ТВЧ:
1–высушиваемый материал; *2*–электроды;
$\bar{e}$ – электрон; i – ионы; $\oplus$ и $\ominus$ – электрические заряды;
d_1 – диполь неупругий; d_2 – диполь упругий

При высокочастотной сушке происходит объемное поглощение электромагнитной энергии материалом, вследствие чего он одновременно прогревается по всей толщине. Но ввиду того, что поверхность материала охлаждается за счет испарения

влаги и потерь тепла в окружающую среду, температура внутри материала больше, чем на поверхности: $\Theta_ц > \Theta_п$. Этот перепад температур в толще материала положительно влияет на скорость сушки.

Нагрев материала в сушилках ТВЧ происходит настолько интенсивно, что скорость испарения влаги внутри материала превышает скорость переноса ее паров к поверхности материала. В связи с этим внутри материала возникает перепад давления пара уже при температуре $\Theta_ц \approx 60$ °С, что также ускоряет процесс сушки. Низкое влагосодержание внутри материала в процессе сушки оказывает слабое тормозящее действие.

Основное преимущество диэлектрической сушки - высокое качество продукта и малая длительность процесса (в 20-25 раз быстрее конвективной сушки). К недостаткам высокочастотной сушки относятся сложность

оборудования установки и большой расход электроэнергии (не менее 2-3,5 квт-ч на 1 кг испаренной влаги).

Диэлектрические сушилки обычно не применяются для удаления из материалов горючей влаги. В высокочастотных сушильных установках сушат древесину, клееные изделия, прессованные волокнистые материалы, шелк в куличах, порошкообразные материалы (лекарства, химические реактивы) и другие материалы. В качестве транспортных устройств в высокочастотных сушилках (за исключением сушилок для сушки древесины) обычно используются ленточные конвейеры (транспортеры).

На рис. 6.54 представлена схема камерной диэлектрической сушильной установки для сушки древесины. Сушильная установка состоит из двух основных элементов: высокочастотного генератора *1* и собственно сушильной камеры *2*. При помощи генератора / электрический ток промышленной частоты (50 Гц) преобразуется в переменный ток высокого напряжения (до 10000 В) высокой частоты (10-25 МГц), который подводится к электродам *4*.

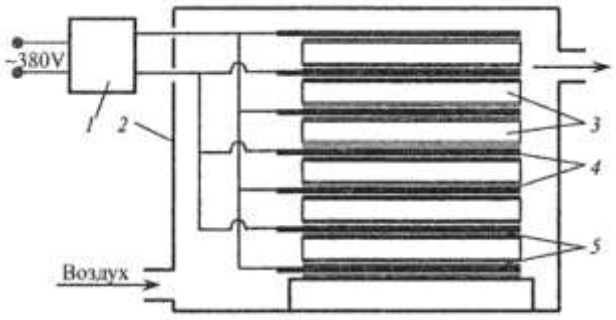


Рис. 6.54. Схема сушилки ТВЧ:
1–высокочастотный генератор; *2*–сушильная камера; *3*–древесина; *4*–электроды; *5*–асбестовые прокладки

Электроды выполняются ввиде листов из меди, латуни, алюминия, оцинкованной стали или сеток из этих же металлов. Между слоями древесины *3* и электродами *4* прокладывается изоляционный влагопоглощающий материал *5* (обычно асбест) во избежание межэлектродного замыкания при образовании во время сушки на холодных электродах капель воды. Паровоздушная смесь эвакуируется из сушильной камеры с помощью вентилятора и сбрасывается в атмосферу.

Комбинированные сушилки

Сушку кусковых и компактных материалов можно производить в любой гидрофобной жидкости: в расплавленных петролатуме, сере или парафине, в различных маслах и других подобных веществах. Наиболее широко применяются так называемые п е т р о л а т у м н ы е с у ш и л к и (они относятся к контактно-конвективному типу сушилок) для сушки древесины в петролатуме. Петролатум - твердый горючий материал, который получается в качестве побочного продукта при депарафинизации авиационных масел. Он состоит из смеси парафина, церезина и высоковязких масел. Температура плавления петролатума 55-60 °*C,* температура вспышки 240 °С, температура самовоспламенения 340 °*C.*

При погружении влажной древесины в расплавленный петролатум происходит ее интенсивное нагревание. Внутри влажной древесины возникает избыточное (по сравнению с внешним давлением) давление водяного пара, которое является следствием значительного внутреннего гидравлического сопротивления при движении паров по капиллярам древесины. Влага под действием градиентов давления $(p_ц > p_п)$ и влажности ($\omega_ц > \omega_п$) перемещается от внутренних слоев древесины к внешним в виде пара. Выйдя из древесины перегретый водяной пар барботирует через слой петролатума и выделяется в окружающую среду.

Установка для сушки древесины в петролатуме (рис. 6.55) состоит из заглубленной стальной или бетонной ванны *1* и связанного с ней хранилища петролатума *2.* Размеры ванн зависят от габаритов штабеля. Так, например, для сушки досок на строительных площадках применяются ванны длиной 7 м, глубиной 2-2,5 м и шириной 1,5-1,7 м. Обогрев ванны и хранилища

осуществляют обычно водяным паром, который поступает в подогреватели *3* под давлением 0,4-0,5 МПа, что может обеспечить нагрев петролатума до 120-130 °С. Помимо водяного пара для нагрева петролату-ма используются топочные газы или ТЭНы. При сушке чрезмерно влажной древесины происходит вспенивание петролатума. Для гашения пены вдоль бортов ванны смонтировано специальное устройство в виде труб, обогреваемых водяным паром до температуры 150-170 °С, или трубчатых электронагревателей (ТЭНов).

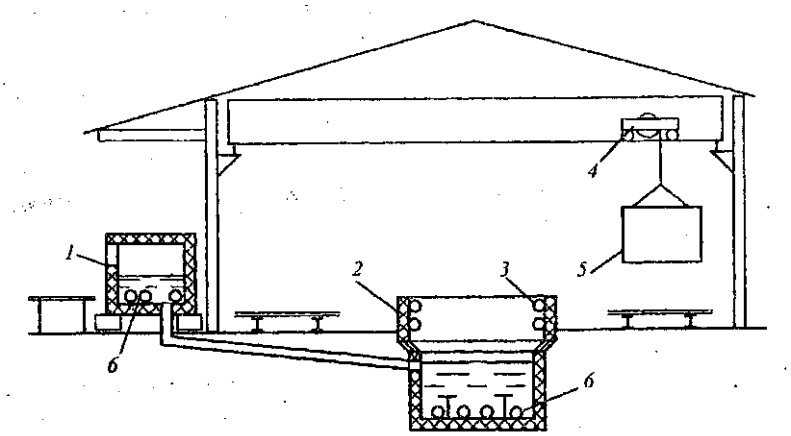


Рис. 6.55. Схема петролатумной сушилки:
1–хранилище петролатума; *2*–ванна; *3*–устройство для гашения пены; *4*–подъемно-транспортное устройство; *5*–штабель; *6*–трубы парового подогревателя

К преимуществам сушки в петролатуме относятся: совмещение сушки с пропиткой древесины антисептиками; сокращение продолжительности сушки (в 8-10 раз по сравнению с конвективной камерной сушилкой), уменьшение гигроскопичности древесины в результате пропитки ее петро-латумом.

Недостатками указанного способа сушки являются: безвозвратный расход петролатума (около 20 кг на 1 м высушенной древесины); затрудненная дальнейшая обработка древесины (распиловка, склейка, полировка) вследствие ее пропитки петролатумом; снижение прочностных свойств древесины при сжатии и изгибе (в среднем на 10 %). Сушка в петролатуме обычно производится на строительных площадках и предприятиях с небольшим объемом высушиваемой древесины (до 3-5 тыс. $м^3$ в год).

Контрольные вопросы

Какие процессы называются диффузионными?

Назовите общие признаки диффузионных процессов.

Что ограничивает протекание массообменного процесса?

От чего зависит количество переносимого через слой носителя вещества при молекулярной диффузии?

Что представляет собой коэффициент диффузии?

От чего зависит коэффициент диффузии?

От чего зависит количество переносимого через слой носителя вещества при конвективной диффузии?

Что такое движущая сила процесса массопередачи?

Что выражает уравнение рабочей линии процесса массопереноса?

От чего зависит количество вещества, переходящего из одной фазы в другую в процессе массообмена?

Для чего используются сорбционные процессы?

Какие виды сорбционных процессов Вы знаете?

Что такое адсорбция?

Что такое абсорбция?

Что такое хемосорбция?

Что такое десорбция?

Что понимают под селективностью сорбционного процесса?

Каким тепловым эффектом сопровождаются сорбционные процессы?

Чем руководствуются при выборе способа разделения газовых смесей?

Кто впервые ввел термин «активированный уголь»?

Для каких целей применяются процессы адсорбции?

Что такое адсорбенты и какими свойствами они должны обладать?

Назовите основные виды адсорбентов и дайте их краткую характеристику.

Что понимают под изотермой адсорбции и от чего зависит ее вид?

Чем характеризуется поглотительная способность адсорбента?

Что понимают под термином «проскок» при проведении процесса адсорбции?

Какие технологические параметры и каким образом влияют на протекание процесса адсорбции?

Каким образом производят десорбцию поглощенного вещества из адсорбента?

Укажите основные типы адсорберов.

Как устроен и работает вертикальный угольный адсорбер?

Для чего служит и как работает станция рекуперации?

От чего зависит продолжительность фазы адсорбции?

Как устроен и работает адсорбер с движущимся слоем зернистого адсорбента?

Для каких целей используются процессы абсорбции?

Что выражает закон Генри и от чего зависит константа Генри?

Какие технологические параметры способствуют процессу абсорбции?

Что понимают под термином «степень извлечения»?

Как называются аппараты для проведения процессов абсорбции и какие их типы Вы знаете?

Как устроен и работает пленочный абсорбер, какие у него достоинства и недостатки?

Как устроен и работает насадочный абсорбер, какие у него достоинства и недостатки?

Как устроен и работает тарельчатый абсорбер, какие у него достоинства и недостатки?

Как устроен и работает скруббер, какие у него достоинства и недостатки?

Как производят десорбцию отработанного абсорбента?

Как устроена и работает абсорбционно-десорбционная установка?

Укажите назначение процессов перегонки и ректификации жидкостей.

Смеси каких жидкостей можно разделить перегонкой или ректификацией?

Поясните сущность закона Рауля.

О чем гласит первый закон Коновалова?

Какие особенности характерны для азеотропных смесей?

О чем гласит второй закон Коновалова?

Поясните сущность простой перегонки.

Поясните сущность перегонки с дефлегмацией пара.

Что такое флегма и для чего служит дефлегматор?

Поясните сущность простой ректификации.

Из каких частей состоит ректификационная колонна?

Что такое флегмовое число?

Как влияет значение флегмового числа на положение рабочей линии процесса ректификации?

Какие типы ректификационных колонн Вы знаете?

Как устроена и работает насадочная ректификационная колонна, какие у нее достоинства и недостатки?

Какие факторы определяют высоту ректификационной колонны?

Какие факторы определяют диаметр ректификационной колонны?

Как устроена и работает ректификационная установка непрерывного действия?

Какие способы орошения ректификационных колонн Вы знаете?

Какие способы обогрева ректификационных колонн Вы знаете?

В каких случаях необходимо использовать цельносварные, а в каких случаях - сборные ректификационные колонны?

Какие типы тарелок Вы знаете?

Как устроены и работают ситчатая и провальная тарелки, какие у них достоинства и недостатки?

Как устроена и работает клапанная тарелка, какие у нее достоинства и недостатки?

Как устроены и работают струйные тарелки и в каких случаях рекомендуется их использовать?

Для каких целей производят сушку веществ и материалов?

Что понимают под влагой?

Каким образом классифицируют влагу, находящуюся в твердом материале?

Укажите формы связи влаги с материалом,

Какими способами удаляют влагу из твердого материала?

Что такое влажность материала?

Что такое влагосодержание материала?

Что такое тепловая сушка и какие виды тепловой сушки Вы знаете?

Что понимают под искусственной сушкой?

Какие факторы влияют на перемещение влаги в высушиваемом материале?

Какие факторы приводят к ускорению процесса сушки?

Какие факторы тормозят процесс сушки?

Что понимают под скоростью сушки и как она изменяется в процессе сушки?

Как классифицируют сушилки по способу подвода тепла?

Что такое сушильный агент?

Какие достоинства и недостатки присущи конвективному методу сушки?

В каких случаях применяют рециркуляцию сушильного агента и какая опасность возникает при этом?

Как устроена и работает туннельная сушилка?

Как устроена и работает сушилка КС, какие у нее достоинства и недостатки?

Как устроена и работает шахтная дымогазовая зерносушилка, какие у нее достоинства и недостатки?

Как устроен и работает вакуум-сушильный шкаф и в каких случаях его используют?

Как устроена и работает вальцовая сушилка, какие у нее достоинства и недостатки?

Какие типы генераторов инфракрасного излучения Вы знаете?

Как устроена и работает ламповая сушилка, какие у нее достоинства и недостатки?

Как устроена и работает газовая сушилка, какие у нее достоинства и недостатки?

Почему происходит нагрев материала, находящегося в поле токов высокой частоты?

Как устроена и работает сушилка ТВЧ?

Какие достоинства и недостатки имеет высокочастотный способ сушки?

Почему происходит сушка древесины при погружении ее в нагретый петролатум?

Как устроена и работает петролатумная сушилка?

100. Какие достоинства и недостатки имеет способ сушки материала в петролатуме?

Литература

Основная.

Рабочая программа курса пожарная профилактика технологических процессов (5 лет обучения). -М.: ВИПТШ МВД России, 1995.

Алексеев М. В., Волков О. М., Шатров Н. Ф. Пожарная профилактика технологических процессов производств. -М: ВИПТШ МВД СССР, 1985.

3. Основы пожарной безопасности: Учебное пособие / Под ред. канд. техн. наук В.А. Копылова. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1990.

Дополнительная.

Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии.

-М.: Изд-во «Химия», 1975.

Справочник нефтехимика: В 2-х т. /Под ред. канд. хим. наук С.К. Огороднико-ва. -Л.: Изд-во «Химия», 1978.

Глава 7. АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Химические реакторы - это аппараты для проведения химических превращений исходного сырья в целевой продукт определенного качества и в заданном количестве. Химические превращения осуществляются при проведении ряда физических процессов (диффузии, теплообмена, перемешивания и других процессов). Все без исключения химические реакторы должны удовлетворять следующим основным требованиям:

-обеспечивать наибольшую производительность при более высокой степени превращения сырья в готовую продукцию;

-иметь минимальные энергетические затраты на транспортировку и перемешивание реагентов;

-быть простыми в устройстве и дешевыми в изготовлении;

-наиболее полно использовать тепло экзотермических реакций и тепло, подводимое извне, для осуществления эндотермических процессов;

-быть надежными в работе, в наибольшей степени автоматизированными и механизированными.

Основными классификационными признаками химических реакторов являются: способ организации химического процесса в реакторе, температурный режим и режим движения реагентов.

По способу организации химического процесса различают реакторы периодического, непрерывного и полунепрерывного действия.

В *периодически действующий* реактор (схема периодически действующего реактора показана на рис. 2.3) сырье (реагенты) загружают в начале цикла производственного процесса. При необходимости сырье подогревают, добавляют какие-нибудь ингредиенты, перемешивают, охлаждают и через определенное время после достижения заданной степени превращения аппарат разгружают.

В реактор *непрерывного действия* (см. рис. 2.4) исходные вещества поступают непрерывно (или систематическими порциями), непрерывно же отводятся и продукты реакции.

В реактор *полунепрерывного действия* сырье поступает периодически, а продукты реакции отводятся непрерывно или же при непрерывной загрузке сырья осуществляется периодическая выгрузка готовой продукции.

По температурному режиму реакторы подразделяются на адиабатические, изотермические и политермические (программно-регулируемые).

Адиабатические реакторы при спокойном (без перемешивания) течении потока реагентов не имеют теплообмена с окружающей средой, так как снабжены хорошей теплоизоляцией. Вся теплота реакции аккумулируется

потоком реагирующих веществ. На рис. 7.1 показаны схема адиабатического реактора и графики изменения температуры при протекании экзотермического (а) и эндотермического *(б)* процессов.

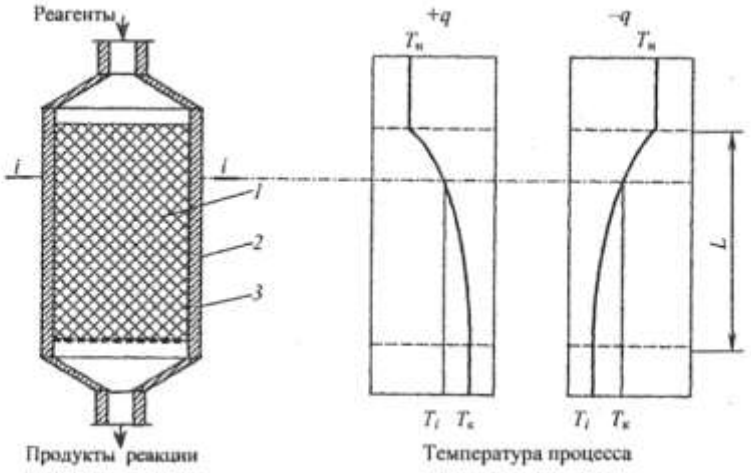


Рис. 7.1. Схема и температурные режимы работы адиабатического реактора: 1-зона реакции; 2-корпус реактора; 3-теплоизоляция (L - *длина реакционной зоны)*

Температуру в любом *i-м* сечении адиабатического реактора (рис. 7.1) можно определить из выражения

$$T_i = T_н + \frac{qX_i}{GC_p} \qquad (7.1)$$

где T_i и $T_н$ - текущая и начальная температуры реакционной смеси; q - тепловой эффект химической реакции; X_i - степень превращения сырья в i-м сечении реактора; G - общее количество реакционной смеси; C_p - средняя удельная теплоемкость смеси в интервале начальной ($T_н$) и конечной ($T_к$) температур процесса.

Изотермический реактор имеет постоянную рабочую температуру ($T_р$) во всех точках реакционного объема в течение всего периода его работы. Схема изотермического реактора и графики изменения температуры при протекании экзотермического *(а)* и эндотермического (б) процессов приведены на рис. 7.2. Изотермичность процесса достигается: при помощи помещенных в реакционный объем теплообменных устройств для отвода тепла в экзотермических *(+q)* и подвода тепла в эндотермических *(-q)* реакциях; за счет теплового равновесия экзо- и эндотермических превращений (автотермичности процесса); за счет разбавления реагентов большим количеством инертных компонентов и интенсивным перемешиванием смеси и другими способами.

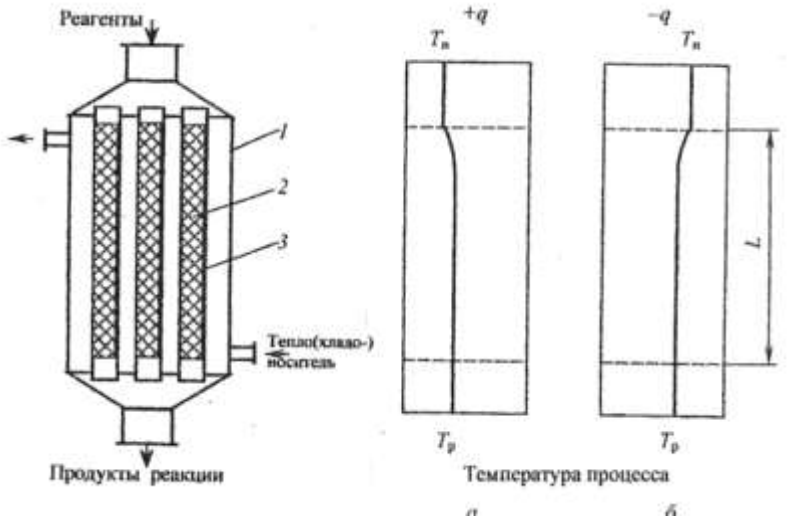


Рис. 7.2. Схема и температурные режимы работы изотермического реактора: 1-корпус; 2-реакционный объем; 3-трубы (L - *длина реакционной зоны)*

Политермическими называются реакторы, в которых тепло реакции лишь частично компенсируется за счет отвода (подвода) тепла или процессов с тепловым эффектом, противоположным по знаку основному. Количество подводимого или отводимого тепла рассчитывается на стадии проектирования таких реакторов. Поэтому они называются также программно-регулируемыми.

По режиму движения реагентов различают реакторы идеального вытеснения, идеального смешения (перемешивания) и частичного смешения.

В реакторе *идеального вытеснения* реагенты без перемешивания ламинарным потоком проходят весь реакционный путь, определяемый длиной или высотой аппарата, которая значительно больше его диаметра. Аппараты идеального вытеснения не имеют приспособлений для механического перемешивания реагентов и обычно представляют собой реакторы трубчатого, шахтного или башенного типов.

Реакторы *идеального перемешивания* характеризуются тем, что любая частица реагента, попавшая в данный момент в реакционную зону, благодаря интенсивному перемешиванию имеет равную со всеми остальными частицами вероятность первой покинуть ее. В таких реакторах любой элемент объема мгновенно смешивается со всем содержимым реакционного пространства, так как скорость циркуляционных движений по высоте и сечению аппарата во много раз больше скорости линейного перемещения среды по оси реактора. Моделью реактора идеального перемешивания могут служить смесители с механическими мешалками, пневматическими и струйными смесителями, а также реакторы с кипящим слоем.

Сравнивая реакторы идеального вытеснения и смешения, необходимо отметить, что реакторы смешения работают, как правило, в изотермических условиях, а реакторы вытеснения - в адиабатическом или политермическом режимах. При равенстве начальных температур проведение экзотермического процесса в реакторе смешения сопровождается повышенной (в 5-10 раз) константой скорости реакции по сравнению с проведением того же процесса в

реакторе вытеснения, однако движущая сила процесса, выраженная разностью равновесного и действительного выхода $(X_P\text{-}X)$, в реакторе вытеснения во много раз больше, чем в реакторе смешения. Кроме того, реакторы смешения требуют дополнительных затрат энергии на перемешивание реагентов.

Для эндотермических процессов реакторы смешения без подвода тепла извне используются значительно реже, чем для экзотермических, так как в этих процессах снижается и движущая сила и константа скорости.

В связи с тем, что идеальные условия вытеснения и смешения создать в реальных условиях трудно, большинство промышленных реакторов работает в режиме частичного, или локального, перемешивания реагентов с продуктами реакции. Такие реакторы описываются так называемой *диффузионной моделью,* которая учитывает изменение концентрации не только вследствие химического превращения (как при идеальном вытеснении), но и вследствие перемешивания реагентов и продуктов реакции.

Помимо указанных классификационных признаков, реакторы, как и химико-технологические процессы подразделяются на низкотемпературные и высокотемпературные, по применяемому давлению - на аппараты, работающие при высоком, повышенном, нормальном и низком (под вакуумом) давлениях. По фазовому состоянию реагентов реакторы делятся на аппараты для проведения гомогенных и гетерогенных процессов.

7.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕЧИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Основной аппаратурой для осуществления высокотемпературных химических процессов являются промышленные печи различной конструкции. Промышленной печью называют аппарат, в котором за счет сгорания топлива, протекания других экзотермических химических реакций или применения электрической энергии выделяется тепло, используемое для тепловой обработки различных веществ, претерпевающих при этом физические и химические превращения.

Технологические печи классифицируются, в первую очередь, по назначению, источнику тепловой энергии, способу нагрева, конфигурации рабочей камеры и другим признакам. Ниже приводятся некоторые типы печей и указывается их предназначение.

1. Шахтные печи: доменные печи для выплавки чугуна; печи цветной металлургии для выплавки меди, свинца, никеля; газогенераторы для газификации твердого топлива и другие.

2. Барабанные печи: цементные для производства цементного клинкера; обжиговые для обжига колчедана, восстановления сульфатов и другие.

3. Туннельные печи: для пиролиза древесины, сланца; плавильные для плавки серной руды; обжиговые для обжига огнеупоров и керамики и другие.

4. Камерные печи: для коксования твердого топлива; отжиговые для отжига металла и стекла и другие.

5. Трубчатые печи: конверторы для паровой или паровоздушной конверсии

природного газа; пиролизные печи для крекинга и пиролиза древесины, нефтепродуктов и другие.

6. Циклонные печи: для сжигания твердого топлива и обжига колчедана и руд цветных металлов и другие.

7. Печи взвешенного (кипящего) слоя: обжиговые для обжига колчедана, руд цветных металлов; регенераторы для выжигания углерода с поверхности катализатора; газогенераторы для газификации и пиролиза твердого топлива; печи крекинга для разложения тяжелых углеводородов и другие.

8. Механические полочные печи: для обжига колчедана, руд цветных металлов и солей.

9. Печи пылевидного обжига руд цветных металлов, колчедана, сжигания топлива.

10. Ванные печи: отражательные для выплавки стали, цветных металлов, стекла; конверторы для выплавки и переплавки стали и цветных металлов; тигельные для переплавки чугуна, термической обработки металлов и другие.

11. Электрические печи: дуговые для плавки и рафинирования цветных металлов, стали; сопротивления для получения карбидов, графита, кварцевого стекла, сероуглерода; комбинированные для получения карбида, фосфора, электролиза расплавов, получения электрокорунда, огнеупоров; индукционные для переплавки металлов и сплавов, варки кварцевого стекла.

Схема циклонной печи для обжига серного колчедана приведена на рис. 7.3. Тангенциальный ввод вторичного воздуха (по аналогии с циклоном) обеспечивает завихрение среды в печи. При этом резко интенсифицируются процессы массо- и тепло переноса, за счет чего в печи развивается высокая температура (до 1400 °С), превышающая температуру плавления огарка, который удаляется в жидком виде. Расплавленный огарок, в состав которого входят окислы железа, других металлов, алюмосиликаты, а также кварц, поступает в ванну с водой и застывает в виде гранул диаметром 5-8 мм. Его используют в доменном производстве при получении чугуна.

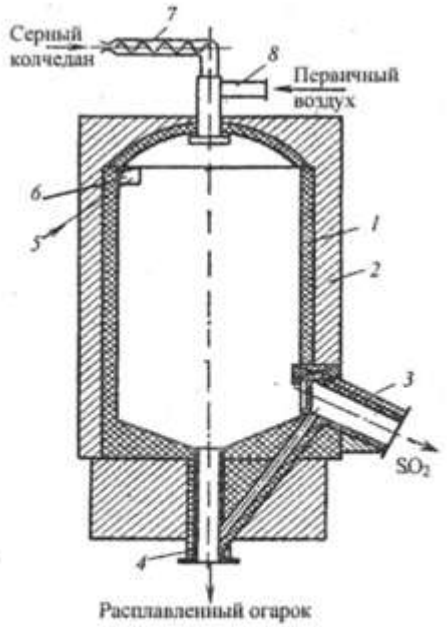


Рис. 7.3. Схема циклонной печи:
1–футеровка; *2*–кладка; *3*–газоход обжигового газа; *4*–патрубок отвода огарка; *5*–вторичный воздух; *6*–газоход вторичного воздуха; *7*–шнековый питатель; *8*–патрубок первичного воздуха

Процесс обжига пирита (сульфида железа, содержащегося в серном колчедане) можно представить следующей суммарной реакцией:

$$4FeS + 11O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 + 8SO_2 + Q\ .$$

Концентрация сернистого ангидрида (SO_2) в газе доходит до 14 %, а отсутствие в нем пыли упрощает последующую схему переработки газов обжига на серную кислоту.

В электродуговых печах нагрев материала осуществляется за счет тепла дуги, которая образуется между электродом и нагреваемым материалом (прямой нагрев) или между двумя электродами (косвенный нагрев).

На рис. 7.4 представлена схема электродуговой печи прямого нагрева для производства карбида кальция. Печь состоит из стального корпуса *1* и свода *5,* выложенных огнеупорным кирпичом 7. В своде печи имеются патрубки *4,* через которые проходят угольные электроды *3* меньшего диаметра. Под печи выложен угольными блоками *8* и имеет уклон в сторону летки *6.* Из негашеной извести и кокса готовится шихта, которая непрерывно загружается в печь через кольцевые отверстия между электродами и внутренними стенками патрубков. Реакционные газы отводятся через патрубки *2.* Расплав карбида кальция периодически отводится через летку 6.

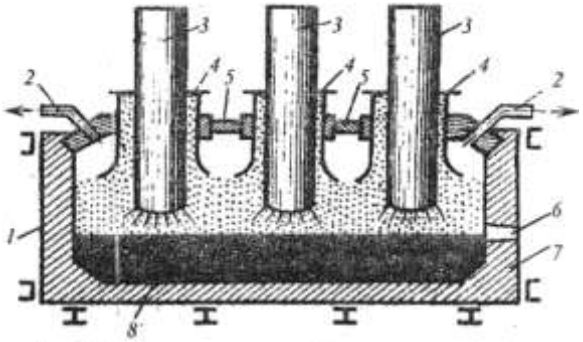


Рис. 7.4. Схема электродуговой печи прямого нагрева: *1*–стальной корпус; *2*–газоотводящие патрубки; *3*–электроды; *4*–отверстия для подачи шихты; *5*–свод печи; *6*–летка; *7*–футеровка; *8*–угольные блоки

Карбид кальция образуется при взаимодействии извести с коксом при 1800-2000 °С по уравнению

$$CaO + 3C \Leftrightarrow CaC_2 + CO + 475 \text{ кДж}.$$

7.3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Во многих современных производствах преимущественно используются реакторы непрерывного действия (проточного типа), а периодически действующие реакторы находят ограниченное применение в малотоннажных, опытных и вспомогательных производствах. Для большинства химических технологических процессов проектируются нестандартные реакторы, зачастую изготавливаемые в единственном экземпляре. На производственных установках применяются не только одиночные, самостоятельно работающие реакторы, но и их комбинации. Реакторы могут соединятся параллельно и последовательно. В первом случае достигается только количественный эффект увеличения производительности. Во втором случае достигается качественный эффект, связанный с обеспечением большей степени превращения сырья и высокой селективности, а также с повышением устойчивости и безопасности технологического режима при проведении экзотермических процессов.

При рассмотрении различных типов химических реакторов в первую очередь необходимо учитывать фазовый состав веществ, находящихся в реакционной зоне, включая реагенты, катализаторы и растворители (твердые теплоносители и инертные насадки не учитываются). Рассмотрим некоторые типы реакторов, предназначенных для проведения реакций в гомогенных средах (только газовая или только жидкая фаза) и в гетерогенных средах: газ-твердый катализатор; жидкость-твердый катализатор; жидкость-жидкость (не смешивающаяся с первой); газ-жидкость-твердый катализатор.

7.3.1. Реакторы для проведения процессов в гомогенной газовой среде

Реакторы смешения. Перемешивание газов в таких реакторах осу-

ществляется за счет конвекции в реакционном объеме или путем принудительной циркуляции с помощью встроенных вентиляторов.

На рис. 7.5 в качестве примера показан адиабатический реактор с конвекционным перемешиванием для проведения реакций в гомогенной газовой фазе, используемый в технологическом процессе термического хлорирования метана. При пуске реактора в работу перед подачей сырья реакционная камера разогревается за счет сжигания метана в горелках 7. Смесь реагентов (метан и хлор) поступает в реактор нагретой до требуемой температуры, обеспечивающей их химическое взаимодействие. Процесс протекает без наружного теплообмена. Внутренняя насадка 5, аккумулирующая теплоту, служит для увеличения динамической устойчивости технологического режима.

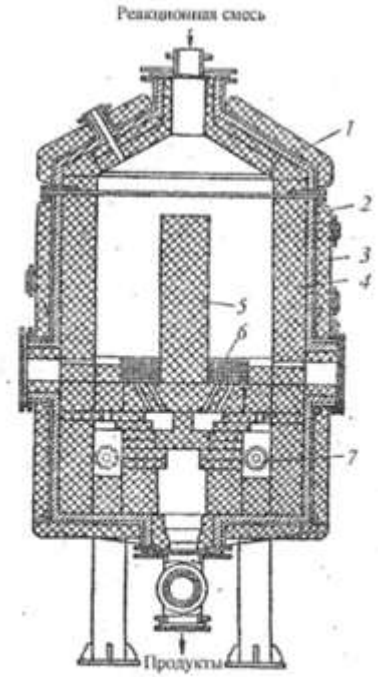


Рис. 7.5. Реактор термического хлорирования метана:
1 и *2*–наружная теплоизоляция; *3*–стальной корпус; *4*–внутренняя футеровка; *5*–теплоаккумулирующая насадка; *6*–керамические кольца; *7*–горелки

Указанный тип реакторов, применяемых для проведения газовых реакций при высоких температурах и в агрессивных средах, имеет следую^ щие достоинства: отсутствие теплообмена через стенку; надежное обеспечение тепловой и коррозионной защиты корпуса; высокую динамическую

устойчивость технологического процесса. Недостатки: низкая селективность (протекание нежелательных реакций); недостаточно высокая скорость превращения исходного сырья; ограниченная возможность регулирования процесса, связанная с постоянством состава исходной сырьевой смеси; неравномерность температурного поля в объеме реактора. Последние два недостатка ликвидируются при использовании систем принудительной циркуляции газовой смеси, но при этом возникают трудности с тепловой и коррозионной защитой.

Реакторы вытеснения. Примерами таких реакторов служат трубчатые реакторы для пиролиза и термического крекинга змеевиково-го типа, аналогичные трубчатым нагревательным печам (см. рис. 5.16). Реактор парофазного пиролиза нефтепродуктов представляет собой пучок длинных труб (длиной 10-12 м) небольшого диаметра (80-120 мм), обогреваемых снаружи топочными газами. Современные пиролиз-ные печи имеют в одном корпусе 4-5 топочных камер, в которых заложено до 16 параллельно работающих змеевиков. Трубы змеевика в зависимости от места расположения в печи делятся на 4 зоны: предварительного нагрева и испарения сырья, перегрева пара, высокотемпературную конвекционную и радиантную зону. Температура реакционной смеси по мере ее продвижения по трубам постепенно повышается с 200 °С до 800-850 °С.

К достоинствам трубчатых реакторов для проведения газофазных реакций относятся: интенсивный регулируемый теплообмен через стенку трубы; оптимальный температурный режим; высокая селекгивность процесса при отсутствии продольного перемешивания потока. Недостатки: ограниченность температуры процесса жаропрочностью материала труб; большое гидравлическое сопротивление реактора; образование отложений кокса на внутренней поверхности труб, что приводит к ухудшению теплообмена, увеличению гидравлического сопротивления, т. е. создаются условия для прогара труб.

7.3.2. Реакторы для проведения процессов в гомогенной жидкой среде

Реакторы смешения. К таким реакторам относятся аппараты с механическими перемешивающими устройствами (мешалками), в которых достигается однородность концентрации компонентов и высокие коэффициенты теплоотдачи (см. рис. 2.3). Для обеспечения подвода или отвода тепла из зоны реакции применяются встроенные теплообменники.

Реакторы вытеснения. Наибольшее распространение в промышленности получили трубчатые реакторы, аналогичные по конструкции с теплообменниками типа «труба-в-трубе». На рис. 7.6 показана схема реактора трубчатого типа с посекционной циркуляцией реагирующей смеси (альдолиза-тор). Реактор состоит из нескольких последовательно соединенных секций *1* с интенсивной многократной циркуляцией жидкости в каждой секции, создаваемой насосами *2*. Такой аппарат работает подобно каскаду реакторов идеального вытеснения (труба) и смешения (центробежный насос), вследствие чего его эффективность приближается к эффективности реактора идеального вытеснения.

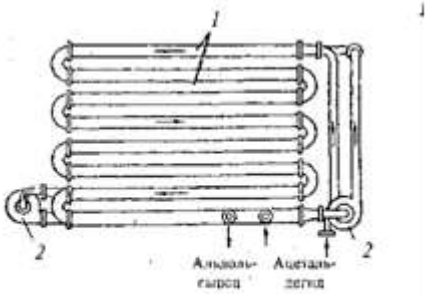


Рис. 7.6. Схема альдолизатора:
1–секции реактора; *2*–циркуляционные насосы

Для быстро протекающих процессов при большой линейной скорости реагентов используются реакторы кожухотрубного или колонного типов с внутренними теплообменными устройствами.

К достоинствам указанных типов реакторов относятся возможность обеспечения заданной температуры процесса и противоточного режима движения теплоносителя (хладоносителя). Основные недостатки: низкая эффективность теплообмена с теплоносителем (хладоносителем); необходимость устройства каскада реакторов для обеспечения высоких степеней превращения и селективности и, как следствие, высокая удельная металлоемкость; сложность конструкции реакторов.

7.3.3. Реакторы для проведения процессов в гетерогенной системе газ-твердый катализатор

Для этих видов процессов существует большое число разнообразных реакторов, преимущественно относящихся к классу реакторов вытеснения в связи с тем, что как в аппаратах с неподвижным слоем катализатора, так и в аппаратах с псевдоожиженным слоем катализатора практически не удается достигнуть эффекта полного перемешивания веществ.

Реакторы вытеснения. К этой группе аппаратов относятся колонные реакторы со сплошной загрузкой катализатора, трубчатые реакторы, а также адиабатические колонные полочные реакторы.

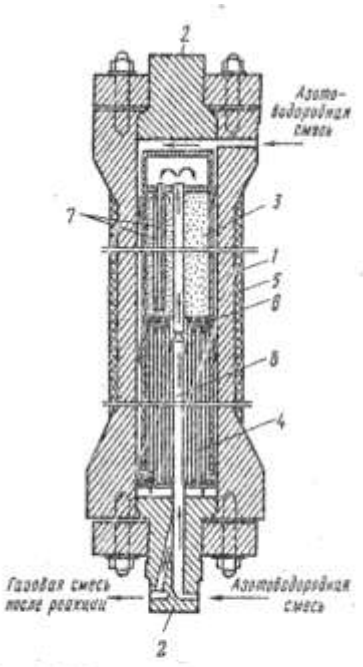


Рис. 7.7. Колонна синтеза аммиака под средним давлением:
1–корпус; *2*–крышка; *3*–катализаторная коробка; *4*–теплообменник; *5*–теплоизоляция; 6–опорная решетка; *7*–трубы Фильда; *8*–центральная труба

На рис. 7.7 показан р е а к т о р к о л о н н о г о т и п а для синтеза аммиака под средним давлением (до 30 МПа). В корпусе *1* такого реактора, изготовленного из высоколегированной хромоникелевой стали с толщиной стенок 175 мм, диаметром 1,0-1,4 м и высотой 13 м, расположена катализаторная коробка *3* и теплообменник *4,* обеспечивающий автотермичность процесса.

Трубчатые реакторы используются для проведения сильно экзотермических процессов (например, окислительных, гидрогениза-ционных, синтеза углеводородов из СО и РЬ) или эндотермических процессов (например, дегидрирования этилбензола, паровой конверсии метана). По конструкции такие реакторы напоминают трубчатые нагревательные печи с вертикальным расположением труб или кожухотрубные теплообменники с трубами, заполненными катализатором.

К достоинствам таких реакторов относятся: глубокое превращение сырья и высокая селективность процесса, т.к. режим движения потока близок к полному вытеснению; развитая поверхность теплообмена и высокие значения коэффициентов, теплопередачи; эффективная работа катализатора во всех трубах, достигаемая в результате калибровки гидравлического сопротивления каждой трубы; возможность использования в отдельных случаях стандартных теплообменников.

Недостатки трубчатых реакторов, ограничивающие область их применения: невысокая доля общего объема реактора, заполненного катализатором; большой расход металла на трубы; сложность загрузки и выгрузки катализатора из реакционных труб; сложность обеспечения оптимального температурного режима по всей длине труб.

В связи с этим в последнее время нашли широкое применение адиабатические реакторы со сплошным неподвижным и с подвижным слоем катализатора. Адиабатические реакторы со сплошным слоем катализатора используются в процессах протекающих в кинетической и переходной областях (например, гидрокрекинга, риформинга, изомеризации парафинов, прямой гидратации этилена, дегидрирования этилбензола в стирол и других), а также в процессах, протекающих в диффузионной области (например, окисления спиртов в альдегиды и кетоны). Для проведения процессов первого вида используются адиабатические реакторы шахтного типа с достаточно высоким слоем катализатора.

На рис. 7.8 показан адиабатический шахтный реактор дегидрирования алкилбензолов со сплошной засыпкой катализатора. Катализатор в виде цилиндров диаметром 10-20 мм или колец Рашига укладывается на слой инертной насадки *4*, препятствующей просыпанию его через опорную решетку *2*. Важное значение имеет смеситель *9*, предназначенный не только для получения однородной реакционной смеси, но и для равномерного распределения газового потока по сечению реактора.

К достоинствам таких реакторов относятся: полнота использования объема реактора, простота конструкции, небольшая металлоемкость.

Недостатки: ограниченная область применения (они применяются только для процессов, в которых адиабатический перепад температур не слишком высок, т. е. когда нет опасности перехода в области слишком высоких или низких температур); невозможность обеспечения оптимального профиля температур по высоте слоя катализатора; трудность равномерного распределения подачи реакционной смеси на слой катализатора.

Процессы с большим адиабатическим изменением температуры реакционной смеси проводят в реакторах полочного (секционированного) типа (рис. 7.9). Число секций в таких реакторах (обычно не более 10) и распределение катализатора между ними определяют, исходя из величин адиабатического перепада температур и оптимальной степени превращения в каждом слое. Охлаждение (нагревание) реакционной смеси между полками производится, как правило, непосредственным смешением реакционной смеси с холодным (горячим) теплоносителем или впрыскиванием испаряющейся жидкости. В то же время между секциями реактора могут использоваться встроенные *3* или выносные теплообменники.

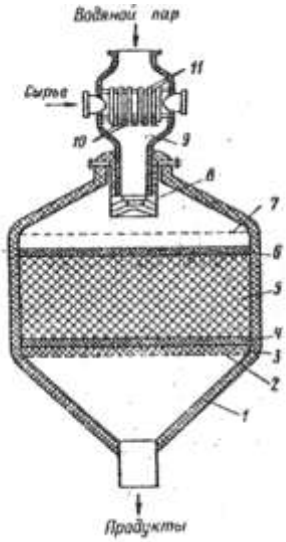


Рис. 7.8. Схема адиабатического шахтного реактора:
1–корпус; *2*, *7*–опорные решетки; *3*, *4*, *6*–насадка; *5*–катализатор; *8*–распределительное устройство; *9*–смеситель; *10*–сопла; *11*–трубы

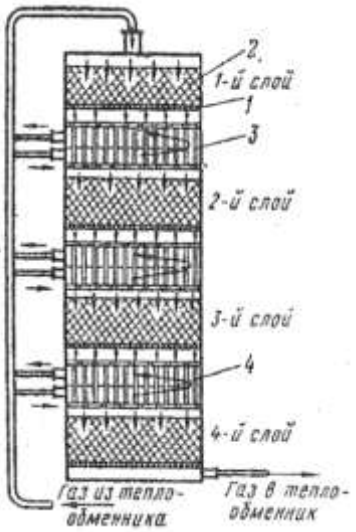


Рис. 7.9. Схема адиабатического полочного реактора:
1–опорные решетки (полки); *2*–катализатор люки; *3*–теплообменник; *4*–перегородка

Достоинства секционированных реакторов: возможность поддержания оптимального температурного режима; простота конструкции (без встроенных или выносных теплообменников) и удобство эксплуатации; небольшая металлоемкость. Недостатки: необходимость использования больших количеств катализатора; необходимость последующего отделения продуктов реакции от теплоносителя; громоздкость и сложность конструкции реакторов со встроенными и выносными теплообменниками.

Для проведения процессов, протекающих в диффузионной области, используются адиабатические реакторы с катализаторами в виде сеток.

На рис. 7.10 представлен к о н т а к т н ы й а п п а р а т для окислительного аммонолиза метана. Аналогичные по конструкции аппараты (с устройством в нижней части закалочной камеры) используются для получения формалина из метилового спирта и в других окислительных процессах (например, для окисления аммиака в нитро-зные газы в технологическом процессе производства азотной кислоты). Реактор прост по конструкции, но регулирование процесса в нем затрудненно и обеспечивается, в какой-то мере, только изменением состава исходной реакционной смеси.

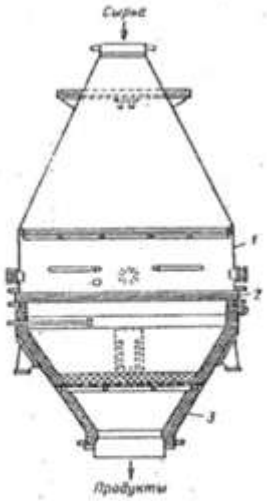


Рис. 7.10. Схема адиабатического реактора вытеснения с катализатором в виде сеток:
1–корпус; *2*–катализаторные сетки; *3*–теплоизоляция

Рассмотренные выше реакторы с неподвижным слоем катализатора непригодны для проведения процессов, требующих регенерации катализатора. В этом случае более пригодны аппараты с подвижным катализатором: с медленно движущимся плотным слоем, с псевдоожиженным (кипящим) слоем, с катализатором, движущимся в режиме пневмотранспорта (данный тип реакторов применяется для проведения быстро протекающих реакций (например, синтеза углеводородов) с интенсивным коксообразованием).

В установках с медленно движущимся плотным слоем используется гранулированный катализатор с размером частиц 3-5 мм. Установка обычно состоит из двух аппаратов: реактора и регенератора, через которые осуществляется циркуляция катализатора. Схема установки реактор-регенератор напоминает непрерывно действующий адсорбер с зернистым адсорбентом (см. рис. 6.10).

В реакторах с псевдоожиженным слоем применяют мелкий и пылевидный катализатор с размерами частиц 0,01-0,1 мм. Если в процессе происходит его быстрая дезактивация, то в состав установки должен входить регенератор (отдельно стоящий или совмещенный в одном корпусе с реактором).

На рис. 7.11 приведена схема реактора с псевдоожиженным катализатором для крекинга соляровых или керосиновых фракций. Конструктивно такие реакторы выполняются в виде колонн или труб, внутри которых размещаются системы улавливания пыли из отходящих газов (циклоны, фильтры), устройства, препятствующие продольному перемещению частиц катализатора (сетки, перфорированные тарелки), теплообменники, отпарные секции.

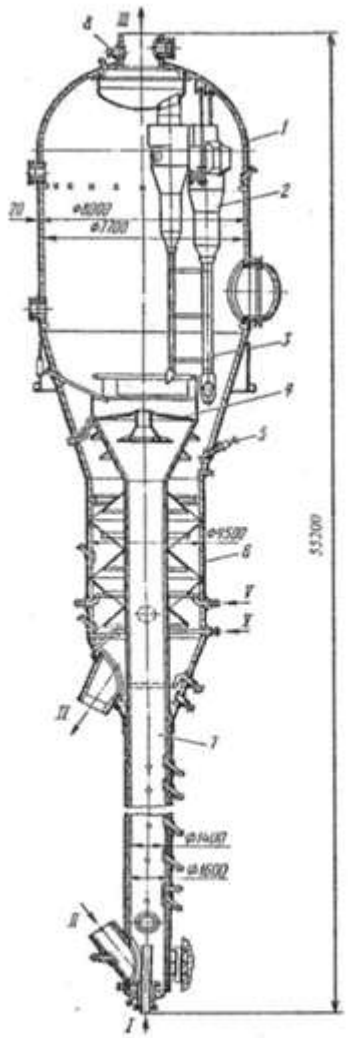


Рис. 7.11. Схема реактора с псевдоожиженным катализатором:
1–корпус; *2*–циклоны; *3*–стояки; *4*–распределительная решетка; *5*–форсунка; *6*–десорбер; *7*–стояк; *8*–штуцер ПК; *I*–ввод сырья; *II* и *IV*–подвод и отвод катализатора; *III*–отвод продуктов реакции; *V*–подвод водяного пара

Достоинства реакторов определяются, в первую очередь, свойствами псевдоожиженного слоя (способностью течь подобно жидкости), хорошей теплоотдачей, возможностью использования мелких частиц катализатора, в которых отсутствует внутридиффузионное сопротивление протеканию химических реакций.

7.3.4. Реакторы для проведения процессов в системе газ-жидкость

Среди процессов данного типа можно назвать окисление, гидрогенизацию, алкилирование, галогенирование, нитрование, сульфирование, гидратацию и многие другие процессы. Основными условиями эффективного проведения этих процессов, при которых достигаются высокие степень превращения и селективность, а также устойчивость процесса, являются обеспечение хорошего

контакта фаз и теплообмена в реакторе.

Реакторы смешения. К данному типу аппаратов относятся реакторы с механическими смесителями, а также реакторы с использованием газлифтов или инжекторов для перемешивания газожидкостной среды за счет гидродинамических эффектов. Теплообмен в таких реакторах осуществляется через стенки циркуляционных труб или с помощью встроенных теплообменников. На рис. 7.12 покачан реактор высокого давления с турбинной мешалкой и герметичным бессальни-ковым приводом. Сырье поступает по патрубкам / и *II,* продукгы отводятся по патрубку *III,* для подачи и отвода теплоносителя служат патрубки *IV* и *V.*

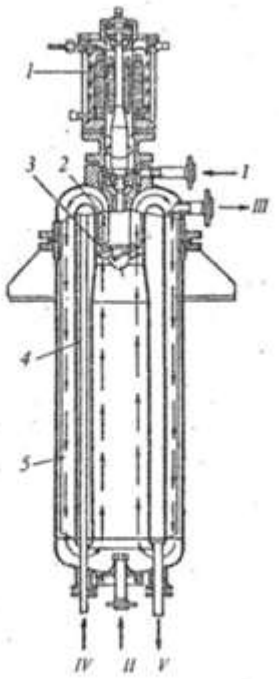


Рис. 7.12. Реактор высокого давления с турбинной мешалкой: *1*–электропривод; *2*–направляющий аппарат; *3*–мешалка; *4*–теплообменная камера; *5*–полые ребра

Реакторы вытеснения. Для процессов, протекающих в кинетической или переходной областях, применяют барботажные реакторы колонного типа с колпачковыми или ситчатыми тарелками, аналогичные по конструкции с абсорберами (см. рис. 6.16 и 6.30). В качестве теплообменных устройств в реакторах используются змеевики или трубы Фильда.

Для процессов, протекающих в диффузионной области, используются аппараты с развитой поверхностью контакта фаз - пенные или пленочные, аналогичные по устройству с абсорберами (см. рис. 6.14). Основной недостаток пенных аппаратов - трудность организации теплообмена. Этот недостаток устраняется благодаря применению встроенных теплообменных устройств.

7.3.5. Реакторы для проведения процессов в системе жидкость-твердый катализатор

Подобные каталитические процессы в технологии осуществляются достаточно редко вследствие возникающих трудностей с обеспечением хорошего теплообмена. Несколько улучшить теплообмен можно принудительной турбулизацией потока с помощью перемешивающих устройств или созданием большой поверхности теплообмена.

Реакторы смешения. Наиболее типичными реакторами для проведения процессов в системе жидкость-твердый пылевидный катализатор являются аппараты емкостного типа с рубашками и механическими мешалками (обычно турбинными, пропеллерными или лопастными) для перемешивания суспензий с содержанием твердой фазы до 70-90 % (см. рис. 2.3 и 2.4). Интенсивность перемешивания выбирается достаточной для создания суспензии катализатора в жидкости и для поддержания хорошего теплообмена.

Для создания суспензии твердых частиц катализатора используют также барботирующий через жидкость инертный газ или псевдоожижают слой катализатора потоком жидкости.

Реакторы вытеснения. В зависимости от величины теплового эффекта применяются реакторы трубчатого типа, колонные с неподвижным слоем катализатора (адиабатические или секционированные) и колонные, в которых катализатор используется в виде суспензии. Конструкции этих реакторов аналогичны реакторам для проведения химических процессов в системах газ-твердый катализатор.

7.3.6. Реакторы для проведения процессов в системе жидкость-жидкость

Примерами таких процессов могут служить процессы алкилирования ароматических и парафиновых углеводородов, синтеза диметилдиоксана из формальдегида и изобутилена и другие. Конструктивные особенности реакторов определяются необходимостью обеспечения хорошего контактирования фаз и интенсивного теплообмена.

Реакторы смешения. На установках для проведения химических процессов в системе жидкость-жидкость применяются реакторы емкостного типа, оборудованные рубашками и пропеллерными или турбинными мешалками (см. рис. 4.1). Для достижения высоких степеней превращения и селективности применяются каскады реакторов смешения с организацией противоточного движения реагентов.

Реакторы вытеснения. Основные типы реакторов - тарельчатые колонны со встроенными теплообменниками (для реакций с небольшим тепловым эффектом) или реакторы кожухотрубного типа (для сильно экзотермических процессов). Для эффективной работы реакторов кожухотрубного типа необходимо обеспечить высокую степень диспергирования одной жидкости в другой, что достигается интенсивным перемешиванием жидкостей в быстроходной мешалке или подачей эмульсии в реактор через специальные сопла, установленные на каждой трубе.

7.3.7. Реакторы для проведения процессов в системе газ-жидкость-твердый катализатор

Процессы протекающие в тройной системе, широко распространены в нефтехимии. Примерами могут служить процессы гидрирования. В реакторах для реализации указанных процессов в первую очередь обеспечивают хороший массообмен между жидкостью и катализатором и между газом и жидкостью, а также устойчивый тепловой баланс процесса.

Реакторы смешения. В малотоннажных производствах применяются аппараты с мешалками (турбинными, пропеллерными или лопастными), а катализатор может применяться в виде суспензии или в неподвижном состоянии.

Реакторы вытеснения. Примеры таких реакторов - аппараты с неподвижным слоем катализатора колонного типа со сплошной (адиабатические реакторы) или секционированной загрузкой, аналогичные реакторам для систем газ-твердый катализатор. В настоящее время на крупных установках гидроочистки работают реакторы диаметром до 3 м с 1-5 слоями катализатора высотой 3-5 м каждый.

В процессах сероочистки и гидрокрекинга нефтяных фракций, гидрирования органических соединений в жидкой фазе и других процессах используются реакторы колонного типа с внутренними теплообменными устройствами, катализатор в которых находится в виде суспензии. Достоинства этих аппаратов по сравнению с реакторами, в которых катализатор находится в неподвижном состоянии: хорошая теплоотдача к поверхности, помещенной в слой; интенсивный массообмен между фазами; возможность непрерывного обновления катализатора. К недостаткам относится интенсивная эрозия стенок аппаратуры.

Контрольные вопросы

Что такое химический реактор?

Какие требования предъявляются к химическим реакторам?

По каким основным признакам классифицируются реакторы?

Как классифицируют реакторы в зависимости от способа организации процесса?

Как классифицируют реакторы в зависимости от температурного режима процесса?

Как классифицируют реакторы в зависимости от режима движения реагентов?

Каков принцип работы адиабатического реактора?

Каков принцип работы изотермического реактора?

Каков принцип работы политермического реактора?

Как можно охарактеризовать работу реактора идеально вытеснения?

Как можно охарактеризовать работу реактора идеально перемешивания?

Какие аппараты называются промышленными печами?

По каким основным признакам классифицируются промышленные печи?

Перечислите основные виды промышленных печей.

Как устроена и работает электродуговая печь прямого нагрева?

Как устроена и работает циклонная печь?

Как устроен и работает адиабатический реактор термического хлорирования метана?

Как устроен и работает трубчатый реактор парофазного пиролиза неф-

тепродуктов?

Как устроен и работает трубчатый реактор-альдолизатор?

Как устроена и работает колонна синтеза аммиака под средним давлением?

Как устроен и работает адиабатический шахтный реактор дегидрирования алкилбензолов?

Как устроен и работает адиабатический полочный реактор?

Как устроен и работает контактный аппарат окислительного аммоноли-за метана?

Как устроен и работает реактор крекинга углеводородного сырья с псевдоожиженным слоем пылевидного катализатора?

Как устроен и работает реактор высокого давления идеального смешения с турбинной мешалкой?

Литература

Основная.

Рабочая программа курса пожарная профилактика технологических процессов (5 лет обучения). -М.: ВИПТШ МВД России, 1995.

Алексеев М. В., Волков О. М., Шатров Н. Ф. Пожарная профилактика технологических процессов производств. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985.

Дополнительная.

Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. -М.: Изд. «Химия», 1975.

Мухленов И. П., Тамбовцева В. Д., Горштейн А. Е. Основы химической технологии. 2-е изд., перераб. и доп. -М.: Изд-во «Высшая школа», 1975.

Справочник нефтехимика: В 2-х т./ Под ред. канд. хим. наук *С.К.* Огороднико-ва. -Л.: Изд-во «Химия», 1978.

Глава 8. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

8.1. ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ О ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ

В целях обнаружения потенциально опасных мест возникновения пожара и возможных путей его распространения на производстве выявляют оборудование, участки или места, где обращаются (обрабатываются, перерабатываются или складируются) горючие или окисляющие вещества и материалы, а также возможно образование взрывоопасных газо-, паро- или пылевоздушных смесей. Документальной основой для этого служат проектные (расчетно-пояснительная записка к технологической части проекта) или производственные (технологический регламент производства) материалы, в которых представлены технологические схемы, материальные балансы, основные характеристики технологического оборудования и параметры его работы и многие другие данные. Помимо этого в проектной и производственной документации имеются генеральный план предприятия, планы и

разрезы зданий и сооружений, общие виды и разрезы технологического оборудования и паспорта на них и прочие материалы.

Указанные документы, являющиеся основными источниками информации о технологии производств и размещении оборудования, должен изучить пожарный специалист в такой степени, чтобы иметь возможность произвести анализ взрывопожарной опасности технологических процессов и предложить необходимые меры обеспечения требуемого уровня безопасности.

8.1.1. Технологическая часть проекта

Технологическая часть входит в состав проекта любого промышленного или сельскохозяйственного производства. Например, в состав рабочего проекта нефтеперерабатывающей установки входят: технологическая, механическая, энергетическая и строительные части, разделы по контролю технологических параметров и автоматике, водоснабжению и канализации, а также сметы. Следует иметь в виду, что содержание рабочих проектных материалов отличается от того, что будет в действительности на производстве, так как в ходе строительства объекта его проект подвергается изменениям, часто существенным. Изменения вносятся и в процессе эксплуатации, а также при реконструкции производства.

Технологическая часть проекта состоит из пояснительной записки и чертежей. Расчетно-пояснительная записка обычно содержит: описание технологической схемы производства; характеристику и обоснование технических решений и технологических процессов; обоснование выбора основного производственного оборудования и принятые варианты его размещения; перечень производственных процессов, для которых проектируется автоматизация; обоснование принятых в проекте решений по автоматическому контролю, регулированию и системам блокировок процессов; обоснование и характеристику принимаемых источников и потребителей электрической и тепловой энергий; технологические расчеты; перечни стандартного и нестандартного оборудования.

Рассмотрим в качестве примера пояснительную записку нефтеперерабатывающей установки ЭЛОУ-АВТ-6. Она состоит из следующих разделов: обоснование для проектирования; основные положения, принятые в проекте; исследовательские данные; выбор технологической схемы; технологическая схема; генплан установки; материальный баланс; расчет аппаратуры (материальные, тепловые балансы с экспликацией оборудования и предохранительных клапанов); расходные показатели (расход воды, электроэнергии, водяного пара, топлива, реагентов и т.д. на 1 тонну перерабатываемой нефти); штаты установки; мероприятия по охране труда и технике безопасности; условия привязки установки к общезаводскому хозяйству.

Содержание пояснительной записки, как и состав проекта в целом, зависит от отрасли производства и вида процесса, а также от стадии (этапа) разработки проектных материалов.

8.1.2. Технологический (производственный) регламент

Технологический регламент - основной производственный документ,

определяющий последовательность проведения операций технологического процесса и их параметры. Соблюдение требований технологического регламента является обязательным, так как обеспечивает выпуск качественной продукции в заданном количестве, рациональное ведение производственного процесса, сохранность оборудования и безопасные условия труда.

Технологические регламенты разрабатывают разовыми (на опытных производствах), временными (на новых мало освоенных производствах, а также на производствах, в технологию которых внесены принципиальные изменения) и постоянными. Технологический регламент может состоять из одной книги (части) или из нескольких книг, что характерно для сложных производственных процессов.

В качестве примера приведем содержание временного технологического регламента производства аммиака. Он состоит из 5 книг: 1. Агрегат производства аммиака. Технологическая часть; 2. Агрегат производства аммиака. КИП и автоматика; 3. Пусковая котельная; **4.** Установка приготовления питательной воды; 5. Склад жидкого аммиака.

Технологическая часть регламента состоит из следующих основных разделов: общая характеристика производства; характеристика готовой продукции; характеристика исходного сырья и материалов; описание технологического процесса и схемы производства; нормы технологического режима; возможные неполадки технологического процесса и действия по их устранению; нормы расхода сырья и энергетики на **1** тонну аммиака; основные правила безопасного ведения процесса (основные виды опасностей на производстве и предусмотренные проектом меры профилактики, перечень мероприятий по технике безопасности, перечень предусмотренных проектом блокировок, правила подготовки проведения ремонтов оборудования и коммуникаций и сдачи их в эксплуатацию после ремонта, первоначальный пуск производства, остановка производства (плановая, аварийная), пуск и остановка объектов в зимнее время, положение регулирующих клапанов при отсутствии воздуха питания КИП и электроэнергии, классификация помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, классификация зон по ПУЭ, классификация зон по санитарным нормам); отходы производства, сточные воды и выбросы в атмосферу; перечень обязательных инструкций; технологическая схема; спецификация основного технологического оборудования; схемы материальных и технологических потоков; список чертежей технологического регламента.

Сравнение технологического регламента с технологической частью проекта показывает их определенное сходство, но они имеют и существенные различия, так как они предназначены для различных целей. В то же время и технологический регламент и технологическая часть проекта содержат исчерпывающую информацию, необходимую для изучения технологии данного производства, и достаточные сведения для анализа его взрывопожарной опасности и разработки мер пожарной профилактики.

8.2. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

На первом этапе создания или коренной реконструкции любого производства

разрабатывают технологическую схему процесса в виде определенной последовательности проведения отдельных операций или стадий. В техническом проекте, подготовленном для строительства производственной установки, линии или агрегата, в составе рабочих чертежей (как было показано выше) имеется монтажно-технологическая схема процесса, или просто технологическая схема процесса, а в расчетно-пояснителыюй записке к технологической части проекта приводится ее описание.

Одновременно с получением технического задания на разработку проекта производства отраслевой научно-исследовательский институт приступает к разработке технологического регламента производства, в составе которого также имеется технологическая схема процесса и ее подробное описание. Обе схемы, имея определенные различия, абсолютно идентичны в отражении вопросов технологии. На начальном этапе эксплуатации производства (в период его освоения) в технологический регламент и в его технологическую схему часто вносятся определенные дополнения и изменения, согласованные с головными научно-исследовательской и проектно-конструкторской организациями и направленные на совершенствование производства или его расширение. Изменения вносятся и в связи с изменениями свойств сырья, требований, предъявляемых к готовой продукции, конструкции технологического оборудования и с другими подобными обстоятельствами.

При изучении проектной или производственной технологической документации может встретиться термин «технологический блок». На этапе проектирования производственного процесса для снижения опасности при его эксплуатации, а также для обеспечения безопасного отключения оборудования при возникновении аварийной ситуации, взрыва или пожара производят секционирование установок (линий, агрегатов и пр.). Секционирование, т.е. рациональное разделение установки на отдельные технологические блоки, способствует всестороннему детальному анализу взрывоопасное™ входящих в их состав аппаратов, машин, агрегатов и протекающих в них процессов с использованием критерия взрывоопасное™ - общего энергетического потенциала взрывоопасное™. (Под общим энергетическим потенциалом взрывоопасное™ технологического объекта, стадии, блока понимают сумму энергий адиабатического расширения парогазовой фазы, полного сгорания имеющихся и образующихся из жидкости паров за счет внутренней и внешней (окружающей среды) энергии при аварийной разгерметизации технологической системы.)

Выбор и обоснование рациональных решений по секционированию технологических систем является весьма сложной инженерной задачей, удачное решение которой поззоляет значительно снизить потенциальную опасность объекта без крупных капитальных вложений.

Работник пожарной охраны должен понимать сущность технологии, так как это необходимо для выполнения анализа взрывопожарной опасности производственного процесса и разработки профилактических мероприятий и систем противопожарной защиты, в том числе и для расчетного определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. Естественно, что имеющиеся в производственном процессе и нашедшие отражение в монтажно-техноло-гической схеме нюансы технологии могут затруднить и осложнить изучение

технологического процесса. В связи с этим часто возникает необходимость в разработке принципиальной схемы процесса, где была бы изложена только основная, главная идея технологии, не скрытая чрезмерными подробностями, но учитывающая специфику данного производства.

В специальной и учебной литературе можно найти принципиальные схемы многих технологических процессов (производств аммиака, мочевины, лакокрасочных материалов, кислот, бумаги, водорода, переработки нефти и нефтепродуктов и пр. и пр.), которые, к сожалению, можно использовать только для первоначального ознакомления с производством, т.к. они не отражают специфику технологического процесса на конкретном предприятии.

Имея под руками расчетно-пояснительную записку к технологической части проекта или технологический регламент производства с технологическими схемами, нетрудно разработать принципиальную схему процесса для дальнейшего использования и при анализе пожарной опасности процесса, и при разработке пожарно-профилактических мероприятий, и при разработке карты пожарной опасности и защиты технологического процесса, и при разработке пожарно-технического паспорта производства, и при разработке оперативного плана пожаротушения.

Создавая принципиальную технологическую схему производственного процесса, руководствуются следующими положениями.

1. При наличии на производстве двух, трех и более идентичных технологических ниток (установок, агрегатов, потоков, систем и т.д.) на принципиальной схеме отображают только одну нитку (рис. 8.1).

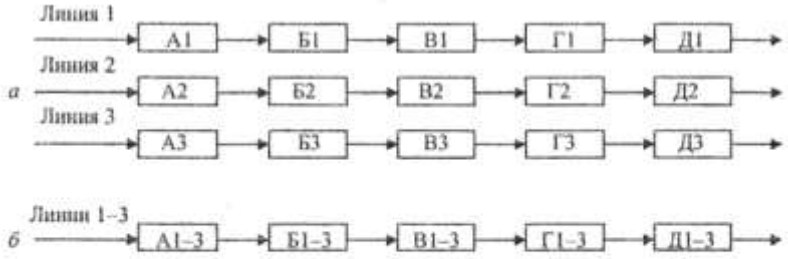


Рис. 8.1. Отображение технологических линий:
а – на производственной схеме и *б* – на принципиальной схеме;
$А_1$–$Д_1$ – номера позиций оборудования (или наименование производственных операций) на производственной схеме

2. При последовательном проведении нескольких однотипных операций на принципиальной схеме отображают только одну из них (рис. 8.2).

Рис. 8.2. Отображение операций окраски и сушки изделий:
а – на производственной схеме и *б* – на принципиальной схеме

3. При наличии в производственном процессе двух или более параллельно или последовательно работающих однотипных аппаратов на принципиальной схеме отображают один аппарат (рис. 8.3 и 8.4).

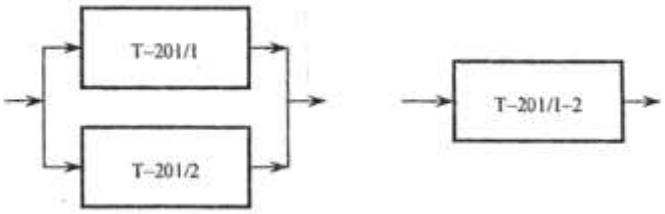


Рис. 8.3. Отображение параллельно работающих аппаратов: а - *на производственной схеме и* б - *на принципиальной схеме; Т-201/1 и Т-201/2 - секции теплообменника поз. 201*

4. При разработке принципиальной схемы из нее исключают резервное оборудование как параллельно работающее (см. рис. 8.3).

5. На принципиальной схеме не отображают контрольно-измерительные приборы и автоматизированные системы управления процессом (системы КИПиА).

6. При разработке принципиальной схемы из нее исключают, по возможности, арматуру (запорную, регулирующую и предохранительную), а также обвязку аппаратов дополнительными трубопроводами (обратными, спускными, обводными и другими линиями) (рис. 8.5).

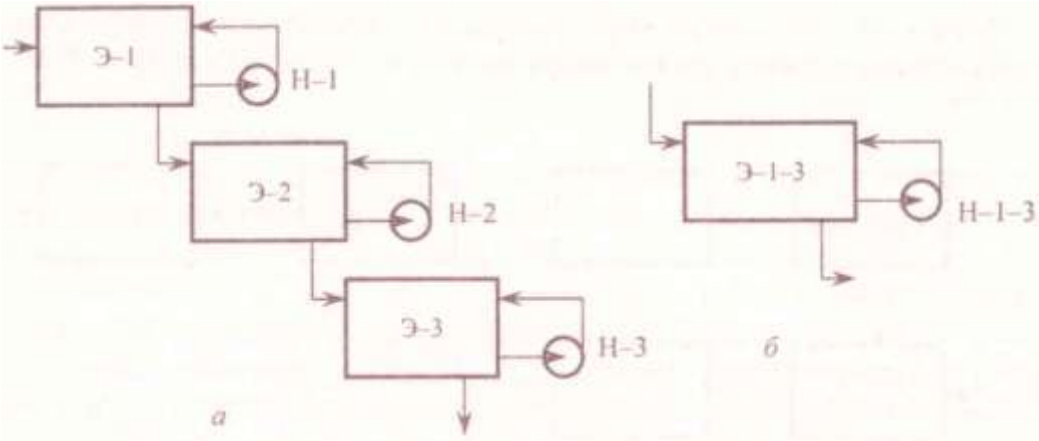


Рис. 8.4. Отображение каскада последовательно работающих аппаратов: *а* – на производственной схеме и *б* – на принципиальной схеме; Э – экстракторы; Н – насосы

Рис. 8.5. Отображение арматуры и обвязки насоса трубопроводами:
а – на производственной схеме и *б* – на принципиальной схеме;
– направление движения потока; – заглушка; – задвижка;
– обратный клапан; – диафрагма; ① – номер линии; – электропривод

В принципиальную схему не включают аппараты и блоки из производственной схемы, в которых отсутствуют горючие или окисляющие вещества и материалы (рис. 8.6).

На принципиальной схеме не отображают системы, устройства или иные объекты, направленные на обеспечение взрывопожарной безопасности производства в целом и технологического процесса в частности (системы флегматизации среды и аварийной эвакуации продуктов, взрывные мембранные устройства и предохранительные клапаны, устройства взры-воподавления и пожаротушения и другие).

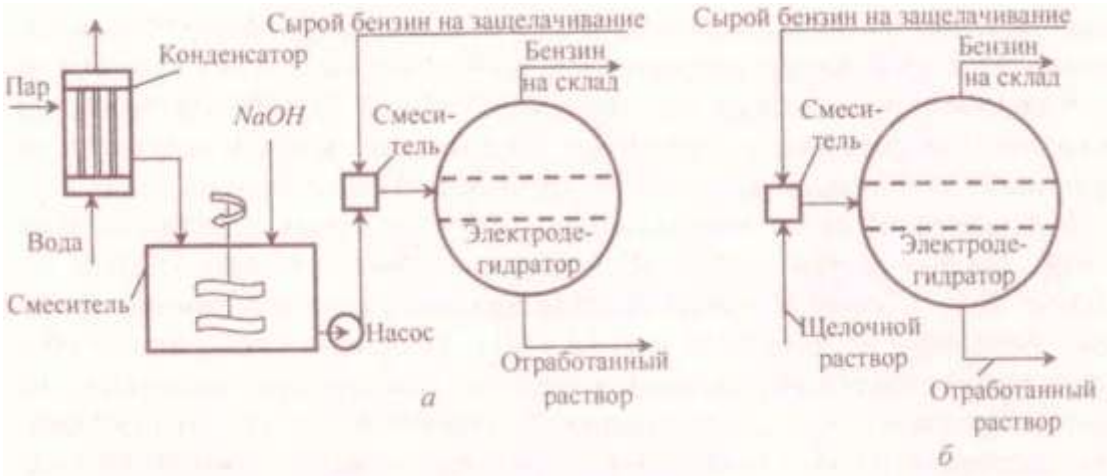


Рис. 8.6. Отображение аппаратов, в которых отсутствуют горючие или окисляющие вещества и материалы:
а – на производственной схеме и *б* – на принципиальной схеме

В то же время принципиальная технологическая схема не должна искажать существенные особенности производственного процесса: непрерывность или периодичность работы аппаратов и машин, отдельных операций и процесса в целом, способ обеспечения движения потоков (самотеком или под напором), тип аппаратуры (герметичное, «дышащее», открытое) и его размещение относительно друг друга и т.д. Желательно, чтобы отображение основного оборудования на схеме соответствовало

(хотя бы приближенно) контурам реально существующих аппаратов и машин на производстве или общепринятым стандартным обозначениям.

На принципиальной технологической схеме необходимо указать:

-основное технологическое оборудование;

-последовательность проведения технологических операций или. направление движения материальных потоков, а также наименование сырья, готовой продукции или полуфабрикатов с указанием мест их ввода и вывода;

-технологические параметры процессов (температуру, давление, концентрацию, расход (или объемную скорость), катализатор, напряжение, величину тока или другие показатели);

-основные характеристики аппаратов, машин или агрегатов (объем, высоту, диаметр, длину, частоту вращения рабочего органа или другие характеристики) и их действительное количество;

-места ввода в производственный процесс (или в оборудование) и вывода из него вспомогательных веществ и материалов, отходов производства и т.д. и их наименование.

Для того, чтобы принципиальную схему можно было использовать наравне с монтажно-технологической или производственной технологической схемами, принято сохранять на ней обозначения позиций аппаратов, машин, агрегатов, линий, потоков и т.п. такими же, какими они приняты на монтажно-технологической или производственной схемах. На примерах показано, как обеспечить сохранение обозначений позиций аппаратов на принципиальной схеме. Так, если на производственной (или на монтажно-технологической) схеме имеется несколько идентичных технологических линий, например, три линии, обозначенные соответственно «Линия 1», «Линия 2» и «Линия 3», то на принципиальной схеме изображенную линию обозначают «Линии 1-3» (см. рис. 8.1). Аналогично поступают с обозначениями параллельно и последовательно работающих аппаратов: на принципиальной схеме двухсекционный теплообменник (т.е. теплообменник, состоящий из двух независимых одинаковых частей - секций) обозначают Т-201/1-2 (см. рис. 8.3), а на упрощенной схеме каскада экстракторы с насосами первого, второго и третьего уровней (Э-1, Э-2, Э-3, Н-1, Н-2 и Н-3) обозначают соответственно Э-1-3 и Н-1-3 (см. рис. 8.4).

Одним из вариантов графического представления производственного процесса является его блок-схема, которая показывает последовательность проведения основных операций, этапов, стадий технологического процесса. Блок-схему сложного химико-технологического процесса разрабатывают на основании имеющейся в пояснительной записке или регламенте технологической схемы и ее описания. Для достаточно простого технологического процесса (например, механического или гидромеханического профиля) блок-схему можно составить непосредственно на самом производственном объекте, пройдя вместе со специалистом-технологом по всей технологической цепочке. Блок-схема обычно бывает полезна на первом этапе изучения технологии. Ее целесообразно разрабатывать для выявления основных производственных участков и типовых технологических процессов. Блок-схема проста и наглядна, но не дает полного представления о многих существенных и необходимых для выполнения анализа пожарной опасности технологического процесса

характеристиках.

На рис. 8.1 приведены варианты блок-схем одного и того же производственного процесса. Из рис. 8.1, а видно, что на четырех последовательно расположенных участках изделия окрашивают, сушат, еще раз окрашивают и снова сушат. На упрощенной блок-схеме (рис. 8.2, б) показана только одна операция окраски с последующей сушкой изделий. Поэтому к этой схеме необходимо дать пояснения о том, что окраска производится в два слоя с последующей послойной сушкой. В противном случае может создаться впечатление об окраске изделий только одним слоем.

Рассмотрим производственную технологическую схему предприятия нефтепродуктообеспечения, принципиальную схему и блок-схему того же объекта (рис. 8.7-8.9).

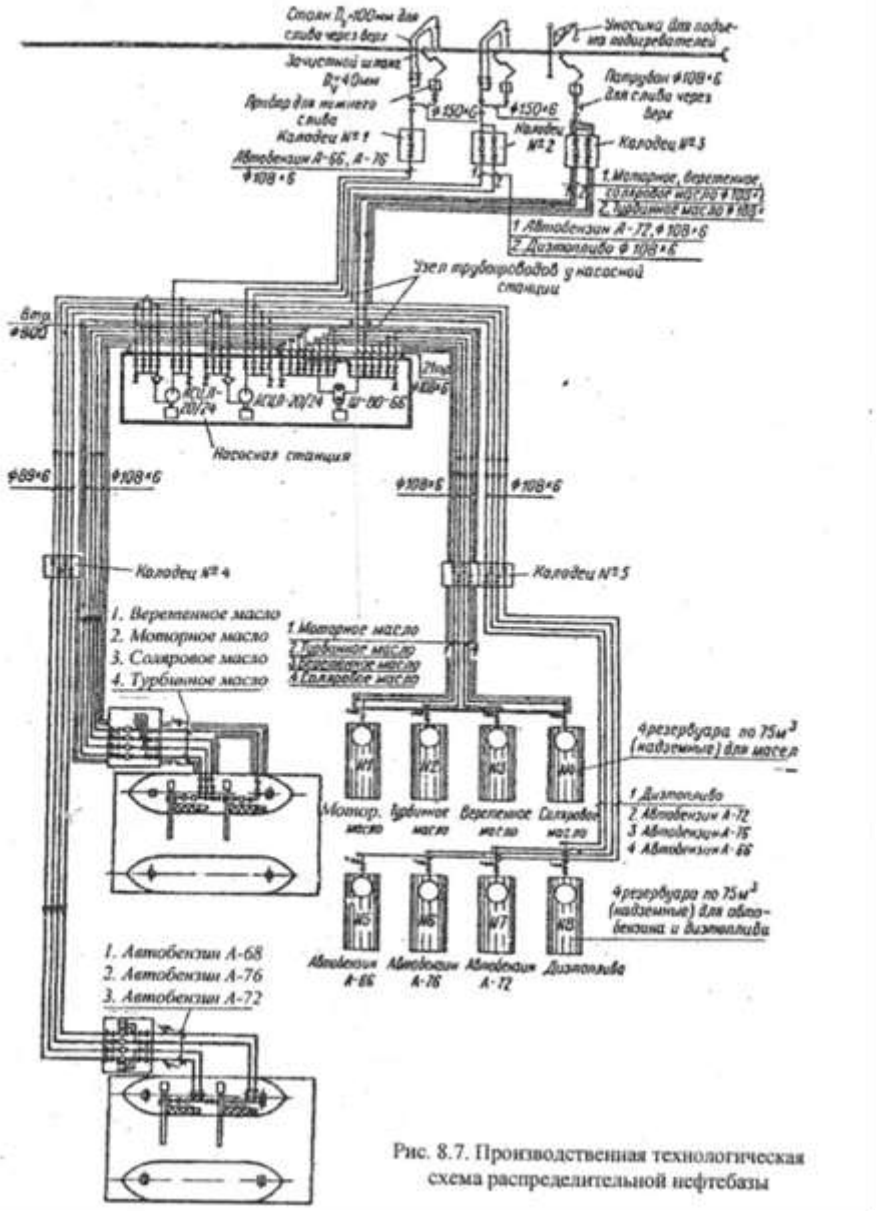


Рис. 8.7. Производственная технологическая схема распределительной нефтебазы

На производственной схеме распределительной нефтебазы (рис. 8.7) приведены все основные и вспомогательные аппараты, колодцы, узлы задвижек, отводы и другое оборудование, а также показана трассировка всех технологических трубопроводов. На схеме видно, откуда и куда направляются нефтепродукты, общее количество резервуаров, сливных и наливных стояков, насосов и даже показаны некоторые особенности конструктивного устройства оборудования и их размеры (смотровые люки на резервуарах, условные диаметры трубопроводов и т.д.). Чтение такой схемы затруднено из-за большого количества однотипных аппаратов и несущественных деталей, заслоняющих основную идею: назначение, устройство и принцип работы объекта.

На схеме (рис. 8.8) показаны все принципиально значимые и отличительные признаки технологического процесса нефтебазы: устройство систем слива-налива нефтепродуктов, тип резервуаров, особенности обвязки оборудования трубопроводами. Из этой схемы видно, что нефтепродукт поступает на нефтебазу по железной дороге, сливается из железнодорожных цистерн *2* с помощью приборов для нижнего *3* или верхнего *3* слива в коллектор *4,* откуда откачивается насосом *5* и направляется на наливную автомобильную эстакаду *9,* оборудованную прибором для верхнего налива автомобильных цистерн *8,* или на хранение в горизонтальный резервуар 7. Обвязка насоса 5 трубопроводами позволяет использовать его для выдачи нефтепродукта потребителю непосредственно из резервуара. (Вследствие того, что на производственной технологической схеме отсутствует нумерация всего технологического оборудования, на принципиальной схеме произведена его независимая нумерация.)

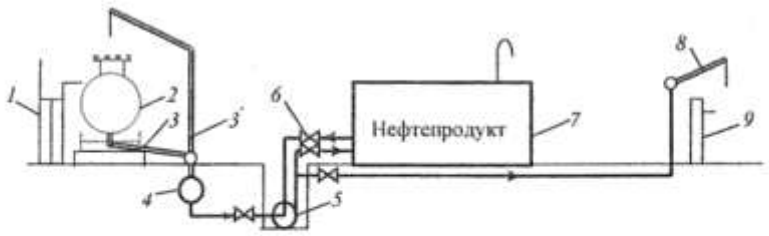


Рис. 8.8. Принципиальная схема нефтебазы:
1–железнодорожная сливная эстакада; *2*–ж/д цистерна; *3*, *3'*–приборы для нижнего и верхнего слива нефтепродуктов; *4*–коллектор; *5*–насос; *6*–задвижки; *7*–горизонтальный резервуар; *8*–стояк для верхнего налива нефтепродуктов; *9*–автомобильная наливная эстакада

Блок-схема рассматриваемой нефтебазы приведена на рис. 8.9. Такая схема дает только общее представление о технологии производственного процесса на нефтебазе. В то же время из нее отчетливо видно, что технологический процесс данной нефтебазы включает в себя четыре основные стадии, каждая из которых реализуется в самостоятельном технологическом оборудовании на отдельных производственных участках.

Рис. 8.9. Блок-схема нефтебазы

В связи с тем, что на принципиальной схеме процесса (рис. 8.8), и тем более на блок-схеме (рис. 8.9), невозможно в полном объеме отразить сведения, характеризующие технологические устройства и аппараты (типы, количество, габариты, режимы работы), а также сведения о видах, свойствах и количестве находящихся в аппаратах веществ и материалов, то этот информационный пробел восполняют, помещая на чертеже или в пояснительной записке сводные таблицы (экспликации, технические характеристики и т.п.) с необходимыми данными.

Ни одна из рассмотренных схем (ни производственная, ни принципиальная, ни блок-схема) не дает представления о размещении производств на предприятии и технологического оборудования, о планировке территории, о наличии соседних объектов и некоторых других данных, необходимых для анализа причин возникновения пожара и путей его развития. Поэтому необходим второй источник информации о производстве - его реальное размещение.

8.3. РАЗМЕЩЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В проектной или производственной документации содержатся сведения о месте нахождения предприятия (на генеральном плане города или другого населенного пункта, схеме районной планировки или схеме генплана промышленного узла), о расположении на территории предприятия зданий и сооружений (на генплане предприятия), о размещении в зданиях и сооружениях технологического оборудован™ (на планах и разрезах зданий и сооружений). Эти документы используются при экспертизе проектных материалов, анализе причин возникновения пожара и условий, способствующих его развитию, а также при оценке возможного ущерба от пожара или взрыва на производстве, так как дают точные сведения о количестве, расположении и габаритах основного технологического оборудования, о трассировке, устройстве и характеристиках транспортных и производственных коммуникаций, о виде, количестве и местах промежуточного и базисного хранения материалов, содержат сведения о размещении и численности персонала на предприятии и окружающих промышленных объектах и организациях, о размещении населения на прилегающей к объекту территории, о наличии и вместимости мест массового пребывания людей.

Генплан предприятия предусматривает функциональное зонирование территории с учетом технологических связей, противопожарных и других требований. По функциональному использованию площадка предприятия разделяется на предзаводскую, производственную, складскую и подсобную зоны. Технологическое

оборудование основных производственных процессов сосредоточено в производственной и складской зонах. Строительные нормы и правила, отраслевые нормы проектирования промышленных предприятий определяют минимальные расстояния от зданий и сооружений производств с пожаровзрывоопасными технологическими процессами до зданий и сооружений соседних предприятий, жилых и общественных зданий, населенных пунктов и других объектов (лесных массивов, железных и автомобильных дорог общей сети, воздушных линий электропередач и т.д.), а также взаимное расположение зданий и сооружений на предприятии и его отдельных производствах. Нормы определяют минимальные расстояния между отдельными видами технологического оборудования, например, между резервуарами, располагаемыми в одной группе; между оборудованием с пожаровзрывоопасными веществами и аппаратами огневого действия, входящими в состав одной производственной установки; между оборудованием, размещаемым в производственных помещениях, и т.д.

Технологическое оборудование на открытых площадках (наружных установках) и в производственных зданиях размещают таким образом, чтобы при минимальной площади производственных установок и протяженности транспортных коммуникаций обеспечивалось удобство и безопасность его эксплуатации, возможность проведения ремонтных работ и принятия оперативных мер по предотвращению аварийных ситуаций и локализации аварий. Оборудование взрывоопасных технологических процессов располагают преимущественно на открытых площадках.

На рис. 8.10 в качестве примера размещения оборудования представлен общий вид нефтеперерабатывающей установки ЭЛОУ-АВТ-6.

Площадь установки достигает 2 га (193х102 м^2). Установка разбита на блоки: теплообменников, ректификационной аппаратуры, холодильников, огневых нагревателей, защелачивания и промывки, концевых холодильников, электродегидраторов. Расположение блоков принято с учетом поточности и современных методов ремонта аппаратуры. Разрывы между блоками выполнены с учетом противопожарных требований, а также с учетом возможности проведения монтажа и демонтажа оборудования при помощи передвижного крана. Все оборудование (кроме щелочных и водяных насосов) расположено на открытых площадках. Нефтяные насосы, насосы для откачки нефтепродуктов размещены под железобетонными постаментами, на которых смонтированы теплообменники, конденсаторы-холодильники, сборники орошения. Три трубчатые печи установки с воздухоподогревателями, дымососами и дымовой трубой смонтированы в одном блоке огневых нагревателей. Линия форсунок печей и иных огневых точек обращена в противоположную сторону от пожаро- и взрывоопасного оборудования установки. При несомненных достоинствах блочная компоновка оборудования имеет один существенный недостаток: большую протяженность и разветвленность трубопроводной системы.

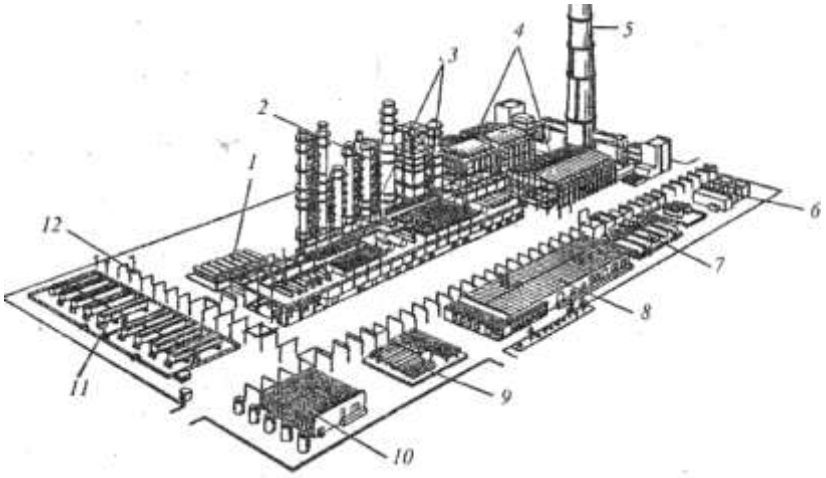


Рис. 8.10. Общий вид установки:
1–блок теплообменников; *2*–блок ректификационной аппаратуры; *3*–блок холодильни ков; *4*–блок огневых нагревателей; *5*–дымовая труба; *6*–венткамеры и анализаторная *7*–блок защелачивания и промывки; *8*–здание операторной и электроподстанции *9*–блок концевых холодильников; *10*–водяная насосная; *11*–блок электродегидраторов; *12*–опоры трубопроводных эстакад

Размещение аппаратуры малотоннажных производств или производств с ограниченным количеством единиц оборудования на открытых площадках производят по линейной схеме (аппараты размещают последовательно друг за другом так, как они располагаются на технологической схеме), что позволяет значительно сократить длину трубопроводов и обеспечивает удобство эксплуатации. Исключение составляют аппараты огневого действия, которые, как и при блочной компоновке, располагают отдельно от оборудования неогневого действия с соблюдением противопожарных разрывов.

При размещении технологического оборудования в зданиях:

-обеспечивают поточность производства и удобство эксплуатации оборудования;

-сокращают до минимума длину трубопроводов и других транспортных коммуникаций при требуемом уровне безопасности;

-стараются не располагать в одном помещении разное по уровню пожарной и взрывопожарной опасности оборудование в целях удешевления строительства;

-выносят наиболее опасное оборудование за пределы помещений;

-производства с применением открытого огня размещают в отдельных помещениях.

На рис. 8.11 приведена схема генплана распределительной нефтебазы, которая с учетом технологических требований (т.е. наиболее удобного и бесперебойного проведения всех операций), а также требований противопожарных и санитарных норм пунктирными линиями условно разделена на четыре производственных участка (зоны): *I* - участок железнодорожного приема нефтепродуктов, *II*- участок перекачки (насосная), *III*- участок резервуарного хранения нефтепродуктов и *IV*- участок отпуска нефтепродуктов в автоцистерны. Следует обратить внимание, что количество производственных участков на рис. 8.11 и их функциональное назначение соответствует количеству и содержанию стадий технологического процесса, приведенных на блок-схеме (рис. 8.9).

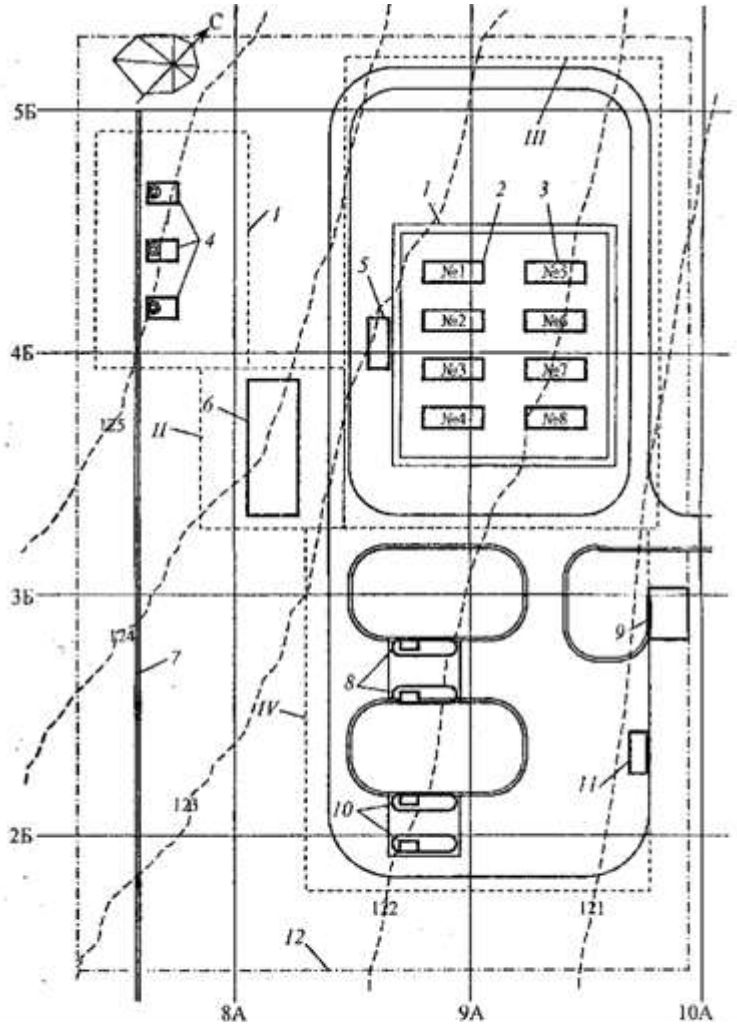


Рис. 8.11. Схема генплана предприятия нефтепродуктообеспечения: 1-обвалование резервуарного парка; 2-резервуары темных нефтепродуктов (№1-№4); 3-резервуары светлых нефтепродуктов (№5-№8); 4-сливные приборы; 5-узел задвижек; 6-насосная станция; 7-железнодорожный путь; 8-автомобильная наливная эстакада темных нефтепродуктов; 9-контора; 10-автомобильная наливная эстакада светлых нефтепродуктов; 11-операторная; 12-ограждение

На схеме генерального плана предприятия (установки, цеха или другого объекта) по результатам анализа взрывопожарной опасности производства или экспертизы произошедшей аварии показывают зоны, на границах которых выявленные опасные факторы пожара или взрыва имеют критические значения с целью оценки последствий и разработки профилактических мероприятий (рис. 8.12). При больших размерах выявленных зон (например, зон избыточного давления, развиваемого при сгорании газо- или паровоздушной смеси; зон, ограниченных нижним концентрационным пределом распространения пламени газа или пара; зон разлива пожароопасной жидкости и др.) для оценки воздействия опасных факторов на соседние объекты используют схемы генпланов города или промышленного узла, масштаб которых меньше масштаба генплана предприятия.

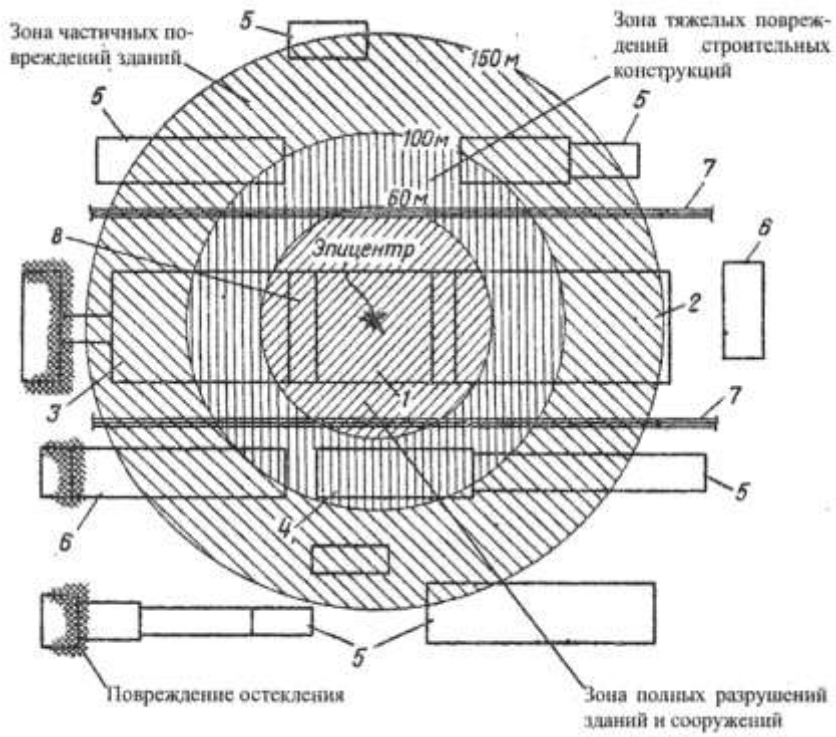


Рис. 8.12. Схема плана завода синтетического каучука с зонами разрушений при взрыве паров изопентана в помещении цеха дегазации (г. Тольятти, 1981 г.): 1-отделение дегазации; 2-отделение полимеризации; 3-отделение выделения; 4-наружная установка; 5-промкорпуса; 6-склады; 7-трубоироводные эстакады; 8-операторная

Схемы генпланов предприятий с нанесенными на них зонами возможного проявления опасных факторов аварий, взрывов и пожаров используют при разработке деклараций промышленной безопасности объектов, планов локализации аварийных ситуаций, пожаротушения и карт пожарной опасности и защиты технологических процессов.

8.4. ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЛОЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПО ТИПОВЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ

Типовые технологические процессы входят в состав различных производств. Наиболее распространенными процессами из рассмотренных ранее в данном разделе являются: транспортировка и хранение, нагрев и охлаждение, сушка, химические процессы, а также процессы механической обработки, окраски и др. Ввиду принципиальной общности типовых технологических процессов (независимо от их принадлежности к конкретному производству той или иной отрасли промышленности) применительно к каждому из них можно заранее разработать частные методики анализа взрывопожарной опасности и основные меры пожарной профилактики. Разделение производственных процессов на типовые позволяет в кратчайший срок произвести анализ пожарной опасности всех технологических объектов предприятия и создать модель обеспечения его пожарной безопасности, учитывающую различие свойств находящихся в аппаратах веществ и материалов, технологические параметры процессов, особенности конструктивного исполнения оборудования и другие факторы.

Рассмотрим это на примере предприятия со сложной технологией -

нефтеперерабатывающего завода. На рис. 8.13 приведена схема потоков нефтеперерабатывающего завода, работающего по топливно-масляной схеме переработки нефти. Назначение завода - получение из нефти различных видов моторных и котельных топлив, масел, сжиженных углеводородных газов, кокса, парафина, серы и других продуктов. Для реализации указанных на схеме процессов на нефтеперерабатывающем заводе имеется целый ряд производств (установок, цехов) и складов: сырьевой резервуар-ный парк и склады готовой продукции (твердой, жидкой, сжиженной и газообразной), установки электрообессоливания (ЭЛОУ), атмосферной перегонки нефти (АТ) и вакуумной перегонки мазута (ВТ), термического и каталитического крекинга и риформинга, гидроочистки дизельного топлива и керосина, газофракционирования и стабилизации бензина, получения масел и элементарной серы, коксования и получения битума и другие. Каждая установка состоит из набора аппаратов и машин различного назначения.

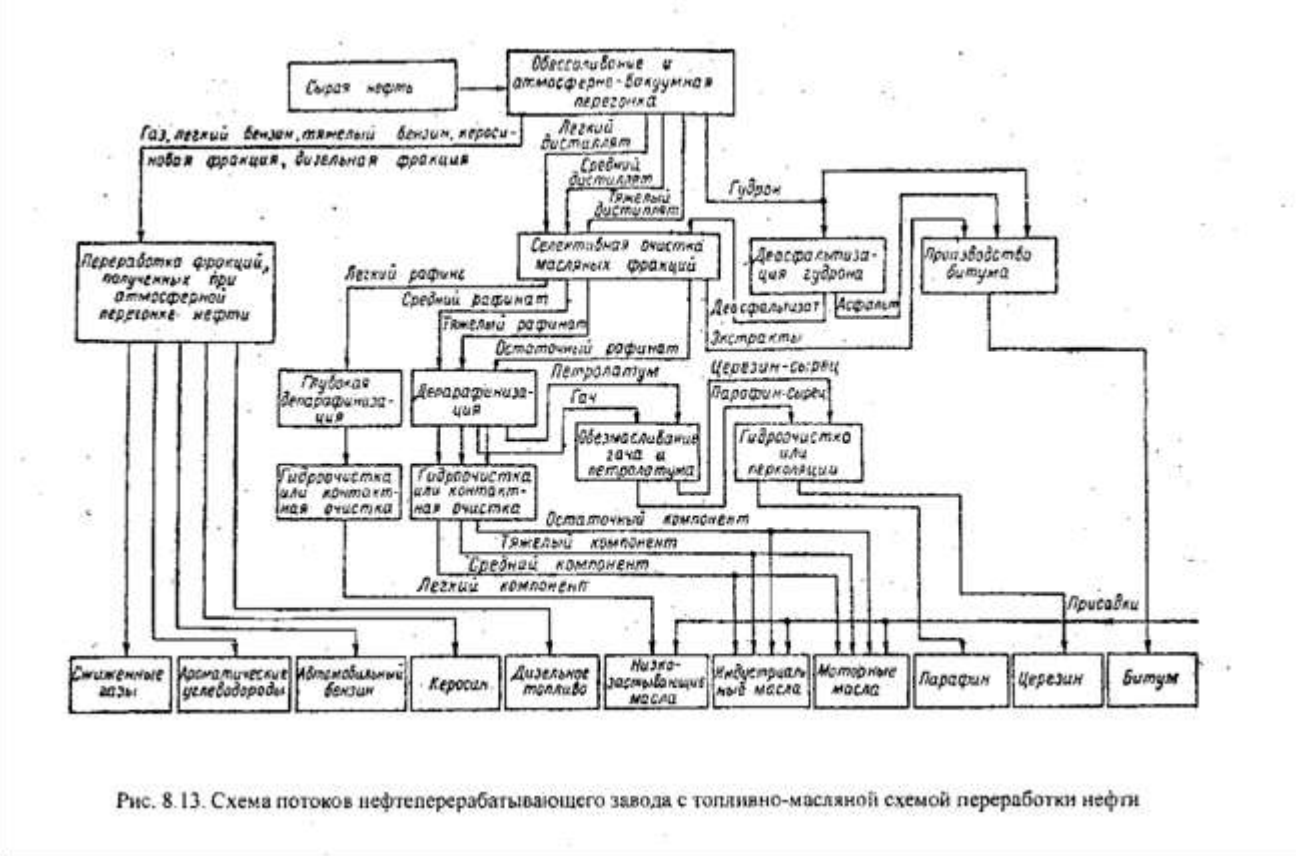


Рис. 8.13. Схема потоков нефтеперерабатывающего завода с топливно-масляной схемой переработки нефти

Например, на установке вторичной перегонки бензина (рис. 8.14), предназначенной для разделения бензина прямой гонки на более узкие погоны, имеется несколько групп однотипных аппаратов, в которых реализуются типовые технологические процессы: центробежные насосы обеспе чивают транспортирование бензиновых фракций по трубопроводам к аппаратам; сборники орошения - их накопление и временное хранение; трубчатые печи - нагрев фракций до кипения; теплообменники - теплообмен между фракциями (нагрев-охлаждение); конденсаторы-холодильники - конденсацию пара и охлаждение образовавшейся жидкой фазы; ректификационные колонны - перегонку фракций; кипятильник обеспечивает кипение кубового остатка в колонне К-4 и генерацию пара.

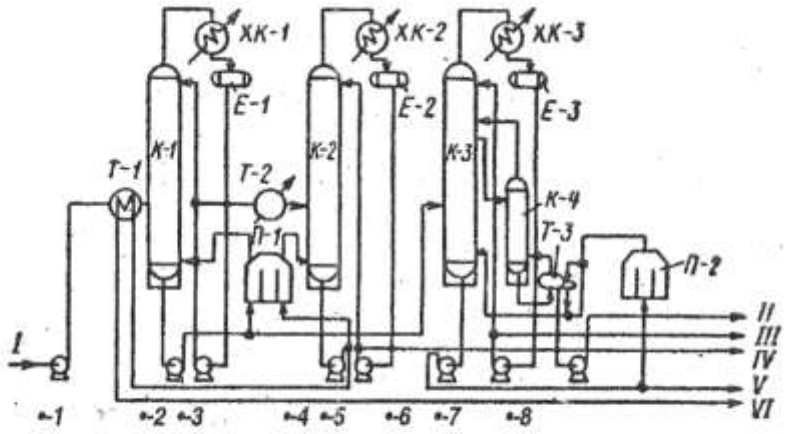


Рис. 8.14. Принципиальная схема установки вторичной перегонки бензина:
К-1–К-4–ректификационные колонны; П-1, П-2–трубчатые печи; Т-1, Т-2–теплообменники; Т-3–кипятильник; ХК-1–ХК-3–конденсаторы-холодильники; Е-1–Е-3–сборники орошения; Н-1–Н-8–насосы;
I–сырье; *II*–фракция 105–140 °С; *III*–фракция 85–105 °С; *IV*–фракция н.к.–62 °С; *V*–фракция 140–180 °С; *VI*–фракция 62–85 °С

Таким образом на данной установке осуществляются процессы транспортирования и хранения, нагрева, охлаждения, кипячения, конденсации и ректификации. Проанализировав другие производства данного нефтеперерабатывающего завода можно дополнительно выявить ряд механических процессов (транспортирования, измельчения, разделения и дозирования твердых материалов), химических процессов (риформинга, гидроочистки, крекинга, коксования, окисления и др.), массообменных процессов (сушки, абсорбции, адсорбции и др.), а также гидродинамических процессов (перемешивания, отстаивания и др.).

Перечень типовых технологических процессов металлургических, нефтехимических, коксохимических, химических и других производств со сложной технологией практически полностью совпадает с перечнем типовых технологических процессов рассмотренного производства. Производства машиностроительной, деревообрабатывающей, пищевой и других отраслей промышленности с более простой технологией состоят, в основном, из типовых гидромеханических, механических, тепловых и некоторых диффузионных процессов.

Облегчить задачу выявления типовых технологических процессов сложных производств помогает наличие в пояснительной записке к технологической части проекта раздела «Экспликация оборудования», а в технологическом регламенте производства - раздела «Спецификация основного технологического оборудования». При отсутствии этих сведений работник пожарной охраны должен (с помощью специалистов или самостоятельно) выполнить работу по разделению изучаемого производственного процесса на типовые технологические процессы, что значительно упростит и ускорит его последующую работу. Частные методики анализа пожарной опасности типовых технологических процессов и способы обеспечения их пожарной безопасности будут рассмотрены после изучения универсальной методики анализа пожарной опасности технологических процессов.

Контрольные вопросы

Для какой цели выявляют на производстве оборудование, участки или места, где обращаются (обрабатываются, перерабатываются или складируются) горючие или окисляющие вещества и материалы?

Какие документы служат основой для выявления пожаровзрывоопас-ных участков и оборудования на производстве?

Какие документы являются основными источниками информации о технологии производств?

Укажите примерный состав технологической части проекта.

Какие сведения содержит расчетно-пояснительная записка к технологической части проекта?

Что такое технологический регламент производства?

Какие бывают технологические регламенты и в чем их различие?

Какие сведения содержит технологическая часть регламента?

Какие различия и сходства имеются в технологических схемах проекта и регламента одного и того же производственного процесса?

Каким образом допускается внесение изменений и дополнений в технологическую схему?

Что понимают под термином «технологический блок» установки?

Для какой цели производят секционирование установок, линий, агрегатов?

Что такое принципиальная схема процесс? и чем она отличается от монтажно-технологической схемы?

Для какой цели разрабатывают принципиальную схему процесса?

Поясните методику разработки принципиальной схемы процесса на основе монтажно-технологической схемы.

Какие сведения обязательно необходимо указать на принципиальной технологической схеме?

Что должно найти отражение на принципиальной схеме, чтобы ее можно было использовать наравне с монтажно-технологической или производственной технологической схемами?

Что такое блок-схема производственного процесса?

В каких документах содержатся сведения о реальном размещении производства и технологического оборудования?

Укажите общие требования к размещению технологического оборудования пожаровзрывоопасных производств.

Какие достоинства и недостатки имеет блочное размещение оборудования на открытых технологических установках?

Какие общие требования соблюдают при размещении оборудования пожаровзрывоопасных производств в помещениях?

Какие сведения должны найти отражение на разрабатываемой схеме генплана предприятия?

Для какой цели производят разделение производственных процессов на типовые технологические процессы?

Выявите типовые технологические процессы в производстве синтеза аммиака под

средним давлением (см. рис. 2.8).

Литература

Основная.

Рабочая программа курса пожарная профилактика технологических процессов (5 лет обучения). -М.: ВИПТШ МВД России, 1995.

Алексеев М. В., Волков О. М., Шатров Н. Ф. Пожарная профилактика технологических процессов производств. -М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985.

Дополнительная.

Справочник нефтехимика. В 2-х т./ Под ред. канд. хим. наук С.К. Огородиикова **. - Л.:** Изд-во «Химия», 1978.

Шишкин Г. В. Справочник по проектированию нефтебаз. -Л.: Изд-во «Недра», 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

Цель, задачи, предмет курса «Пожарная безопасносгь технологических процессов», его роль и место в системе подготовки инженеров пожарной безопасности в Академии ГПС МВД России 3

Краткий очерк развития знаний о технологии производств и пожарной безопасности технологических процессов 4

Взаимосвязь и взаимообусловленность проблем технологии, пожарной безопасности и охраны окружающей среды 6

Статистика пожаров - источник информации для анализа причин возникновения и методов предотвращения пожаров на промышленных предприятиях 9

Нормативные документы по пожарной безопасности технологических процессов 13

Контрольные вопросы 14

Литература 16

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ С ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫМИ СРЕДАМИ 17

1.1. Ктассификацня технологического оборудования 17

1.2. Материалы, применяемые для изготовления технологического оборудования с пожаровзрывоопасными средами 18

Стали конструкционные обыкновенного качества 20

Стали конструкционные качественные 20

Стали конструкционные низколегированные 20

Стали конструкционные легированные 21

Стали конструкционные высоколегированные 21

Конструкционные чугуны и цветные металлы 22

Поведение конструкционных материалов при повышенных и пониженных температурах и давлениях 23
Поведение конструкционных материалов в агрессивных пожаровзрывоопасных средах 28

Химическая коррозия и ее разновидности 3 1
Электрохимическая коррозия и ее разновидности 32
Влияние технологических параметров на скорость коррозии 36

Основные требования к конструкции аппаратов и машин 40
Элементы проверочных расчетов технологического оборудования на прочность 41
1.7. Испытания оборудования на прочность и герметичность 46
Контрольные вопросы 47
Литература 49
Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИИ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ 50
Технологические термины и определения 50
Основные виды технологических расчетов 54
Физико-химические закономерности в технологии 57
Технологическая схема процесса и ее описание 60

2.5. Технологические параметры и их влияние на взрывопожарную опасность процессов.... ■. 62
Контрольные вопросы 67
Литература 68
Глава 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ 70
3.1. Классификация технологических процессов пожаровзрывоопасных производств 70
3.2. Машины для проведения механических процессов 7 1
Машины для измельчения твердых материалов 7 1
Машины для разделения твердых материалов 77
Механические питатели 79
Контрольные вопросы 80
Литература 8 1
Глава 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ 82
Аппараты для перемешивания жидкостей и твердых материалов 82
Аппараты для проведения процессов отстаивания жидкостей и газов 84
Аппараты для проведения процессов фильтрования жидкостей и газов 91

Оборудование для перемещения и хранения горючих веществ и материалов 95
Оборудование для перемещения и хранения газов 96
Оборудование для перемещения и хранения жидкостей 102
Оборудование для перемещения и хранения твердых материалов 106
4.5. Трубопроводы, арматура, компенсаторы 109
Технологические трубопроводы 109
Трубопроводная арматура 1 1 3
Температурные компенсаторы 129
Контрольные вопросы 132
Литература 135
Глава 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ 137
Способы нагревания и охлаждения горючих веществ и материалов 137
Сущность процессов нагревания и охлаждения 138
Тепловой баланс теплообменного аппарата 138
Передача тепла в теплообмеином аппарате 139
Температурный напор 146
Характеристика тепло- и хладоносителей 148
Классификация систем для нагревания и охлаждения горючих веществ и материалов и теплообменного оборудования 153
5.5. Оборудование для нагревания горячей водой, водяным паром, высокотемпературными теплоносителями и горячими продуктами производства 156
Оборудование для охлаждения водой и атмосферным воздухом 161
Оборудование для нагревания горючих веществ пламенем и топочными газами 163
5.8. Нагревание горючих веществ электроэнергией 169
Контрольные вопросы 172
Литература 174
Глава 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ 175
6.1. Общие сведения о диффузионных процессах 175
Виды массообменных процессов 175
Способы выражения состава фаз двухкомпонентных систем 178
Материальный баланс процессов массообмена 179
Уравнение массопередачи 181
6.2. Аппараты для проведения сорбционных процессов 182
Виды сорбционных процессов 182
Аппараты для проведения процессов адсорбции 183
Аппараты для проведения процессов абсорбции 193

6.3. Аппараты для проведения процессов перегонки и ректификации смесей жидкостей 202
Сущность процессов перегонки и ректификации 202
Простая перегонка растворов 206
Перегонка с дефлегмацией пара 208
Простая ректификация 209
Основные типы ректификационных колонн 213
Тарелки ректификационных колонн 221
6.4. Аппараты для поведения процессов сушки 223
6.4Л. Виды влаги в материале и способы ее удаления 223
Понятие о влажности материала и влагосодержании 224
Тепловая сушка горючих веществ и материалов 226
Кинетика процесса сушки 227
6.4.5.0сновные типы сушилок 231
Контрольные вопросы 244
Литература 248
Глава 7. АППАРАТЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ■ 249
7.1. Классификация химических реакторов 249
7.2. Технологические печи для проведения высокотемпературных химических процессов 253
7.3. Основные типы химических реакторов 255
Реакторы для проведения процессов в гомогенной газовой среде 256
Реакторы для проведения процессов в гомогенной жидкой среде 258
Реакторы для проведения процессов в гетерогенной системе
газ-твердый катализатор 259
7.3.4. Реакторы для проведения процессов в системе газ-жидкость 263
7.3.5. Реакторы для проведения процессов в системе жидкость-твердый катализатор: 264
7.3.6. Реакторы для проведения процессов в системе жидкость-жидкость.. 265
7.3.7. Реакторы для проведения процессов в системе газ-жидкость-твердый
катализатор265
Контрольные вопросы , 266

Литература 267
Глава 8. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ 268
8.1. Источники информации о производственном процессе 268
Технологическая часть проекта 268
Технологический (производственный) регламент 269

Разработка принципиальной схемы технологического процесса 270

Размещение технологического оборудования 279
Изучение технологии сложного производства по типовым технологическим процессам 285
Контрольные вопросы 288
Литература 289