

Учреждение образования  
«Белорусский государственный технологический университет»

Кафедра машин и аппаратов химических и силикатных производств

**КУРС ЛЕКЦИЙ**

по дисциплине

«

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ  
В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»**

для студентов очной формы обучения специальности 1 – 43 01 06  
“Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент”,  
специализации 1 – 43 01 06 02 “Энергоэффективные технологии  
в химическом комплексе”

Минск 2012

## 1. Классификация и требования к химическому оборудованию

Химическое оборудование работает в широко диапазоне технологических параметров: размеров, температур (от  $-200$  до  $+1000^{\circ}\text{C}$ ), давлений (до  $600$  МПа), скоростей движения среды или узлов и деталей оборудования, агрессивностей среды. Для таких условий требуются аппараты надежной конструкции, изготовленные из разнообразных конструкционных материалов, включая легированные, кислотостойкие и жаростойкие стали, керамику, пластмассы и др. для получения качественной продукции с минимальными затратами. Требуется также автоматизация работы химического оборудования и дистанционное управление им (особенно во вредных, пожаро- и взрывоопасных производствах).

Процессы и аппараты, общие для различных отраслей химической промышленности, получили название основных процессов и аппаратов. Классификация основных процессов и оборудования химической технологии может быть проведена на основании различных признаков. В зависимости от основных законов, определяющих скорость протекания процессов, различают следующие группы оборудования.

1. Гидромеханическое оборудование, скорость протекания процессов в которых определяется законами гидродинамики. К этому оборудованию относятся насосы для перемещения жидкостей, вентиляторы, газодувки, компрессоры для сжатия и перемещения газов, отстойники, сепараторы, центрифуги, фильтры для разделения неоднородных жидких систем, циклоны, фильтры для разделения неоднородных газовых систем, аппараты с мешалками для перемешивания жидкостей.

2. Теплообменное оборудование, в котором процессы протекают со скоростью, определяемой законами теплопередачи. При этом скорость тепловых процессов зависит от гидродинамических условий (скоростей, режимов течения), при которых осуществляется перенос тепла между средами. Оборудование этой группы включает теплообменники для охлаждения и нагрева, испарители и конденсаторы. Вследствие многих специфических особенностей отдельную группу выделено холодильное оборудование, в котором тепловые процессы протекают при температурах более низких, чем температура окружающей среды (умеренное и глубокое охлаждение)

3. Массообменное оборудование, в котором осуществляется перенос одного или нескольких компонентов из одной фазы в другую через поверхность раздела фаз. Протекание процессов массообмена тесно связано с гидродинамическими условиями в фазах и на границе их раздела и часто – с сопутствующими массообмену процессами переноса тепла (теплообмена). К этой группе аппаратов относятся абсорберы, адсорберы, ректификационные аппараты, аппараты для растворения и экстракции из твердых тел и жидкости (экстракторы), кристаллизаторы и сушилки.

4. Реакторы. В них процессы протекают со скоростью, определяемой законами химической кинетики. Химическим реакциям обычно сопутствуют перенос массы и энергии; скорость химических процессов зависит также от гидродинамических условий. Вследствие этого скорость реакций подчиняет-

ся законам макрокинетики и определяется наиболее медленным из последовательно протекающих химического взаимодействия и диффузии.

5. Механическое оборудование характеризуется процессами, описываемыми законами механики твердых тел. Это оборудование применяется для подготовки исходных твердых материалов и обработки конечных твердых продуктов, а также для транспортирования кусковых и сыпучих материалов. К механическому оборудованию относятся дробилки, мельницы, транспортеры, смесители, сортировальное оборудование.

Особую группу механического оборудования составляет оборудование для переработки химических продуктов в изделия – прессы, литьевые машины, экструдеры и др.

По способу организации основных процессов химическое оборудование делится на периодически и непрерывно действующее.

В периодически действующем аппарате через определенные промежутки времени загружаются исходные материалы, обрабатываются в нем и затем выгружаются конечные продукты. После окончания разгрузки аппарата и его повторной загрузки цикл работы повторяется вновь. Все стадии технологического процесса протекают в одном аппарате, но в разное время. Все частицы среды находятся в аппарате одинаковое время.

В непрерывно действующем аппарате поступление исходных материалов и выгрузка конечных продуктов производится непрерывно. Процессы в таком аппарате протекают одновременно, но разобщены в пространстве, т. е. осуществляются в разных частях одного аппарата или в различных аппаратах, входящих в одну установку. Время пребывания частиц в аппарате может значительно отличаться.

В непрерывно работающих аппаратах нет перерыва в выпуске конечных продуктов, отсутствуют затраты времени на загрузку и выгрузку материалов. По сравнению с периодически действующими аппаратами в них легче обеспечить автоматическое управление и регулирование, а также возможность более полной механизации. Режим проведения процессов более устойчив, качество получаемых продуктов более стабильное. Они более компактны, что снижает капитальные затраты и эксплуатационные расходы (монтаж, обслуживание, ремонт и др.). Более полно используется подводимая энергия и имеется возможность использования отводимой теплоты при отсутствии перерывов в работе аппарата, что также снижает потребление энергии.

Благодаря указанным преимуществам непрерывно действующего оборудования увеличивается его производительность, уменьшается потребность в обслуживающем персонале, улучшаются условия труда и повышается качество продукции. Вследствие этого в многотоннажных химических производствах стремятся использовать аппараты непрерывного действия. Периодически действующее оборудование сохраняет свое значение главным образом относительно небольшого масштаба с разнообразным ассортиментом продукции, где использование аппаратов такого типа позволяет достичь большой гибкости при меньших затратах.

По распределению времени пребывания частиц в аппарате и связанных с ним изменений во времени других факторов (температура, концентрация и т. п.), влияющих на процесс, различают две теоретические предельные модели аппаратов непрерывного действия: идеального вытеснения и идеального смешения.

В аппаратах идеального вытеснения все частицы движутся в заданном направлении, не перемешиваясь с движущимися впереди и сзади частицами и полностью вытесняя находящиеся впереди частицы потока. Все частицы равномерно распределены по площади поперечного сечения аппарата и действуют при движении подобно твердому поршню. Время пребывания всех частиц в аппарате идеального вытеснения одинаково.

В аппаратах идеального смешения поступающие частицы сразу же полностью перемешиваются с находящимися там частицами, т. е. равномерно распределяются в объеме аппарата. В результате во всех точках объема мгновенно выравниваются значения параметров, характеризующих процесс. Время пребывания частиц в аппарате идеального смешения неодинаково.

Реальные непрерывно действующие аппараты представляют собой аппараты промежуточного типа. В них время пребывания частиц в аппарате распределяется более равномерно, чем в аппаратах идеального смешения, но никогда не выравнивается, как в аппаратах идеального вытеснения.

Показатели качества химического оборудования делят на следующие группы:

- 1) эксплуатационно-технические, характеризующие эффект от использования машин по назначению и обуславливающие область их применения;
- 2) надежности, характеризующие свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости;
- 3) технологические, характеризующие эффективность конструкторско-технологических решений с точки зрения обеспечения высокой производительности труда при изготовлении, техническом обслуживании и ремонте;
- 4) эргономические, характеризующие систему «человек – машина – среда» и учитывающие комплекс гигиенических, антропологических, физиологических, психологических свойств человека;
- 5) эстетические, отражающие выразительность, оригинальность, гармоничность, целостность;
- 6) стандартизации и унификации, отражающие степень стандартизации машин и уровень унификации их составных частей;
- 7) патентно-правовые, характеризующие степень защиты модели от копирования другими производителями;
- 8) экономические, характеризующие затраты на разработку, изготовление и эксплуатацию оборудования.

Одним из важнейших эксплуатационных свойств оборудования является безопасность работы, которая определяется двумя группами факторов:

1. Соблюдением при конструировании оборудования ряда требований, обеспечивающих безопасность работы и благоприятные санитарные условия для рабочего.

2. Соблюдение требований охраны труда при выполнении оборудования рабочих операций.

Безопасность работы всех типов оборудования определяется прочностью деталей, особенно движущихся или вращающихся, и наличием ограждений на них. Для оборудования, перемещающегося во время работы, параметром, определяющим безопасность, является его устойчивость при выполнении рабочих операций.

Специальные требования безопасности к конструкции оборудования определяют защиту рабочего от пыли, пара, высокой температуры агрегатов. Для защиты рабочего или оператора от внутренних шумов, превышающих 75 – 80 дБ при частоте 800 Гц, вредно отражающихся на здоровье людей, необходимо устанавливать глушители, применять различные звукоизолирующие материалы или выносить управление в места, защищенные от шума. Для большинства оборудования достижение указанных норм стало возможно за счет введения централизованного дистанционного управления с частичной или полной автоматизацией.

Удобство использования относится к эргономическим свойствам оборудования, которое определяется легкостью управления, показателями безопасности работы оборудования, технической эстетикой, показателями среды, в которой находится машинист. Длительная работа машины на полной производительности обеспечивается только в том случае, если не будут превышены возможности человека, управляющего этой машиной. При управлении оборудованием в ряде случаев возникает необходимость в приложении значительных усилий к рычагам или педалям при их неудобном расположении, что вызывает утомление машиниста и ведет к снижению производительности.

Простота управления определяет затраты труда, необходимого для управления оборудованием, которое зависит от количества рычагов управления, их расположения и величины прилагаемых усилий. В отдельных случаях трудоемкость управления работой оборудования можно оценить по числу включений рычагов и длинам их хода.

Удобство обзора места работы с поста управления оборудованием зависит от конструкции оборудования, конструкции пульта управления и места машиниста или оператора. Условия работы требуют, чтобы оператор, не меняя обычной рабочей позы, мог наблюдать за работой оборудования при выполнении всех элементов рабочего процесса.

Удобство рабочего места оператора, его защита от атмосферных явлений (дождя, снега, ветра и др.), воздействия шума и вибраций, а также достаточное освещение рабочего места и оборудования в значительной мере влияют на удобство и легкость управления машиной, в результате чего повышается эффективность использования химического оборудования. Эти условия должны также выполняться при выполнении ремонтных и монтажных работ. Перед проведением ремонта или монтажа оборудования необходимо подготовить рабочие места при соблюдении требований техники безопасности.

## 2. Основные конструкционные материалы

Выбор материала для изготовления той или иной детали или всего аппарата определяется уровнем требуемой конструкционной прочности, коррозионной стойкости, износостойкости, технологичностью механической и химико-термической обработки, объемом производства, стоимостью и другими показателями. Эти требования нередко противоречивы. Так, например, более прочные материалы менее технологичны, труднее обрабатываются, хуже свариваются; коррозионно-стойкие материалы более дорогие.

В промышленности наибольшее применение получили конструкционные материалы на основе железа (чугуны, и стали).

Чугун – сплав железа с углеродом ( $> 2,14\%$ ) разделяют на нелегированный и легированный. По структуре различают белый чугун (с белым изломом) и серый чугун (с серым изломом). Серый чугун подразделяют на литейный, высокопрочный, ковкий, жаростойкий, коррозионно-стойкий и антифрикционный.

В стали содержание углерода не превышает  $2\%$ . По химическому составу сталь разделяют на углеродистую и легированную. Углеродистую конструкционную сталь подразделяют на обыкновенного качества и качественную. В зависимости от условий и степени раскисления различают стали обыкновенного качества (Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6) спокойные «сп», полуспокойные «пс» и кипящие «кп». В этом ряду снижается содержание кремния и повышается содержание кислорода. Последние наиболее дешевые.

Качественные углеродистые стали отличаются более высокими требованиями к химическому составу и структуре. Различают низкоуглеродистые ( $< 0,25\% \text{ C}$ ) (05кп, 08, 10, 10кп, 15, 15кп, 20, 25), среднеуглеродистые ( $0,3-0,5\% \text{ C}$ ) (30, 35, 40, 45, 50, 55) и высокоуглеродистые стали ( $0,5-0,8\% \text{ C}$ ) (60, 65, 70, 80, 85). В этом ряду повышается прочность, твердость и износостойкость.

Легированные стали широко используют в химической промышленности, в основном, из-за их коррозионной стойкости. В качестве легирующих элементов чаще используют сравнительно недорогие элементы – марганец, кремний и хром. Стали, содержащие эти элементы, нередко добавочно легируют титаном, ванадием и бором.

Хром повышает прочность и жаропрочность стали и уменьшает пластичность и вязкость. Одновременное легирование хромом и никелем повышает прочность, пластичность и вязкость. Никель обеспечивает стойкость при криогенных температурах, при высоких температурах и в агрессивных кислых средах. Марганец повышает прочность и упругость. Кремний повышает прочность и износостойкость. Алюминий повышает окислительную стойкость. Вольфрам повышает жаропрочность и износостойкость.

При содержании легирующих элементов до  $2,5\%$  стали относят к низколегированным, при содержании  $2,5-10\%$  – к легированным, и более  $10\%$  – к высоколегированным. Высоколегированные стали, как правило, имеют специальное назначение (коррозионно-стойкие, жаропрочные, немагнитные и др.). С увеличением легированности возрастает стоимость стали. Цена калиброванной и шлифованной стали еще выше.

Для уменьшения стоимости материала в коррозионно-стойких хромоникелевых сталях часть никеля заменяют марганцем. Экономнолегированная по никелю сталь 10X14Г14Н4Т рекомендована как заменитель стали 12X18Н10Т для изделий, работающих в слабоагрессивных средах (органических кислотах, соля, щелочах), а также при температуре до  $-196^{\circ}\text{C}$ .

Кроме того, для деталей химической аппаратуры (корпуса аппаратов, днищ, фланцев, патрубков и др.), работающих в коррозионной среде, нашли применение двухслойные стали. Они состоят из основного слоя низколегированной стали (09Г2, 16ГС, 09Г2С, 12ХМ и др.) или углеродистой стали (Ст3) и коррозионно-стойкого плакирующего слоя толщиной 1-6 мм из высоколегированных стали (08X18Н10Т, 12X18Н10Т, 08X13) или никелевых сплавов (ХН65МВ, Н70МФ).

Легированные конструкционные стали обозначают буквами и цифрами. Двухзначные цифры, приводимые в начале обозначения марки, указывают содержание углерода в сотых долях процента. Буквы справа обозначают легирующий элемент: 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; Ю – алюминий.

Цифры после букв указывают примерное содержание легирующего элемента в целых процентах. Отсутствие цифры указывает, что среднее содержание легирующего элемента примерно составляет 1%. Основная масса легирующих элементов выплавляется качественной ( $\leq 0,035\%$  Р и  $\leq 0,035\%$  S).

Высококачественные стали содержат меньше вредных примесей ( $\leq 0,025\%$  Р и  $\leq 0,025\%$  S) и обозначаются буквой А, помещаемой в конце марки. Особовысококачественные стали обозначаются буквой Ш, располагаемой в конце марки (30ХГСА-Ш). Если буква А расположена в середине марки (16Г2АФ), то сталь легирована азотом (0,015-0,025%), а если в начале марки (А40) – сталь автоматная, хорошо обрабатываемая резанием и содержащая 0,4% С. Буквы АС в начале марки указывают, что сталь легирована свинцом (АС35Г2).

Примеры. Сталь 12X2Н4А содержит в среднем 0,12% С, 2% Cr, 4% Ni и относится к высококачественным, на что указывает буква А в конце марки. Сталь 18ХГТ содержит 0,18% С, а отсутствие цифр после букв, обозначающих легирующие элементы, указывает на содержание хрома и марганца около 0,8-1,2%, а титан присутствует в небольшом количестве. Следует подчеркнуть, что некоторые элементы V, Ti, Nb, Zr, В, N и др. – нередко присутствуют в стали в сотых долях процента (бор в тысячных долях процента) и оказывают при этом существенное влияние на свойства стали. Поэтому они рассматриваются, как легирующие элементы (микролегирование), что находит отражение в марке стали. Например, сталь 10Г2Б содержит 0,02- 0,05% ниобия, сталь 14Г2АФ содержит 0,015-0,025% N и 0,07-0,12% V, сталь 20ХГР содержит 0,001-0,005% В.

#### Цветные металлы.

Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью вследствие об-

разования на его поверхности тонкой прочной оксидной пленки. Легко обрабатывается давлением, сваривается, обработка резанием затруднена. Из-за низкой прочности, в 20 раз меньшей, чем у стали, используется для изготовления конструкций, не несущих нагрузки. Более широко используют сплавы алюминия с медью, магнием, кремнием, магнием, цинком: дуралюмин (Cu, Mg, Mn), силумин (Si, Mg, Mn), авиаль (Mg, Cu, Mn, Si) и др.

Медь хорошо противостоит коррозии в атмосферных условиях, в пресной и морской воде и других агрессивных средах. Легко обрабатывается давлением, плохо резанием и имеет невысокие литейные свойства, плохо сваривается и легко подвергается пайке. Прочность меньше, чем у стали.

Различают две основные группы медных сплавов: латуни – сплавы с медью, и бронзы – сплав с другими элементами, например, с оловом, кремнием, бериллием, свинцом.

Оловянные и свинцовые баббиты – антифрикционные сплавы для заливки вкладышей в подшипниках скольжения. Они пластичны, легко деформируются под влиянием местных напряжений, удерживают смазочный материал на поверхности вала, имеют малый коэффициент трения, хорошо проводят тепло, устойчивы к коррозии и имеют невысокую температуру плавления.

Сплавы на основе титана, как и у алюминия, получили значительно большее применение, чем технический титан. На поверхности титана образуется стойкая оксидная пленка, повышающая сопротивление коррозии в морской воде, некоторых кислотах и других агрессивных средах. Сплавы титана применяют там, где главную роль играют небольшая плотность, высокая удельная прочность, теплостойкость и хорошая сопротивляемость коррозии. К легирующим элементам титана относят алюминий (BT-5), алюминий и ванадий (BT-6), алюминий, молибден и кремний (BT-8), алюминий, молибден и ванадий (BT-14).

Сталь различного качества поставляется в виде болванок, листов, полос, круглых, квадратных или шестигранных прутков, проволоки, труб, уголков, швеллеров, двутавров и др. проката. Алюминий выпускается в виде плит, прутков, проволоки, листов, труб, угольников, тавров, швеллеров, таврошвеллеров и другой формы проката. Медь и ее сплавы выпускают в виде проволоки, прутков, листов, труб и др. Титан поставляют в виде листов, труб, прутков, проволоки и других полуфабрикатов.

Пластические массы получают на основе высокомолекулярных соединений – полимеров. Термопласты при нагреве расплавляются, а при охлаждении возвращаются в исходное состояние. Реактопласты отличаются более высокими рабочими температурами. При нагреве разрушаются и при последующем охлаждении не восстанавливают своих исходных свойств. Из термопластов различают полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полистирол, фторопласт, полиакрилаты, органическое стекло, капрон, полиамиды, полиуретан и др. Из реактопластов различают фенолформальдегидная смола, мочевиноформальдегидная смола, полиамидная смола, кремнийорганическая смола, полиимиды, полисульфоны и др. Реактопласты часто применяют вместе с наполнителями, в качестве которых используют стекловолокна, органи-

ческие волокна, асбест и ткани. Наполнители повышают прочностные свойства материалов. Газонаполненные пластмассы являются хорошими теплоизолирующими материалами (пенополистирол).

Широкое применение находят различные композиционные материалы: карбоволокниты в составе углеродных волокон с различным связующим, борволокниты – композиции из полимерного связующего и борных волокон, органооволокниты – композиции из полимерного связующего и синтетических волокон). В текстолите наполнителем является хлопчатобумажная ткань. Асботекстолит содержит связующее и асбестовую ткань. Гетинакс получают на основе модифицированных фенольных и карбамидных смол и различных сортов бумаги.

Для повышения работоспособности деталей оборудования широко применяют различные защитные покрытия, которые обеспечивают надежность и долговечность изделия, повышают твердость, износостойкость и жаростойкость, коррозионную и эрозионную стойкость, придают изделиям декоративный вид и др. Покрытия могут быть металлическими, неметаллическими неорганическими, пластмассовыми, резиновыми, лакокрасочными.

Клеи предназначены для неразъемного соединения металлов и неметаллических материалов. Различают клеи фенольные, бакелитовые, эпоксидные, полиамидные, карбамидные, полиуретановые, перхлорвиниловые, цианакриловые и др.

Резина как конструкционный материал отличается высокими эластичными свойствами, химической стойкостью, газо- и водонепроницаемостью, высоким сопротивлением разрыву, износу.

Смазочные материалы предназначены для уменьшения износа трущихся поверхностей, повышения к.п.д. механизмов, предохранения от коррозии. Смазочные материалы разделяются на жидкие масла и пластичные смазки. Масла разделяют на конструкционные (моторные, промышленные, трансмиссионные, турбинные, трансформаторные, для холодильных агентов и др.) и технологические, применяемые при обработке металлов. Пластичные смазки получают загущением масел специальными загустителями. В качестве загустителей используют парафин, графит, литиевое, калиевое, натриевое и кальциевое мыла. К твердым смазочным материалам относят графит, слюду, тальк.

Для защиты оборудования от воздействия высоких температур используют футеровку из шамотного кирпича ( $T_{\max} = 1350^{\circ}\text{C}$ ), диатомовый кирпич ( $T_{\max} = 900^{\circ}\text{C}$ ), перлит ( $T_{\max} = 800^{\circ}\text{C}$ ), асбест ( $T_{\max} = 600^{\circ}\text{C}$ ) и др.

Тепловую изоляцию обеспечивают изделия из асбоцемента ( $T_{\max} = 450^{\circ}\text{C}$ ), стекловолокна ( $T_{\max} = 400^{\circ}\text{C}$ ), пенопласта ( $T_{\max} = 130^{\circ}\text{C}$ ), войлока ( $T_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$ ) и др.

### 3. Методы защиты химического оборудования

Один из основных методов борьбы с коррозией химического оборудования – нанесение на его поверхность, подвергаемую воздействию агрессивной среды, защитного покрытия из материала, стойкого к воздействию этой среды. В этом случае металлический корпус аппарата является как бы каркасом защитной системы и воспринимает на себя механические нагрузки, обеспечивая прочность аппарата, а защитное покрытие защищает металлический каркас от непосредственного химического воздействия среды.

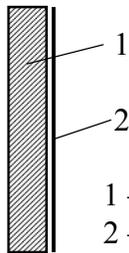
Для обеспечения надежной и длительной работы оборудования с защитным покрытием необходимо соблюдать следующие условия.

1. Правильный выбор материала защитного покрытия, обладающего необходимой стойкостью в заданной среде при рабочих условиях.
2. Обеспечение необходимой прочности покрытия.
3. Строгое выполнение технических условий при нанесении защитного покрытия.

В связи с различием конструкций химических аппаратов, их технологического назначения, агрессивных сред, их концентраций и температур, а также в связи с разнообразием материалов и технологии нанесения защитного покрытия существуют разнообразные защитные покрытия и футеровки. Однако с некоторыми допущениями все это разнообразие видов защитных покрытий можно свести к следующим основным схемам покрытий.

1. Образование на защищаемой поверхности прочного пленочного защитного покрытия из химически стойкого материала.
2. Нанесения на защищаемую поверхность сравнительно толстого слоя из химически стойкого материала.
3. Покрытие защищаемой поверхности листами химически стойкого материала наклейкой или обкладкой.
4. Укладка по защищаемой поверхности футеровки из штучных химически стойких изделий на соответствующем вяжущем.

Пленочные защитные покрытия толщиной 0,1–0,5 мм наносят одним из следующих способов:



1 – стенка  
2 – пленка

- 1) многослойной окраской защищаемой поверхности кистью или окунанием лаками, красками или битумами с сушкой каждого слоя;
- 2) гуммированием из растворов с последующей вулканизацией;
- 3) напылением порошкообразных полимерных материалов методом газопламенного напыления или вихревым способом;

4) многократным нанесением эмульсий из полимерных материалов с последующей сушкой и спеканием;

5) нанесением шихты из порошкообразных материалов с последующим спеканием в стекловидное покрытие (кислотоупорная эмаль).

Достоинства пленочных защитных покрытий: а) простота технологии образования, б) возможность нанесения на защищаемую поверхность слож-

ной конфигурации, в) сохранение полезного объема аппарата и его веса. Недостатки пленочного покрытия: а) малая механическая прочность покрытия, б) низкая рабочая температура среды за исключением эмалей.

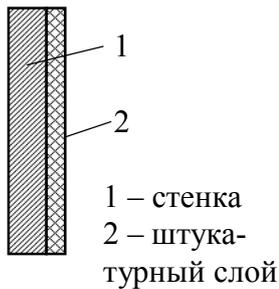
Пленочные покрытия применяют для защиты поверхностей от воздействия агрессивной парогазовой среды (газоходы, крышки аппаратов, газоприемники, вентиляционные установки).

Металлические покрытия: цинковое; кадмиевое; никелевое; хромовое; медное; оловянное; серебряное; золочение; биметаллическое и др.

Неметаллические покрытия: оксидное; оксидно-фторидное; оксидно-фосфатное; фосфатное; хроматно-фторидное.

Полимерные покрытия: полиэтилен; полипропилен; полиизобутилен; винипласт; поливинилхлорид; фторопласт; фаолит; эпоксидная смола; резина.

Лакокрасочные покрытия: пентафталевые ПФ; глифталевые ГФ; меламиноалкидные МЛ; мочевиные МЧ; фенольные смолы ФП; эпоксидные смолы ЭП; полиуретановые УР; нитроцеллюлозные НЦ; перхлорвиниловые ХВ; сополимеры винилхлорида; каучуки КЧ; кремнийорганические; полиакриловые АК, АС; битумы БТ.

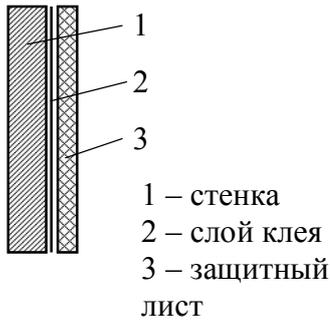


Усиленное защитное покрытие наносят оштукатуриванием защищаемой поверхности химически стойким материалом. Наиболее часто такое покрытие создают из термореактивных пластмасс (фаолит, асбовинил) и кислотостойких силикатных замазок. На поверхность наносят сырой материал, которые затем при определенных условиях переходят в твердое состояние. Толщина покрытия 10–25 мм. Для увеличения механической прочности иногда сырую массу

наносит на металлическую сетку, прихваченную к защищаемой поверхности точечной сваркой.

К достоинствам этого вида покрытия следует отнести: а) возможность нанесения на защищаемую поверхность сложной конфигурации, б) малое изменение веса защищаемой поверхности, в) достаточная механическая прочность покрытия, г) сравнительно несложная технология его образования. Недостатки покрытия из термостойкой пластмассы: а) усадка сырой массы, нанесенной на поверхность, при ее отверждении и вследствие этого образование трещин, б) необходимость использования специальной полимеризационной камеры для отверждения сырой термореактивной массы, что ограничивает размеры защищаемых изделий, в) необходимость поддержания специального режима для отверждения сырой массы в течение продолжительного времени.

Температура среды в аппарате обычно составляет для покрытий из асбовинила, фаолита до 120°C, для силикатных материалов – 300°C и выше.



Листовое покрытие наносят на защищаемую поверхность: 1) наклейкой раскроенных листов полимерных материалов со сваркой стыковых швов; 2) наклейкой раскроенных листов сырой резины с последующей вулканизацией покрытия; 3) простой обкладкой без наклейки. Толщина защитного слоя зависит от толщины листового материала и обычно составляет 3–6 мм.

Преимущества этого вида покрытия: а) возможность применения готового листового материала, выпускаемого серийно с различными физико-механическими свойствами и химической стойкостью, б) сравнительно несложная технология производства работ по наклейке листов на защищаемую поверхность. Недостатки листового вида покрытий: защищаемая поверхность должна иметь несложную форму. Адгезия листов с металлической поверхностью обеспечивается за счет клея и иногда бывает недостаточной, ряд клеев не обладает достаточной химической стойкостью, поэтому необходимо сваривать стыковые швы покрытия, что усложняет технологию образования покрытия. Температура применения не может превышать 100°С для полимерных материалов и 70°С для резин.

Ряд материалов (полиэтилен, полипропилен) нельзя наклеивать на защищаемую поверхность из-за их неполярности.

Метод обкладки листами без наклейки мало применяют в химических аппаратах, однако успешно используют при футеровке стальных труб чаще всего гуммированием.

Футеровка защищаемой поверхности штучными кислотоупорными изделиями. Для образования этого вида покрытия на защищаемую поверхность укладывают штучные кислотоупорные изделия на специальных вяжущих материалах, например, химически стойких замазках с последующей сушкой уложенной футеровки. В качестве штучных кислотоупорных изделий для футеровки чаще всего используют блоки и специальные штучные изделия из природного камня, плитки, кирпичи и блоки из кислотоупорной керамики, плитки диабаз, стекла, фарфора, пропитанного графита и некоторых полимерных материалов.

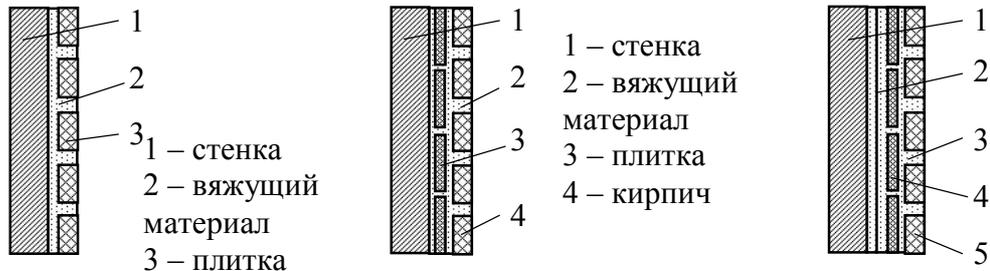
По конструкции футеровки делятся на простые (однослойные), многослойные и комбинированные (многослойная футеровка с подслоем из листового органического материала). Толщина футеровочного слоя зависит от размеров штучных изделий и количества слоев и составляет примерно 50–500 мм.

Однослойную футеровку применяют для защиты поверхностей аппаратов с парогазовой средой без конденсации, газоходов, полов и фундаментов.

Многослойную и комбинированную футеровку используют для защиты поверхностей химической аппаратуры, работающей в наиболее тяжелых условиях по степени воздействия среды, температуры, механическому и абразивному воздействию среды.

Достоинства такой футеровки: а) высокая механическая прочность, что

- 1 – стенка  
2 – полиизо  
бутилен  
3 – вяжущий  
материал

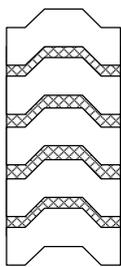


позволяет использовать ее при абразивном воздействии среды, б) высокий предел рабочей температуры (до 300–400°C), в) низкая стоимость футеровки при использовании серийно изготавливаемых материалов. Недостатки футеровки: а) значительно увеличивается вес аппарата и уменьшается полезный объем, б) большинство штучных материалов (керамика, фарфор, природные камни, графит) обладают пористостью, что требует введения непроницаемого подслоя из органического материала (полиизобутилен, резина), в) футеровка может наноситься на поверхность сравнительно простой формы.

В зависимости от условий эксплуатации футерованного аппарата конструкция защитного футерованного слоя может быть различной. Для футеровки поверхностей металлической аппаратуры и газоходов наиболее часто используют кислотоупорный кирпич, кислотоупорную керамическую плитку, плитку каменного литья (диабазовую), плитку графитовую, блоки бетонные, угольные и графитовые. При выборе материала исходят из химической стойкости образуемого из него защитного покрытия в заданной среде при определенных концентрациях и температурах, характера вяжущего материала и пористостью футеровки.

Отдельные зоны поверхности аппарата в разной степени подвергаются агрессивному воздействию среды. Примером может служить обычный реакционный аппарат с неполным заполнением агрессивной жидкостью. На верхнюю часть аппарата и крышку среда действуют значительно меньше, чем на нижнюю стенку и днище. В этом случае необязательно защитное покрытие у крышки делать аналогичным покрытию стенок и днища, предусматривать в крышке броневой слой, воспринимающий абразивное воздействие среды.

Операции по нанесению футеровки аналогичны операциям строительного производства, но требуют тщательного исполнения и строго контроля качества.



При значительных скоростях движения агрессивной среды, например, в аппаратах с мешалками, не следует использовать футеровку из тонкой плитки укладкой в один слой. Более целесообразны плитки большой толщины или многослойная футеровка. При наличии в агрессивной среде твердых частиц, которые могут абразивно воздействовать на футеровку, последняя должна быть многослойной и иметь защитный бронированный слой, обращенный к среде. В случае применения тонкой футеровки в таких условиях штучные материалы футеровки для увеличения ее устойчивости должны быть шпунтованными.

#### 4. Механические расчеты

Для обеспечения прочности и надежности химического оборудования при его проектировании выполняются необходимые механические (прочностные) расчеты. При этом могут выполняться два вида механических расчетов: проектировочный и поверочный. В первом случае основные размеры проектируемого элемента оборудования рассчитывают, исходя из действующих на него нагрузок, температуры, материала и необходимого запаса прочности. Во втором случае размеры элемента конструкции известны и расчет сводится к определению напряжений, действующих в материале рассчитываемого элемента и их сравнению с допустимыми напряжениями.

При статической нагрузке элементы, узлы и аппарат в целом рассчитываются на прочность. При динамических нагрузках (от давления, температурных и других деформаций) рассчитываемые элементы проверяют на усталостную прочность.

Для выполнения расчета необходимо иметь следующие технические данные, определяющие объем вычислений:

- 1) географическое положение и сейсмичность района установки аппарата;
- 2) место установки аппарата (в отапливаемом помещении или вне его);
- 3) характеристика работы аппарата;
- 4) характеристика рабочей среды;
- 5) рабочее давление и температура (минимальная отрицательная и максимальная плюсовая);
- 6) рекомендуемые марки конструкционных материалов;
- 7) тип, форма и основные размеры аппарата;
- 8) характеристика внутренних устройств;
- 9) характеристика футеровки или тепловой изоляции и др.

Все аппараты, подведомственные Промнадзору должны иметь паспорт установленной формы.

Стандартные узлы и детали при применении их в аппарате выбираются на ближайшее большее давление для рабочей температуры и, как правило, на рабочее давление не рассчитываются.

Расчетную температуру определяют на основании тепловых расчетов или опытных данных. При положительных температурах за расчетную принимают наибольшую температуру стенки. Допускаемые напряжения принимают при этой температуре. При отрицательных температурах за расчетную принимают температуру 20 °С.

Рабочее давление – максимальное избыточное давление среды в аппарате при нормальном протекании рабочего процесса, без учета гидростатического давления и без учета допустимого кратковременного повышения давления при срабатывании предохранительного клапана или других устройств.

Расчетное давление – максимальное допускаемое рабочее давление, на которое выполняется расчет на прочность и устойчивость элементов аппарата при максимальной их температуре. Его принимают, как правило, равным рабочему или выше его. Если на элемент сосуда действует гидростатическое давление, составляющее 5 % и более от рабочего, то расчетное давление для

этого элемента увеличивают на это значение. При вакууме с остаточным давлением до 0,05 МПа расчетное давление равно 0,1 МПа.

Пробное давление – избыточное давление, на которое аппарат испытывается на прочность и плотность после его изготовления и периодически при его эксплуатации. При разрежении или давлении в аппарате от 0,07 до 0,5 МПа пробное давление равно 1,5 рабочего, но не менее 0,2 МПа (для литых деталей не менее 0,3 МПа). При давлении в аппарате более 0,5 МПа пробное давление равно 1,25 рабочего. При давлении в аппарате от 0 до 0,07 МПа пробное давление составляет 0,2 МПа. При отсутствии давления в аппарате испытания проводят наливом воды.

Испытания чаще всего проводят водой с температурой 5-40 °С. Время выдержки при пробном давлении не менее 10 минут при толщине стенки до 50 мм и не менее 20 минут при толщине стенки 50-100 мм. Если гидравлическое испытание аппарата невозможно, то разрешается проводить пневматическое испытание воздухом или нейтральным газом.

Допускаемое напряжение для выбранного материала приближенно можно определять по формуле

$$[\sigma] = \eta \sigma^*$$

где  $\eta$  – коэффициент;  $\sigma^*$  – нормативное допускаемое напряжение, МПа.

Для взрыво- и пожароопасных сред  $\eta = 0,9$ , а в остальных случаях  $\eta = 1$ . В зависимости от вида проката для листового проката  $\eta = 1$ , для отливок, подвергающихся неразрушающему контролю,  $\eta = 0,9$ , для отливок, не подвергающихся контролю,  $\eta = 0,8$ .

Значения  $\sigma^*$  и модуля упругости  $E$  приводятся в справочной литературе. При отсутствии справочной информации допускаемые напряжения определяются

$$[\sigma] = \eta \sigma_B / n_B; \quad [\sigma] = \eta \sigma_T / n_T,$$

где  $\sigma_B, \sigma_T$  – минимальное значение предела соответственно прочности и текучести при расчетной температуре, МПа;  $n_B = 2,4, n_T = 1,5$  – коэффициенты запаса прочности по пределам соответственно прочности и текучести

Коэффициент прочности сварных швов  $\phi$  характеризует прочность сварного шва и зависит от метода сварки (ручная, полуавтоматическая и автоматическая) и типа сварного соединения (стыковой, тавровый, угловой, внахлест). Изменяется от 0,8 до 1 при контроле 100 % длины шва и от 0,65 до 0,9 при контроле от 10 до 50 % длины шва. Для бесшовных элементов  $\phi = 1$ .

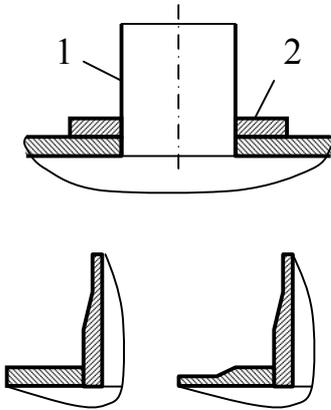
При расчете элементов сосудов и аппаратов необходимо учитывать прибавку к расчетной толщине  $c$ . Исполнительную толщину определяют по формуле

$$s \geq s_p + c; \quad c = c_1 + c_2 + c_3,$$

где  $c_1$  – прибавка на коррозию, мм;  $c_2$  – прибавка для компенсации минусового допуска, мм;  $c_3$  – прибавка для компенсации утонения в процессе изготовления оборудования, мм.

Тонкостенными называют оболочки, у которых соблюдается отношение  $(s - c)/D \leq 0,1$ . Для труб и обечаек с диаметром  $D < 200$  мм допускается ( $s -$

$c/D \leq 0,3$ . В противном случае они относятся к толстостенным. Для тонкостенных и толстостенных методики расчета конструктивных элементов различны. Подробно и наиболее полно методология расчета различных элементов аппаратов приведены в книге Лацинский А.А. Конструирование сварных химических аппаратов. Справочник. – Л.: Машиностроение, 1981.



Отверстия ослабляют стенку. Наличие отверстий в краевой зоне обечайки и днищ, как правило, не допускается. Расстояние от оси штуцера до края обечайки рассчитывается по формулам, индивидуальным для каждого вида обечайки, днища или крышки.

Для компенсации ослабления оболочки отверстием предусматривается ее укрепление путем постановки дополнительной накладки 2, толщина и ширина которой рассчитываются по различным формулам в зависимости от типа стенки (цилиндрическая, эллиптическая, сферическая, конусная, плоская).

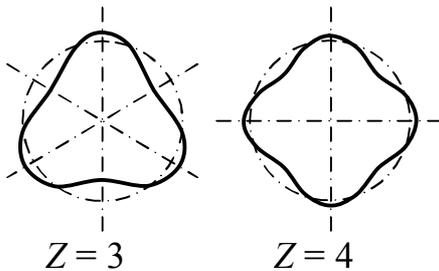
Кроме того, отверстие может быть укреплено утолщением стенки обечайки, штуцера или одновременное их утолщение в месте сопряжения.

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления при отсутствии избыточной толщины стенки аппарата, определяется по формуле

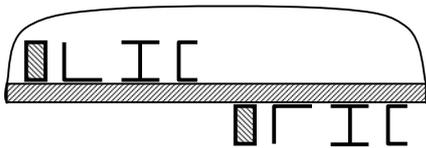
$$d_o = 0,4\sqrt{D(s - c)}.$$

Цилиндрические обечайки, работающие при наружном давлении, принято делить на короткие и длинные. Границей их раздела является длина

$$l = 0,815\sqrt{\frac{D^3}{s - c}}.$$

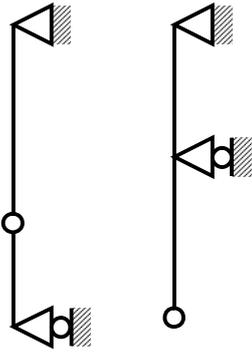


Длинные цилиндрические обечайки и трубы теряют устойчивость с образованием двух волн смятия, т. е. они сплющиваются. Короткие цилиндрические обечайки, закрепленные по торцам, теряют устойчивость с образованием трех, четырех и более волн смятия.



Для усиления обечайки, находящихся под внутренним давлением, и предотвращения смятия обечайки, находящихся под наружным давлением предусматриваются кольца жесткости различной формы, которые могут быть закреплены сваркой как внутри обечайки, так и снаружи ее.

Расчету валов любых роторных агрегатов предшествует разработка его расчетной схемы, отражающей наиболее важные факторы. В зависимости от количества установленных на валу дисков, шкивов, барабанов, мешалок, колес и других узлов и деталей различают валы с одной и многими сосредоточенными массами. При этом допускается представлять менее массивные элементы лишенными массы. По виду поперечного сечения различают валы по-



стоянного и переменного сечения. В зависимости от места установки подшипников валы подразделяют на однопролетные (с концевой опорой) и консольные. По значению угловой скорости различают валы быстроходные и тихоходные. Важнейшими критериями работоспособности тихоходных валов являются прочность и жесткость. Расчет быстроходных валов предусматривает в качестве важнейшего критерия виброустойчивость, выполнение которого обычно связано с одновременным выполнением условий про-

чности и жесткости. Условие виброустойчивости соблюдается при:

а) для жестких валов

$$\omega \leq 0,7 \omega_{кр};$$

б) для гибких валов

$$\omega \geq 1,3 \omega_{кр},$$

где  $\omega_{кр}$  – критическая скорость вала, рад/с.

Зависимости для определения критической скорости вала для различных способов закрепления диска на нем индивидуальны. Методология расчета узлов и деталей аппаратов с мешалками на прочность приведена в книге Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред: Справочное пособие. – Л.: Машиностроение, 1979.

Установка химических аппаратов на фундаменты или специальные несущие конструкции осуществляется, в основном, с помощью опор. Непосредственно на фундаменты устанавливают лишь аппараты с плоским днищем, предназначенные для работы под наливом.

В зависимости от рабочего положения аппарата различают опоры для вертикальных аппаратов и опоры для горизонтальных аппаратов. Вертикальные аппараты обычно устанавливают либо на стойках, когда их размещают внизу, или на подвесных лапах, когда аппарат размещают между перекрытиями или на специальных металлоконструкциях. Горизонтальные аппараты устанавливают на седловых опорах. Все указанные опоры для стальных сварных аппаратов нормализованы.

Число опор определяется расчетом и конструктивными соображениями: лап должно быть не менее двух, стоек не менее трех. Весьма подробно конструкции, рекомендуемые области использования и методология расчета опор приведены в книге Лацинский А.А. Конструирование сварных химических аппаратов. Справочник. – Л.: Машиностроение, 1981.

Расчет опор для вертикальных аппаратов выполняется в соответствии с руководящим документом РД РТМ 26-319-79. При этом собственно опоры расчетом не проверяются, а выбираются стандартные на требуемую нагрузку. Расчету подлежит обечайка цилиндрического аппарата, на которую действуют местные нагрузки, вызываемые опорными лапами.

Расчет опор для колонных аппаратов выполняется по стандартам: СТ СЭВ 1645-79 и ОСТ 26-467-78.

## 5. Методики расчета на прочность

Исполнительную толщину тонкостенной цилиндрической обечайки, нагруженных внутренним давлением, рассчитывают по формуле

$$s_{\text{ц}} \geq \frac{pD}{2\varphi[\sigma] - p} + c.$$

Допускаемое внутреннее давление равно

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s_{\text{ц}} - c)}{D + s_{\text{ц}} - c}.$$

Толщина стенки цилиндрической обечайки, нагруженной наружным давлением, выбирается большей из двух величин

$$s_{\text{ц}} = \max \left\{ K_2 D \cdot 10^{-2} + c; \quad \frac{1,1pD}{2[\sigma]} + c \right\}$$

с последующей проверкой по формуле

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}},$$

где  $K_2$  – коэффициент, значение которого определяют по номограмме в зависимости от коэффициентов  $K_1$  и  $K_3$ ;  $[p]_p$  – допускаемое давление из условий прочности, МПа;  $[p]_E$  – допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа.

$$K_1 = \frac{n_y p}{2,4 \cdot 10^{-6} E}; \quad K_3 = \frac{l}{D};$$

$$[p]_p = \frac{2[\sigma](s_{\text{ц}} - c)}{D + s_{\text{ц}} - c}; \quad [p]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} E D}{n_y B_1 l} \left[ \frac{100(s_{\text{ц}} - c)}{D} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s_{\text{ц}} - c)}{D}},$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;  $l$  – длина обечайки, м;  $n_y = 2,4$  – запас устойчивости;  $B_1$  – значение, принимаемое меньшим из двух

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; \quad 8,15 \frac{D}{l} \sqrt{\frac{D}{100(s_{\text{ц}} - c)}} \right\}.$$

Исполнительную толщину стенки эллиптического или полусферического днища при внутреннем давлении рассчитывают по формуле

$$s_{\text{э}} \geq \frac{pR}{2\varphi[\sigma] - 0,5 p} + c,$$

где  $R$  – радиус кривизны при вершине днища, м.  $R = D$  для эллиптических днищ с  $H = 0,25 D$ ;  $R = 0,5 D$  для сферических днищ с  $H = 0,5 D$ .

Допускаемое внутреннее давление равно

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s_{\text{э}} - c)}{R + 0,5(s_{\text{э}} - c)}.$$

Исполнительная толщина стенки эллиптического или полусферического днища при наружном давлении равна

$$s_э = \max \left\{ \frac{K_э R}{510} \sqrt{\frac{n_y p}{10^{-6} E}} + c; \frac{pR}{2[\sigma]} + c \right\}.$$

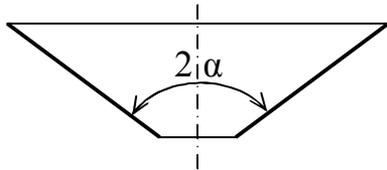
где  $K_э$  – коэффициент, принимаемый при приближенных расчетах для полусферических днищ равным 1,0 и для эллиптических днищ равным 0,9.

Полученное значение толщины проверяется по формуле

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_p}{[p]_E} \right)^2}},$$

где  $[p]_p$  – допускаемое давление из условий прочности, МПа;  $[p]_E$  – допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа.

$$[p]_p = \frac{2[\sigma](s_э - c)}{R + s_ц - c}; \quad [p]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} E}{n_y} \left[ \frac{100(s_э - c)}{K_э R} \right].$$



Исполнительную толщину конических обечаек, днищ и крышек при внутреннем давлении с углом при вершине  $2\alpha \leq 120^\circ$  определяют по формуле

$$s_к = \frac{pD_к}{(2\varphi[\sigma] - p)\cos\alpha}.$$

При бóльших значениях угла при вершине расчет выполняется как для плоских крышек и днищ.

Допускаемое внутреннее давление равно

$$[p] = \frac{2\varphi[\sigma](s_к - c)\cos\alpha}{D_к + (s_к - c)\cos\alpha}.$$

Толщину конических обечаек, днищ и крышек при наружном давлении определяют по формулам, применяемым для цилиндрических обечаек. При этом допускаемое давление из условий прочности  $[p]_p$  и допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости  $[p]_E$  находят по формулам

$$[p]_p = \frac{2[\sigma](s_к - c)}{\frac{D_к}{\cos\alpha} + s_к - c}; \quad [p]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} E}{n_y B_1} \frac{D_к}{l_к} \left[ \frac{100(s_к - c)}{D_к} \right]^2 \sqrt{\frac{100(s_к - c)}{D_к}},$$

где  $D_к$ ,  $l_к$  – соответственно эффективные диаметр и длина конической обечайки, м.

$$D_к = \max \left\{ \frac{D + D_o}{2\cos\alpha}; \frac{D}{\cos\alpha} - 0,31(D + D_o) \sqrt{\frac{D + D_o}{s_к - c} \operatorname{tg}\alpha} \right\}; \quad l_к = \frac{D - D_o}{2\sin\alpha}.$$

Исполнительную толщину плоских днищ и крышек определяют по формуле

$$s_{\Pi} = KK_o D \sqrt{\frac{p}{\varphi[\sigma]} + c},$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от формы днищ. Для предварительных расчетов можно принять  $K = 0,41$ ;  $K_o$  – коэффициент ослабления днища или крышки отверстиями. При отсутствии отверстий  $K_o = 1$ . Для одиночного отверстия и для нескольких отверстий

$$K_o = \sqrt{1 + \frac{d}{D} + \left(\frac{d}{D}\right)^2}; \quad K_o = \sqrt{\frac{1 - \sum \left(\frac{d_i}{D}\right)^3}{1 - \sum \frac{d_i}{D}}}.$$

Следует иметь в виду, что плоские днища и крышки, работающие под внутренним избыточным давлением, диаметром более 500 мм не применяют.

Допускаемое давление на плоское днище или крышку равно

$$[p] = \left(\frac{s_{\Pi} - c}{KK_o D}\right)^2 \varphi[\sigma].$$

Во фланцевых соединениях при  $p \leq 4,0$  МПа и  $t \leq 300$  °С применяют болты, а при  $p > 4,0$  МПа и  $t > 300$  °С – шпильки. Для уплотнения фланцевых соединений применяют неметаллические, металлические, асбометаллические и комбинированные прокладки стандартных форм.

Проверочный расчет болтов и прокладок фланцевых соединений начинают с определения расчетной температуры фланцев  $t_{\phi} = t_p$  и болтов или шпилек  $t_b = 0,95 t_p$ . Затем находят расчетные нагрузки на соединение, усилие, возникающее от разности температур фланца и болта в период эксплуатации и расчетное осевое усилие для болтов. Далее проверяют прочность болтов и прокладок.

К аппаратам высокого давления относят аппараты, работающие под давлением свыше 10 МПа. Толщина стенки такого аппарата превышает 10% его внутреннего диаметра. Обычно аппараты высокого давления изготавливают малого диаметра, что позволяет получить относительно небольшие усилия от внутреннего диаметра на крышку аппарата и обеспечить эффективное уплотнение. Необходимый объем обеспечивается увеличением длины, которая составляет 10-15 диаметров.

В отличие от тонкостенных для толстостенных обечаек нельзя принимать равномерным распределение тангенциальных (кольцевых) напряжений по толщине стенки и пренебрегать радиальными напряжениями, которые при высоких давлениях соизмеримы с тангенциальными.

Исполнительная толщина цилиндрической однослойной обечайки определяется по формуле

$$s \geq 0,5 D (\beta_p - 1) + c,$$

где  $\beta_p$  – расчетный коэффициент толстостенности.

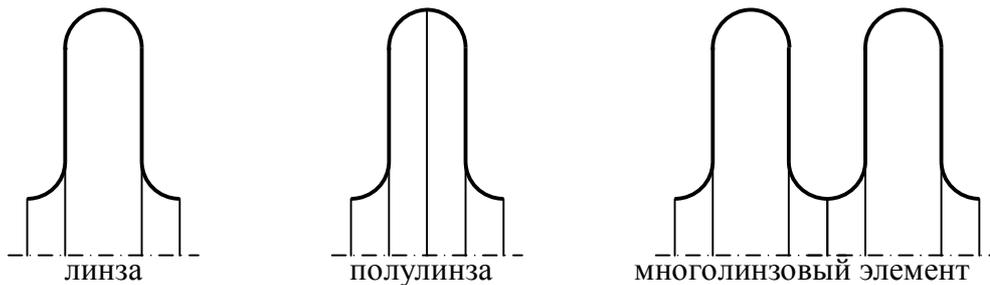
$$\ln \beta = \frac{p}{\varphi[\sigma]}.$$

Допускаемое рабочее давление определяется по формуле

$$[p] = \varphi [\sigma] \ln \beta,$$

где  $\beta = \frac{D + 2s}{D + 2c}$  – коэффициент толстостенности.

В кожухотрубчатых аппаратах могут развиваться весьма значительные напряжения за счет неодинакового температурного удлинения жестко соединенных между собой труб и кожуха. Для устранения этого явления кожух аппарата снабжают специальными устройствами – компенсаторами. В промышленности используют линзовые и сильфонные компенсаторы. Они стандартизированы для давления до 2,5 МПа и температуры от – 70 до + 700 °С.



При расчете линзового компенсатора вычисляют разность между линейным расширением труб и кожуха, расчетное число линз и усилие в компенсаторе.

Расчет на прочность трубных решеток теплообменников нормализован и учитывает множество факторов, связанных с особенностью конструкции аппарата и решетки. Методика расчета приведена в упомянутой книге Лашинского А.А.

Одними из основных элементов конструкций роторов центрифуг, сепараторов и т. п. химического оборудования являются быстровращающиеся цилиндрические или конические обечайки. В общем случае они находятся под совместным воздействием распределенных по поверхности инерционных нагрузок от собственной массы обечайки и массы обрабатываемой среды.

Расчет таких быстровращающихся обечаек изложен в книге Михалев М.Ф. и др. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи. – Л.: Машиностроение, 1984.

В промышленности широко используются барабанные печи, сушилки и др. Механические расчеты вращающихся барабанов включают определение толщины стенки барабана, обеспечивающей прочность и жесткость конструкции, расчет на прочность бандажей, а также опорных и упорных роликов. При этом учитывается собственная масса обечайки и внутренних устройств барабана, масса обрабатываемого материала, находящегося в барабане, масса футеровки, масса изоляции. Барабан рассматривается как балка, опирающаяся на опоры и подвергающаяся действию силы и крутящего момента от привода.

Методика расчета тихоходных барабанов приведена в книге Михалев М.Ф. и др. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи. – Л.: Машиностроение, 1984.

## 6. Механическое оборудование для дробления твердых материалов

По назначению измельчительное оборудование условно делится на *дробилки* крупного, среднего и мелкого дробления и *мельницы* тонкого и сверхтонкого измельчения.

По основному способу механического воздействия на материал разделяют следующие основные группы: раскалывание, раздавливание, истирание, удар, ударно-истирающего действия, коллоидное измельчение.

Дробление и особенно измельчение – весьма энергоемкие операции, поэтому необходимо стремиться к уменьшению массы перерабатываемого материала, руководствуясь принципом: не измельчать ничего лишнего. По этому принципу из исходного материала целесообразно выделить куски того размера, до которого производится измельчение на данной стадии.

В щечковой дробилке материал измельчается путем раздавливания в сочетании с раскалыванием и изгибом между неподвижной 1 и подвижной 2 щеками.

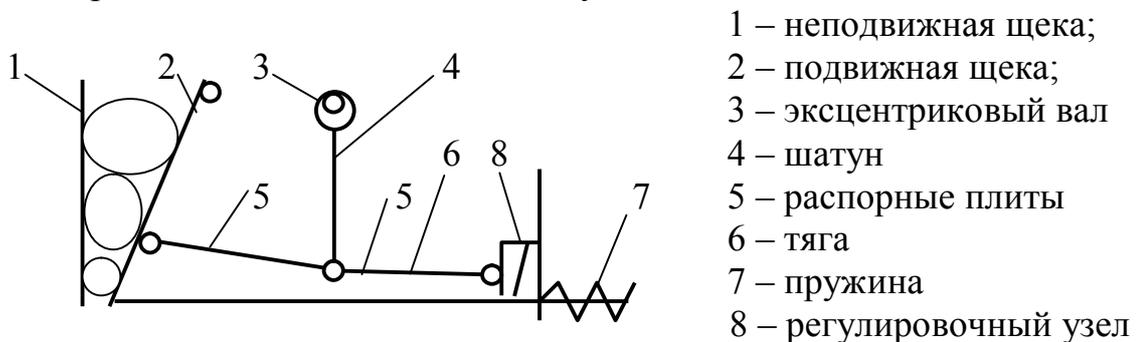


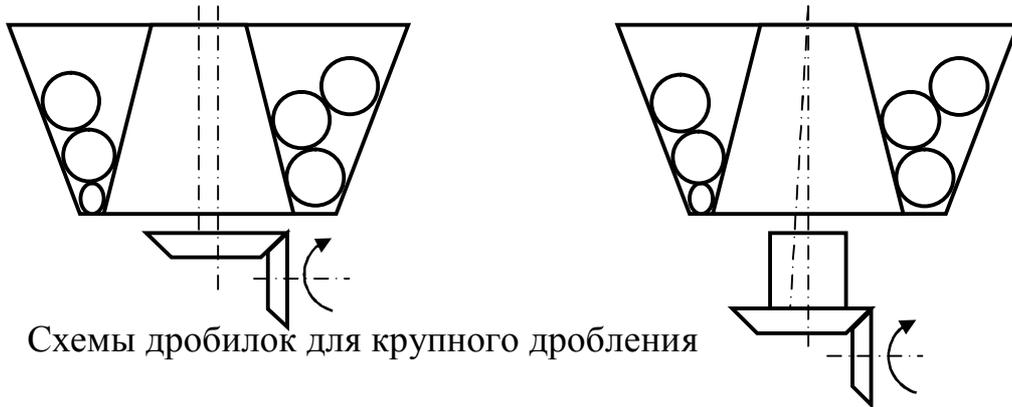
Схема щечковой дробилки

Подвижная щека 2 приближается (при рабочем ходе) или отходит (при холостом ходе) от неподвижной щеки 1 при вращении эксцентрикового вала 3. При сближении щек происходит дробление материала, а при раздвигании – выгрузка измельченного материала под действием собственного веса. Движение щеке 2 передается шатуном 4, подвижно соединенного с эксцентриковым валом 3 и двумя распорными плитами 5 – передней и задней. Тяга 6 и пружина 7 отводят щеку 2 при холостом ходе. Путем взаимного перемещения клиньев в регулировочном узле 8 регулируется ширина выпускного отверстия и, следовательно, степень измельчения.

Описанная щечковая дробилка является машиной с простым качанием подвижной щеки. В других дробилках подвижная щека не только приближается к неподвижной и отходит от нее, но во время рабочего хода еще и движется вниз, в сторону разгрузки материала. При этом происходит не только раздавливание, но и истирание материала, за счет чего производительность таких дробилок несколько увеличивается, а расход энергии снижается.

Конусная дробилка может быть представлена в нескольких конструктивных вариантах: для крупного, среднего и мелкого дробления. Рабочими элементами конусных дробилок являются поверхности двух конусов, входящих один в другой. Внешний конус неподвижен, внутренний эксцентрично установлен на оси. При вращении внутренний конус дробилки в одной части описываемой им окружности приближается к неподвижному конусу и раз-

рушает материал, а в противоположной части этой окружности измельченный материал высыпается через расширяющуюся выходную щель.

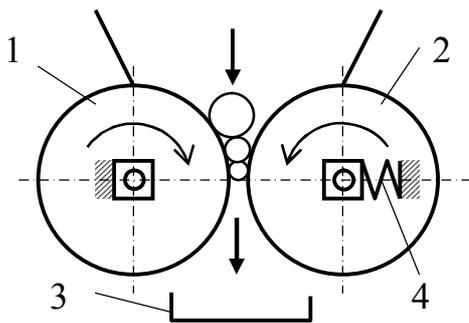


Схемы дробилок для крупного дробления

За счет непрерывности выхода измельченного материала и большей его равномерности по составу производительность конусных дробилок выше, чем щековых. Однако следует учитывать, что при малых производительностях и большой крупности исходных кусков может оказаться более экономичной щековая дробилка.

У дробилок среднего и мелкого дробления угол конусности конусов снижается.

Валковые дробилки применяют для среднего и мелкого дробления. Материал измельчается между двумя валками, вращающимися навстречу друг другу. Опоры одного из валков неподвижны, другого – закреплены в скользящих подшипниках. При попадании в дробилку куска материала чрезмерной твердости подвижный валок отходит от неподвижного, устраняя тем самым возможность поломки дробилки. Цилиндрическая поверхность валков для снижения скольжения измельчаемого материала о них может быть гладкой, рифленой, ребристой и зубчатой.



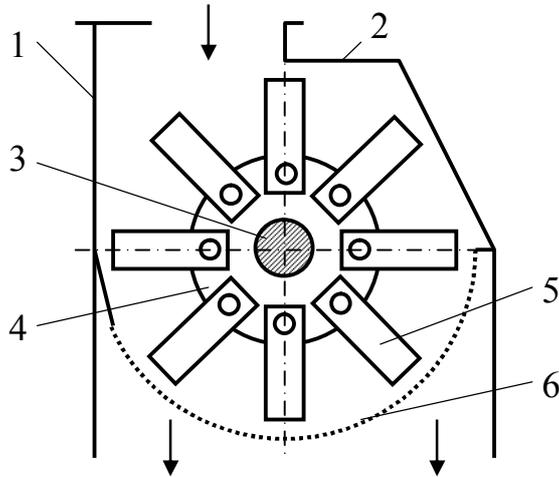
- 1 – валок с неподвижными подшипниками
- 2 – валок с подвижными подшипниками
- 3 – бункер; 4 – пружина

Степень измельчения колеблется от 10–15 для зубчатых валков до 3–8 для гладких валков. Окружная скорость валков – 3–6 м/с. Частота вращения валков от 14 до 64 об/мин.

Валки обычно изготавливают из чугуна и футеруются по внешней поверхности бандажами из износостойкой марганцовистой стали. Они компактны и надежны в работе. Вследствие однократного сжатия материал не переизмельчается и содержит мало мелочи.

Молотковые дробилки относятся к числу простейших измельчителей ударного действия. Их применяют для измельчения хрупких материалов (известняк, гранит, шлак, уголь и др.). Производительность молотковых мельниц до 500 т/час. Частота вращения ротора 580 – 1480 об/мин.

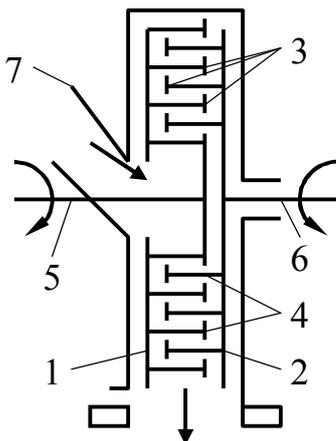
Молотковая дробилка состоит из корпуса 1, футерованного стальными плитами 2. На вращающемся горизонтальном валу 3 насажены диски 4, между которыми шарнирно подвешены молотки 5. Материал дробится под действием ударов быстровращающихся с



окружной скоростью 30–55 об/с молотков. Дробление происходит также при ударах кусков материала, отбрасываемых молотками, о плиты 2. Измельченный материал выгружается через колосниковую решетку 6.

Кроме однороторных молотковых дробилок применяются двухроторные (с двумя валами), для которых степень измельчения составляет 30–40. Выпускаются также дробилки с жестко закрепленными молотками.

Молотки, плиты и решетка изготавливаются из углеродистой стали с твердосплавными наплавками или из марганцовистой стали.



- 1, 2 – вращающиеся диски;
- 3 – кольцевые диски; 4 – пальцы;
- 5, 6 – валы;
- 7 – загрузочная воронка

Рабочим органом дезинтегратора являются два вращающиеся в разные стороны ротора. Каждый ротор состоит из дисков 1, соединенных с кольцевыми дисками 3 стальными цилиндрическими пальцами 4, и закреплен на отдельных валах 5 и 6, которые приводятся во вращение от индивидуальных двигателей. Пальцы на роторах расположены по концентрическим окружностям так, что каждый ряд пальцев одного ротора входит между двумя рядами другого. Окружная скорость пальцев 22–37 м/с.

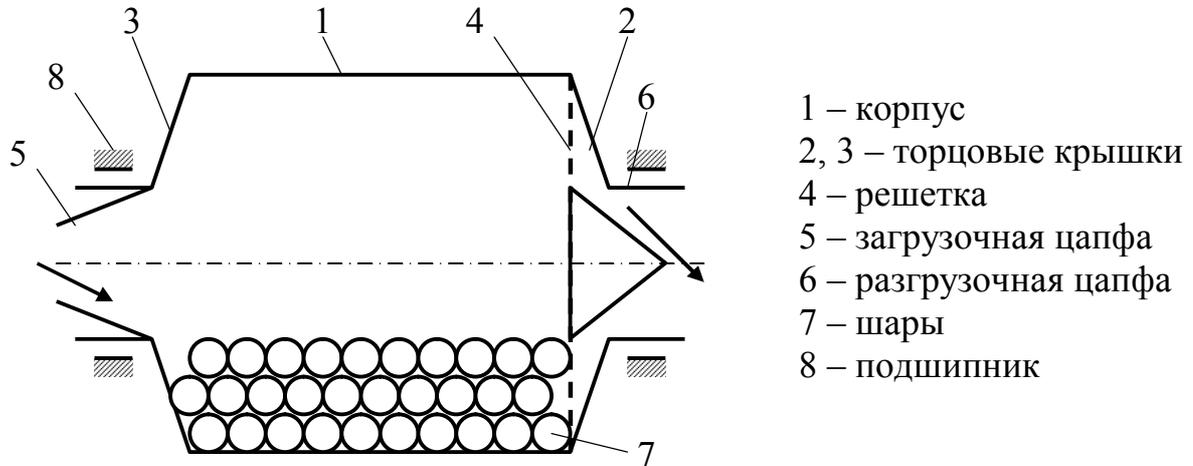
Дробимый материал подается через загрузочную воронку 7 к центру ротора. Пальцы, расположенные на внутренней окружности, дробят материал и отбрасывают его куски к следующему концентрическому ряду, вращающемуся в противоположном направлении. После такого многократного дробления измельченный материал выгружается вниз.

В отличие от дезинтегратора дисмембраторы имеют один ротор. Внутренняя стенка корпуса выполняет роль второго неподвижного диска, который является статором. Частота вращения ротора дисмембратора примерно в два раза больше, чем у дезинтегратора.

Барабанные мельницы для тонкого измельчения бывают периодического и непрерывного действия, одно- и многокамерные, работающие по сухому и мокрому способу измельчения, шаровые, стержневые, вибрационные ,

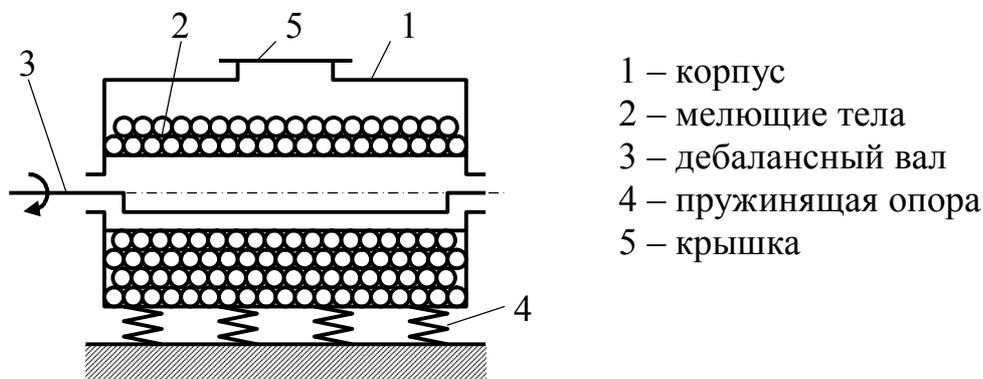
трубные. Диаметр загружаемых мелющих тел – 25–175 мм, которые занимают треть объема, размеры кусков измельчаемого материала – менее 65 мм.

Барабанные мельницы состоят из горизонтального цилиндрического корпуса (барабана) 1, закрытого торцовыми крышками 2 и 3 с пустотелыми



цапфами 5 и 6, установленными в подшипниках 8. Барабан и крышки футерованы бронеплитами.

При вращении барабана мелющие тела увлекаются под действием центробежной силы и силы трения на определенную высоту, а затем свободно падают и измельчают материал ударом, раздавливанием и истиранием. Производительность барабанных мельниц определяется опытным путем в зависимости от размера барабана, массы мелющих тел, коэффициента заполнения, свойств измельчаемого материала, частоты вращения барабана и тонины помола.



Вибрационная мельница периодического или непрерывного действия используется для тонкого помола и является машиной ударно-истирающего действия. Цилиндрический корпус мельницы объемом до 1 м<sup>3</sup> находится на валу с дебалансом, расположенным эксцентрично относительно оси вращения вала. Мелющие тела занимают 80–90 % объема мельницы. Частота колебаний 1000–3000 об/мин и соответствует частоте вращения ротора электродвигателя, а амплитуда 2–4 мм.

Несмотря на обеспечение достаточной тонины помола вибрационные мельницы обладают рядом недостатков: низкой производительностью, большим износом шаров, загрязнением частицами шаров измельчаемого материала, разогрев материала.

## 7. Машины для разделения твердых материалов

Разделение твердых зернистых материалов на классы по крупности кусков или зерен называется классификацией. В технике используют три вида классификации: 1) механическая классификация; 2) гидравлическая классификация; 3) воздушная классификация (сепарация).

При разделении крупнозернистых и кусковых материалов используют термины «грохот» и «грохочение», при разделении мелкозернистых сыпучих материалов – термины «сита» и «рассеивание».

Грохочение является наиболее распространенным способом классификации. Оно применяется для разделения частиц размерами от сотен миллиметров до долей миллиметра. Гидравлической и воздушной классификацией разделяются частицы размерами 2-3 мм.

Грохочение (просеивание, рассев) заключается в том, что сыпучий материал разделяется на фракции просеиванием его через грохоты (сита) с определенным размером отверстий  $d$ . Частицы, размеры которых меньше  $d$ , проходят через отверстия и обозначаются  $-d$ , а крупные остаются на сите и обозначаются  $+d$ . Для грохочения на рассеивающих устройствах (грохотах) применяют: 1) металлические и другие сита; 2) решета из металлических листов со штампованными отверстиями; 3) решетки из параллельных стержней – колосники.

Сита изготавливают с квадратными или прямоугольными отверстиями, имеющими размеры от 100 до 0,04 мм. В соответствии с ГОСТ 3584-73 сита обозначаются номерами, соответствующими размеру стороны отверстия сита в свету, выраженному в миллиметрах или микронах. Так, например, сито № 5 имеет квадратные отверстия с длиной стороны 5 мм.

Решета изготавливают из металлических листов толщиной 2-12 мм, в которых штампуют круглые или продолговатые отверстия размерами 5-10 мм. Чтобы отверстия не забивались их выполняют расширяющимися книзу.

Колосники представляют собой стержни обычно трапецеидального сечения, что также облегчает проход частиц через расширяющиеся зазоры между колосниками.

В результате грохочения получают два продукта: куски (частицы) материала, прошедшего через рассеивающее устройство – отсев или нижний продукт и куски (частицы), не прошедшие через рассеивающее устройство – отход или верхний продукт.

Эффективность грохочения обычно характеризуется отношением продукта, прошедшего через сита, к количеству сыпучего материала того же класса в исходном материале.

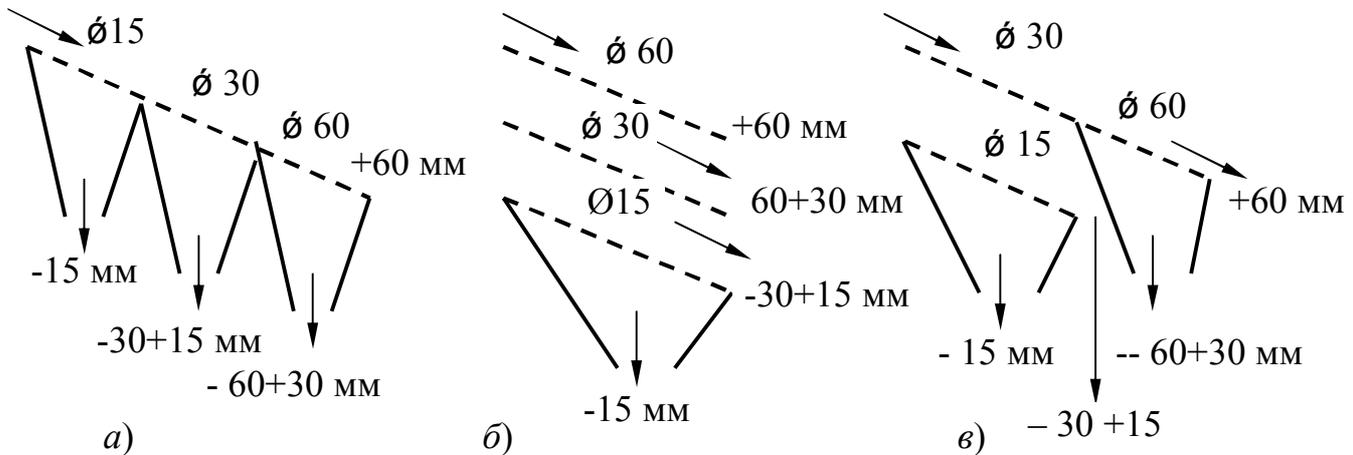
Грохочение производится через одно сито (решето, колосники) или последовательно через несколько сит – многократное грохочение. Многократное грохочение выполняется тремя способами:

1) от мелкого к крупному – через сита, расположенные в одной плоскости, размеры отверстий которых увеличиваются от предыдущего сита к последующему (схема *a*);

2) от крупного к мелкому – через сита, расположенные одно над дру-

гим, размеры отверстий которых уменьшаются от верхнего сита в нижнем (схема б);

3) комбинированным способом (схема в).



Достоинствами грохочения по 1 способу: удобство смены сит и наблюдения за их состоянием, небольшая высота грохота, удобство распределения отдельных фракций по сборникам. Недостатки этого способа: повышенная длина грохота, пониженная эффективность разделения, т. к. отверстия мелких сит перекрываются крупными кусками, перегрузка и повышенный износ мелких сит.

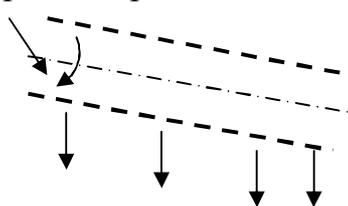
Достоинства 2 способа: лучшее качество грохочения, т. к. в первую очередь отсеиваются крупные куски, меньший износ сит. Недостатки: сложность ремонта и смены сит, большая высота грохота, неудобный отвод готовых продуктов.

Недостатки первых двух способов устраняются при грохочении комбинированным способом.

Устройство грохотов. Грохоты разделяются на неподвижные и подвижные. По форме просеивающей поверхности различают плоские и цилиндрические (барабанные) грохоты. По расположению различают горизонтальные и наклонные грохоты.

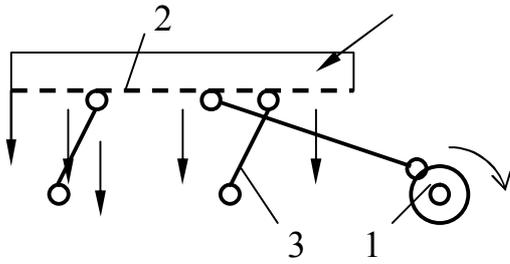
Роликовый грохот представляет ряд параллельно расположенных валов с посаженными на них роликами или дисками, которые вращаются в одном направлении. Рассеиваемый материал движется по роликам и нижний продукт проваливается в зазоры между роликами. При движении по роликам материал непрерывно встряхивается, что повышает эффективность разделения. Основной недостаток – повышенный износ дисков.

Барабанный грохот (цилиндрический, конический или многогранный) открыт с торцов наклонен к горизонту на угол 4 - 7°.



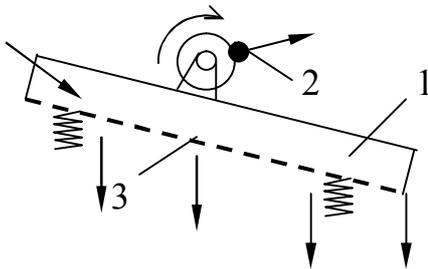
Отверстия в барабане увеличиваются по ходу движения материала (грохочение от мелкого к крупному). Окружная скорость барабана порядка 1 м/с. Достоинства: простота конструкции и равномерность работы. Недостатки: громоздкость, малая удельная производительность, низкая эффективность. Применяются редко.

Призматические барабанные грохоты называются буратами.



вращения вала.

Достоинства: бóльшие, чем у барабанных грохотов производительность и эффективность, компактность и удобство обслуживания, незначительное крошение материала. Основные недостатки: неуравновешенность конструкции, быстрый выход из строя опорных стоек грохота.



Достоинства: высокая производительность и эффективность грохочения, меньшая вероятность забивки отверстий сит по сравнению с грохотами других типов, пригодность для крупного и мелкого грохочения, компактность и легкость смены сит, относительно небольшой расход энергии.

Достоинства: высокая производительность и эффективность грохочения, меньшая вероятность забивки отверстий сит по сравнению с грохотами других типов, пригодность для крупного и мелкого грохочения, компактность и легкость смены сит, относительно небольшой расход энергии.

Гидравлической классификацией называется процесс разделения неоднородного по крупности твердого материала на классы в жидкости.

Спиральный классификатор представляет собой наклонное под углом 12-15° корыто 1 полуцилиндрического типа, внутри которого вращается одна или несколько спиралей 2, частично погруженных в жидкость и транспортирующих пески в верхнюю часть аппарата для выгрузки. Слив удаляется из нижней части аппарата через высокий порог 3.

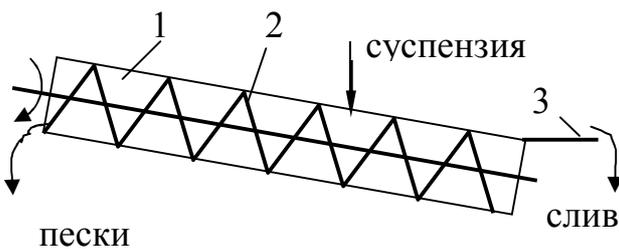
В речных классификаторах транспортирование песков в корыте коробчатого сечения осуществляется скребками, совершающими возвратно-поступательное движение. Периодически опускаясь на дно короба, скребки сдвигают осевшие пески вверх, после чего поднимаются над дном и приподнятыми перемещаются в обратном направлении, не задевая осевших песков.

Общим недостатком гидравлических классификаторов является низкий к.п.д., поскольку пески содержат большое количество тонкого материала (до 20% материала класса – 75 мкм).

Просеивающая поверхность качающихся грохотов совершает принудительные колебания с помощью эксцентрика 1, соединенного с корпусом 2, который закреплен на шарнирных или жестких стойках 3. Движение материала в этом грохоте определяется эксцентриситетом и скоростью

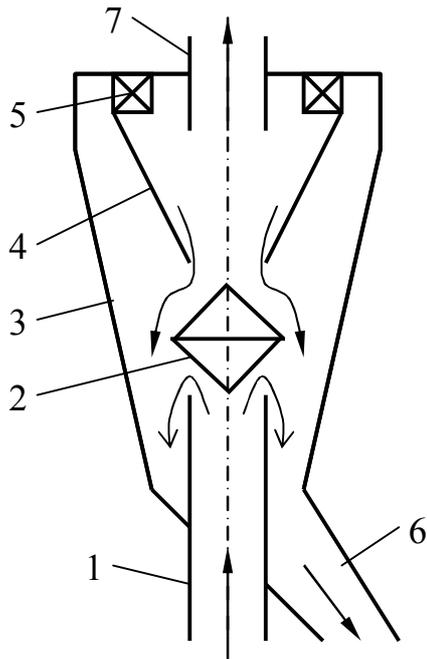
Вибрационные грохоты получили широкое применение. В зависимости от принципа работы они делятся на инерционные и электромагнитные. Вибрация корпуса 1 происходит из-за неуравновешенности масс вращающихся дебалансов 2. Сортируемый материал непрерывно подбрасывается на сите 3, при этом мелкие куски проваливаются через отверстия сит, а крупные перемещаются к выгрузочному концу грохота.

12-15° корыто 1 полуцилиндрического типа, внутри которого вращается одна или несколько спиралей 2, частично погруженных в жидкость и транспортирующих пески в верхнюю часть аппарата для выгрузки. Слив удаляется из нижней части аппарата через высокий порог 3.



Высокая производительность и эффективность классификации достигается в центробежных классификаторах, в качестве которых используются гидроциклоны и отстойные центрифуги со шнековой выгрузкой.

В воздушных сепараторах, работающих в замкнутом или разомкнутом циклах с мельницами сухого помола, классификация твердого материала происходит вследствие различных скоростей осаждения частиц различного размера в воздушной среде в поле действия центробежных сил или сил тяжести. Воздушные сепараторы делятся на воздушно-проходные и воздушно-циркуляционные.



В воздушно-проходной сепараторе поток воздуха с измельченным материалом поступает по патрубку 1 со скоростью 15-20 м/с. Внутри он обходит отбойный конус 2, проходит по кольцевому пространству между корпусом 3 и внутренним конусом 4 и затем через тангенциальные лопатки завихрителя 5.

Выделение крупной фракции происходит сначала на выходе из патрубка 1 при резком снижении скорости воздушного потока до 4-6 м/с. Крупные частицы по патрубку 6 возвращаются на доизмельчение. Дальнейшая сепарация выполняется под действием центробежных сил, возникающих при закручивании потока в лопатках завихрителя 5. При этом крупные частицы отбрасываются к внутренней стенке конуса 4, попадают на отбойный конус 2 и удаляются через патрубок 6, предварительно подвергаясь дополнительной классификации в воздушном потоке кольцевого пространства. Тонкая фракция вместе с воздухом отводится через патрубок 7 и подается в аппарат очистки воздуха, например, циклон, в котором твердые частицы улавливаются, а воздух возвращается в мельницу при замкнутом цикле или удаляется в атмосферу.

В сепараторе с неподвижными лопатками возможно разделение материала на границе 150-200 мкм. Эффективность сепарации можно регулировать изменением скорости воздуха и положения лопаток завихрителя. Более тонкое разделение по границе 30-60 мкм достигается в сепараторах с принудительным вращением лопаток завихрителя от отдельного привода.

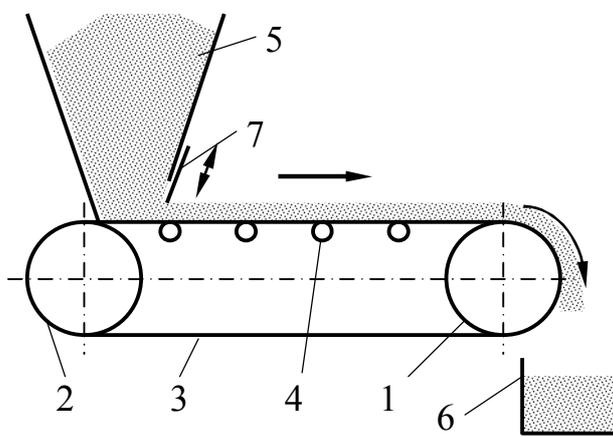
Воздушно-циркуляционные сепараторы отличаются от воздушно-проходных тем, что воздушный поток циркулирует внутри аппарата и не выходит наружу. Выполняя одновременно функции классификатора, вентилятора и циклона, воздушно-циркуляционные сепараторы по сравнению с воздушно-проходными более компактны и требуют меньших затрат энергии. Как те, так и другие разнообразны по конструктивному оформлению, производительности и применяемым режимным параметрам.

## 8. Питатели и дозаторы

Питатели применяют для равномерной или регулируемой подачи насыпных и штучных грузов из бункеров в дозаторы, транспортирующие машины и другое технологическое оборудование. Регулирование производительности питателей выполняется либо изменением выходного отверстия бункера, либо изменением рабочих параметров питателя, например, скорости потока груза, числа или амплитуды качаний рабочего элемента и др.

Большая группа питателей представляет собой разновидности конвейеров – ленточных, пластинчатых, винтовых, качающихся, вибрационных. Питатели отличаются от конвейеров меньшей длиной, относительно повышенной мощностью двигателя и прочностью, т. к. они могут испытывать давление груза под отверстием бункера, перемещают груз более толстым слоем.

Другая группа питателей – барабанные, дисковые, цепные и лопастные – не имеют прототипов среди конвейеров и могут служить только для выдачи груза непосредственно из отверстия бункера.



Ленточные питатели могут быть горизонтальными или наклонными с движением вверх или вниз. Они состоят из ведущего 1 и ведомого 2 барабанов, между которыми натянута бесконечная лента 3. Ведущий барабан соединен с приводом. Верхняя часть ленты поддерживается роликоопорами 4. Над ведомым барабаном установлен бункер 5 с сыпучим материалом, под ведущим барабаном – сборник 6. Задвижка 7 предназначена

для изменения высоты слоя материала на ленте, т. е. для регулирования производительности. Расход может регулироваться также изменением скорости движения ленты.

Производительность ленточных питателей равна

$$Q = F v \rho,$$

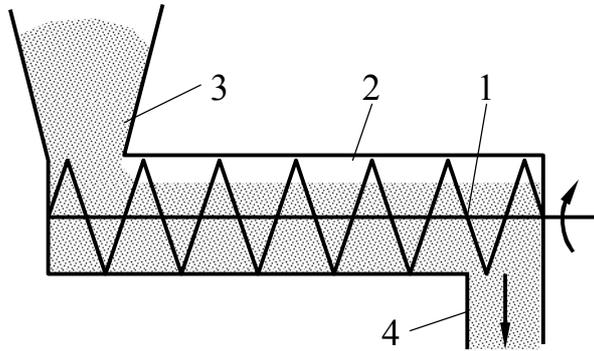
где  $F$  – поперечное сечение потока,  $\text{м}^2$ ;  $v$  – скорость движения потока,  $\text{м/с}$ ;  $\rho$  – плотность потока,  $\text{кг/м}^3$ .

Ленточные питатели применяют главным образом при перемещении зернистых, мелко- и среднекусковых грузов. Иногда питатели снабжают весовым устройством, по показателю которого автоматически регулируется скорость ленты, обеспечивая заданную производительность. Скорость движения ленты 0,1 – 0,5  $\text{м/с}$ .

Достоинства ленточных питателей – надежность действия, небольшой вес и широкий диапазон регулирования производительности.

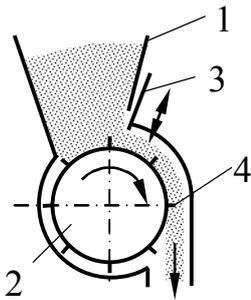
У пластинчатых питателей вместо резиновой ленты установлены пластины, соединенные петлями, напоминающие звенья цепей. Они характеризуются высокой прочностью и могут применяться при перемещении тяжелых грузов. Однако они имеют большой вес и высокую стоимость.

Шнековый питатель состоит из шнека 1, который вращается в закрытом желобе или трубе 2, и привода. Шнек расположен по оси желоба. Силой, препятствующей вращению груза вместе со шнеком, является вес груза, а также его трение о стенки желоба. Для облегчения движения груза шнек де-

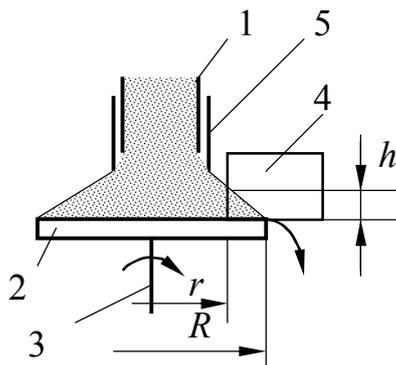


лают с малым шагом, а иногда двухзаходным. Коэффициент заполнения желоба (трубы) принимается высоким  $\varphi = 0,8-0,9$ . Шнековые питатели применяют при пылевидных, зернистых и мелкокусковых насыпных грузах.

Барабанные питатели конструктивно наиболее просты. Их применяют с гладкой поверхностью барабана при хорошо сыпучих и мелкокусковых грузах и с ребристой поверхностью барабана – при крупнокусковых грузах. Под бункером 1 расположен вращающийся барабан 2.



Производительность питателя пропорциональна сечению слоя груза, которое регулируется задвижкой 3, и скорости движения поверхности барабана. Для подачи крупнокусковых грузов на барабане приваривают ребра 4, образующие секторы, которые заполняются материалом. Для повышения износостойкости барабан, ребра и некоторые другие части питателя покрываются слоем резины. Обрезиниваются также другие поверхности, соприкасающиеся с абразивным грузом.



Тарельчатый (дисковый) питатель состоит из трубы 1, соединенной с бункером, и вращающейся тарелки (диска) 2, закрепленной на вертикальном валу 3. Материал, поступающий на тарелку, сбрасывается в лоток ножом 4. Количество подаваемого материала за один оборот тарелки регулируется изменением угла установки ножа 4 или изменением положения обоймы 5. В первом случае изменяется объем кольца материала, равный объему усеченного конуса за вычетом объема цилиндра, определяемого положением и диаметром обоймы 5. Во втором случае изменяется общий объем конуса материала на тарелке.

Производительность тарельчатого питателя равна

$$V = \left[ \frac{\pi h}{3} (R^2 + r^2 + Rr) - \pi r^2 h \right] n,$$

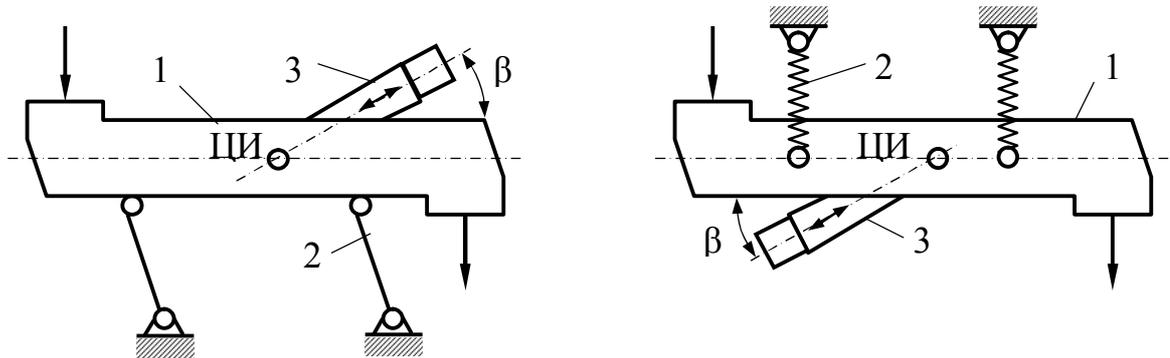
где  $h$  – высота кольца материала, срезаемого ножом, м;  $R$  – наружный радиус основания кольца материала, м;  $r$  – радиус верхней кромки кольца материала, м;  $n$  – частота вращения тарелки,  $\text{с}^{-1}$ .

Для нормальной работы питателя центробежная сила не должна отбрасывать материал с тарелки. Критическая частота вращения тарелки

$$n < 0,5 \sqrt{\frac{f}{R}},$$

где  $f$  – коэффициент трения материала о тарелку.

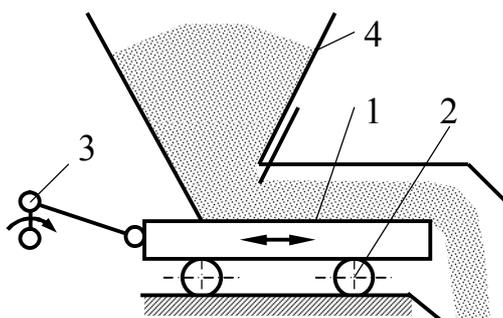
Вибрационный питатель состоит из грузонесущего элемента (трубы или желоба) 1, свободно опираемого или подвешенного на упругих связях–амортизаторах 2 к неподжным опорным конструкциям. Питатель получает



направленные колебания от вибратора 3, например, маятникового дебалансного вибратора. Привод может быть расположен сверху и внизу грузонесущего элемента.

Для обеспечения перемещения груза в заданном направлении привод устанавливают таким образом, чтобы направление возмущающей силы составляло угол  $\beta = 20-30^\circ$  с осью питателя. Кроме того, направление возмущающей силы должно совпадать с центром инерции (ЦИ) всей колебательной системы.

Вибрационные питатели одновременно могут быть служить грохотами, что используется, например, для отсева мелкой фракции. Одним из достоинств вибрационного питателя является возможность при подаче груза на ленту расположить переднюю грань лотка на незначительной высоте от поверхности ленты, что предохраняет поверхность ленты от повреждения падающими кусками груза.



Кареточный питатель представляет собой горизонтальную или наклонную (с наклоном вниз) каретку 1 с подвижными или неподжными бортами, которая опирается на роликовые опоры 2. Она может быть подвешена на тягах.

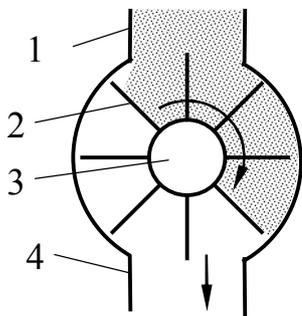
Каретка совершает возвратно-поступательные движения от кривошипно-шатунного механизма 3. При движе-

нии каретки вправо находящийся на ней груз увлекается в сторону движения

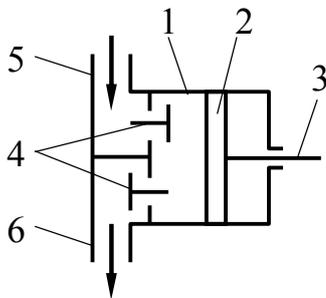
за счет трения. При этом из бункера 4 в образовавшееся под ним пространство поступает некоторое количество груза. При обратном ходе, вследствие подпора, образуемого задней неподвижной стенкой бункера, груз не движется назад и частично сыпается через переднюю грань каретки.

Производительность кареточного питателя регулируется перестановкой задвижки 5 и изменением хода стола. Кареточные питатели применяют для кусковых грузов малой, средней и большой величины при широком диапазоне производительности. Однако они не применимы для налипающих грузов. Они просты по конструкции и прочны.

Дозаторы – устройства для циклического отмеривания заданного количества (дозы) сыпучих или жидких веществ. Дозирование может производиться по объему или по весу. Дозирование по объему возможно с помощью мерного сосуда, плунжера или ячеечного барабана. Различают дозаторы периодического или непрерывного действия, с ручным или автоматическим управлением, одно- и многокомпонентные. Примером устройства для объемного дозирования может быть уже упоминавшийся барабанный дозатор.



Питающий лоток 1 присоединяется к бункеру. Ребра 2 имеют большую длину и образуют секторы. Объем секторов равен объему дозы. При вращении барабана 3 в выходной лоток 4 из секторов периодически высыпается отмеренные дозы груза. Периодичность подачи груза регулируется частотой вращения барабана, длиной и числом секторов.



Дозирование по объему жидкостей может осуществляться с помощью поршневых, плунжерных, мембранных насосов и других устройств. Например, в поршневом насосе, состоящем из цилиндра 1, поршня 2, штока 3 и клапанов 4, дозируемая жидкость подается по патрубку 5 при движении поршня вправо. При последующем движении поршня влево отмеренный объем жидкости выводится через патрубок 6. При стабильной плотности жидкости поршневым насосом дозируется постоянная масса жидкости.

Автоматическое дозирование по весу производится также с помощью сосуда, установленного на весах, которые обеспечивают автоматическое воздействие на бункерный затвор или питатель в момент, когда вес насыпного груза в сосуде достигает заданной величины. Автоматически производится также открывание и закрывание выпускного отверстия сосуда, а затем следующее открывание затвора бункера или включение питателя.

Применяются также способы автоматического отмеривания определенного количества груза с помощью конвейерных весов, по показанию которых производится выключение конвейера или питателя после пропуска ими определенного количества груза.

Расчет питателей и транспортеров изложен в книге Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины. – М.: Машиностроение, 1968. 504 с.

## 9. Газоочистное и пылеулавливающее оборудование

Фильтры для очистки газов от взвешенных частиц рассмотрены в лекции 5.

Промышленная очистка газов от взвешенных веществ проводится для уменьшения загрязненности воздуха, улавливания из газа ценных компонентов или для удаления из него вредных примесей, ухудшающих показатели газа.

Различают следующие способы очистки газов:

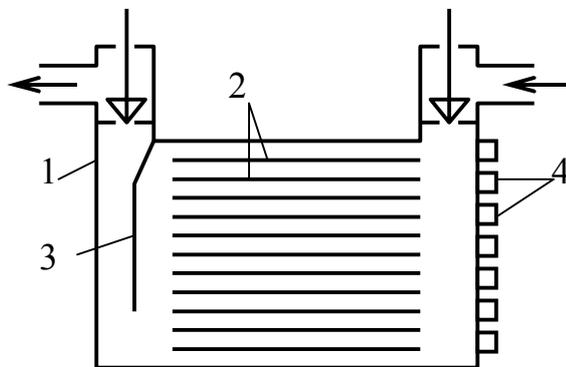
- 1) осаждение под действием сил тяжести (гравитационная очистка);
- 2) осаждение под действием инерционных, в частности, центробежных сил;
- 3) фильтрование;
- 4) мокрая очистка;
- 5) осаждение под действием электростатических сил.

Степень очистки газа определяется следующим образом

$$\eta = \frac{G_1 - G_2}{G_1} 100\% = \frac{V_1 x_1 - V_2 x_2}{V_1 x_1} 100\%,$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – количество загрязняющих веществ в исходном и очищенном газе, кг/м<sup>3</sup>;  $V_1$  и  $V_2$  – объемный расход исходного и очищенного газа, приведенного к нормальным условиям, м<sup>3</sup>/с;  $x_1$  и  $x_2$  – концентрация взвешенных частиц в исходном и очищенном газе, кг/м<sup>3</sup>.

Очистку газов под действием сил тяжести производят в пылеосадительных камерах. Запыленный газ поступает в пылеосадительную камеру 1,



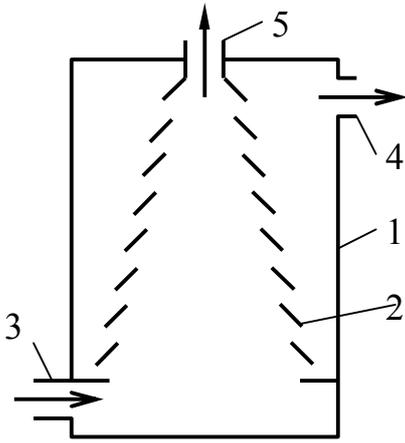
внутри которой установлены горизонтальные перегородки (полки) 2. Частицы взвешенных веществ оседают на полках при движении газа между полками, расстояние между которыми обычно принимают 0,1-0,4 м. При снижении расстояния между полками уменьшается путь осаждения частиц пыли и время осаждения. Наличие полок увеличивает эффективную поверхность осаждения частиц.

Газ после полок 2 огибает вертикальную отражательную перегородку 3

и удаляется из камеры. При этом из газа отделяются под действием сил инерции некоторое количество пыли. Кроме того отражательная перегородка способствует более равномерному распределению газа между полками. Уловленная пыль удаляется из камеры периодически вручную скребками через люки 4.

Камера предназначена для грубой очистки (50-100 мкм). Степень очистки не превышает 40-50 %. Поэтому их используют в качестве первой ступени при очистке сильно запыленных газов.

Кроме пылеосадительных камер часто применяют жалюзийные пылеуловители инерционного типа с большим количеством щелей (жалюзей).



штуцеру 3 и частицы пыли, ударяясь о жалюзи 2, отбрасываются в поток газа. Очищенный газ проходит между жалюзьями и удаляются из аппарата через штуцер 4. Небольшая часть газа ( $\approx 10\%$ ), в которой концентрируется основная масса частиц загрязнений, выводится через штуцер 5 на дополнительную очистку, например, в циклон.

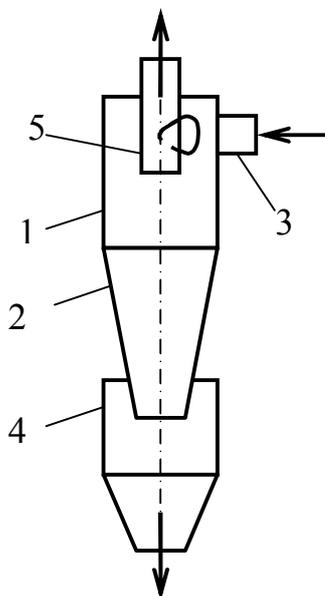
Жалюзийный пылеуловитель может устанавливаться в вертикальных или горизонтальных газопроводах. Скорость газа на входе в аппарат 10-15 м/с. Гидравлическое сопротивление 100-400 Па.

Инерционные пылеуловители просты по устройству, компактны, не имеют движущихся частей. Однако в них достигается невысокая степень очистки (до 60%), размер улавливаемых частиц более 25 мкм. Они имеют сравнительно высокое гидравлическое сопротивление, возможны износ и забивание жалюзийных перегородок.

Эффективность разделения неоднородных систем в поле действия центробежных сил характеризуется критерием Фруда

$$Fr = \frac{w^2}{rg},$$

где  $w$  – скорость потока, м/с;  $r$  – радиус аппарата, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.



Разделение систем газ – твердое тело под действием центробежной силы производят в циклонах. Циклон имеет цилиндрический корпус 1 с коническим дном 2. Запыленный газ вводится в циклон через патрубок 3 со значительной скоростью 20-25 м/с. При этом прямолинейное движение газового потока преобразуется во вращательное. Поток запыленного газа движется в циклоне вниз по спирали, частицы пыли, как более тяжелые, прижимаются к внутренней стенке циклона, сползают вниз и через пылесборник 4 выводятся наружу. Очищенный газ внизу циклона меняет направление движения на противоположное, закручивается по меньшему радиусу и выводится из циклона через патрубок 5.

Гидравлическое сопротивление циклона можно представить как долю скоростного напора потока

$$\Delta p = \xi \frac{\rho w_{\phi}^2}{2},$$

где  $w_{\phi}$  – фиктивная скорость газа, отнесенная к полному поперечному сечению, м/с.

$$w_{\phi} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\xi\rho}}.$$

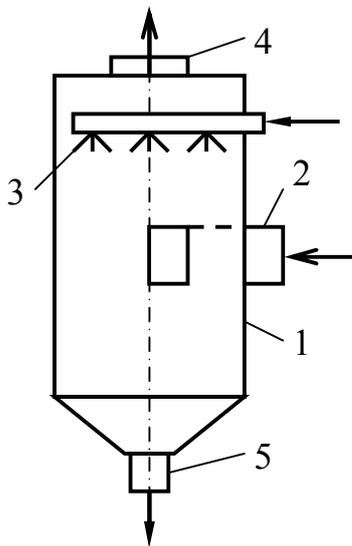
Значения  $\xi$  и  $\Delta p/\rho$  имеются в справочной литературе для циклонов различных конструкций. Затем определяют диаметр цилиндрической части циклона

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi w_{\phi}}}.$$

Остальные размеры циклона стандартизированы в зависимости от  $D$ .

Отличительной особенностью циклонов НИИОГАЗ является наклонный входной патрубок 3 с углом наклона к горизонту  $24^\circ$  (ЦН-24),  $15^\circ$  (ЦН-15) и  $11^\circ$  (ЦН-11). (Эффективность 70-90%,  $\delta \geq 10$  мкм).

В промышленности применяют одиночные циклоны с диаметром до 1 м. Если требуется большая производительность циклона по газу, то применяют несколько параллельных циклонов или батарейные циклоны, состоящие из параллельно работающих циклонных элементов диаметром до 250 мм.

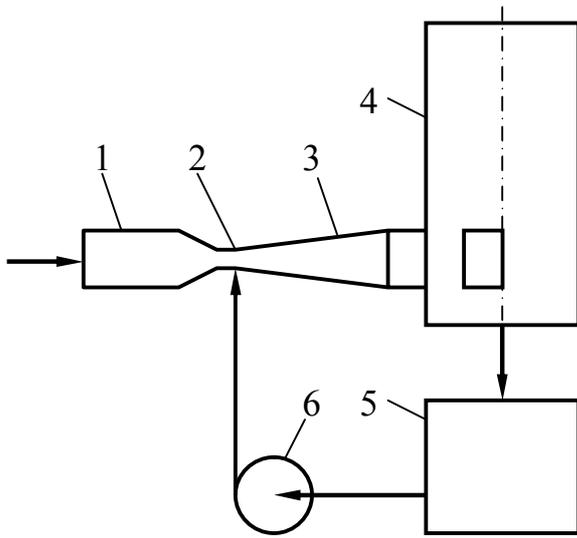


Для тонкой очистки газов от пыли применяют мокрую очистку – промывку газов водой или другой жидкостью. Взаимодействие между газом и жидкостью происходит в мокрых пылеуловителях или на поверхности жидкой пленки, стекающей по вертикальной или наклонной плоскости (пленочные или насадочные скрубберы), либо на поверхности капель (полые скрубберы, скрубберы Вентури).

Простейшим аппаратом для мокрой очистки и одновременного охлаждения газов является полый скруббер прямоугольного или круглого сечения. Запыленный газ подается через патрубок 2 и движется в скруббере 1 со скоростью 0,8-1,5 м/с во избежание брызгоуноса и орошаются водой, подаваемой через форсунки 3. Все сечение скруббера орошается жидкостью. Очищенный газ отводится по патрубку 4, а уловленная пыль в виде суспензии – по патрубку 5.

Процесс мокрой очистки может быть интенсифицирован при проведении его в поле центробежных сил. Такую очистку можно проводить в циклонах, стенки которого смачиваются непрерывно стекающей жидкостью, или в центробежных скрубберах.

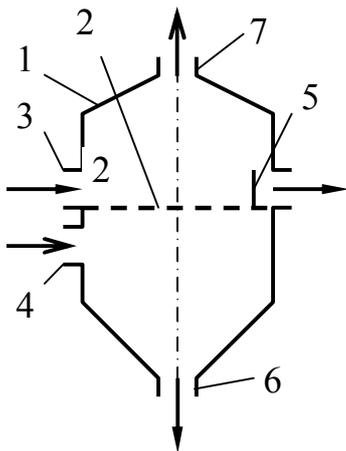
Для тонкой очистки газов от высокодисперсной пыли применяют струй-



в котором скорость снижается до 4-5 м/с. Капли под действием центробежной силы отделяются от газа и вместе со шламом удаляются в отстойник 5. Из отстойника осветленная вода насосом 6 возвращается в горловину 2 скруббера.

В скруббере Вентури эффективно улавливаются тонкие частицы диаметром порядка 1 мкм или туман, образующийся в производстве серной кислоты (0,2-1,2 мкм). При этом возможно удаление из газа до 99 % загрязнений. Недостатком скруббера Вентури является высокое гидравлическое сопротивление (1,5-7,5 кПа).

Барботажные (пенные) пылеуловители. Для очистки сильно запыленных газов используют барботажные пылеуловители, в которых жидкость, которая взаимодействует с газом, находится в состоянии подвижной пены, что обеспечивает высокую поверхность контакта между фазами и соответственно высокую степень очистки газа от пыли.



Барботажный пылеуловитель представляет собой камеру 1 с размещенной внутри перфорированной тарелкой 2. Промывная жидкость подается на тарелку через штуцер 3, загрязненный газ вводится в аппарат через штуцер 4. Газ проходит через отверстия тарелки 2, барботирует через слой жидкости образует с ней слой подвижной пены. В слое пены пыль эффективно поглощается жидкостью и ее основная часть ( $\approx 80\%$ ) удаляется через регулируемый порог 5. Оставшаяся часть жидкости ( $\approx 20\%$ ) сливается через отверстия в тарелке и улавливает в пространстве под тарелкой более крупные частицы пыли. Образующаяся при этом суспензия удаляется через сливной штуцер 6.

В таких аппаратах устанавливают несколько перфорированных тарелок, причем их число зависит от требуемой степени очистки газа. Степень улавливания пыли в барботажных аппаратах часто превышает 95-99 % при относительно низких капитальных и эксплуатационных расходах.

## 10. Разделение неоднородных систем. Фильтры для газов

При разделении фильтрованием запыленные газы проходят через пористые перегородки. При этом через перегородки проходят очищенные газы, а твердые частицы остаются на перегородках.

Фильтры для газов различаются видами фильтровальных перегородок:

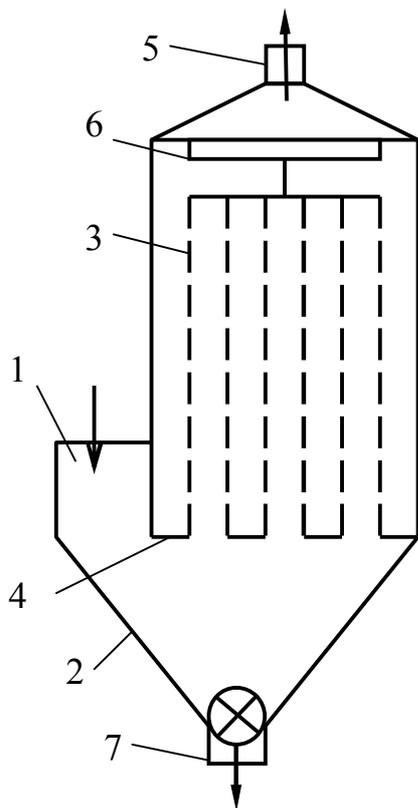
1) с гибкими пористыми перегородками из природных, синтетических и минеральных волокон (тканевые материалы), нетканые волокнистые материалы (войлок, картон), металлоткани; (ВТУЛП, трикотаж);

2) с полужесткими пористыми перегородками (слои из волокон, стружки, сетки);

3) с жесткими пористыми перегородками из зернистых материалов (пористые керамика, пластмассы, спрессованные или спеченные порошки металлов и др.);

4) с зернистыми слоями из кокса, гравия, кварцевого песка и др.

Выбор пористой перегородки обусловлен химическими свойствами фильтруемого газа, его температурой, гидравлическим сопротивлением фильтровальной перегородки и размерами взвешенных в газе частиц.



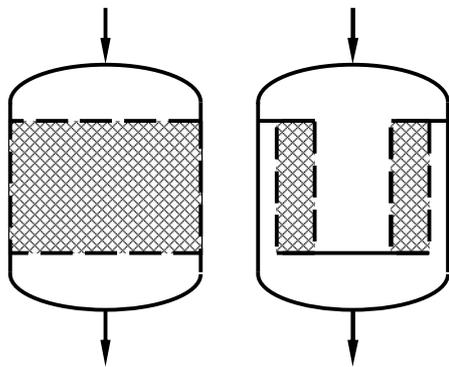
Фильтры с гибкими пористыми перегородками. К числу наиболее широко применяемых фильтров относятся рукавные фильтры. Запыленный газ нагнетается вентилятором через входной газопровод 1 в камеру 2, затем проходит через рукава 3 (обычно  $d = 200$  мм и  $L = 3-8$  м), нижние концы которых закреплены на патрубках распределительной решетки 4. Пыль осаждается в порах и на поверхности ткани, а очищенный газ выходит через патрубок 5. Уловленная пыль выводится через патрубок 7. При помощи распределительного механизма 6 отдельные секции фильтра через определенные промежутки времени отключаются для очистки фильтровальной ткани от пыли встряхиванием сжатым воздухом давлением или механическим путем. После окончания очистки секция переключается в рабочее положение, а следующая секция на очистку. Переключение секций в современных фильтрах выполняется автоматически.

Гидравлическое сопротивление фильтра в среднем 1 кПа и возрастает при накоплении пыли на рукаве до 2-2,5 кПа. Скорость фильтрования в зависимости от свойств материала рукава и улавливаемой пыли изменяется в пределах  $25-60 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ ч}$ . Для увеличения скорости фильтрования применяется непрерывная регенерация фильтровальной ткани, которая выполняется непосредственно во время работы рукавного фильтра, т. е. во время фильтрования, без прекращения подачи газа путем продувки рукавов струей сжатого

воздуха давлением 6-10 кПа. Благодаря такой регенерации можно достичь скорости фильтрования  $180-300 \text{ м}^3/\text{м}^2 \text{ ч}$ .

Достоинствами рукавных фильтров является высокая степень обеспыливания газов (до  $5 \text{ мг}/\text{м}^3$ ), степень очистки газов от тонкодисперсной пыли достигает 98-99 %, а недостатками – большой износ рукавов, а также узкий диапазон рабочих температур: верхний предел ограничен свойствами ткани, нижний – точкой росы (во избежание увлажнения и замазывания ткани).

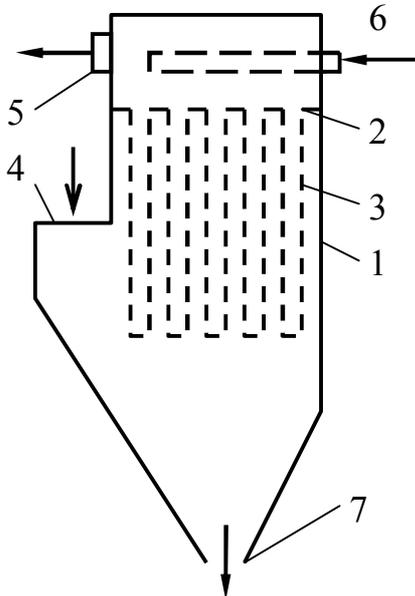
Рукава изготавливают из натуральных или химических волокон органического или неорганического происхождения: хлопок, лен с температурой до  $80^\circ\text{C}$ , шерсть с температурой до  $110^\circ\text{C}$ , полиамидных (капрон), полиэфирных (лавсан) волокон с температурой до  $140^\circ\text{C}$ , фторопласта с температурой до  $270^\circ\text{C}$ , реже из стекловолокна с температурой до  $400^\circ\text{C}$ , кремнеземного волокна с температурой до  $1000^\circ\text{C}$ , плохо работающих на изгиб.



Фильтры с полужесткими пористыми перегородками обычно состоят из ячеек-кассет, в которых между сетками зажат слой стекловолокна, шлаковой ваты, металлической стружки и др., смоченный специальным (висциновым) маслом для лучшего улавливания пыли. Кассеты обычно собирают в секции, а секции устанавливают перпендикулярно к газовому потоку. Возможна

периодическая регенерация фильтра путем промывки или продувки. Такие фильтры применяют для очистки относительно мало запыленных газов, например, вентиляционного воздуха с содержанием пыли  $1-5 \text{ мг}/\text{м}^3$ .

Для очень тонкой очистки газов используют фильтры с перегородками, в которых в качестве фильтрующего материала применяют ультратонкие полимерные волокна, получивших название ФП (фильтры Петрянова). Эти волокна изготавливают из перхлорвинила, полиакрилатов, эфиров целлюлозы и др., обладающих высокой химической стойкостью, механической прочностью и термостойкостью.

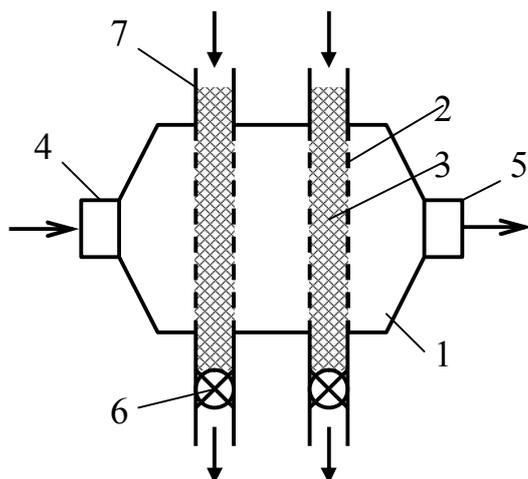


Для сверхтонкой очистки газов, требуемой в некоторых химических производствах, используют фильтры с жесткими перегородками из керамических, металлокерамических и пластмассовых пористых материалов или мелкоячеистых металлических сеток и перфорированных листов.

Принцип действия такого фильтра состоит в следующем. В корпусе 1 фильтра на решетке 2 закреплены открытые сверху металлокерамические гильзы 3. Запыленный газ поступает через входной штуцер 4, проходит через стенки гильз 3 и очищается от пыли. Очищенный газ удаляется из аппарата по штуцеру 5. Очистка фильтрующих элементов от осевшей на них пыли производится

периодически обратной продувкой сжатым воздухом, поступающим по коллектору 6. Пыль собирается в бункере 7 и удаляется из фильтра. В металлокерамических фильтрах можно отделять твердые частицы размером более 0,5 мкм.

Гильзы из металлокерамических фильтров изготавливают из гранул, стружки, порошка металла путем прессования или спекания, проката или литья. Они более прочные и менее хрупкие, чем керамические, отличаются высокой механической прочностью и химической стойкостью, хорошо противостоят резким температурным изменениям. Применяются для очистки химических агрессивных горячих газов.



#### Фильтры с зернистыми слоями.

Газы в таких фильтрах очищаются при прохождении через свободно насыпанные слои зернистого материала – мелко раздробленного шлака, кокса, кварцевого песка, гравия и др. Фильтрующие слои могут быть расположены горизонтально, вертикально или наклонно. При этом фильтрующий материал заключен в секции, состоящие из сеток, перфорированных листов и др.

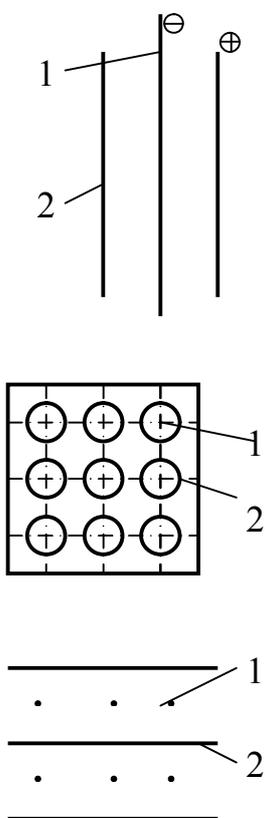
В корпусе 1 фильтра размещены фильтровальные перегородки 2, внутри которых непрерывно движется сверху вниз фильтрующий материал 3, например, песок. Загрязненный газ поступает по штуцеру 4, проходит через слои фильтрующего материала и очищенный удаляется из аппарата по штуцеру 5. Запыленный фильтрующий материал выводится через затвор 6, очищается от уловленной пыли, например, промывкой водой и снова подается в фильтр по патрубкам 7.

Фильтры с зернистым слоем фильтрующего материала используют для тонкой очистки газов, например, для очистки сжатого воздуха от масла, улавливания сажи и др.

Электрическая очистка газов основана на ионизации молекул газа электрическим разрядом. При напряженности электрического поля, достаточной для полной ионизации, между электродами возникает коронный разряд, сопровождающийся голубовато-фиолетовым свечением и характерным потрескиванием. Отрицательный электрод, вокруг которого возникает «корона», называется коронирующим, а положительный электрод – осадительным.

Под действием электрического поля положительные ионы движутся к коронирующему электроду и нейтрализуются на нем, а отрицательные ионы и свободные электроны перемещаются к осадительному электроду. Встречая на пути пылинки и капельки, находящиеся в газе, они сообщают им свой заряд и увлекают к осадительному электроду. В результате взвешенные в газе частицы оседают на этом электроде. Основная масса взвешенных частиц приобретает отрицательный заряд и только небольшое количество частиц – положительный и, соответственно, оседает на коронирующем электроде.

Электрофильтры работают только на постоянном токе, т. к. при переменном токе заряженные частицы, испытывают ряд импульсов, направленных то в одну, то в другую сторону и могут быть вынесены потоком газа из аппарата раньше, чем они успевают достичь поверхности осадительного электрода.



Электрофильтры делятся на сухие и мокрые, вертикальные и горизонтальные. Запыленный газ пропускается через неоднородное электрическое поле, образованное двумя электродами, к которым подведен электрический ток напряжением 35-70 кВ. Катод обычно выполняют в виде проволоки, а анод – в виде трубы диаметром 200-400 мм. У катода имеет место сгущение силовых линий и образуется ионизированный слой газа. Внешним признаком ионизации является свечение слоя газа и образование «короны» у катода. Коронирующие электроды представляют собой проволоки круглого или звездообразного сечения или элементы с иголками. Осадительные электроды изготавливают из стали и других металлов, графита или пластмасс. Поток электронов направляется от катода 1 к аноду 2, по пути сталкивается и оседает на встречных частицах пыли, заряжая их. Частицы, получившие отрицательный заряд, перемещаются к аноду и оседают на нем.

В некоторых случаях для повышения степени очистки секции электрофильтров располагают последовательно по ходу газа и снабжают самостоятельным электрическим питанием. Электрические поля создаются в каждой секции. В зависимости от числа электрических полей эти фильтры называют двупольными и многопольными.

В сухих электрофильтрах пыль удаляется периодически при помощи различных ударных механизмов при встряхивании электродов (механических, электромагнитных). В мокрых электрофильтрах осевшие частицы удаляются периодически или непрерывно путем промывки внутренней поверхности осадительных электродов водой, распыляемой форсунками.

В пластинчатых электрофильтрах легче, чем в трубчатых, удаляется осевшая на электродах пыль и меньше расходуется энергии на единицу длины проводов. Они более компактны, требуют меньшего расхода металла и отличаются простотой монтажа. Вместе с тем трубчатые электрофильтры позволяют получить большую напряженность электрического поля и соответственно допускают большие скорости газа, т. е. более производительны. В них лучше отделяется трудно улавливаемая пыль из газов умеренной влажности.

В электрофильтрах достигается высокая степень очистки – 95-99%, а иногда 99,9%. Скорость газа в трубчатых электродах составляет 0,75-1,5 м/с, а в пластинчатых 0,5-1,0 м/с. Электрофильтры работают в широком диапазоне температур от – 20 до +500°С.

## 11. Фильтры для жидкостей

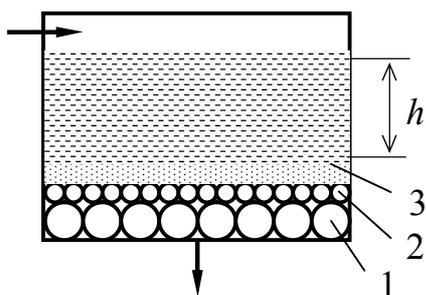
В качестве фильтровальных перегородок используются специальные ткани из волокон растительного (хлопчатобумажные – бельтинг, миткаль и др.), животного (шерсть), минерального (асбест, стекловолокно) происхождения, металлов и из синтетических волокон (капрон, лавсан и др.). Применяют также пористые металлические, керамические и металлокерамические перегородки, слои из гравия, песка. В качестве фильтрующей перегородки можно рассматривать слой образованного на перегородке осадка. Вспомогательные фильтровальные материалы (активные угли, перлит, диатомит, асбест и др.) добавляют к фильтруемой суспензии или намывают тонким слоем перед фильтрованием. Эти материалы увеличивают пористость осадка и снижают его гидравлическое сопротивление.

Поверхностные фильтровальные перегородки характеризуются тем, что твердые частицы суспензии при фильтровании не проникают в поры, а задерживаются на поверхности. Глубинные перегородки, которые используются преимущественно для осветления жидкостей, содержащих частицы в небольшой концентрации, характеризуются тем, что частицы суспензии при разделении проникают в поры и задерживаются там.

По структуре фильтровальные перегородки разделяются на гибкие и негибкие.

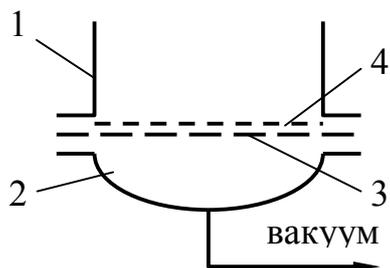
Выбор фильтровальной перегородки обусловлен ее пористостью, химической стойкостью, теплостойкостью, механической прочностью.

В зависимости от характера работы различают фильтры периодического и непрерывного действия. По способу создания давления фильтровальное оборудование делят на фильтры работающие под вакуумом, под гидростатическим и под избыточным давлением.



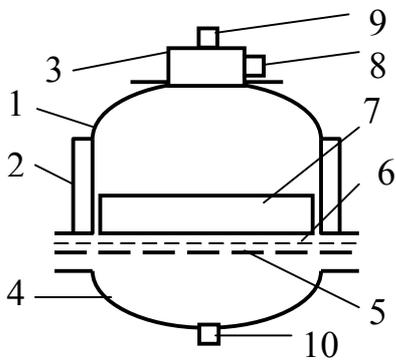
Простейшим фильтром является гравитационный фильтр. Внизу емкости накладываются слой 1 камней, далее насыпается слой 2 гравия и сверху насыпается песок 3. Выше песка наливается вода, подвергаемая фильтрованию. Движущей силой процесса является гидростатический слой воды высотой  $h$ . Вода проходит последовательно все слои сверху вниз и очищается от взвесей. Осадок периодически смывается подачей промывной воды снизу вверх.

Производительность таких фильтров невысокая из-за небольшого перепада давлений, но используемые материалы дешевые, что и обусловило их широкое распространение при подготовке питьевой воды.



Нутч-фильтр представляет собой наиболее простой фильтр периодического действия, работающий под вакуумом или давлением, в котором совпадают направление силы тяжести и движения фильтрата. Он изготавливается прямоугольного или круглого открытого резервуара 1 с плоским или выпуклым дном 2 над которым на не-

котором расстоянии находится ложное дно 3, поддерживающее фильтровальную перегородку 4. Суспензия наливается сверху и под ложным дном создается вакуум, в результате чего жидкая фаза проходит через фильтровальную перегородку и удаляется из аппарата, а твердая фаза накапливается на перегородке. Аппарат прост, но требует ручного удаления осадка.

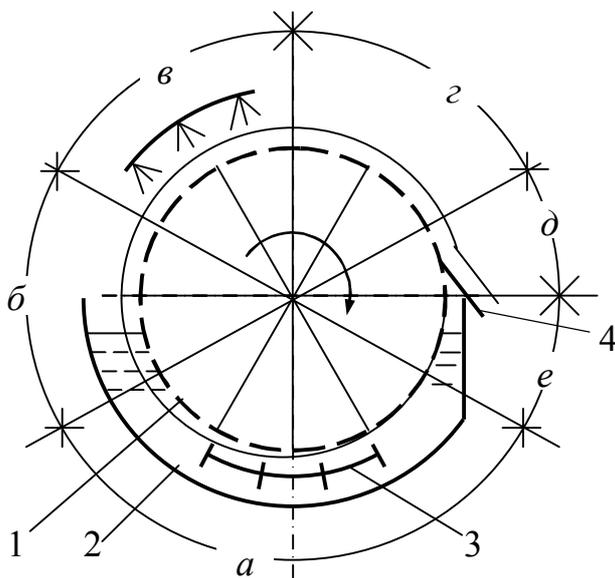


Нутч-фильтр, работающий под давлением не более 0,3 МПа, состоит из корпуса 1 с рубашкой 2 и съемной крышкой 3. Над съемным днищем 4 размещена опорная перегородка 5, на которой закреплена фильтровальная перегородка 6, представляющая собой ткань или слой волокон. В последнем случае над перегородкой помещают защитную сетку. Над фильтровальной перегородкой 6 размещена кольцевая перегородка 7

высотой 150 мм, которая поддерживает осадок во время его выгрузки. Для подачи суспензии и сжатого воздуха предусмотрены штуцеры 8 и 9, для удаления фильтрата – штуцер 10.

В простейшем случае цикл работы нутч-фильтра состоит из следующих операций: наполнение нутча суспензией, разделение суспензии под давлением сжатого газа, промывка осадка, удаление осадка с фильтровальной перегородки, регенерация фильтровальной перегородки.

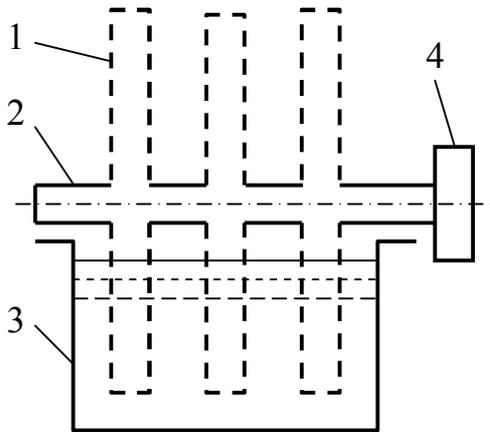
Достоинство нутчей – возможность равномерной и полной промывки осадка. Недостаток – относительно большая занимаемая площадь помещения, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> поверхности фильтрации.



Барабанный фильтр имеет горизонтальный цилиндрический перфорированный барабан 1, который снаружи покрыт фильтровальной тканью и опирается при помощи цапф. Барабан вращается вокруг своей оси и на 30-40 % своей поверхности погружен в суспензию, находящуюся в корыте 2. Для предотвращения осаждения частиц суспензии в корыте предусмотрена мешалка 3. Под фильтровальной тканью создается разрежение и фильтрат проходит через фильтрующую ткань, а на поверхности остается осадок, который срезается ножом 4. При вращении барабана последовательно осуществляются следующие операции: а - фильтрация; б - 1-е обезвоживание; в - промывка осадка; г - 2-е обезвоживание; д - удаление осадка; е - регенерация ткани. Барабан секционирован и режим задается с помощью распределительной головки, закрепленной на одной из цапф.

При вращении барабана последовательно осуществляются следующие операции: а - фильтрация; б - 1-е обезвоживание; в - промывка осадка; г - 2-е обезвоживание; д - удаление осадка; е - регенерация ткани. Барабан секционирован и режим задается с помощью распределительной головки, закрепленной на одной из цапф.

Достоинства: непрерывность действия, удобство обслуживания, благоприятные условия промывки осадка. Недостатки: небольшая поверхность фильтрации (не более  $40 \text{ м}^2$ ), отнесенная к занимаемой фильтром площади, и сравнительно высокая стоимость.

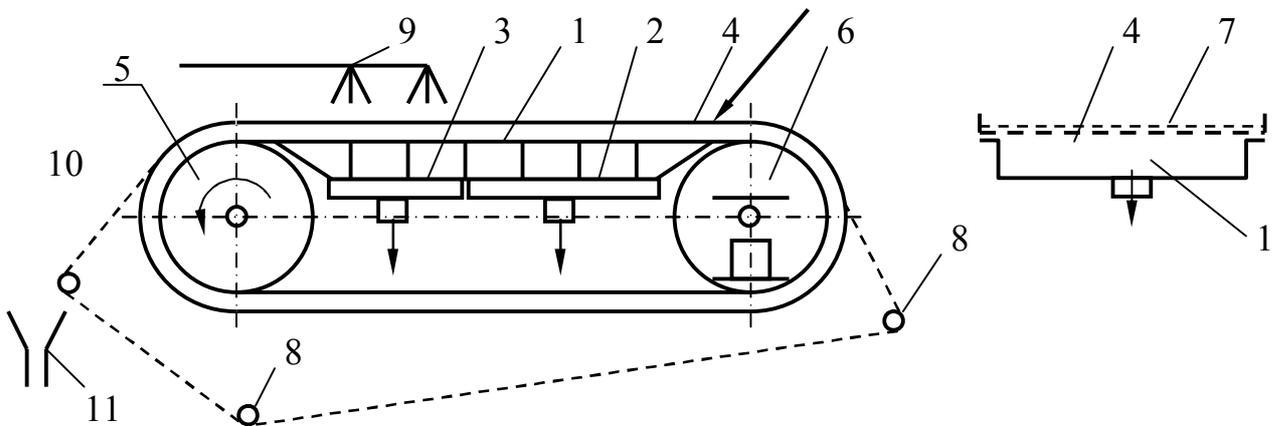


Дисковый вакуум-фильтр отличается от барабанного тем, что его фильтровальная поверхность имеет форму полых перфорированных дисков 1, насаженных на общий полый вал 2. Все диски секционированы, обшиты фильтрующей тканью и частично погружаются в корыто 3, заполненное суспензией. На одной из опорных цапф монтируется распределительная головка 4, аналогичная по устройству распределительной головке барабанного вакуум-фильтра. В

процессе фильтрации на боковой поверхности дисков откладывается осадок, который после обезвоживания снимается ножом.

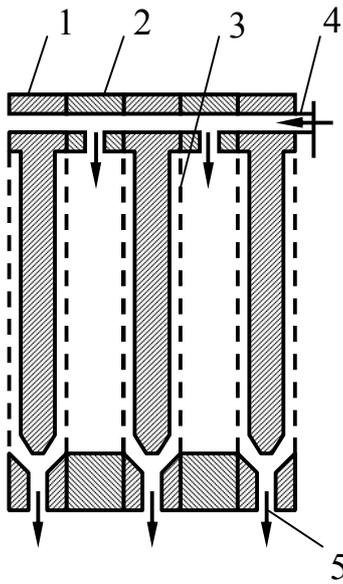
По сравнению с барабанными дисковые фильтры более компактны, но в них затруднена промывка осадка, т. к. увлажненный осадок при возможной промывке легко сползает с вертикальной поверхности дисков.

#### Ленточный вакуум-фильтр.



На длинном столе закреплены открытые сверху вакуум-камеры 1, имеющие в нижней части патрубки 2 и 3 для отвода фильтрата и промывной жидкости. К верхней части вакуум-камеры прижимается бесконечная резиновая лента 4 с бортами, натянутая между приводным 5 и натяжным 6 барабанами. Фильтрующая ткань 7 в виде бесконечного полотна прижимается к резиновой ленте 4 натяжными роликами 8. При прохождении ленты с суспензией над вакуум-камерами 3 происходит фильтрация и отложение на ткани осадка, а затем промывка осадка жидкостью, поступающей по форсункам 9. На приводном барабане 5 фильтрующая лента отделяется от резиновой ленты 4 и огибает валик 10. При этом осадок отделяется от ткани и падает в бункер 11. При прохождении между роликами 8 ткань может регенерироваться и просушиваться.

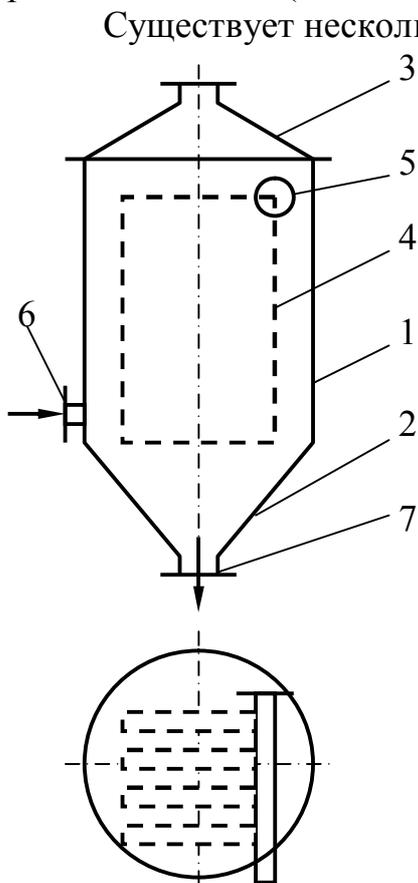
Фильтр-пресс с вертикальными рамами состоит из чередующихся плит



1 и рам 2 с одинаковыми размерами. Между соприкасающимися плитами 1 и рамами 2 имеются тканевые фильтровальные перегородки 3, которые служат уплотняющим материалом при стягивании плит и рам.

Суспензия поступает по патрубку 4, а промывная жидкость по аналогичным параллельным штуцерам. Жидкость проходит через фильтровальную перегородку и выводится из фильтра по трубкам 5. Осадок накапливается на фильтровальной перегородке и периодически удаляется вручную при раздвижке плит и рам. Осадок можно промыть жидкостью, поступающей по патрубку, параллельному патрубку 4.

Достоинства фильтр-прессов: большая поверхность фильтрации на единицу занимаемой площади, возможность отключения отдельных неисправных плит путем закрывания соответствующего крана на выходе, отсутствие движущихся частей. Недостатки: необходимость ручного обслуживания, быстрое изнашивание фильтровальной ткани, несовершенство промывки осадка. Существуют фильтр-прессы с механизированной выгрузкой осадка, в которых используются устройства для перемещения рам, плит и фильтровальной ткани (ФПАКМ).



Существует несколько разновидностей листовых фильтров. Вертикальный фильтр с прямоугольными листами состоит из цилиндрического резервуара 1 с коническим дном 2, съемной крышкой 3, плоских фильтровальных листов 4. Суспензия поступает по штуцеру 6. Жидкая фаза проходит внутрь фильтровальных листов, собирается в коллекторе и в виде фильтрата выводится из аппарата через штуцер 5. Твердая фаза накапливается в виде осадка на внешней поверхности фильтровальных листов 4, сбрасывается с них обратным толчком сжатого воздуха или жидкости и удаляется из аппарата через штуцер 7.

Фильтровальный лист представляет собой рифленую раму с каналами для отвода фильтрата, обтянутый тканью.

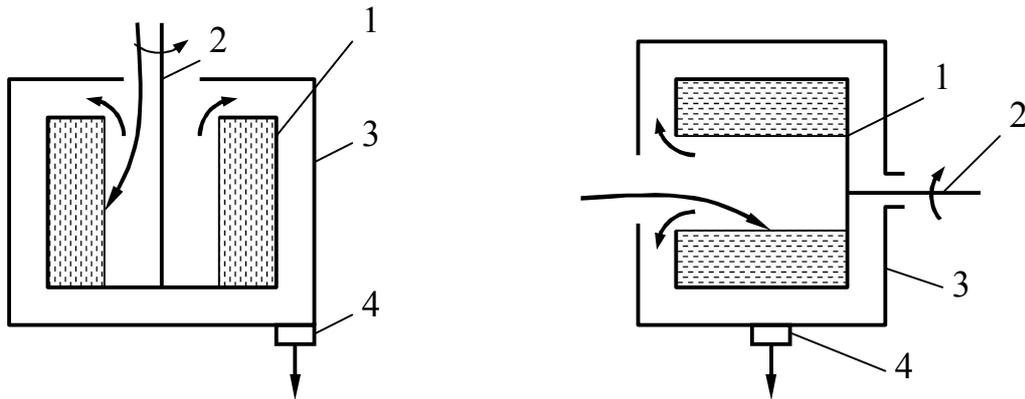
Преимущества: хорошие условия промывки осадка, меньшее изнашивание фильтровальной перегородки и более легкое обслуживание. Недостатки: трудность контроля толщины осадка, необходимость перемешивания суспензии путем ее рециркуляции.

## 12. Центрифуги и сепараторы

Центрифугами называются аппараты, в которых выполняется жидких неоднородных сред. Основным узлом любой центрифуги является барабан-ротор со сплошными или перфорированными стенками, вращающийся с большой скоростью. Внутри его подается разделяемая суспензия и твердые частицы стремятся осесть с ускорением  $\omega^2 R$ . Здесь  $\omega$  – угловая скорость ротора, рад/с,  $R$  – радиус вращения, м. В центробежном поле можно осуществить разделение неоднородных систем путем осаждения и фильтрования. Суспензия разделяется на осадок и осветленную жидкость, называемую фугатом. Интенсивность разделения суспензии под действием центробежных сил определяется фактором разделения  $K_p = \omega^2 R/g$ , показывающим во сколько раз центробежная сила превышает силу тяжести.

По принципу работы различают отстойные или осадительные центрифуги, фильтрующие центрифуги и сепараторы, по характеру работы – центрифуги периодического и непрерывного действия. По величине фактора разделения центрифуги условно разделяются на нормальные центрифуги ( $K_p < 3500$ ) и сверхцентрифуги ( $K_p > 3500$ ). По расположению вала различают горизонтальные и вертикальные центрифуги, по выгрузке осадка – с ручной и механизированной выгрузкой.

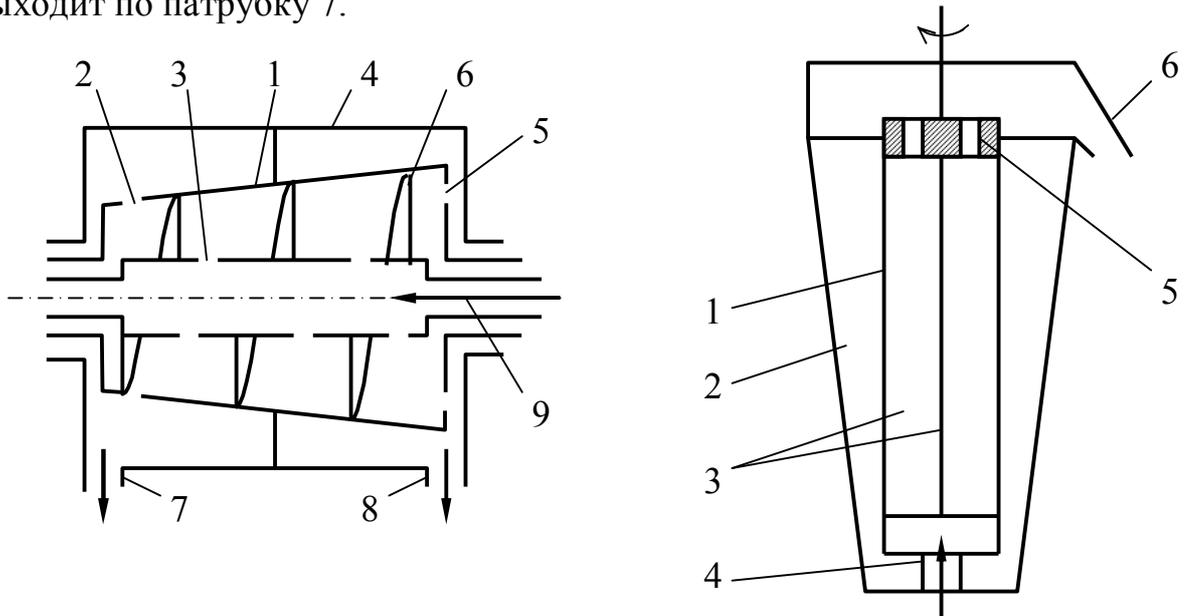
### Отстойные центрифуги.



Основные узлы этих центрифуг – сплошной барабан 1, насаженный на вращающийся вал 2, и неподвижный кожух 3. При подаче суспензии в барабан 1 твердые частицы осаждаются в нем в виде осадка на внутренней стенке барабана. Осветленная жидкость переливается через края барабана и вытекает из него по патрубку 4. По мере накопления осадка он выгружается вручную при остановленной центрифуге.

Непрерывно действующая горизонтальная отстойная центрифуга (НОГШ) с механизированной выгрузкой осадка оборудована коническим вращающимся барабаном 1 и разгрузочным шнеком 6, размещенным внутри барабана. Разделяемая суспензия вводится по трубе 9 и через отверстия 3 поступает внутрь барабана 1 под действием центробежной силы. В барабане происходит разделение суспензии. Осветленная жидкость перемещается к отверстиям 5, перетекает в кожух 4 и удаляется через патрубок 8. Осадок непрерывно перемещается шнеком 6 со скоростью, несколько меньшей скоро-

сти барабана 1, к отверстию 2 и через него выводится в кожух 4, из которого выходит по патрубку 7.



Производительность центрифуги типа НОГШ по исходной суспензии можно рассчитать по эмпирической формуле

$$V_c = 3,5 \frac{DL(\rho_T - \rho_c)d^2 n^2}{\mu_c}, \text{ м}^3/\text{с},$$

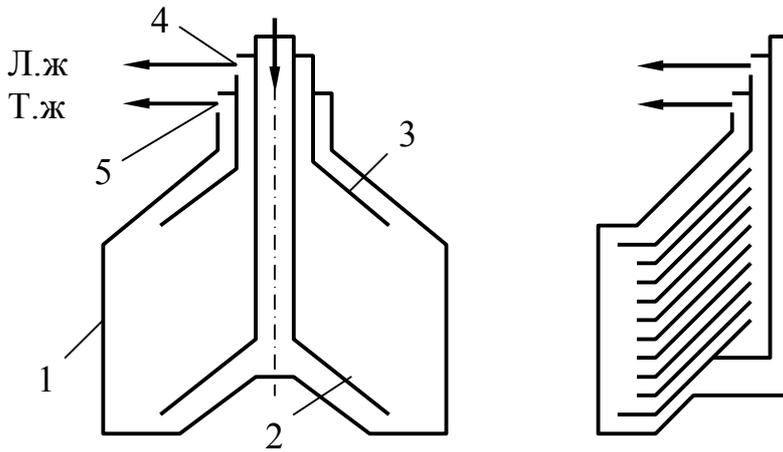
где  $D$ ,  $L$  – диаметр и длина сливного цилиндра, м;  $\rho_m$ ,  $\rho_c$  – плотность твердых частиц и суспензии, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – размер дисперсных частиц, м;  $n$  – частота вращения ротора, об/с;  $\mu_c$  – вязкость суспензии, Па·с.

Трубчатые сверхцентрифуги широко применяются для разделения суспензий с незначительным содержанием твердой фазы, а также для разделения эмульсий. Скорость вращения ротора достигает 60000 об/мин, а фактор разделения  $K_c = 15000$ . Длина ротора в несколько раз превышает его диаметр.

В кожухе 2 размещен ротор 1 с глухими стенками, внутри которого имеются радиальные лопасти 3, способствующие закручиванию суспензии. В нижней части ротора расположен эластичный направляющий подпятник 4, через который в ротор вводится труба для подачи суспензии. Взвешенные частицы под действием центробежной силы откладываются на внутренней стенке ротора 1, а осветленная жидкость движется по ротору вверх и выводится из него через отверстия 5. По мере накопления осадка центрифуга периодически останавливается для его выгрузки. Сверхцентрифуга для разделения эмульсий отличается более сложной конструкцией верхней части ротора, для обеспечения отдельного отвода расслоившихся жидкостей.

Отстойные центрифуги для разделения эмульсий часто называют сепараторами. В промышленности наибольшее применение получили одно- и многокамерные, а также тарельчатые сепараторы. Как и центрифуги они включают барабан, насаженный на вертикальный вал с приводом.

Исходная эмульсия вводится в корпус барабана 1 по центральной трубе, проходит под нижней конической перегородкой 2 и поступает в рабочую зону барабана. Здесь под действием центробежной силы эмульсия расслаива-



вается. Тяжелая жидкость проходит над верхней конической перегородкой 3 и отводится через отверстие 5, а легкая жидкость проходит под этой перегородкой и отводится через отверстие 4.

В тарельчатых сепараторах рабочая камера заполнена рядом конических перегородок-тарелок. Поток исходной эмульсии распределяется между тарелками, которые выполняют ту же роль, что и перегородки или полки в отстойниках, и значительно повышают производительность и качество разделения.

Производительность при осаждении в поле центробежных сил определяют по формуле

$$V = \frac{\pi(R_{\text{н}}^2 - R_{\text{вн}}^2)H}{\tau_{\text{ос}}}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $R_{\text{н}}$ ,  $R_{\text{вн}}$  – соответственно наружный и внутренний радиусы вращения потока, м;  $H$  – высота рабочей части аппарата, м;  $\tau_{\text{ос}}$  – время осаждения, с.

Для ламинарного режима время осаждения находят по формуле

$$\tau_{\text{ос}} = \frac{18\mu g}{\omega^2 d^2 (\gamma_{\text{т}} - \gamma_{\text{ж}})} \ln \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{вн}}}, \text{ с.}$$

В случае проведения периодического процесса общую продолжительность определяют по формуле

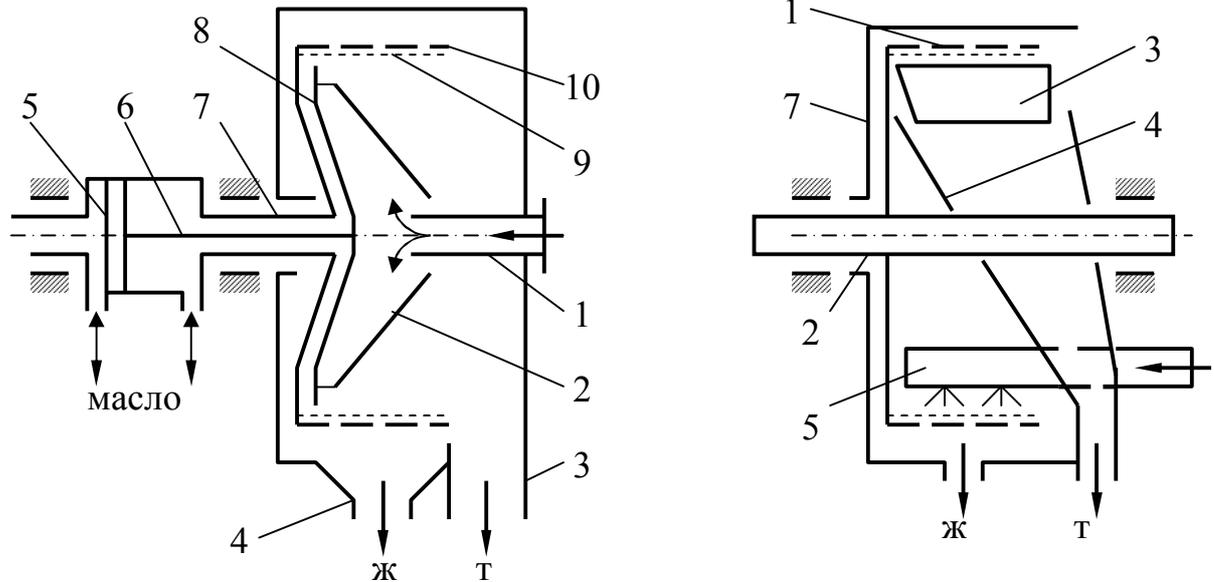
$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{з}} + \tau_{\text{ос}} + \tau_{\text{в}},$$

где  $\tau_{\text{з}}$  – время загрузки, с;  $\tau_{\text{в}}$  – время выгрузки, с.

Фильтрующие центрифуги применяют в тех случаях, когда нужно получить осадок с наименьшей влажностью. Суспензия поступает в перфорированный ротор. Осадок откладывается на внутренней стенке барабана, покрытой сеткой или фильтрующей тканью.

Фильтрующие центрифуги периодического действия типа ФМБ и ФМД широко используются в химической промышленности. Их применяют в диапазоне массовых концентраций суспензий от 1 до 60 % для отделения частиц размером  $> 10$  мкм. Особенно удобны для малотоннажных производств ( $V < 5$  м<sup>3</sup>/час).

Рассмотрим схему фильтрующей центрифуги выгрузкой осадка пульсирующим поршнем. Суспензия по трубе 1 поступает в коническую воронку



2, вращающейся с такой же скоростью, как и перфорированный ротор 10, который изнутри покрыт металлической сеткой 9. Суспензия перемещается по внутренней поверхности воронки 2 и приобретает скорость, почти равную скорости вращения ротора. Затем суспензия отбрасывается на внутреннюю поверхность сита 9 в зоне перед поршнем 8. Под действием центробежной силы жидкая фаза проходит через сито и удаляется из кожуха центрифуги по штуцеру 4. Твердая фаза откладывается на сите в виде осадка, который периодически перемещается к краю ротора при движении поршня вправо. При обратном движении поршня на освобожденной фильтровальной поверхности образуется новый слой осадка. За 1 мин поршень совершает 10-16 ходов. Осадок удаляется из кожуха через канал 3.

В автоматической фильтрующей центрифуге с ножевой выгрузкой осадка типа ФГН исходная суспензия поступает по трубопроводу 5 в ротор 1 с перфорированной цилиндрической стенкой. Осветленная жидкость проходит через фильтровальную перегородку, собирается внизу кожуха 7 и вытекает из него по патрубку. Твердая фаза накапливается на сите в виде осадка и периодически снимается ножом 3, который для этого приподнимается гидравлическим механизмом. Далее осадок ссыпается вниз и по желобу 4 выводится из аппарата. Во время съема осадка частота вращения ротора уменьшается.

Центрифуга может быть оборудована шнеком для выгрузки осадка, как это рассмотрено применительно к отстойным центрифугам, вибрационным устройством для выгрузки осадка, устройством для промывки осадка. Имеется также центрифуга с инерционной выгрузкой осадка, у которой конический ротор расположен вертикально. При этом угол наклона стенок ротора должен превышать угол трения твердых частиц. В такой центрифуге невозможно регулирование скорости выгрузки осадка, что устраняется путем придания вибраций ротору в осевом направлении

### 13. Механическое перемешивание жидкостей

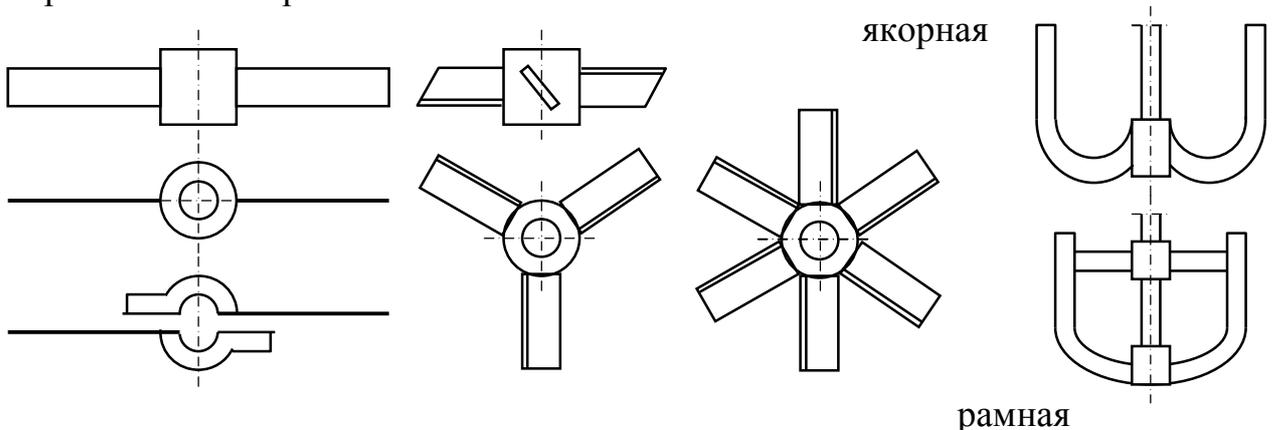
В химической промышленности перемешивание жидкостей применяется для: 1) равномерного распределения твердых частиц в жидкости (создание суспензий); 2) равномерного распределения и дробления частиц жидкости или газа в жидкости (образование эмульсий, аэрация); 3) интенсификации теплообмена в обрабатываемом объеме; 4) интенсификации массообмена в перемешиваемой среде (растворение, выщелачивание).

Различают два основных способа перемешивания в жидких средах: механический (с помощью мешалок различных конструкций) и пневматический (сжатым воздухом или газом). Смешение твердых сыпучих материалов является скорее механическим, чем гидродинамическим процессом.

Наиболее важными характеристиками перемешивающих устройств являются их эффективность и интенсивность перемешивания. Эффективность перемешивающего устройства характеризует качество проведения процесса перемешивания и может быть выражена по-разному, в зависимости от цели перемешивания, например, однородностью поля концентраций, теплоотдачей, массоотдачей с перемешиванием и без него. Интенсивность перемешивания определяется временем достижения заданного технологического результата или числом оборотов мешалки при фиксированной продолжительности процесса. Интенсификация процесса перемешивания приводит к снижению размеров и увеличению производительности оборудования.

Наиболее часто используются перемешивание вращающимися механическими мешалками различных конструктивных типов: лопастные, винтовые (пропеллерные), турбинные и др. По линейной скорости движения мешалки делятся на тихоходные (скорости до 10 м/с) и быстроходные.

Лопастные мешалки состоят из цилиндрической втулки, к которой приварены две или большее число плоских лопастей прямоугольного сечения. Ширина лопастей  $b = 0,2 d_m$ . Начиная с диаметра 710 мм лопастные мешалки снабжаются укрепляющими ребрами. Лопастные мешалки могут быть неразъемными и разъемными.



Разновидностью лопастных мешалок являются листовые мешалки, у которых высота лопасти сопоставима с диаметром, якорные мешалки и рамные мешалки.

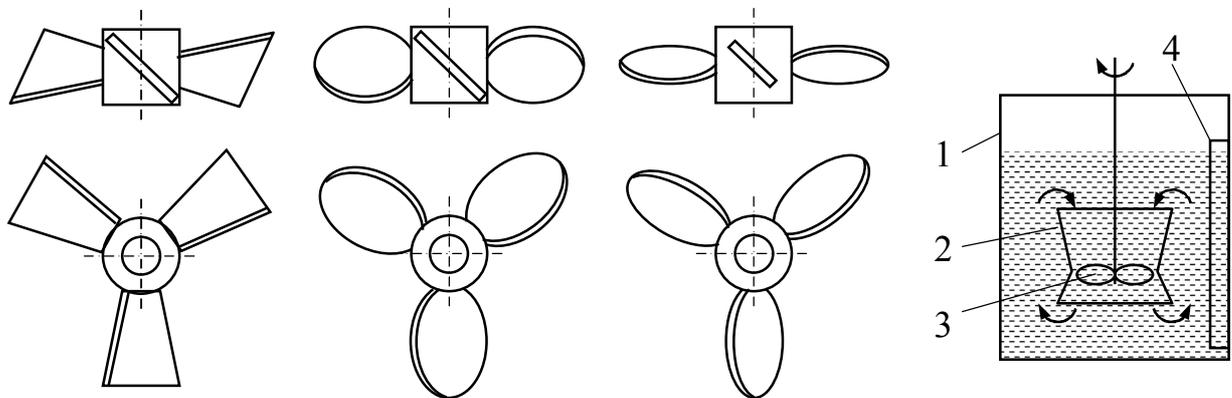
Достоинства лопастных мешалок – простота устройства и низкая стоимость изготовления. Недостатки – слабый осевой поток, не обеспечивающий

достаточно полное перемешивание во всем объеме аппарата. Эти мешалки перемешивают только те слои жидкости, которые находятся возле лопастей. Некоторое увеличение осевого потока достигается при наклоне лопастей под углом  $35\text{--}45^\circ$  к оси вала. Для увеличения перемешиваемого объема несколько мешалок устанавливаются по высоте на одном валу.

Лопастные мешалки используют для перемешивания жидкостей вязкостью до  $1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Частота вращения изменяется в пределах  $0,5\text{--}5 \text{ об/с}$ .

Якорные и рамные мешалки имеют форму, соответствующую внутренней форме аппарата, и диаметр, близкий к внутреннему диаметру аппарата или змеевика. При вращении эти мешалки интенсифицируют тепло- и массообмен вблизи лопастей, а также очищают стенки и дно аппарата от налипающих загрязнений. Они относятся к тихоходным мешалкам.

Пропеллерные мешалки состоят из втулки, к которой приварены под углом  $120^\circ$  одна к другой три лопасти (плоские или со сложной пространственной крыловидной формой), литые или штампованные.



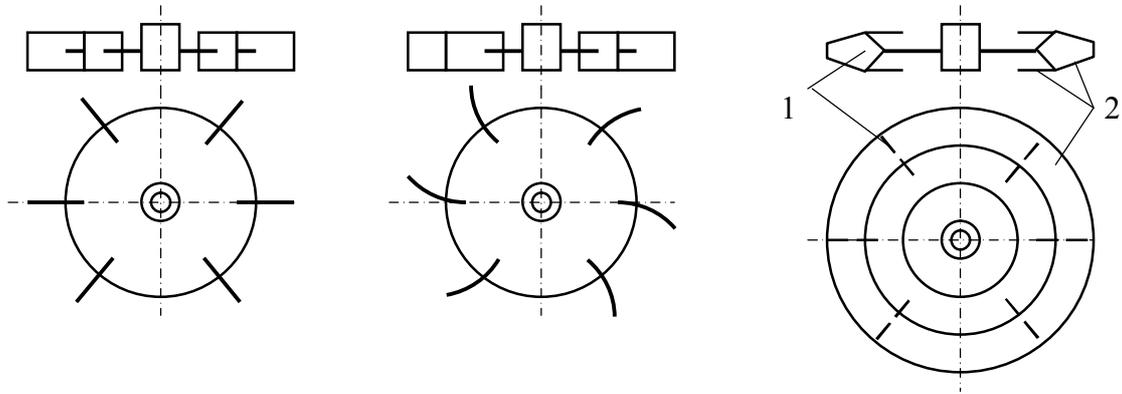
Вследствие обтекаемой формы пропеллерные мешалки при одинаковых скоростях потребляют меньшую мощность, чем мешалки прочих типов. Они создают преимущественно осевые потоки перемешиваемой среды, что позволяет сократить продолжительность перемешивания. Высокая скорость вращения позволяет присоединить вал непосредственно к электродвигателю. Однако они отличаются сложностью конструкции и сравнительно высокой стоимостью изготовления. Их целесообразно устанавливать в цилиндрических аппаратах с выпуклыми днищами. В аппаратах с плоскими днищами могут образовываться застойные зоны.

Для улучшения перемешивания больших объемов жидкости и организации направленного движения жидкости в аппарате 1 устанавливают направляющий аппарат или диффузор 2, представляющий короткий цилиндрический или конический стакан, внутри которого помещают мешалку 3. При больших скоростях вращения мешалки и отсутствии диффузора устанавливают отражательные перегородки 4, закрепленные у стенок аппарата.

Пропеллерные мешалки применяют для перемешивания жидкостей вязкостью до  $2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , частотой вращения до  $40 \text{ об/с}$ . Окружная скорость достигает  $40 \text{ м/с}$ .

Турбинные мешалки бывают открытого и закрытого типа. Открытые турбинные мешалки представляют конструкцию, состоящую из цилиндриче-

ской втулки с кольцевым диском, на окружности которого равномерно расположены шесть плоских или криволинейных лопастей. Длина каждой лопасти  $0,25 d_m$ , высота  $b = 0,2 d_m$ . Закрытые турбинные мешалки имеют плоские лопатки 1 конической формы, закрытые с обеих сторон коническими дисками 2. Турбинные мешалки закрытого типа могут быть использованы для подачи газа в перемешиваемую жидкость.



При работе открытых турбинных мешалок создаются преимущественно радиальные потоки жидкости, а также возможно возникновение тангенциального движения содержимого аппарата. В последнем случае в аппарате устанавливают отражательные перегородки. Закрытые турбинные мешалки создают четко выраженный радиальный поток.

Мощность, потребляемая турбинными мешалками в аппарате с отражательными перегородками, мало зависит от вязкости жидкости. Поэтому эти мешалки применяют для смесей, вязкость которых во время перемешивания меняется.

Частота вращения турбинных мешалок 2–5 об/с, а окружная скорость 3–8 м/с.

Для перемешивания вязких неньютоновских жидкостей применяются дисковые мешалки, создающие высокое напряжение сдвига.

Мощность, потребляемая мешалкой, равна

$$N = K_N \rho n^3 d_m^5, \text{ кВт},$$

где  $K_N$  – критерий мощности;

$\rho$  – плотность перемешиваемой жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$n$  – частота вращения мешалки, об/с;

$d_m$  – диаметр мешалки, м.

Критерий мощности определяют опытным путем по зависимости

$$K_N = A \text{Re}_m^a \text{Fr}_m^b S_1^c S_2^d \dots,$$

где  $\text{Re}_m = n d_m^2 \rho / \mu$  – модифицированный критерий Рейнольдса;

$\text{Fr}_m = n^2 d_m / g$  – модифицированный критерий Фруда;

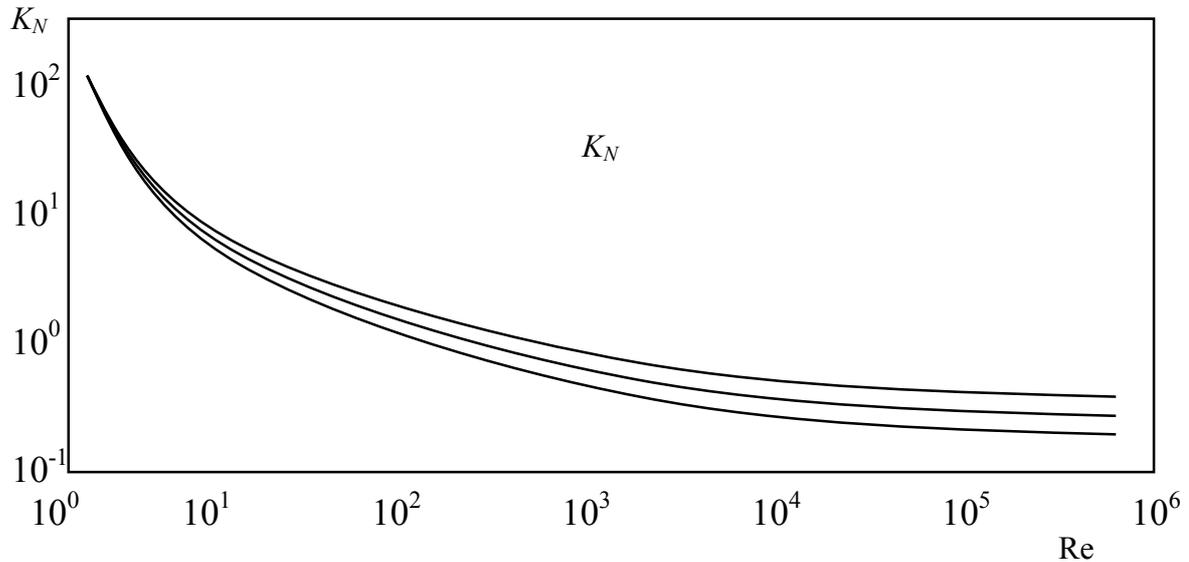
$S_1, S_2, \dots$  – симплексы геометрического подобия;

$A, a, b, c, d$  – коэффициент и показатели степеней, определяемые опытным путем;

$\mu$  – вязкость жидкости,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Для различных типов мешалок график зависимости  $K_N$  от  $Re_m$  для основных нормализованных перемешивающих устройств, построенный на основании многочисленных экспериментальных данных имеет вид



При перемешивании механическими мешалками различают два режима перемешивания: ламинарный и турбулентный. Ламинарный режим имеет место при  $Re_m < 50$  и соответствует неинтенсивному перемешиванию, при котором жидкость плавно обтекает кромки лопастей мешалки, захватывается лопастями и вращается вместе с ними. При ламинарном режиме перемешиваются только те слои жидкости, которые непосредственно примыкают к лопастям мешалки.

С увеличением числа оборотов мешалки возрастает сопротивление среды вращению мешалки, вызванное турбулизацией пограничного слоя и возникает турбулентный режим перемешивания, характеризующийся менее резкой зависимостью  $K_N$  от  $Re_m$ .

В области развитой турбулентности при  $Re_m > 10^5$  критерий  $K_N$  практически не зависит от  $Re_m$ . В этой области, которая называется автотельной, расход энергии на перемешивание определяется только инерционными силами. Дальнейшее увеличение числа оборотов, хотя и приводит к более интенсивному перемешиванию среды, часто оказывается нецелесообразным вследствие того, что возрастание затрат мощности в этом случае не компенсируется достигаемым эффектом.

Обычно высота жидкости в аппарате примерно равна диаметру. Если высота уровня жидкости не равна его диаметру, значение мощности перемешивания, определенное с помощью графика, умножают на коэффициент  $k$

$$k = \sqrt{\frac{H}{D}}.$$

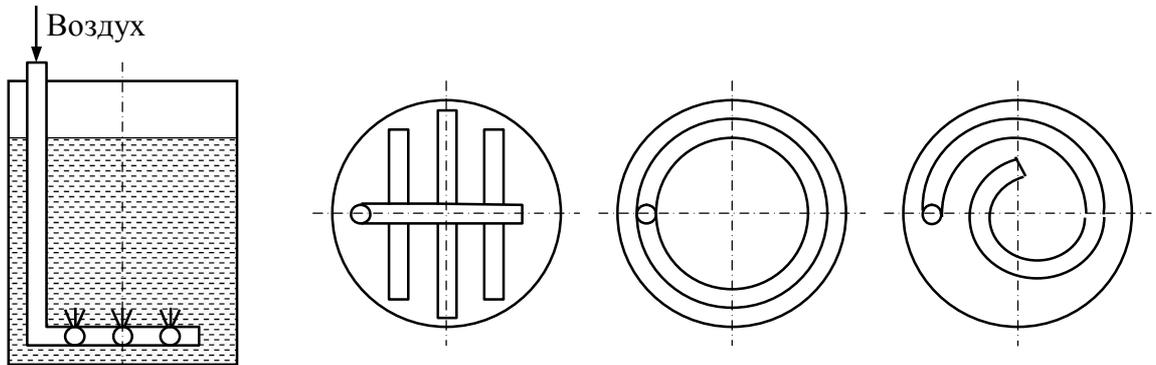
Наличие в аппарате змеевика увеличивает потребляемую мощность в 2–3 раза, гильзы термометра, трубы для переадавливания, устройства для замера уровня и т. п. – на 10–20%.

## 14. Пневматическое перемешивание жидкостей

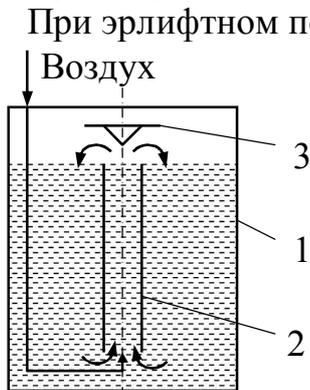
Пневматическое перемешивание воздухом или сжатым газом используется в тех случаях, когда перемешиваемая жидкость агрессивна и быстро разрушает металл механических мешалок. Кроме того перемешивание воздухом целесообразно в том случае, когда необходимо, чтобы газ вступал во взаимодействие в химическую реакцию с жидкостью, а также в биореакторах микробиологических производств, в которых воздух является источником кислорода для дыхания микроорганизмов.

Перемешивание сжатым газом является мало интенсивным процессом. Расход энергии на пневматическое перемешивание больше, чем при механическом. Пневматическое перемешивание не применяют для обработки летучих жидкостей в связи со значительным уносом с газом и потерями перемешиваемого продукта. Кроме того, перемешивание воздухом может сопровождаться окислением и осмолением веществ.

Перемешивание сжатым газом осуществляют в аппаратах, снабженных специальным устройством – барботером или центральной циркуляционной трубой.



Барботер представляет собой расположенные на дне аппарата трубы с отверстиями для выхода газа, с помощью которых осуществляется барботажа его через слой обрабатываемой жидкости. Пузырьки сжатого газа равномерно поднимаются через слой жидкости и перемешивают ее. Барботер может иметь форму трубы, свернутую в кольцо или спираль. Часто барботер выполняют из трубы с пористыми стенками, что снижает размер пузырьков газа, образующихся после выхода из барботера, и способствует более равномерному распределению газа в поперечном сечении аппарата. (*аэротенк*).



При эрлифтном перемешивании газ подают в циркуляционную трубу 2, установленную в середине аппарата 1. К нижней части циркуляционной трубы подводится газ, пузырьки которого поднимаются по трубе вверх и увлекают жидкость, находящуюся в аппарате. Газожидкостная смесь на выходе из циркуляционной трубы разделяется на отдельные фазы. Газ выходит из аппарата, а жидкость медленно опускается вниз в кольцевом пространстве между стенками аппарата и циркуляционной трубой, обеспечивая

циркуляционное перемешивание жидкости. Для предотвращения вылета частиц жидкости из аппарата над циркуляционной трубой размещен отбойник 3.

В микробиологической промышленности при выращивании кормовых дрожжей на гидролизатах древесины широко применяются такие аппараты объемом 600 м<sup>3</sup>. В них установлены 12 циркуляционных труб, расположенных по окружности. В циркуляционной трубе достигается высокая скорость движения газожидкостной смеси, достигающая 5 м/с, в отличие от скоростей подъема отдельных пузырьков при барботаже порядка 0,2 м/с. Такие скорости способствуют лучшему растворению кислорода в жидкости и увеличению роста микроорганизмов.

Количество кислорода, поглощаемого жидкостью, оценивается формулой

$$M_{O_2} = KF(c_{нас} - c_m),$$

где  $K$  – коэффициент абсорбции, показывающий, какое количество кислорода поглощается жидкостью в единицу времени в заданных условиях, м/с;

$F$  – поверхность контакта между жидкостью и воздухом, м<sup>2</sup>;

$c_{нас}$  – концентрация кислорода в среде, соответствующая пределу насыщения при данных условиях, мг/м<sup>3</sup>;

$c_m$  – концентрация кислорода в среде в текущий момент, мг/м<sup>3</sup>.

Расчет пневматических перемешивающих устройств сводится к определению необходимого давления и расхода сжатого воздуха. Расход воздуха на 1 м<sup>2</sup> свободной поверхности жидкости в аппарате принимают:

- при слабом перемешивании 0,4 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·мин;
- при умеренном перемешивании 0,8 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·мин;
- при интенсивном перемешивании 1 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·мин.

Расход воздуха при выращивании микроорганизмов составляет 1 – 2 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>·мин, при очистке сточных вод – 1 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>·час.

Давление сжатого воздуха для перемешивания

$$p = p_0 + 1,2\rho gH,$$

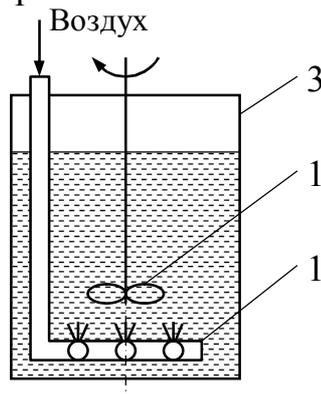
где  $p_0$  – давление в аппарате над жидкостью, Па;

$\rho$  – плотность перемешиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$H$  – высота столба перемешиваемой жидкости, м;

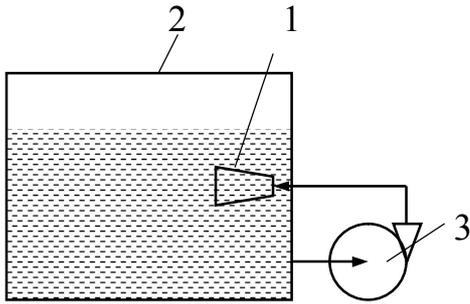
1,2 – коэффициент, учитывающий потери 20 % давления в воздуховоде от сопротивления.



В некоторых случаях для интенсификации процесса растворения кислорода в жидкости в микробиологических производствах выше барботера 1 устанавливают механическую мешалку 2, которая диспергирует поднимающиеся пузырьки воздуха и увеличивает тем самым поверхность массопередачи. Кроме того, мешалка при перемешивании газожидкостной смеси интенсифицирует растворение кислорода путем

увеличения коэффициента массопередачи.

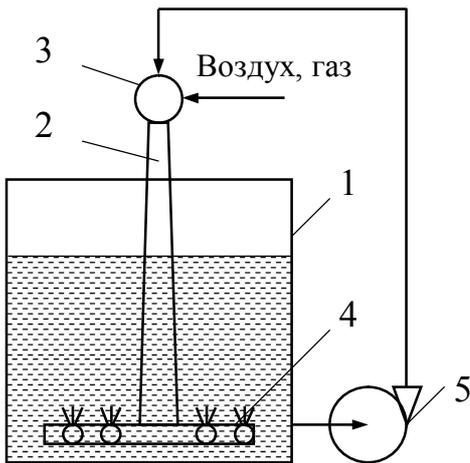
Сопла в аппаратах применяют для перемешивания жидкостей чаще всего циркуляционным способом. Струя жидкости, вытекающая из сопла 1,



передает часть своей кинетической энергии прилегающим слоям жидкости и приводит их в движение. В пространстве, которое занимали эти слои, возникает разрежение, под действием которого подсасывается жидкость из других областей аппарата 2. Такое взаимодействие струи и жидкости, находящейся в аппарате, происходит непрерывно и многократно, обеспечивая перемешивание содержимого аппарата.

Сопло для перемешивания жидкости применяют обычно совместно с циркуляционным насосом 3, который сообщает жидкости, подаваемой в сопло, необходимую энергию. В некоторых случаях жидкость перемешивают, многократно перекачивая ее через аппарат с помощью циркуляционного насоса без применения сопла.

Сопло для перемешивания жидкости применяют обычно совместно с циркуляционным насосом 3, который сообщает жидкости, подаваемой в сопло, необходимую энергию. В некоторых случаях жидкость перемешивают, многократно перекачивая ее через аппарат с помощью циркуляционного насоса без применения сопла.



Также возможен вариант, при котором в циркуляционный контур, включающий сопло 2 и насос 5, на входе в сопло вводится воздух под действием создаваемого в рабочей камере 3 разрежения. При движении в сопле водовоздушной смеси ее давление повышается и происходит интенсивное растворение кислорода, которое возрастает при повышении давления смеси. Далее водовоздушная смесь выходит из барботера 4 и растворение кислорода продолжается при подъеме воздушных пузырьков в аппарате 1.

Помимо перечисленных перемешивающих устройств и способов перемешивания необходимо упомянуть также вибрационное и пульсационное перемешивание и перемешивание жидкостей, которое рассмотрено ранее применительно к экстракционным аппаратам. Для процессов, идущих с поглощением газов, получили распространение всасывающие мешалки и аппараты с циркуляционным контуром.

## 15. Насосы химических производств

В химической промышленности важное значение имеет транспортирование жидкостей по трубопроводам между оборудованием и за пределами предприятия. Для этих целей используют насосы – гидравлические машины, преобразующие механическую энергию двигателя в давление перемещаемой жидкости. Разность давлений жидкости в насосе и трубопроводе обуславливает ее перемещение.

По принципу действия различают следующие насосы: лопастные или центробежные, объемные, вихревые и осевые.

В лопастных (центробежных) насосах давление жидкости создается центробежной силой при вращении лопастных колес.

В объемных насосах давление жидкости создается при ее вытеснении из замкнутого пространства телами, которые движутся возвратно-поступательно или вращаются (поршневые, шестеренчатые, пластинчатые и винтовые насосы).

В вихревых насосах в энергию давления жидкости преобразуется энергия вихрей, которые возникают при вращении рабочих колес.

В осевых насосах перемещение жидкости осуществляется устройством, напоминающим гребной винт.

В струйных насосах перемещение жидкости выполняется движущейся струей воздуха, пара или жидкости. В газлифтах перемещение жидкости выполняется за счет разности плотностей жидкости и газожидкостной смеси.

В монтежю для перекачивания жидкости используется энергия давления сжатого газа.

Основными параметрами насоса любого типа являются производительность, напор и мощность. Производительность или подача определяется объемом жидкости, нагнетаемым насосом в единицу времени ( $\text{м}^3/\text{с}$ ). Напор характеризует удельное давление, передаваемое насосом единице веса перекачиваемой жидкости (м). Напор представляется как высота, на которую можно поднять перекачиваемую жидкость за счет энергии насоса. Напор не зависит от плотности жидкости. Полезная мощность насоса равно произведению

$$N_n = \frac{\rho g Q H}{\eta}, \text{ Вт},$$

где  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $Q$  – производительность насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – напор, развиваемый насосом, м;  $\eta$  – общий к.п.д. насосной установки.

$$\eta = \eta_n \eta_{\text{п}} \eta_{\text{д}},$$

где  $\eta_n$ ,  $\eta_{\text{п}}$ ,  $\eta_{\text{д}}$  – соответственно к.п.д. насоса, передачи и двигателя.

Полный напор насоса определяется по формуле

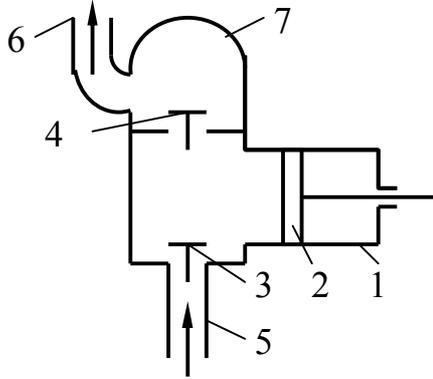
$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + H_{\text{вс}} + H_{\text{наг}} + h_{\text{вс}} + h_{\text{наг}},$$

где  $p_1$ ,  $p_2$  – давление соответственно во всасывающей и нагнетательной емкостях, Па;  $H_{\text{вс}}$ ,  $H_{\text{наг}}$  – высота соответственно всасывания и нагнетания, м;  $h_{\text{вс}}$ ,  $h_{\text{наг}}$  – потери соответственно во всасывающей и нагнетательной линиях, м.

Практически высота всасывания не превышает следующих значений:

Температура, °С	10	20	30	40	50	60	65
Высота всасывания, м	6	5	4	3	2	1	0

Основными элементами поршневого насоса является цилиндр 1, внутри которого совершает возвратно-поступательные перемещения поршень 2. К насосу подведены всасывающая и нагнетательная трубы. При движении поршня



вправо в цилиндре создается разрежение, в результате чего открывается всасывающий клапан 3 и жидкость по трубе 5 поступает в цилиндр. При ходе поршня влево в цилиндре создается избыточное давление, клапан 3 закрывается, а клапан 4 открывается и жидкость вытесняется в нагнетательную трубу 6. Неравномерность подачи жидкости частично сглаживается воздушным колпаком 7.

Длина пути между крайними левым и правым положениями поршня называется ходом поршня.

Если поршень работает двумя своими сторонами, выдавая двойное количество жидкости, то такой насос называется насосом двойного действия.

Действительная производительность поршневого насоса

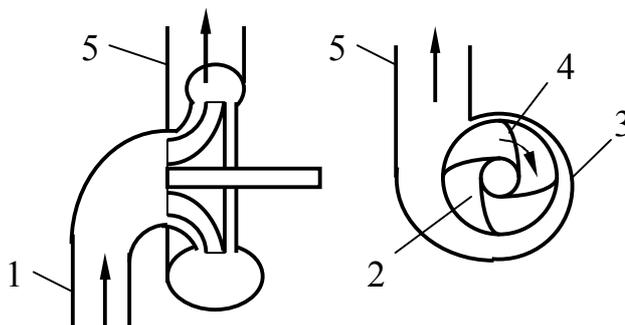
$$Q = F s n \eta_v,$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения поршня,  $m^2$ ;  $s$  — ход поршня, м;  $n$  — частота вращения вала, об/с;  $\eta_v = 0,8-0,9$  — коэффициент подачи, учитывающий запаздывание открытия или закрытия клапанов, утечку жидкости через неплотности.

У плунжерного насоса длина поршня больше диаметра. К поршневым относятся также мембранные и сильфонные насосы, у которых поршень отделен от перекачиваемой жидкости соответственно мембраной и сильфоном.

Достоинство поршневых насосов — независимость их производительности от развиваемого напора, когда можно перекачивать небольшие количества жидкости при высоком давлении. Недостатки поршневых насосов: 1) большая металлоемкость, громоздкость, 2) требуется большая производственная площадь; 3) необходимость массивных фундаментов; 4) наличие клапанов, требующих ухода и ремонта; 5) неравномерность всасывания и нагнетания жидкости.

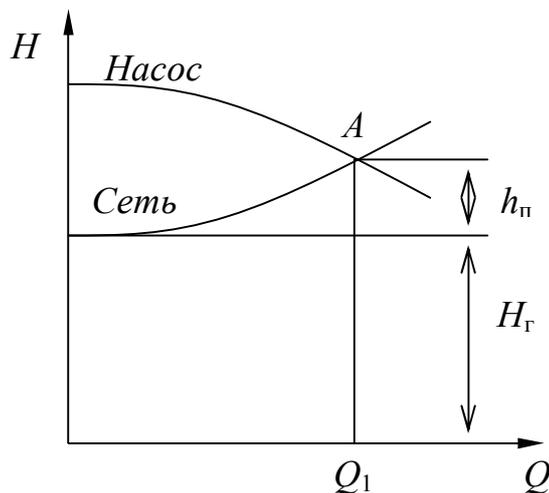
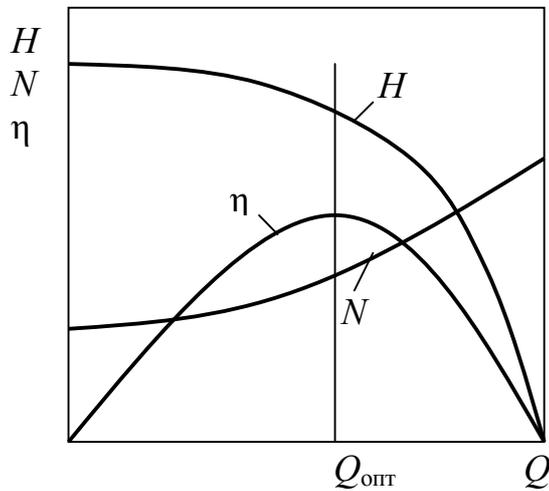
В отличие от поршневого центробежный насос выполняет непрерывное всасывание и нагнетание жидкости.



Жидкость из всасывающей трубы 1 поступает вдоль оси рабочего колеса 2 в корпус 3 насоса. Попадая на лопатки 4, жидкость приобретает вращательное движение. Центробежная сила отбрасывает жидкость в канал между корпусом 3 и ра-

бочим колесом 2 и далее в нагнетательную трубу 5. При этом происходит преобразование кинетической энергии жидкости в статический напор, что повышает давление жидкости.

Графическая зависимость напора  $H$ , потребляемой мощности  $N$ , и к.п.д.  $\eta$  насоса от его производительности называется характеристикой насоса. Эти



зависимости получают при испытаниях центробежных насосов и приводятся в каталогах и паспортах насосов. При увеличении производительности и постоянной частоте вращения напор насоса уменьшается, потребляемая мощность возрастает, а к.п.д. проходит через максимум. Насос потребляет минимальную мощность при закрытой напорной трубе ( $Q = 0$ ). Наиболее благоприятный режим при  $\eta = \max$ .

При выборе насоса необходимо учитывать характеристику сети, т. е. трубопроводов и аппаратов, через которые перекачивается жидкость. Потери напора пропорциональны квадрату расхода

$$h_{\text{п}} = kQ^2,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Характеристика сети равна

$$H = H_{\text{г}} + h_{\text{п}}.$$

Точка пересечения характери-

стик насоса и сети  $A$  называется рабочей точкой. Насос должен быть выбран так, чтобы рабочая точка соответствовала требуемой производительности и напору.

Производительность центробежных насосов можно регулировать изменением частоты вращения электродвигателя, что более экономично, чем изменение степени открытия напорной трубы. Однако это трудно осуществимо в случае привода от асинхронных электродвигателей. Поэтому на практике обычно регулируют подачу с помощью задвижки на напорной трубе.

Достоинства центробежных насосов: 1) надежность и долговечность в работе; 2) высокая производительность при равномерной и непрерывной подаче жидкости; 3) простота обслуживания; 4) малая металлоемкость; 5) отсутствие клапанов и меньшая чувствительность к загрязненным и химически агрессивным жидкостям; 6) более низкая стоимость по сравнению с поршневыми насосами.

Основной недостаток центробежных насосов – низкий к.п.д. при малых

расходах ( $Q < 0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ ), особенно при необходимости создать высокий напор.

Осевые насосы применяют для перекачивания больших количеств жидкости (до  $25 \text{ м}^3/\text{с}$  и более) при небольших напорах (до 16 м). Выпускают несколько типов осевых насосов: ОГ – с горизонтальным расположением вала; ОВ – с вертикальным расположением вала; ОХ6 – для циркуляции химически агрессивных жидкостей. В отличие от центробежных насосов в осевых насосах максимум потребляемой мощности наблюдается при  $Q = 0$ .

Достоинства осевых насосов: 1) простота устройства; 2) нечувствительность к загрязненности перекачиваемой жидкости; 3) быстроходность. Недостаток – небольшой развиваемый напор.

Вихревые насосы пригодны для перекачки жидкостей, не содержащих абразивных взвешенных веществ при температуре до  $85^\circ\text{C}$ . Отличаются сравнительно небольшими производительностями ( $2\text{-}40 \text{ м}^3/\text{час}$ ) и высокими напорами (12-250 м), в 2-5 раз большими, чем у центробежных насосов при тех же размерах, а также небольшим зазором между корпусом и рабочим колесом. При уменьшении производительности резко возрастает напор и потребляемая мощность.

Роторные насосы (шестеренчатые, пластинчатые, винтовые) используют при перекачивании вязких жидкостей для небольших расходов. Развивают высокий напор. В отличие от центробежных не могут работать при закрытой напорной задвижке.

В шестеренчатых насосах вращаются ведущая и ведомая шестерни. Когда зубья выходят из зацепления, образуется разрежение, под действием которого происходит всасывание жидкости. В области, где зубья входят в зацепление, жидкость вытесняется и поступает в напорную трубу.

Рабочим органом винтовых насосов являются ведущий и несколько ведомых винтов, заключенных в обойму, расположенную внутри корпуса. Изготавливают и одновинтовые насосы. При вращении винтов жидкость, заполняющая впадины в нарезках, перемещается вдоль оси винтов. Ведомые винты выполняют роль герметизирующих устройств. Винтовые насосы долговечны при отсутствии в перекачиваемой жидкости абразивных веществ, бесшумны, компактны, отличаются высоким к.п.д. (60-85%) и отсутствием пульсаций подачи.

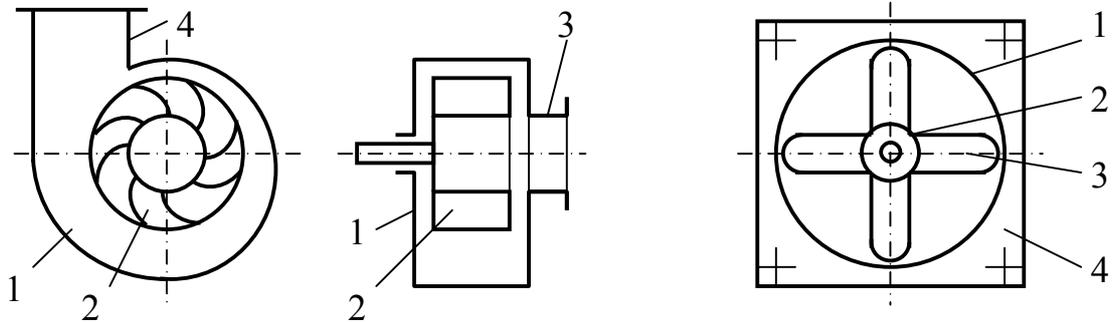
Струйные насосы применяют для нагнетания (инжекторы), отсасывания (эжекторы) жидкости, когда допустимо смешение ее с газом, паром или конденсатом. В зависимости от рабочей среды их называют жидкоструйными, водоструйными, газоструйными или пароструйными. Отличаются простотой и надежностью в работе, отсутствие движущихся частей, низким к.п.д.

Воздухоподъемники (эрлифты) и газлифты применяют для подъема жидкостей с больших глубин или для интенсификации массообмена между жидкостью и газом в некоторых аппаратах. Отличаются низким к.п.д.

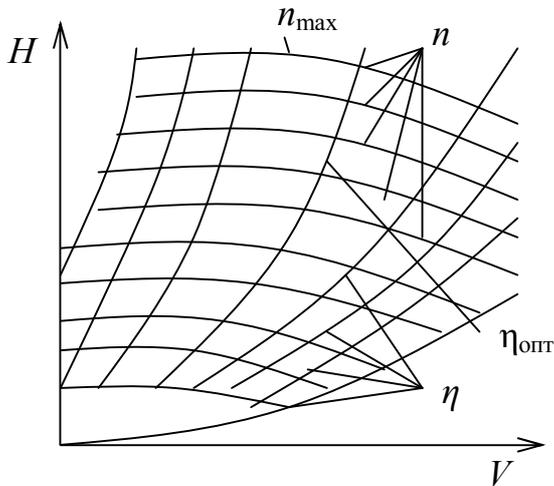
Монтежю (горизонтальная или вертикальная емкость) используют для периодического перемещения жидкости с помощью сжатого воздуха или инертного газа.

## 16. Машины для сжатия и перемещения газов

В зависимости от степени сжатия различают вентиляторы (до 1,15), газодувки (1,2 – 2) и компрессоры (> 2). В свою очередь, вентиляторы условно делят на вентиляторы низкого ( $\Delta p < 10^3$  Па), среднего ( $\Delta p = 10^3 - 3 \cdot 10^3$  Па) и высокого давления ( $\Delta p = 3 \cdot 10^3 - 10^4$  Па).



В спиралеобразном корпусе 1 центробежного вентилятора вращается рабочее колесо 2 с большим числом лопаток. Газ поступает в вентилятор через патрубок 3 и удаляется из корпуса по нагнетательному патрубку 4. Форму и размеры рабочего колеса и корпуса выбирают такими, чтобы гидравлические потери были минимальными. Лопатки у рабочего колеса вентилятора низкого давления отогнуты назад, у вентиляторов высокого давления – вперед для создания большего напора.



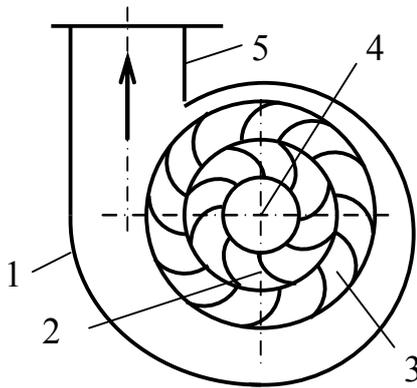
Характеристики вентилятора аналогичны характеристикам центробежного насоса. Однако на характеристике вентилятора чаще всего приводятся данные при различных частотах вращения колеса.

Осевой вентилятор имеет корпус 1 в виде короткого участка цилиндрической трубы, в котором расположено рабочее колесо 2 – пропеллер с лопатками 3, изогнутыми по винтовой поверхности. Вентилятор крепится в раме 4. При вращении рабочего колеса лопасти захватывают газ и перемещают его вдоль оси колеса. К.п.д. осевых вентиляторов существенно выше, чем у центробежных вентиляторов из-за низких потерь на трение газа. Однако напор, создаваемый осевым вентилятором, в 3-4 раза меньше по сравнению с центробежным вентилятором. Поэтому осевые вентиляторы применяют для перемещения больших объемов газа при незначительном сопротивлении сети.

Мощность на валу вентилятора находят по уравнению

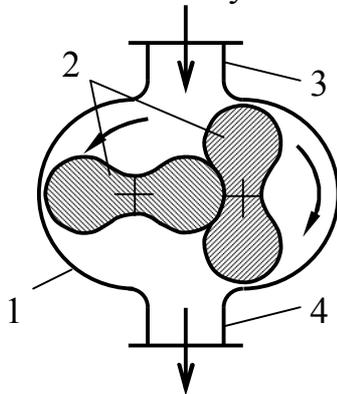
$$N_e = \frac{V \rho g H}{\eta} = \frac{V \Delta p}{\eta},$$

где  $V$  – производительность вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  – напор вентилятора,  $\text{м}$ ;  $\rho$  – плотность газа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\eta$  – общий к.п.д. вентилятора.



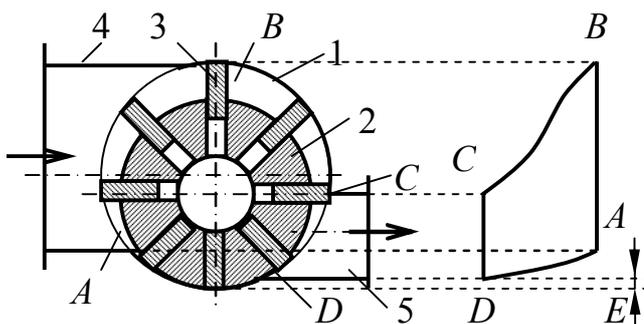
В корпусе 1 турбогазодувки вращается рабочее колесо 2 с лопатками, подобными лопаткам центробежного насоса. Колесо обычно помещают внутри направляющего аппарата 3 с лопатками, в котором кинетическая энергия газа преобразуется в потенциальную энергию давления. Газ поступает в турбогазодувку через входной патрубок 4 и выходит по нагнетательному патрубку 5.

Одноступенчатая турбогазодувка имеет одно рабочее колесо. Если на валу турбогазодувки установлены несколько колес, то такие турбогазодувки называются многоступенчатыми.



В корпусе 1 ротационной газодувки на двух параллельных валах с одинаковой скоростью вращаются два барабана или поршня 2. Один из них приводится во вращение от электродвигателя, второй связан с первым зубчатой передачей. Поршни плотно прилегают друг к другу и стенкам корпуса, образуя две разобщенные камеры, одна из которых является всасывающей,

другая – нагнетательной. Газ поступает в газодувку через всасывающий патрубок 3 и перемещается поршнем по ее периферии. При поступлении в нагнетательный патрубок 4 газ сжимается и выталкивается в напорную трубу.



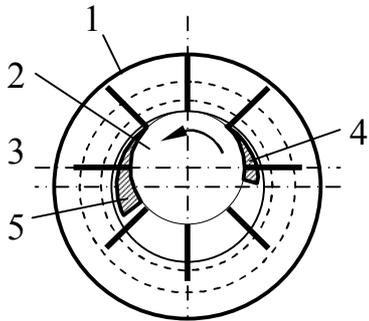
В корпусе 1 ротационно-пластинчатого компрессора вращается эксцентрично расположенный ротор 2. Пластины 3 свободно перемещаются в пазах ротора и при его вращении центробежной силой выбрасываются из его пазов и плотно

прижимаются к внутренней поверхности корпуса. Таким образом серповидное пространство между ротором и корпусом разделено пластинами на ряд неравных по объему камер.

Газ поступает из всасывающего патрубка 4 и заполняет полости камер. В камере, находящейся в положении B, всасывание прекращается и начинается сжатие газа. Сжатие заканчивается, когда камера достигнет положения C. В положении D газ полностью вытесняется из рабочей камеры в нагнетательный патрубок 5. Зазор между ротором и корпусом образует мертвое пространство E. От положения D до положения A происходит расширение газа.

Далее цикл повторяется. Процесс иллюстрируется индикаторной диаграммой, которая для удобства пользования повернута на  $90^\circ$ .

Ротационные пластинчатые компрессоры изготавливают одно – и двухступенчатыми. У одноступенчатого компрессора давление нагнетания не превышает 0,25-0,4 МПа, у двухступенчатых – 0,8-1,5 МПа.

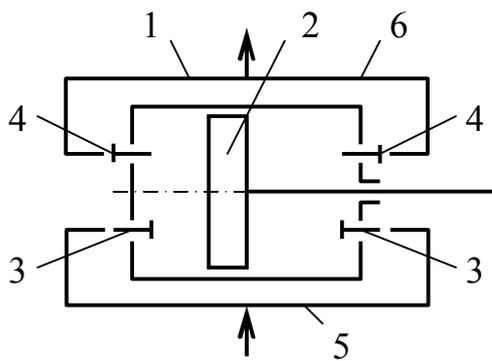


В корпусе 1 водокольцевого компрессора эксцентрично расположен ротор 2 с лопатками 3 плоской формы. Перед пуском компрессор заполняется примерно наполовину водой, которая при вращении ротора отбрасывается центробежной силой к периферии и образует водяное кольцо, коаксиальное с корпусом компрессора и эксцентричное по отношению к ротору. Количество жидкости, заливаемой в компрессор, должно быть таким, чтобы все лопатки ротора были заглублены в слой воды. Лопатки ротора и водяное кольцо образуют полости, объем которых изменяется при вращении ротора.

Газ поступает в полости, объем которых возрастает, из всасывающего отверстия 4 в торцевой крышке компрессора. При дальнейшем вращении ротора газ сжимается из-за уменьшения объема полостей и выталкивается в нагнетательное отверстие 5 в крышке компрессора.

Ротационные водокольцевые компрессоры создают небольшое избыточное давление и поэтому используются в качестве газодувок или вакуум-насосов.

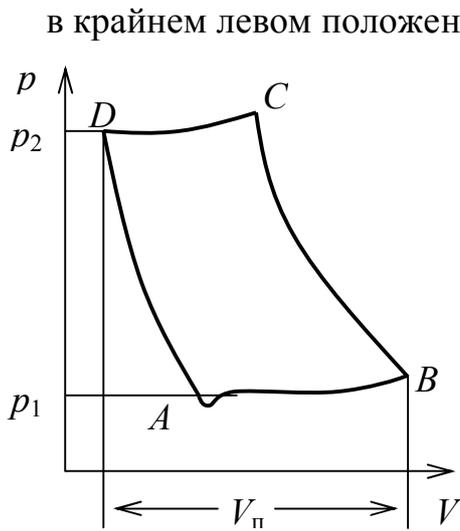
Поршневые компрессоры делятся по числу всасываний и нагнетаний за один двойной ход поршня на компрессоры простого и двойного действия. По числу ступеней сжатия различают компрессоры одноступенчатые и многоступенчатые, которые, в свою очередь, могут быть горизонтальными и вертикальными.



В одноступенчатом компрессоре двойного действия газ попеременно сжимается в цилиндре 1 по обе стороны поршня 2. За один двойной ход происходит два раза всасывание и два раза нагнетание. Цилиндр оборудован двумя всасывающими клапанами 3 и двумя нагнетательными клапанами 4. Компрессоры двойного действия более сложны, чем компрессоры одинарного действия, но почти в два раза более производительны при тех же габаритах и весе.

Индикаторная диаграмма поршневого компрессора представляет собой зависимость между давлением  $p$  и расходом  $V$ , прокачиваемым через компрессор за один двойной ход поршня или за один оборот коленчатого вала.

Точка D на диаграмме соответствует крайнему левому положению поршня, который в реальном компрессоре не подходит вплотную к крышке цилиндра. Пространство между крышкой цилиндра и поршнем, находящимся



в крайнем левом положении, называется мертвым пространством. В зависимости от конструкции компрессора мертвое пространство составляет 2,5-6% рабочего объема цилиндра. Мертвое пространство снижает производительность компрессора. Газ, находящийся в мертвом пространстве, характеризуется точкой  $D$  на диаграмме. Линией  $DA$  характеризуется процесс движения поршня вправо, когда происходит расширение газа в мертвом пространстве и его давление становится немного меньше давления во всасывающей линии  $p_1$ . В положении поршня, соответствующем точке  $A$ , открывается всасывающий клапан и газ поступает в компрессор. Всасывание продолжается до достижения поршнем правого положения (линия  $AB$ ). Всасывающий клапан закрывается. При движении поршня влево начинается сжатие газа (линия  $BC$ ) до давления, несколько превышающее давление  $p_1$  в нагнетательной трубе. Открывается нагнетательный клапан и сжатый газ нагнетается в трубу (линия  $CD$ ).

При сжатии газа он нагревается. Температура газа после адиабатического сжатия

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \text{ К,}$$

где  $T_1$  – температура газа перед компрессором, К;  $p_1, p_2$  – соответственно давление всасывания и нагнетания, МПа;  $k$  – показатель адиабаты. Для воздуха  $k = 1,4$ .

Адиабатическая мощность компрессора

$$N_{\text{ад}} = \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \text{ Вт,}$$

где  $V_1$  – производительность компрессора по условиям всасывания, м<sup>3</sup>/с.

Установочная мощность электродвигателя

$$N_{\text{уст}} = (1,1 \div 1,15) \frac{N_{\text{ад}}}{\eta}, \text{ Вт,}$$

где  $1,1 \div 1,15$  – коэффициент запаса мощности;  $\eta$  – полный к.п.д. компрессора.

$$\eta = \eta_{\text{ад}} \eta_{\text{мех}},$$

где  $\eta_{\text{ад}} = 0,93-0,97$  – адиабатический к.п.д.;  $\eta_{\text{мех}} = 0,85-0,95$  – к.п.д. передачи и двигателя.

## 17. Трубопроводы и арматура химических производств

Трубопроводы широко используются для соединения машин и аппаратов химических производств и изготавливают из труб. Трубы применяются также для изготовления отдельных узлов и деталей оборудования. Трубопроводы изготавливают из труб, диаметры которых нормализованы, т. е. имеют определенный диаметр: 10, 15, 20, 25, 32, 40, 50, 70, 80, 100 мм и т. д. Трубы обозначают так: для труб стальных водогазопроводных: Труба 20x2,8 ГОСТ 3262-75, где 20 – внутренний диаметр, мм; 2,8 – толщина стенки, мм. Стальные бесшовные холоднодеформированные трубы обозначают так:

$$\text{Труба} \frac{57 \times 3,5 \times 1000 \text{ ГОСТ } 8734 - 75}{20 \text{ ГОСТ } 8334 - 74},$$

где 57 – наружный диаметр, мм; 3,5 – толщина стенки, мм; 1000 – длина трубы, мм; 20 – изготовлена из стали 20.

Точно также обозначаются трубы горячедеформированные по ГОСТ 8732-78.

Трубы бесшовные холодно- и горячедеформированные из коррозионно-стойкой стали по ГОСТ 9940-81 обозначаются так:

$$\text{Труба } 76 \times 5 \times 1000 - 08X18H10T \text{ ГОСТ } 9940-81.$$

Трубы бесшовные горячедеформированные из коррозионно-стойкой стали немерной длины по ГОСТ 9940-81 обозначаются так:

$$\text{Труба } 76 \times 5 \text{ 12X18H10T ГОСТ } 9941-81.$$

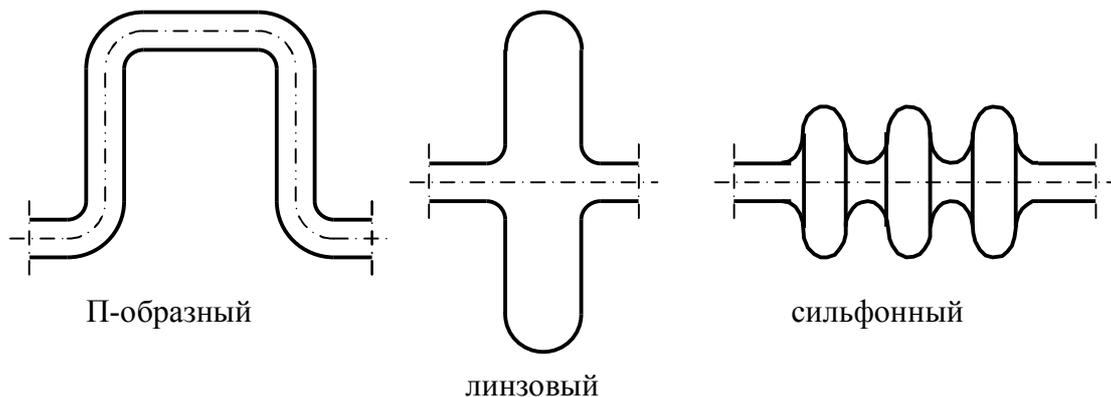
Изготавливаются также трубы из меди, латуни, бронзы, титана и его сплавов, алюминия и его сплавов (В.И.Анурьев. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. – М.: Машиностроение, 2001). Изготавливают также гибкие рукава и шланги из эластичного материала, например, резины, которые при необходимости высокого давления армируют.

Внутренний диаметр трубопроводов определяют по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi w}},$$

где  $V$  – объемный расход потока, м<sup>3</sup>/с;  $w$  – скорость потока, м/с. Для жидкостей обычно принимают  $w = 1$  м/с, для газов –  $w = 10-20$  м/с.

Для компенсации изменения длины при изменении температуры используют П-образные, линзовые или сильфонные компенсаторы.



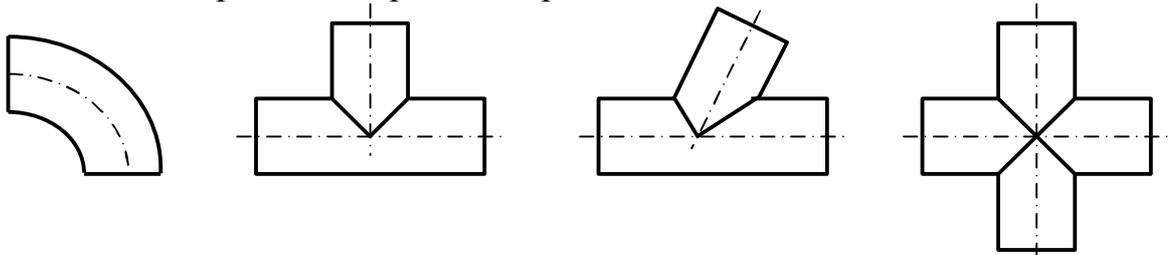
Линейное расширение трубопроводов при определенной температуре  $t$  определяется по формуле

$$L_t = L_0 (1 + at),$$

где  $L_0$  – длина трубопровода при нормальных условиях, мм;  $a$  – коэффициент линейного расширения;  $t$  – температура в трубопроводе, °С.

Для стальных трубопроводов  $a = 0,9173 \cdot 10^{-5}$ ; для медных –  $a = 1,607 \cdot 10^{-5}$ ; для алюминия –  $a = 2,19 \cdot 10^{-5}$ ; для кварцевого стекла –  $a = 0,0385 \cdot 10^{-5}$ .

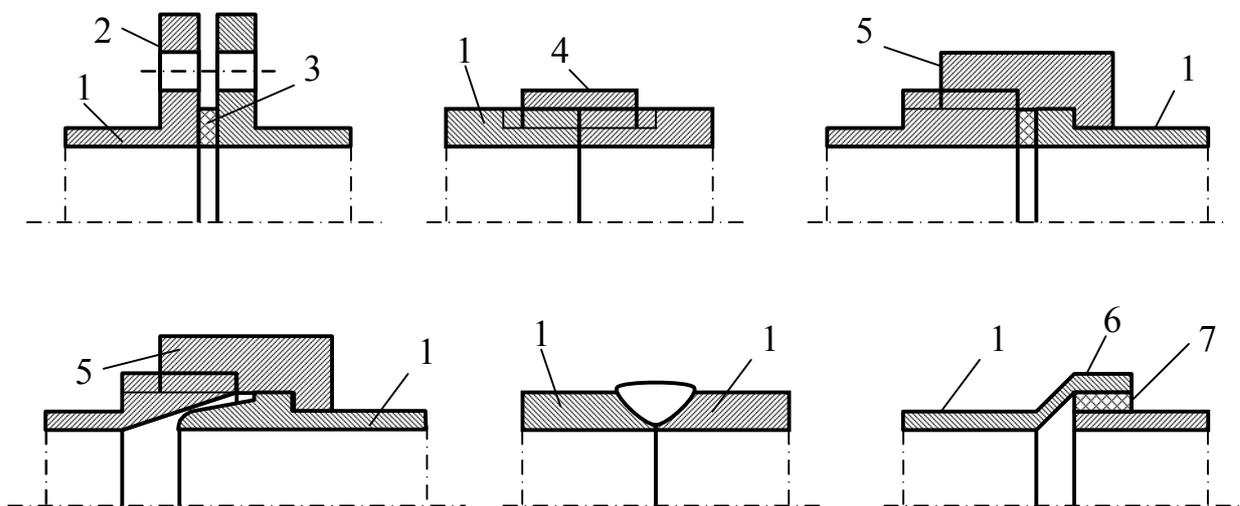
Сваркой изготавливают из труб или отдельно отливают отдельные элементы: колена, тройники, кресты и др.



Радиус изгиба труб составляет (3-5)  $d$ . Меньшее значение соответствует меньшим величинам диаметра и толщины стенки, большее значение – наоборот.

Соединения трубопроводов могут быть: фланцевое, муфтовое, штуцерное, цапковое, сваркой, пайкой, склеиванием, чеканкой.

Чеканку используют для соединения трубопроводов, не испытывающих давления. Склеенные трубопроводы не выдерживают высокой температуры, давления; срок их эксплуатации ограничен.



1 – труба; 2 – фланец; 3 – прокладка; 4 – муфта; 5 – накидная гайка; 6 – раструб; 7 – уплотнение

Трубопроводная арматура разделяется:

а) по назначению:

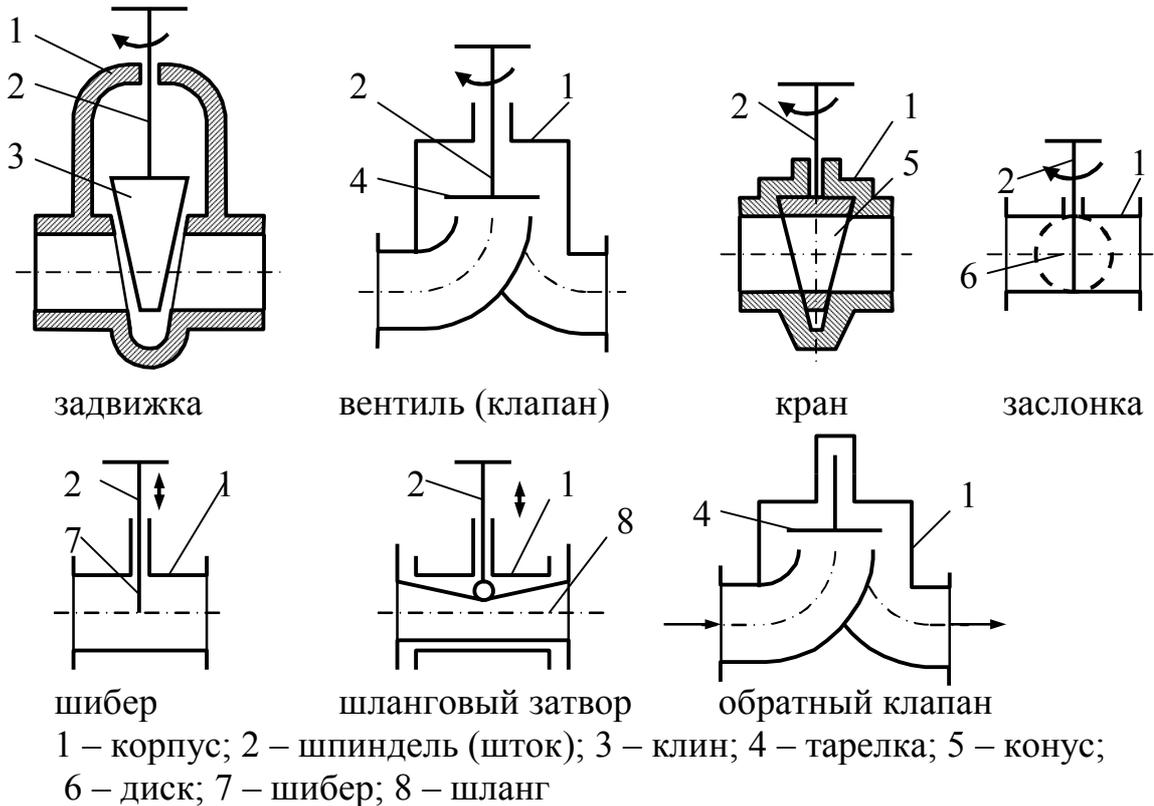
1) запорная; 2) регулирующая; 3) предохранительная; 4) контрольная; 5) фазо-разделительная (конденсатоотводчики);

б) по способу управления:

1) с ручным управлением; 2) с электрическим приводом; 3) с электромагнитным приводом; 4) с пневматическим приводом; 5) с гидравлическим приводом;

в) по способу перекрытия потока:

1) задвижка; 2) клапан (вентиль); 3) кран; 4) заслонка; 5) шибер;  
6) шланговый затвор;



У задвижки затвор может быть в виде клина или иметь параллельные уплотнительные поверхности. Клиновидная форма затвора более приспособлена к ремонту. Перемещение затвора перпендикулярно направлению потока.

У вентиля шпindelь совершает возвратно-поступательные перемещения при его вращении. У клапана шпindelь не вращается. Уплотнительная поверхность параллельна направлению входа потока.

У крана затвор может иметь форму конуса, шара или цилиндра, в которых имеется отверстие. Конусная поверхность более удобна при ремонте. Перекрытие потока выполняется при повороте конусного, шарового или цилиндрического затвора на  $90^\circ$ , когда ось отверстия становится перпендикулярной направлению потока.

У заслонки в открытом положении цилиндрический диск параллелен потоку. Перекрытие потока выполняется при повороте цилиндрического диска на  $90^\circ$ , когда его плоскость перпендикулярна потоку.

У шибера плоскость затвора всегда перпендикулярна потоку. Перекрытие потока выполняется при опускании шибера вниз, когда его нижняя часть касается стенки трубопровода.

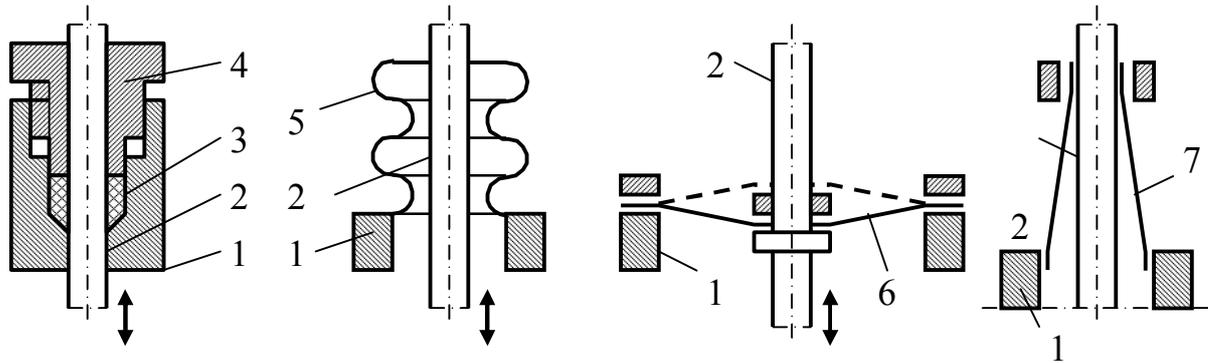
Шланговый затвор выполнен в виде эластичного рукава, помещенного в металлический корпус. Перекрытие потока выполняется при пережатии эластичного рукава, например, при вращении шпинделя 2.

г) по способу присоединения к трубопроводу:

- 1) фланцевая; 2) муфтовая; 3) штуцерная; 4) цапковая; 5) под приварку;

д) по способу герметизации шпинделя:

- 1) сальниковая; 2) сальфонная; 3) мембранная; 4) шланговая;



сальниковая

сальфонная

мембранная

шланговая

1 – корпус; 2 – шпиндель; 3 – сальниковая набивка; 4 – гнундбукса;  
5 – сальфон; 6 – мембрана; 7 – эластичный шланг

е) по конструкции корпуса:

- 1) проходная; 2) угловая; 3) прямоточная; 4) смешительная.



До давления 0,4 МПа возможно применение чугунной арматуры. При большем давлении чугунную арматуру применять нельзя. Она может быть только стальная. Запрещены пневматические испытания арматуры из чугуна, фаолита, стекла.

Клапаны с принудительным приводом (электрическим, пневматическим, гидравлическим) могут быть нормально открытые (НО) или нормально закрытые (НЗ). Нормально открытые клапана открыты при отсутствии управляющего сигнала и закрываются при введении такого сигнала. Нормально закрытые клапана закрыты при отсутствии управляющего сигнала и открываются при введении такого сигнала.

## 18. Тепло- и хладоносители

В химической промышленности приходится осуществлять процессы при самых различных температурах – от близких к абсолютному нулю до нескольких тысяч градусов. Для каждого конкретного процесса, протекающего в определенном температурном интервале, подбираются наиболее подходящие теплоносители и хладоагенты. Применяемые теплоносители и хладоагенты должны быть химически стойкими в рабочих условиях процессов, не давать отложений на стенках аппаратов, не вызывать коррозии аппаратуры и легко транспортироваться по трубам.

Технологические процессы, скорость протекания которых определяется скоростью подвода или отвода тепла, называются тепловыми процессами. К ним относятся нагревание, охлаждение, испарение и конденсация.

Нагревание – повышение температуры обрабатываемых веществ путем подвода к ним тепла.

Охлаждение – понижение температуры обрабатываемых веществ путем отвода от них тепла.

Испарение – перевод в парообразное состояние какой-либо жидкости путем подвода к ним тепла.

Конденсация – сжижение паров какого-либо вещества путем отвода от них тепла.

В тепловых процессах взаимодействуют не менее чем две среды с различными температурами. При этом тепло передается от более нагретой среды к менее нагретой среде без затрат работы. Среда с более высокой температурой, отдающая тепло при теплообмене, называется теплоносителем, среда с более низкой температурой, воспринимающая тепло при теплообмене, называется хладоагентом.

Основными характеристиками теплоносителей являются удельная теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, теплопроводность, плотность и вязкость. Удельная теплоемкость определяет количество теплоты, воспринимаемое единицей массы теплоносителя (кДж/кг). Коэффициент теплоотдачи определяет необходимую поверхность теплообмена (размеры и массу теплообменного оборудования). Теплопроводность сказывается на градиенте температур по толщине слоя теплоносителя. Плотность влияет на размеры и затраты для транспортирования теплоносителей, вязкость – на затраты для транспортирования теплоносителей.

Для охлаждения до обыкновенных температур ( $\approx 10\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) наиболее широко используют доступные и дешевые охлаждающие агенты – воду и воздух. По сравнению с воздухом вода отличается большей теплоемкостью, более высокими коэффициентами теплоотдачи и позволяет проводить охлаждение до более низких температур.

В качестве охлаждающего агента применяют речную, озерную, прудовую или артезианскую воду. Более экономное расходование воды осуществляется при обратном водоснабжении, когда нагретую в теплообменных устройствах циркуляционную воду охлаждают путем ее частичного испарения в открытых бассейнах или градирнях при смешении с потоком воздуха.

Речная, озерная или прудовая вода имеют температуру 4–25 °С, артезианская вода – 8–15 °С, оборотная вода 25 °С в летних условиях.

Вода используется главным образом в поверхностных теплообменниках, в которых она движется снизу вверх, но может применяться также в теплообменниках смешения, например, разбрызгивается в потоке газа для охлаждения или увлажнения.

Когда температура охлаждаемой среды превышает температуру кипения воды при атмосферном давлении, то охлаждение проводят при частичном испарении воды, что позволяет снизить расход воды на охлаждение. Испарительное охлаждение осуществляется в оросительных теплообменниках, градирнях и других теплообменных аппаратах.

Воздух как охлаждающий агент широко используется в смесительных теплообменниках – градирнях, которые представляют собой полые башни, в которых сверху распыляется вода, а снизу вверх движется атмосферный воздух, иногда нагнетаемый вентилятором. Для увеличения поверхности контакта между фазами в градирне помещают насадку, или снижают размер капель разбрызгиваемой воды.

Атмосферный воздух, несмотря на свои низкие теплофизические параметры, находит применение в качестве охлаждающего агента. Для улучшения теплообмена увеличивается скорость движения воздуха и поверхность теплообмена со стороны воздуха, например, путем оребрения трубок. При использовании воздушного охлаждения в крупных промышленных конденсаторах паров, затраты и, следовательно, стоимость энергии на принудительную циркуляцию воздуха могут быть меньше расходов, связанных с водяным охлаждением, и воздушное охлаждение в целом оказывается экономичнее водяного. Кроме того, воздушное охлаждение позволяет снизить общий расход воды, что важно при ограниченных водных ресурсах.

Для охлаждения до отрицательных температур применяют холодильные агенты, представляющие собой пары низкокипящих жидкостей (аммиак, фреоны), сжиженные газы (СО<sub>2</sub>, О<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, этан и др.) или холодильные рассолы. Эти агенты используют в специальных холодильных установках, в которых при испарении хладагентов тепло отнимается от охлаждаемой среды, после чего пары сжимаются в компрессоре и сжижаются, отдавая теплоту воде или воздуху. В качестве холодильных рассолов применяют водный раствор хлорида кальция (до – 50 °С) или этиленгликоль (до – 60 °С).

Одним из наиболее широко применяемых греющих агентов является водяной пар. Это объясняется его высокой удельной теплотой конденсации (2260 кДж/кг) и высоким коэффициентом теплоотдачи между ним и теплопередающей поверхностью. Важным достоинством водяного пара является постоянство его температуры конденсации при данном давлении, что дает возможность точно поддерживать температуру нагрева, а также в случае необходимости регулировать ее, изменяя давление греющего пара. Водяной пар доступен и пожаробезопасен.

Основной недостаток водяного пара – значительное возрастание давления с повышением температуры. Поэтому температуры, до которых можно

производить нагревание насыщенным водяным паром, обычно не превышают 180–190°C, что соответствует давлению пара 1–1,2 МПа. При бóльших давлениях возрастает толщина стенок теплообменников и трубопроводов. Поэтому целесообразно энергетический пар высокого давления направлять в турбины для выработки электроэнергии, а мятый пар низкого давления использовать в качестве теплоносителя.

Тепло перегрева водяного пара мало по сравнению с его теплотой конденсации, коэффициент теплоотдачи значительно меньше, чем от насыщенного пара. Поэтому перегретый водяной пар редко используют в качестве теплоносителя. Более рационально использование перегретой воды при высоком давлении, достигающем критического (22,1 МПа, 374°C). Перегретой водой возможен нагрев материалов до температур до 350°C. Однако высокое давление значительно усложняет и удорожает нагревательную установку и повышает стоимость ее эксплуатации.

Широко распространен нагрев глухим паром, передающим тепло через стенку теплообменника. В тех случаях, когда допустимо смешение нагреваемой среды с паровым конденсатом, используют нагрев острым паром, который вводят непосредственно в нагреваемую среду. Такой способ проще нагрева глухим паром и позволяет лучше использовать тепло пара, т. к. паровой конденсат смешивается с нагреваемой жидкостью и их температуры выравниваются.

Горячая вода в качестве теплоносителя по сравнению с насыщенным водяным паром обладает определенными недостатками. У воды ниже коэффициент теплоотдачи, равномерность нагрева снижается из-за градиента температур по толщине слоя воды. Однако в системах централизованного отопления использование воды более экономно, по сравнению с паром. Горячую воду применяют до температур 100°C, т. к. при больших температурах необходимо повышать ее давление.

Дымовые или топочные газы относятся к числу давно используемых нагревательных агентов. Они позволяют осуществлять нагревание до высоких температур, достигающих 1000°C при незначительном избыточном давлении в теплообменнике со стороны газов. Наиболее существенным недостатком топочных газов являются: неравномерность нагрева, обусловленная охлаждением газа в процессе теплообмена, трудность регулирования температуры обогрева, низкие коэффициенты теплоотдачи от газа к стенке, возможность загрязнения нагреваемых материалов продуктами неполного сгорания топлива. Расходы топочных газов велики из-за их низкой удельной теплоемкости.

Минеральные масла давно используются для равномерного нагревания различных продуктов. В качестве нагревающих агентов используют минеральные масла, отличающихся высокой температурой вспышки – до 310 °C (цилиндровое, компрессорное). Поэтому верхний предел нагревания маслами ограничен температурами 250–300°C.

Нагрев с помощью масел производят либо помещая теплоиспользующий аппарат с рубашкой, заполненный маслом, в печь, в которой тепло пере-

дается маслу топочными газами, либо устанавливая электронагреватели внутри масляной рубашки.

Масла являются наиболее дешевыми высокотемпературными теплоносителями. Однако им присущи относительно невысокие температурные пределы применения, низкие коэффициенты теплоотдачи, которые снижаются еще больше при термическом разложении и окислении масел. Для снижения последнего рекомендуется разность температур между маслом и нагреваемым продуктом не более 15–20°C.

К группе высокотемпературных органических теплоносителей (ВОТ) относятся индивидуальные органические вещества: глицерин, этиленгликоль, дифенил, дифениловый эфир, дифенилметан, многокомпонентные ВОТ и др. Дифенильная смесь, состоящая из 26,5% дифенила и 73,5% дифенилового эфира, известна также под названием Даутерм А, динил и др. При температуре плавления 12,3°C и температуре кипения 258°C смесь может использоваться в жидком виде до температуры 250°C при атмосферном давлении. При избыточном давлении она может применяться до температуры 280°C. В парообразном состоянии дифенильная смесь может применяться до температуры 380°C. При более высоких температурах происходит заметное разложение смеси.

Основным достоинством дифенильной смеси является возможность получения высоких температур без высоких давлений. Поэтому ее можно использовать вместо змеевиков в более простых теплообменных устройствах – рубашках. Недостатком дифенильной смеси, как и других органических теплоносителей, является малая теплота парообразования, что частично компенсируется большей, чем у воды плотностью паров, в результате чего при испарении или конденсации смеси количество тепла, выделяющееся в единице объема, близко к соответствующей величине для воды. Смесь горюча, но практически взрывобезопасна и оказывает лишь слабое токсичное воздействие на человека.

Из различных неорганических солей и сплавов, применяемых для нагрева до высоких температур, наибольшее практическое значение имеет нитрит-нитратная смесь – тройная эвтектическая, содержащая по массе 40% азотистокислого натрия, 7% азотнокислого натрия и 53% азотнокислого калия. Температура плавления смеси 142,3°C. Эта смесь применяется до температур 500–540°C, практически не вызывает коррозии углеродистых сталей до температуры 450°C и нержавеющей сталей при более высокой температуре.

Нагрев жидкими металлами (ртуть, натрий, калий, свинец, различные сплавы) до температур 400 – 800°C и выше требует повышенной герметичности теплообменников и небезопасен из-за ядовитости паров.

Нагрев электрическим током можно проводить в широком диапазоне температур. Электронагреватели просты по устройству, компактны и удобны в работе. В зависимости от способа превращения электрической энергии в тепло различают нагрев электрическим сопротивлением, индукционный нагрев, высокочастотный нагрев и нагрев электрической дугой. Однако применение электроэнергии относительно дорого.

## 19. Теплообменные аппараты

Теплообменные аппараты – это устройства, в которых происходит теплообмен между греющей и нагреваемой средами. Теплообменные аппараты по принципу действия разделяют на поверхностные, смесительные и регенеративные.

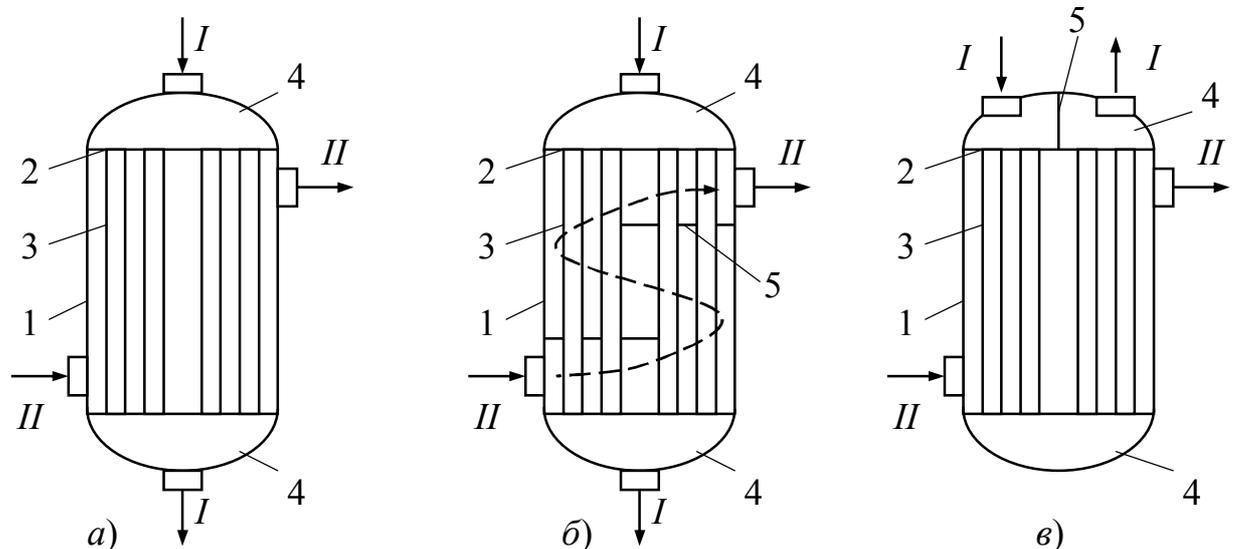
Поверхностные теплообменники: 1) с трубчатой поверхностью теплообмена – кожухотрубчатые (кожухотрубные), погружные змеевиковые, типа «труба в трубе», оросительные; 2) с плоской поверхностью теплообмена – пластинчатые, спиральные, с оребренной поверхностью теплообмена; с поверхностью теплообмена, образованной стенками аппарата; 3) блочные; 4) шнековые. Поверхностные теплообменники наиболее распространены.

Смесительные теплообменники: 1) градирни; 2) конденсаторы смешения; 3) аппараты с барботажом газа; 4) аппараты с погружными горелками.

Регенеративные теплообменники: 1) с неподвижной насадкой; 2) с движущейся насадкой.

Конструкции теплообменников должны отличаться простотой, удобством монтажа или ремонта. В ряде случаев конструкция теплообменника должна обеспечивать возможно меньшее загрязнение поверхности теплообмена и быть легко доступной для осмотра и очистки.

Кожухотрубчатые теплообменники состоят из корпуса или кожуха 1, приваренных к нему плоских трубных решеток 2, в которых закреплен трубный пучок 3. К трубным решеткам крепятся сваркой или на фланцах крышки



4. В кожухотрубчатом теплообменнике одна из обменивающихся теплом сред  $I$  движется по трубкам 3 (в трубном пространстве), а другая  $II$  – в межтрубном пространстве.

Теплообменник на схеме *a*) является одноходовым. При сравнительно небольших расходах сред их скорости движения низки и коэффициенты теплоотдачи невелики. Для увеличения последних при данной поверхности теплообмена можно уменьшить диаметр труб и соответственно увеличить их высоту (длину). Скорость теплообмена можно увеличивать применением

многоходовых теплообменников путем установки перегородок в межтрубном пространстве (схема б) или в крышках 4 теплообменников (схема в).

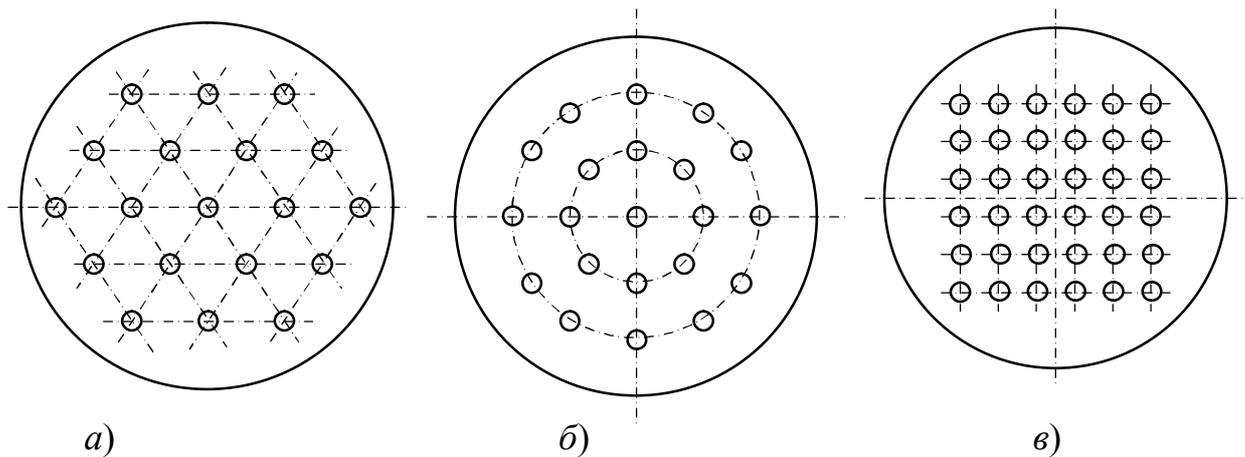
Среды обычно направляют противотоком друг к другу. При этом нагреваемую среду направляют снизу вверх, а среду, отдающую тепло, – в противоположном направлении. Такое направление движения каждой среды совпадает с направлением, в котором стремится двигаться данная среда под влиянием изменения ее плотности при нагревании или охлаждении.

При указанном направлении движения сред достигается более равномерное распределение скоростей и благоприятные условия теплообмена по площади поперечного сечения аппарата.

Многоходовые теплообменники работают по принципу смешанного тока, что приводит к некоторому снижению движущей силы теплопередачи по сравнению с противоточным движением.

Одноходовые и многоходовые теплообменники могут быть вертикальными или горизонтальными. Вертикальные теплообменники более просты в эксплуатации и занимают меньшую производственную площадь.

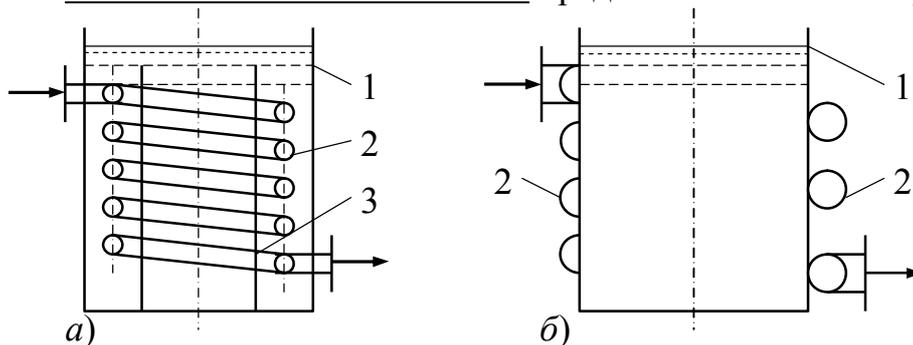
Трубы в решетках обычно размещают по периметрам правильных шестиугольников, т. е. по вершинам равносторонних треугольников (схема а), что обеспечивает наибольшую компактность. Реже применяют размещение



труб по концентрическим окружностям (схема б). В отдельных случаях, когда необходимо обеспечить удобную очистку наружной поверхности труб, их размещают по периметрам прямоугольников (схема в).

Трубы закрепляют в решетках развальцовкой, сваркой и пайкой, применяемой главным образом для медных и латунных труб.

Змеевиковый теплообменник представляет собой спиральный змеевик 2,



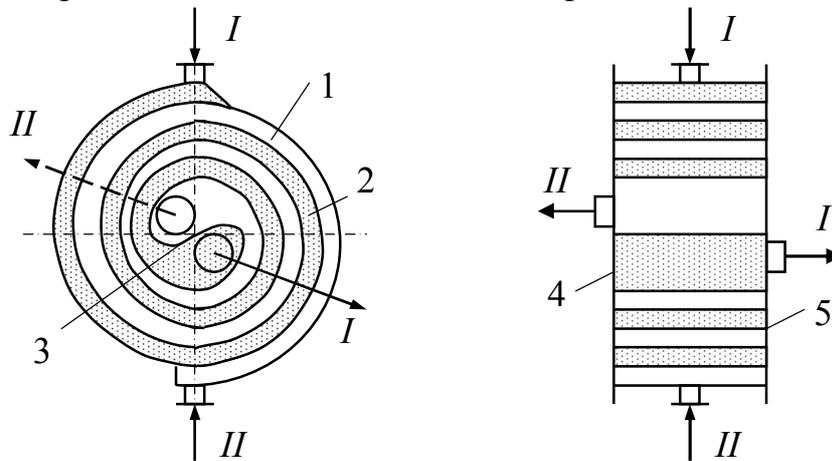
заключенный в корпус 1 (схема *a*). Один из теплоносителей движется внутри змеевика, второй находится с аппарате. Для интенсификации теплообмена внутри корпуса устанавливается стакан 3 или перемешивающее устройство, что увеличивается скорость потока среды снаружи змеевика.

Змеевик может быть выполнен в виде прямых труб, соединенных калачами. При больших расходах среды, движущейся по змеевику из прямых труб, ее сначала направляют в общий коллектор, из которого она направляется в параллельные секции труб, а затем удаляется также через общий коллектор.

Погружные змеевики отличаются простотой устройства, но вследствие низких коэффициентов теплопередачи из-за свободной конвекции у поверхности труб характеризуются малой производительностью.

Змеевик в виде труб, полутруб, угольников и др. может быть приварен снаружи корпуса (схема *б*).

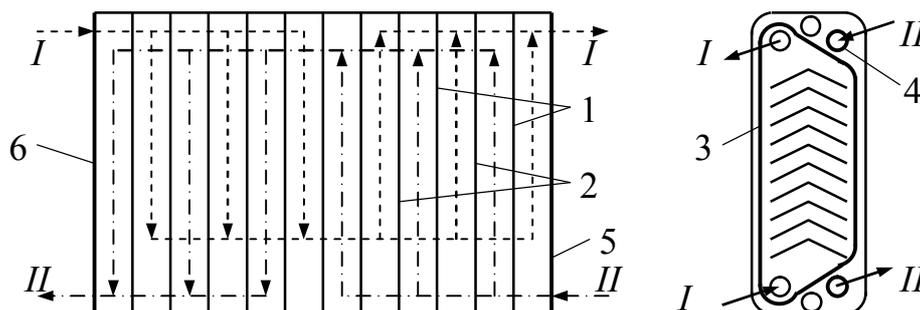
В спиральном теплообменнике поверхность теплообмена образуется



двумя металлическими листами 1 и 2, свернутыми по спирали. Внутренние концы листов приварены к глухой перегородке 3, а их наружные концы сварены друг с другом. С торцов спирали закрыты установленными на прокладках плоскими крышками 4 и 5. Таким образом внутри аппарата образуются два изолированных один от другого спиральных канала шириной 2–8 мм, по которым, обычно противоток, движутся теплоносители.

Спиральные теплообменники весьма компактны, работают при высоких скоростях теплоносителей и обладают при равных скоростях сред меньшим гидравлическим сопротивлением по сравнению с трубчатыми всех форм. Однако они сложнее в изготовлении и работают при ограниченных избыточных давлениях (до 1 МПа).

В пластинчатых теплообменниках поверхность теплообмена образуется

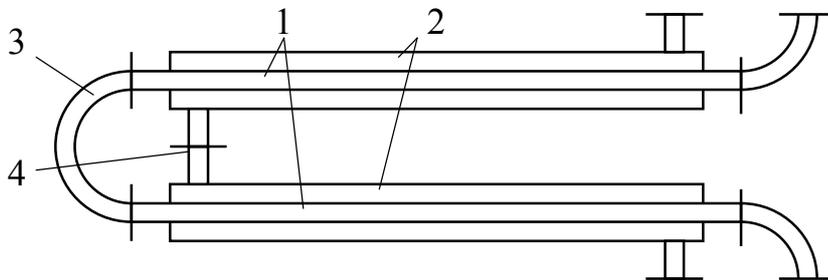


гофрированными параллельными пластинами 1 и 2, с помощью которых создается система узких каналов шириной 3–6 мм с волнистыми стенками. Жидкости, между которыми происходит теплообмен, движутся в каналах между смежными пластинами, омывая противоположные боковые стороны каждой пластины.

Пластина имеет на передней поверхности 3 прокладки. Большая прокладка 3 ограничивает канал для прохождения жидкости *I* между пластинами и отверстия для ввода и вывода жидкости. Две малые прокладки 4 уплотняют отверстия для прохода жидкости *II*. Пакет пластин зажимается подвижной 5 и неподвижной 6 плитами.

Вследствие высоких скоростей движения жидкостей между пластинами достигаются высокие коэффициенты теплопередачи при малом гидравлическом сопротивлении. Пластинчатые теплообменники легко разбираются и очищаются от загрязнений. К их недостаткам относятся: невозможность работы при высоких давлениях и трудность выбора эластичных химически стойких материалов для прокладок.

Теплообменники типа «труба в трубе» состоят из нескольких последовательно соединенных трубчатых элементов, образованных двумя concentрически расположенными трубами. Один теплоноситель движется по внутренним трубам 1, а другой – по кольцевому зазору между внутренними 1 и наружными 2 трубами. Внутренние трубы обычно диаметром 50–100 мм соединяются отводами 3, а наружные трубы обычно диаметром 75–150 мм – патрубками 4.



Благодаря небольшому поперечному сечению трубного и межтрубного пространства в двухтрубчатых теплообменниках даже при небольших расходах достигаются довольно высокие скорости движения жидкостей, равные обычно 1–1,5 м/с. Это позволяет получать высокие коэффициенты теплопередачи и достигать более высоких тепловых нагрузок на единицу массы аппарата по сравнению с кожухотрубчатыми теплообменниками. Кроме того, с увеличением скоростей теплоносителей уменьшается возможность отложения загрязнений на поверхности теплообмена. Теплообменники типа «труба в трубе» могут эффективно работать при небольших расходах теплоносителей и при их высоких давлениях. При необходимости большой поверхности теплообмена аппараты выполняют из нескольких параллельных секций.

Вместе с тем эти теплообменники более громоздки, чем кожухотрубчатые, и требуют большего расхода металла на единицу поверхности теплообмена, которая образуется только внутренними трубами.

## 20. Расчет теплообменников

При проектировании теплообменников их тепловой расчет сводится к определению необходимой поверхности теплообмена при исходных расходах, начальных и конечных температурах теплоносителей. Для действующих теплообменников выполняют поверочные тепловые расчеты, в которых возможная производительность аппарата сопоставляется с фактической и определяются условия, соответствующие оптимальному режиму работы теплообменника.

Тепловой расчет проектируемого теплообменника производят в следующей последовательности.

1. Тепловую нагрузку находят по уравнению теплового баланса

$$Q = G_1(I_{1н} - I_{1к}) = G_2(I_{2н} - I_{2к}),$$

где  $G_1, G_2$  – массовые расходы теплоносителей, кг/с;  $I_n, I_k$  – начальная и конечная энтальпия (теплосодержание) теплоносителей, кДж/кг.

При изменении агрегатного состояния в уравнении учитывается удельная теплота парообразования или конденсации. Из этого же уравнения определяют также расходы теплоносителей. Если же расходы заданы, то по уравнению можно рассчитать начальную или конечную температуру одного из теплоносителей. Когда неизвестны конечные температуры обоих теплоносителей, то ими задаются, принимая во внимание, что разность температур между теплоносителями на конце теплообменника должна быть практически не менее 3–5°C.

2. Средняя разность температур определяется как среднелогарифмическая из большей и меньшей разности температур теплоносителей на концах теплообменника

$$\begin{array}{ccc} t_{1н} & \longrightarrow & t_{1к} \\ t_{2н} & \longleftarrow & t_{2к} \\ \Delta t_{\bar{\theta}} & & \Delta t_m \end{array} \quad \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{\theta}} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{\theta}}}{\Delta t_m}}.$$

Если отношение большей и меньшей разности температур не превышает двух, то средняя разность температур находится как среднеарифметическая

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{\theta}} + \Delta t_m}{2}.$$

3. Для определения коэффициента теплопередачи  $K$  необходимо предварительно рассчитать коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  по обе стороны стенки, разделяющей обменивающиеся теплом среды, а также термическое сопротивление самой стенки, на которой в процессе эксплуатации обычно образуется (с одной или двух сторон) слой загрязнений. Коэффициенты теплоотдачи рассчитывают в зависимости от условий теплоотдачи из критерия Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}.$$

В свою очередь критерий Нуссельта находят опытным путем по уравнению

$$Nu = A Re^a Pr^b S^c \dots,$$

где  $Re = \frac{wd\rho}{\mu}$  – критерий Рейнольдса;  $Pr = \frac{\nu}{a}$  – критерий Пандтля;  $w$  – скорость движения среды, м/с;  $d$  – диаметр трубки, м;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость среды, Па·с;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $A$  – коэффициент, определяемый опытным путем;  $S$  – симплекс геометрического подобия;  $a, b, c$  – показатели степеней, определяемые опытным путем.

В последнее уравнение могут входить и другие величины, влияющие на теплообмен.

Термическое сопротивление стенки определяют с учетом толщины и теплопроводности собственно стенки и загрязнений.

Коэффициент теплопередачи определяют по уравнению

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где  $\sum \frac{\delta}{\lambda}$  – сумма термических сопротивлений собственно стенки и загрязнений, Вт/м<sup>2</sup>·град;  $\delta$  – толщина слоя, м,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности слоя, Вт/м·град,

4. Поверхность теплообмена находят по уравнению

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{cp}}.$$

5. Конструктивный расчет производят после теплового расчета теплообменника. Для кожухотрубчатых аппаратов он сводится к определению числа или длины труб, размещению их в трубной решетке с учетом числа ходов и нахождению основных размеров (диаметр и высота) аппарата.

Число труб  $n$  и длина  $l$  каждой трубы связаны зависимостью

$$n = \frac{F}{\pi d l}.$$

Длину труб обычно округляют до ближайшей большей величины по стандарту или нормали.

Внутренний диаметр кожухотрубчатого теплообменника рассчитывают по формуле

$$D_{вн} = s(a - 1) + 4d_n,$$

где  $s = (1,2 - 1,5)d_n$  – шаг между трубами, м;  $a$  – число труб, размещенных на диаметре;  $d_n$  – наружный диаметр труб, м.

Диаметры патрубков теплообменника определяют по формуле

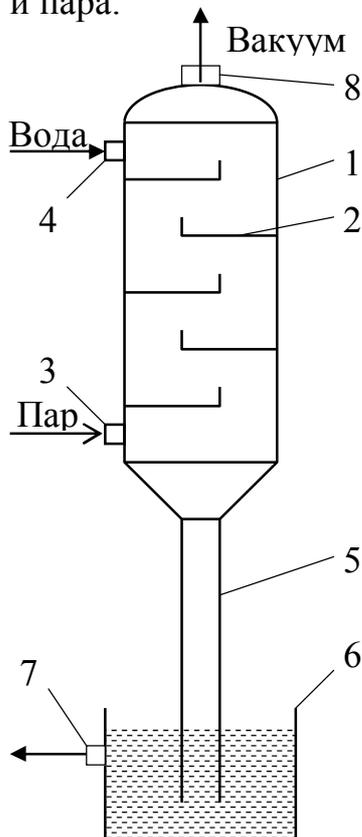
$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi w}} = \sqrt{\frac{4G}{\pi w \rho}},$$

где  $V$  – объемный расход среды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $G$  – массовый расход среды,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  
 $w$  – скорость движения среды,  $\text{м}/\text{с}$ ;  
 $\rho$  – плотность среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Ориентировочная скорость движения сред принимается, исходя из следующих соображений. Для жидкостей, двигающихся под воздействием давления,  $w = 1\text{--}2$   $\text{м}/\text{с}$ , самотеком –  $w = 0,5$   $\text{м}/\text{с}$ . Для газов при атмосферном давлении  $w = 10\text{--}20$   $\text{м}/\text{с}$ , при вакууме – до  $50$   $\text{м}/\text{с}$ .

При необходимости выполняется гидравлический расчет теплообменника.

В том случае, когда не требуется получить чистый конденсат греющего водяного пара для его последующего использования, может быть использован более простой по устройству и более дешевый конденсатор смешения. Одним из наиболее распространенных является полочный барометрический конденсатор, работающий при противоточном движении охлаждающей воды и пара.



В цилиндрический корпус 1 с сегментными полками 2 снизу через штуцер 3 поступает пар. Вода подается через штуцер 4 и каскадно переливается по полкам, имеющим невысокие борты. При соприкосновении с водой пар конденсируется. Смесь конденсата и воды сливается самотеком через барометрическую трубу 5 высотой примерно  $10$   $\text{м}$  и далее в барометрический сборник 6, из которого отводится по штуцеру 7.

Вместе с паром и охлаждающей водой в конденсатор попадает некоторое количество воздуха, который также подсасывается через неплотности фланцевых соединений. Присутствие неконденсируемых газов может вызвать значительное снижение разрежения в конденсаторе, которое необходимо поддерживать на уровне  $0,01\text{--}0,02$   $\text{МПа}$ . Поэтому неконденсируемые газы отводятся через штуцер 8 вакуум-насосом.

Иногда вместо сегментных полок применяют чередующиеся диски и кольца, а также ситчатые сегментные полки, через отверстия которых вода стекает каплями, увеличивая поверхность контакта.

Диаметр барометрического конденсатора определяют по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4G}{\pi \rho w_n}},$$

где  $G$  – расход пара,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  
 $\rho$  – плотность пара,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$w_n$  – скорость пара, м/с. При остаточном давлении 0,01–0,02 МПа рекомендуется принимать  $w_n = 10–15$  м/с.

Расход охлаждающей воды рассчитывают по уравнению

$$W = G \frac{I_n - c_v t_k}{c_v (t_k - t_n)},$$

где  $I_n$  – теплосодержание пара, кДж/кг;

$c_v$  – удельная теплоемкость воды, кДж/кг·град;

$t_n, t_k$  – начальная и конечная температура воды, °С.

Диаметр барометрической трубы определяется при скорости воды и конденсата  $w = 0,5–1$  м/с

$$d = \sqrt{\frac{4(G+W)}{\pi r w}}.$$

Высота барометрической трубы, определяемая от нижнего края корпуса аппарата до уровня жидкости в барометрическом сборнике, складывается из высоты водяного столба жидкости  $H_{\text{вак}}$ , соответствующей вакууму разрежения в конденсаторе и необходимой для уравнивания атмосферного давления, высоты  $H_{\text{гидр}}$ , отвечающей напору, затрачиваемому на преодоление гидравлического сопротивления в трубе и создание скоростного напора  $w^2/2g$  воды в барометрической трубе. Кроме того, высоту трубы принимают с запасом, равным 0,5 м, чтобы обеспечить бесперебойную подачу пара в конденсатор

$$H_{\text{тр}} = H_{\text{вак}} + H_{\text{гидр}} + 0,5 \text{ м}$$

причем

$$H_{\text{вак}} = 10,33 \frac{B}{760}, \text{ м},$$

где  $B$  – разрежение в конденсаторе, мм рт. ст.

Потерю напора определяют, задаваясь предварительно высотой трубы  $H_{\text{тр}}$  и принимая сумму коэффициентов местных сопротивлений равной  $\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} = 1,5$ ,

$$H_{\text{гидр}} = \frac{w^2}{2g} \left( 1 + \lambda \frac{H_{\text{тр}}}{d} + 1,5 \right),$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения.

Количество отсасываемого воздуха и неконденсируемых газов зависит от содержания его в конденсируемом паре и от подсоса воздуха через неплотности во фланцевых соединениях. Обычно приближенно принимают, что на каждую 1 тонну охлаждающей воды и конденсата вносится 0,025 кг воздуха и на 1 тонну парового конденсата подсасывается через неплотности 10 кг воздуха. Тогда расход воздуха

$$G_{\text{возд}} = 0,001[0,025(G+W) + 10W].$$

Воздух и неконденсируемые газы из барометрических конденсаторов удаляют через ловушку-брызгоуловитель главным образом водокольцевыми или поршневыми вакуум-насосами.

## 21. Способы интенсификации теплообмена

Интенсификация теплообмена может быть осуществлена различными способами и устройствами. В соответствии с основным уравнением теплообмена

$$Q = KF\Delta t_{cp}$$

количество передаваемой теплоты увеличивается при возрастании коэффициента теплопередачи, поверхности теплообмена и средней разности температур.

В свою очередь повышение коэффициента теплообмена

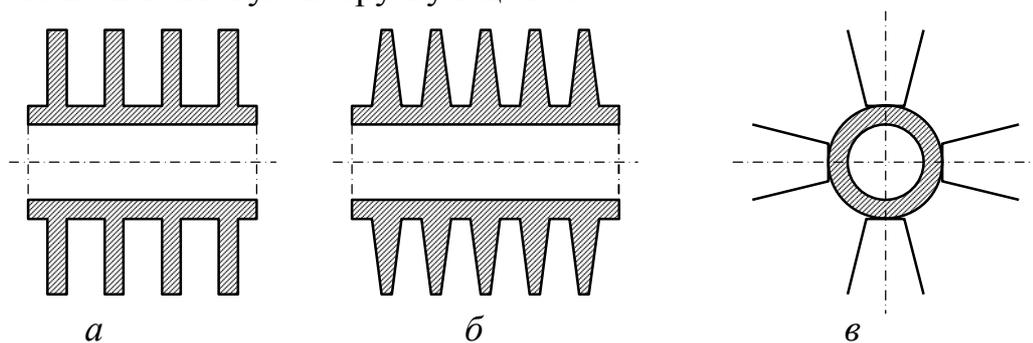
$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

достигается при возрастании теплоотдачи со стороны обоих теплоносителей, теплопроводности стенки и снижении толщины стенки.

Поскольку коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$  зависят от режимов движения, то их возрастание достигается турбулизацией теплоносителей путем увеличения скорости их движения вблизи поверхности теплообмена. Таким образом, интенсификация теплообмена достигается за счет указанных факторов.

К эффективным аппаратам можно отнести пластинчатые теплообменники, у которых для турбулизации потока поверхность пластин, соприкасающаяся с теплоносителями, выполнена гофрированной.

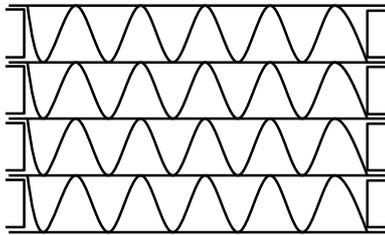
К числу компактных и эффективных теплообменников относятся теплообменные аппараты с оребренными поверхностями. Применение оребрения со стороны теплоносителя с низкими значениями коэффициентов теплоотдачи (газы, вязкие жидкости) позволяет значительно повысить поверхность теплообмена и тепловую нагрузку в целом.



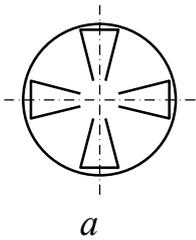
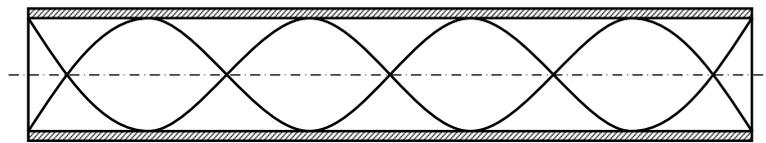
Помимо трубчатых теплообменников с трубами, имеющими поперечные ребра прямоугольного (а), трапецевидного (б) сечения или продольные ребра (в), разработаны конструкции с проволочными, игольчатыми, непрерывными спиральными ребрами. Трубы с поперечными ребрами различной формы широко используются, в частности, в аппаратах для нагрева воздуха (калориферах), а также в аппаратах воздушного охлаждения. Иногда используют продольные ребра, которые для турбулизации пограничного слоя, что особенно важно при ламинарном режиме движения теплоносителя, на опре-

деленном расстоянии надрезаются. Направление потока должно быть перпендикулярным оси трубы.

Конструкции оребренных теплообменников разнообразны. Схема устройства пластинчато-ребристого теплообменника, работающего по принципу противотока, представлена на рисунке. Теплообменники такого типа используются, например, в низкотемпературных установках разделения воздуха.

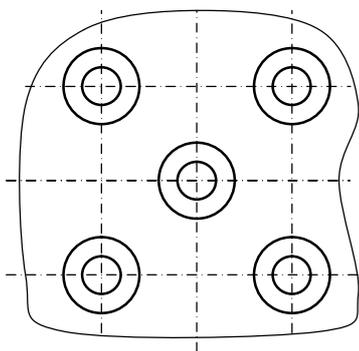
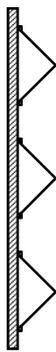


Оребрение может быть выполнено не только снаружи трубок, но и внутри их (схема *a*). Кроме того для турбулизации потока внутри гладкой трубы устанавливают вставки, которые закручивают поток и придают им помимо осевого еще и тангенциальное направление (схема *б*). При той же осевой скорости за счет тангенциальной составляющей общая скорость увеличивается. Причем это увеличение максимальное у поверхности теплообмена.

*a**б*

Поверхность теплообмена рубашек аппаратов ограничена площадью стенок. Давление теплоносителя в рубашке не превышает 1 МПа, поскольку при больших давлениях чрезмерно утолщаются стенки аппарата и рубашки.

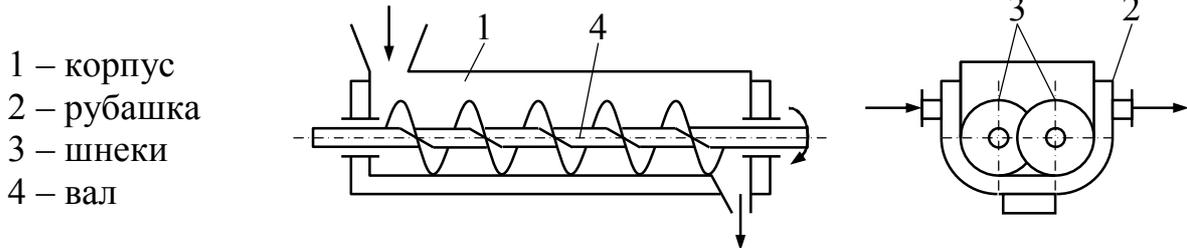
При больших давлениях до 7,5 МПа применяют рубашки с анкерными

*a**б**в**г*

связями (*a*). Эти рубашки имеют выштампованные в шахматном порядке круглые отверстия, а по внутренней кромке отверстий стенка рубашки приварена к наружной стенке аппарата. Рубашки такой конструкции обладают не только повышенной механической прочностью, но и обеспечивают более высокие скорости движения теплоносителя в полостях между анкерными связями, а, следовательно, более интенсивный массообмен.

Теплообмен при повышенных скоростях теплоносителя и давлениях до 6 МПа может быть осуществлен также с помощью змеевиков, приваренных в наружной стенке аппарата и изготовленных из полутруб (б) или угловой стали (в). Для более высоких давлений, достигающих 25 МПа, например, в системах перегрева перегретой водой, к наружной стенке аппарата многослойным швом приваривают змеевики из труб.

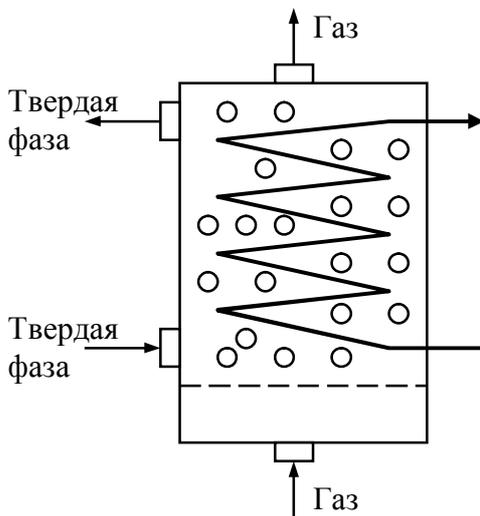
При тепловой обработке высоковязких жидкостей и сыпучих материалов, обладающих низкой теплопроводностью, теплоотдача может быть интенсифицирована путем непрерывного обновления поверхности материала, соприкасающегося со стенками аппарата.



- 1 – корпус
- 2 – рубашка
- 3 – шнеки
- 4 – вал

Материал поступает с одного конца корпуса 1 с рубашкой 2 и перемещается вращающимися навстречу друг другу шнеками 3, которые транспортируют его к противоположному разгрузочному концу корпуса. Иногда для увеличения поверхности теплообмена шнеки изготавливают полыми и в них через полые валы подается теплоноситель через полые витки шнеков.

Интенсификация теплообмена, в котором участвует вязкая жидкость, достигается турбулизацией слоя жидкости особенно возле теплообменной поверхности с помощью перемешивающих устройств. Для этих целей используются якорные, рамные или скребковые мешалки.



Для интенсификации нагрева, обжига, горения, сушки и некоторых других процессов широкое применение нашли установки с так называемым кипящим слоем. Кипящим слоем называется взвешенный слой, когда масса мелкозернистых твердых частиц в восходящем потоке газа в результате непрерывного перемешивания приходит в легкоподвижное состояние, напоминающее кипящую жидкость. Благодаря интенсивному перемешиванию твердых частиц, в кипящем слое выравнивается поле температур, что исключает местные перегревы.

Теплообмен осуществляется: 1) между частицами твердого материала и газовым потоком; 2) между кипящим слоем и поверхностью теплообмена, расположенной в слое или вне аппарата. Теплообмен в кипящем слое складывается из конвективного переноса теплоты от газа к твердым частицам и переноса теплоты внутри самих частиц. Теплота может передаваться через стенки аппарата, через трубы змеевика или иное теплообменное устройство.

Коэффициент теплопередачи между кипящим слоем и поверхностью теплообмена ( $100\text{--}1100 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ) выше, чем в обычных трубчатых газовых теплообменниках. Он увеличивается с повышением скорости газа до определенного максимального значения и с повышением температуры, когда кроме конвекции теплота передается радиацией. При дальнейшем повышении скорости газа уменьшается объемная концентрация частиц, увеличивается порозность слоя и теплоотдача снижается.

Участвующие в теплообмене жидкости, как правило, содержат растворенные газы. Причем растворимость газов снижается с повышением температуры. При нагреве жидкости, из нее выделяются неконденсируемые газы, которые могут не выводиться из теплообменника. В течение определенного времени в теплообменнике накапливаются неконденсируемые газы, вытесняют жидкость из верхних зон теплообмена и существенно снижают эффективную поверхность теплообмена. Во избежание этого явления из верхних частей теплообменников необходимо периодически стравливать накопленные неконденсируемые газы в атмосферу.

Периодический или непрерывный выпуск неконденсируемых газов из теплообменников необходимо осуществлять также из паровой области паровых нагревателей, а воду или конденсат, используемый для питания паровых котлов, необходимо подвергать деаэрации, например, путем вакуумирования, при котором растворимость газов в воде снижается и они выделяются из жидкости. Причем перед вакуумированием воду или конденсат целесообразно подогреть.

Существенно снижает теплообмен отложения на теплообменных поверхностях разного рода загрязняющих веществ: солей жесткости, отложений органических и неорганических веществ. Загрязняющие вещества необходимо периодически удалять. Соли жесткости удаляются промывкой слабыми растворами соляной кислоты, органические вещества растворяются соответствующими растворителями, неорганические загрязнения сначала разрыхляются выдержкой их в слабых растворах соляной кислоты, а затем легче вымываются водой.

Графит обладает высокой теплопроводностью, в 2–3 раза превышающей теплопроводность стали, и коррозионной стойкостью. Для снижения пористости графит пропитывают синтетическими смолами. Из блоков графита и композиционных материалов на его основе изготавливают теплообменники, в которых просверлены вертикальные каналы для агрессивной среды и горизонтальные каналы для охлаждающего или нагревающего агента. Блоки устанавливают один над другим с прокладками между ними. По сторонам блоков располагаются распределительные крышки, которые также уплотняются прокладками.

К преимуществам аппаратов из графита и графитопластов относятся сравнительная простота изготовления, компактность и коррозионная стойкость. Они могут быть собраны без применения замазок и клеев, надежны в работе, легко разбираются и обеспечивают интенсивный теплообмен.

## 22. Массообменные аппараты

Массообменными называются аппараты, в которых происходит перенос вещества (массы) из одной фазы в другую. В промышленности применяются, в основном, следующие процессы массопередачи между газовой (паровой) и жидкой, газовой и твердой, жидкой и твердой, а также между двумя жидкими фазами:

1. Абсорбция – поглощение газа или компонентов газа жидкостью, называемой абсорбентом. Обратный процесс называется десорбцией.

2. Экстракция – извлечение компонента, растворенного в жидкости, другой жидкостью, которая практически не смешивается или ограниченно смешивается с первой жидкостью.

3. Ректификация – разделение гомогенных жидких систем путем многократного взаимного обмена компонентами между паровой и жидкой фазами.

4. Адсорбция – поглощение компонентов газа, пара или раствора твердым пористым поглотителем. Обратный процесс называется десорбцией и обычно используется после адсорбции для регенерации твердого поглотителя.

5. Сушка – удаление влаги из твердого материала главным образом путем испарения. Влага переходит из твердой фазы в газовую или паровую.

6. Кристаллизация – выделение твердой фазы в виде кристаллов из раствора или расплава.

7. Растворение и экстракция в системе твердое вещество – жидкость. Растворение характеризуется переходом твердого вещества в жидкость. Избирательное растворение того или иного вещества из пористого твердого вещества в жидкость называется экстракцией из твердого или выщелачиванием.

Количество массы, передаваемой из одной фазы в другую, определяется по формуле

$$M = K_x F \Delta x_{cp}; \quad M = K_y F \Delta y_{cp},$$

где  $K_x$ ,  $K_y$  – соответственно коэффициенты массопередачи, выраженные параметрами жидкой и паровой (газовой) фаз;  $F$  – поверхность массообмена,  $m^2$ ;  $\Delta x_{cp}$ ,  $\Delta y_{cp}$  – соответственно средняя движущая сила процесса массопередачи.

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{\beta_x} + \frac{1}{m\beta_y}}; \quad K_y = \frac{1}{\frac{m}{\beta_x} + \frac{1}{\beta_y}},$$

где  $\beta_x$ ,  $\beta_y$  – соответственно коэффициенты массоотдачи, выраженные параметрами жидкой и паровой (газовой) фаз;  $m$  – тангенс угла наклона равновесной линии к оси абсцисс.

Если целевой компонент хорошо растворим в жидкости и основное сопротивление массообмену сосредоточено в газовой фазе,  $K_y = \beta_y$ . Если целевой компонент плохо растворим в жидкости, то основное сопротивление сосредоточено в ней и  $K_x = \beta_x$ .

Коэффициенты массоотдачи находят из диффузионного критерия Нуссельта

$$\text{Nu}' = \frac{\beta l}{D},$$

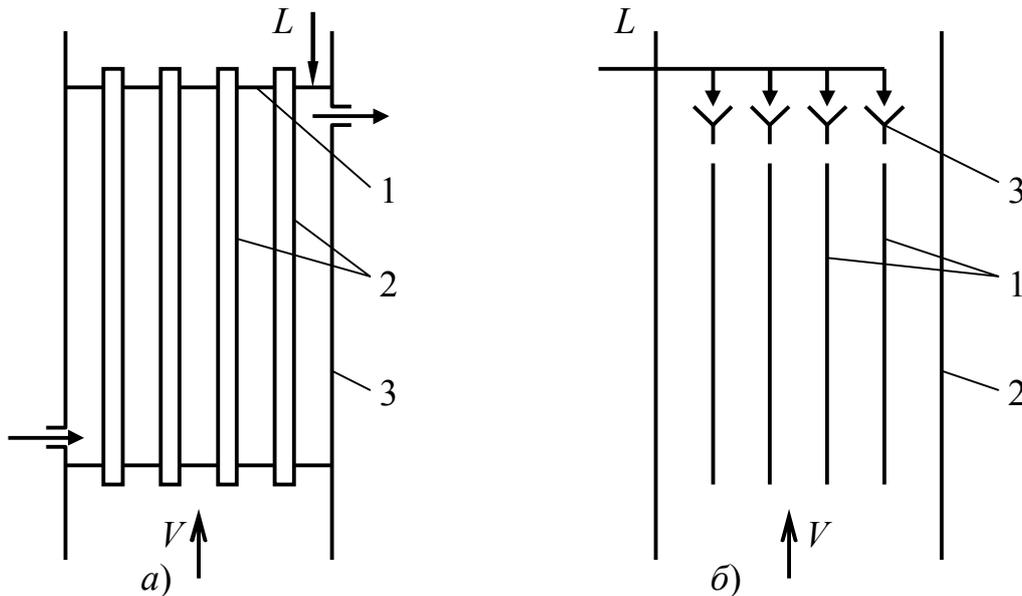
где  $l$  – характерный геометрический размер, м;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Диффузионный критерий Нуссельта обычно находят опытным путем из уравнения

$$\text{Nu}' = A \text{Re}^a (\text{Pr}')^b \Gamma,$$

где  $\text{Pr}' = \nu/D$  – диффузионный критерий Прандтля;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Пленочные аппараты выполняются преимущественно в виде трубчатых теплообменников или аппаратов с листовой насадкой



Контактное устройство трубчатого аппарата приведено на схеме а).

Взаимодействующая с газом (паром) жидкость поступает в верхнюю часть контактного аппарата на трубную решетку 1 и равномерно распределяется по трубам 2 и в виде тонкой пленки стекает по их внутренней поверхности вниз. Газ (пар) поступает в нижнюю часть аппарата и движется по трубам вверх навстречу жидкости. При их соприкосновении происходит обмен компонентами. Снаружи трубки могут охлаждаться или нагреваться теплоносителем, подаваемым в межтрубное пространство, снаружи ограниченное корпусом 3.

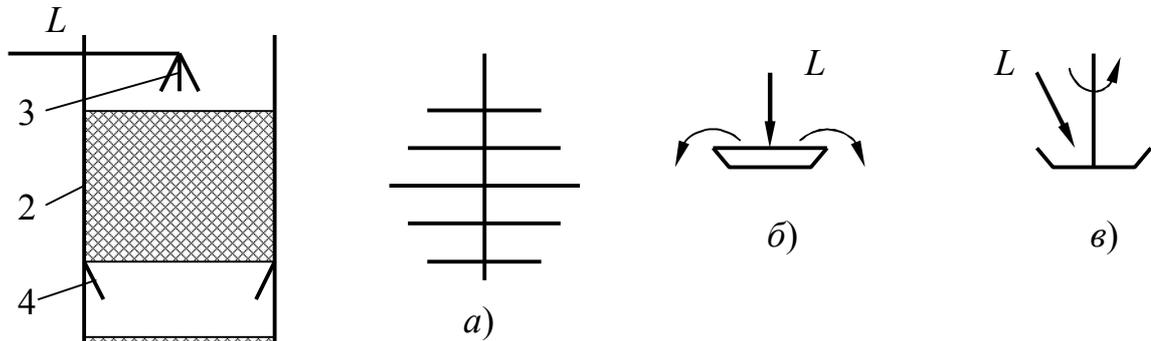
Контактное устройство с листовой насадкой приведено на схеме б).

Контактное устройство представляет собой насадку 1 в виде вертикальных листов, помещенную в корпус 2. В верхней части аппарата расположено распределительное устройство 3, с помощью которого жидкость распределяется по листам насадки равномерно с обеих сторон. При контакте жидкости с паром (газом) осуществляется взаимный массообмен.

В зависимости от скорости движения пленки орошающей жидкости, силы трения ее о стенку и о газ (пар) пленка может либо стекать вниз, захватываться газовым (паровым) потоком или течь вверх.

Насадочные аппараты представляют собой цилиндрические колонны,

заполненные насадочными телами. Основными узлами насадочных аппаратов являются корпус 2, внутри которого размещается один или несколько слоев насадки 1, приспособление 3 для распределения жидкости по насадке и устройство 4, направляющее растекающуюся жидкость к центру.



Газ (пар) обычно взаимодействуют при движении противотоком. Жидкость поступает в верхнюю часть контактного устройства, распределяется по насадочным телам при помощи приспособления 3 и по их поверхности стекает вниз. Газ (пар) вводится снизу и движется вверх по каналам, образованным насадочными телами.

Распределяющие устройства разнообразны по конструкции. Они могут быть выполненными в виде форсунок, разбрызгивающих жидкость с помощью давления или сжатого воздуха, системы трубопроводов с отверстиями для выхода жидкости схема а, тарелки, на которую подается жидкость и переливается через ее края схема б), вращающегося диска схема в) и др.

*Насадка*, или насадочные тела, могут иметь самую разнообразную форму. Практическое значение имеют хордовая насадка, кольца Рашига, кольца Паля, фасонные насадочные тела, спиральная и сетчатая металлическая насадка, а также дробленый кусковой материал.

Хордовая насадка, как правило, делается из деревянных брусьев, расположенных правильными рядами друг над другом, кольца Рашига изготавливаются из керамических или стальных полых цилиндров, у которых высота равна диаметру. Они загружаются в аппарат либо навалом, либо упорядоченно уложенными. У колец Паля часть боковой поверхности отогнута внутрь. Фасонная насадка изготавливается из керамики в виде седел, цилиндров с перегородками, пропеллеров и др., загружаемых в аппарат навалом.

Спиральная и сетчатая насадка изготавливается из металлической ленты и загружается в аппарат правильными рядами. Иногда ленту и сетку гофрируют.

В качестве кусковой насадки обычно используют дробленый кокс или кварц в виде кусков размерами 25-75 мм.

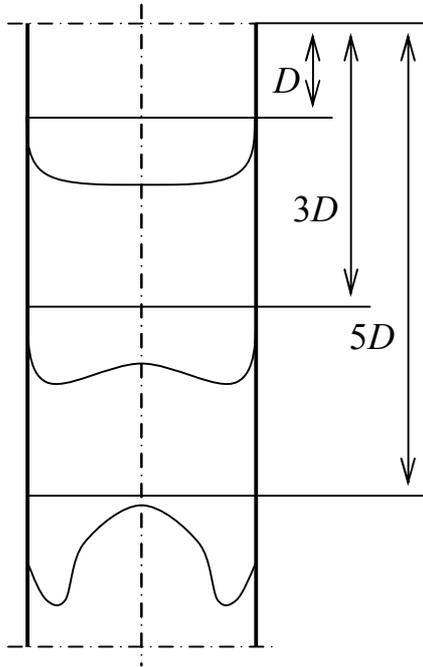
Геометрической характеристикой насадочных тел является эквивалентный диаметр

$$d_{\text{экв}} = \frac{4f}{\Pi} = \frac{4V}{S},$$

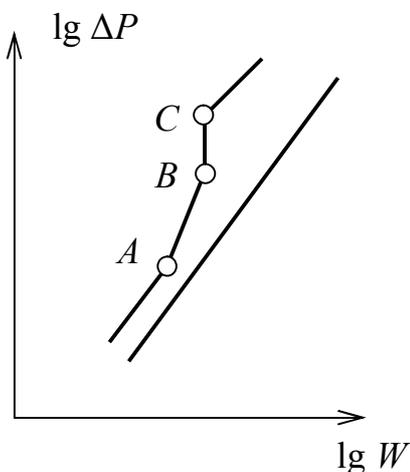
где  $f$  – свободное сечение каналов между насадочными телами;  $\Pi$  – суммар-

ный периметр каналов;  $V$  – объем, занимаемый каналами в единице объема насадки или коэффициент свободного объема;  $S$  – поверхность насадочных тел в единице объема насадки или удельная поверхность.

Наиболее эффективна насадка, имеющая меньший эквивалентный диаметр и большую удельную поверхность.



Газовый поток, который движется в слое насадки снизу вверх, как и во всех случаях движения потока в каналах, имеет максимальную скорость в центре, а движущаяся навстречу ему жидкость растекается к периферии. Как видно из приведенной схемы, жидкость на расстоянии 4-5 диаметров от места ввода орошения почти полностью оттесняется к периферии. В соответствии с этим в насадочных колоннах целесообразно размещать перегородки, перераспределяющие жидкость, на расстоянии 4-5 диаметров аппарата. Эти устройства выполняются в виде усеченных конусов, обращенный большим основанием вверх, или в виде более эффективных тарелок со сливными патрубками.



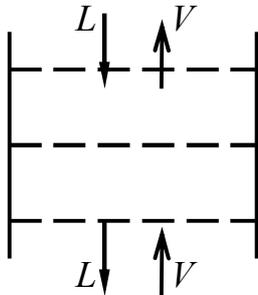
Гидродинамические режимы. Первый режим – *пленочный* – наблюдается при небольших плотностях орошения и малых скоростях газа. Количество жидкости, задерживаемой насадкой, практически не зависит от скорости газа. Этот режим заканчивается в точке  $A$ . Второй режим – *режим подвисяния* – возникает из-за торможения жидкости газовым потоком вследствие трения. В результате скорость жидкости уменьшается, а толщина ее пленки увеличивается, что сужает поперечное сечение аппарата. С возрастанием скорости газа

увеличивается смоченная поверхность насадки и интенсивность массопередачи (отрезок  $AB$ ). Третий режим – *режим эмульгирования* – возникает в результате накопления жидкости в свободном объеме насадки, которое происходит до тех пор, пока сила трения между жидкостью и газом не уравнивает силу тяжести жидкости в насадке. При этом наблюдается инверсия фаз (жидкость становится сплошной фазой, а газ дисперсной). Гидравлическое сопротивление колонны резко возрастает (отрезок  $BC$ ).

Насадочные колонны работают в наиболее эффективном режиме подвисяния, близкого к режиму захлебывания. Окончательный режим работы аппарата устанавливается с учетом гидравлического сопротивления

### 23. Тарельчатые массообменные аппараты

Колонны с тарелками или тарельчатые колонны являются эффективными и наиболее распространенными аппаратами. Они имеют вертикальный цилиндрический корпус, внутри которого одна над другой размещены определенное число горизонтальных перегородок – тарелок. Жидкость в них течет сверху вниз, а газ движется снизу вверх. Различают тарельчатые колонны с переливными устройствами и колонны с неорганизованным переливом жидкости или с провальными тарелками.



Колонны с провальными тарелками отличаются отсутствием переливных труб. Обычно их собирают из полос или труб с зазором 3-6 мм по типу колосниковых решеток. По характеру гидродинамики потоков аналогичны насадочным колоннам, работающим в режиме подвисяния. На тарелке одновременно происходит барботаж газа или пара через слой и частичное «проваливание» жидкости. Газ (пар) движется вверх только через часть отверстий или щелей пульсирующим потоком. Распределение отверстий, пропускающих жидкость или газ (пар), носит вероятностный характер.

Суммарную площадь всех отверстий (щелей), или так называемое свободное сечение тарелок подбирают так, чтобы при заданной скорости газового (парового) потока через часть отверстий происходило «проваливание» жидкости.

Дырчатые тарелки представляют собой горизонтальные перегородки с отверстиями 4-10 мм, а суммарная площадь всех отверстий по отношению к сечению колонны составляет 10-25 %.

Решетчатые тарелки имеют отверстия в виде вырезанных или выштампованных щелей шириной 3-8 мм.

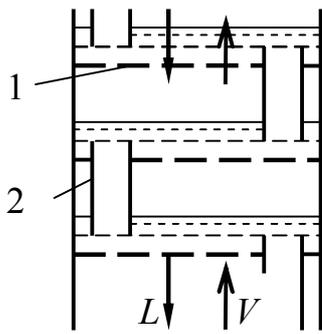
Трубчатые тарелки представляют собой чаще всего решетки, образованные рядами параллельных труб, присоединенных к коллектору.

Волнистые тарелки – гофрированные металлические листы с отверстиями 4-8 мм.

Дырчатые и решетчатые провальные тарелки отличаются простотой конструкции, низкой стоимостью изготовления и монтажа, сравнительно небольшим гидравлическим сопротивлением.

К достоинству трубчатых провальных тарелок относятся легкость отвода тепла от барботажного слоя на тарелке путем пропускания охлаждающего агента по трубам, из которых состоит тарелка. Однако эти тарелки по сравнению с дырчатыми и решетчатыми значительно сложнее по устройству и монтажу.

Основной недостаток колонн с провальными тарелками – небольшой интервал изменения скоростей газа и жидкости, в пределах которого поддерживается устойчивая и эффективная их работа. В более широком диапазоне нагрузок работают волнистые тарелки. Однако они сложнее по устройству и монтажу, чем дырчатые и решетчатые тарелки.



Тарельчатые колонны с переливными устройствами имеют горизонтальные тарелки 1 и переливные устройства 2. Жидкость поступает на верхнюю тарелку, переливается через переливные устройства сверху вниз и удаляется из нижней части аппарата. Газ (пар) вводится в нижнюю часть аппарата и перемещается вверх, распределяясь по каждой тарелке в виде пузырьков или факелов. В зависимости от способа распределения газа (пара) тарелки различаются

типами (ситчатые, колпачковые, клапанные, струйные и др.)

В зависимости от скорости движения газа и плотности орошения различают три основных режима работы тарелок: пузырьковый, пенный и струйный или инжекционный.

Пузырьковый режим наблюдается при небольших скоростях газа, когда он движется через слой жидкости в виде отдельных пузырьков. Поверхность контакта фаз на тарелке при работе в этом режиме невелика.

Пенный режим. С увеличением расхода газа отдельные пузырьки, выходящие из отверстий и прорезей тарелки, сливаются в сплошную струю, которая на определенном расстоянии от места истечения разрушается из-за сопротивления барботажного слоя на большое количество пузырьков и брызг. При этом на тарелке возникает пена, которая является нестабильной и разрушается сразу же после прекращения подачи газа. При пенном режиме поверхность контакта фаз на тарелках максимальна.

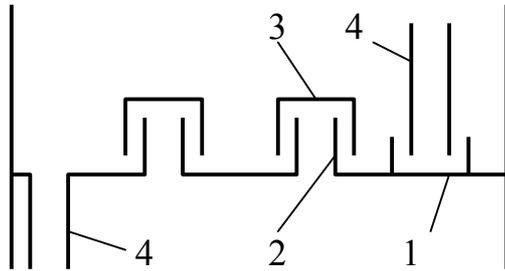
Струйный (инжекционный) режим. При дальнейшем увеличении скорости газа длина газовых струй увеличивается и они достигают поверхности барботажного слоя, не разрушаясь и образуя большое количество крупных брызг. Поверхность контакта фаз в условиях такого режима работы резко снижается.

Следует отметить, что переход от одного режима работы к другому происходит постепенно. Общие методы расчета границ гидродинамических режимов отсутствуют. Поэтому при проектировании тарельчатых аппаратов обычно расчетным путем определяют скорость газа, соответствующую нижнему и верхнему пределам работы тарелок и затем выбирают рабочую скорость газа.

В ситчатых тарелках равномерно по всей поверхности просверлено значительное число отверстий диаметром 1-5 мм. Газ проходит через такие отверстия и распределяется в жидкости в виде мелких струек и пузырьков. При слишком малом расходе газа жидкость может просачиваться («проваливаться») через отдельные отверстия на нижележащую тарелку, что снижает эффективность работы. Поэтому газ должен двигаться с определенной скоростью и должен иметь давление, превышающее давление слоя жидкости на тарелке, и предотвратить стекание жидкости через отверстия тарелки.

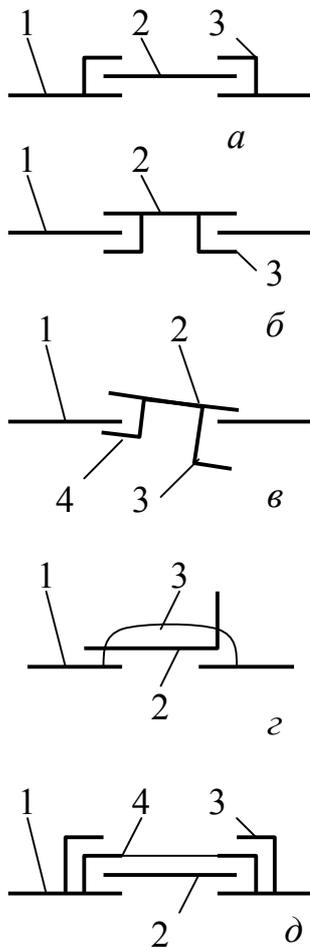
Ситчатые тарелки отличаются простотой конструкции, легкостью монтажа, осмотра и ремонта, малым гидравлическим сопротивлением. Они устойчиво работают в довольно широком диапазоне скоростей газа, причем в

определенном интервале нагрузок эти тарелки обладают высокой эффективностью. Вместе с тем ситчатые тарелки чувствительны к загрязнениям и осадкам, которые забивают отверстия тарелок. В случае внезапного прекращения подачи газа с ситчатых тарелок сливается вся жидкость, и для возобновления процесса требуется значительное время для запуска колонны.



Колпачковые тарелки менее чувствительны к загрязнениям, чем ситчатые, и отличаются более широким диапазоном устойчивой работы. Газ на тарелку 1 поступает по патрубкам 2 и разбивается затем прорезями колпачка 3 на большое число отдельных струй. Прорези колпачка

наиболее часто выполняются в виде зубцов треугольной или прямоугольной формы. Далее газ проходит через слой жидкости, перетекающей по тарелке 1 от одного сливного устройства 4 к другому. При движении через жидкость значительное количество струек распадается на отдельные пузырьки. Интенсивность образования пены и брызг на колпачковых тарелках зависят от скорости движения газа и глубины погружения колпачка в жидкость. Колпачки бывают круглые и туннельные.



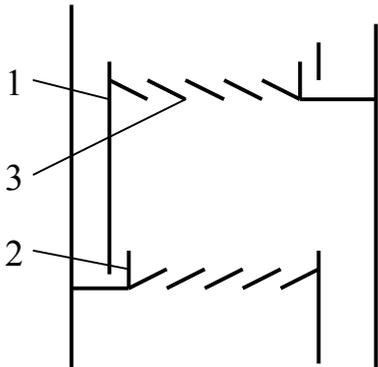
Принцип работы клапанных тарелок заключается в следующем. Над тарелкой 1 свободно лежит круглый клапан 2. При изменении расхода газа клапан своим весом автоматически регулирует зазор и площадь для прохода газа между ним и тарелкой и тем самым поддерживает постоянной скорость истечения газа в барботажный слой. Гидравлическое сопротивление клапанной тарелки при увеличении расхода газа возрастает незначительно. Высота подъема клапана ограничивается верхним (а) или нижним (б) кронштейном-ограничителем 3 и обычно не превышает 8 мм. Иногда клапан имеет два неравных ограничителя 3 и 4 (в).

Пластинчатые клапаны работают так же, как и круглые. Они имеют форму неравнобокого уголка, одна из полок которого более длинная и закрывает прямоугольное отверстие в тарелке (г). Круглые клапаны имеют диаметр 45-50 мм, отверстия под клапан выполняют диаметром 34-40 мм при шаге между ними 75-150 мм. Высота подъема клапана 6-8 мм.

Балластные тарелки отличаются от клапанных тем, что в них между легким и круглым клапаном 2 и кронштейном-ограничителем 3 установлен на коротких стойках, опирающихся на тарелку 1, более тяжелый балласт 4 (д). При небольших расходах газа поднимается только клапан. При увеличении рас-

хода газа клапан упирается в балласт и поднимает его. Балластные тарелки отличаются более равномерной работой и полным отсутствием провала жидкости во всем интервале скоростей газа.

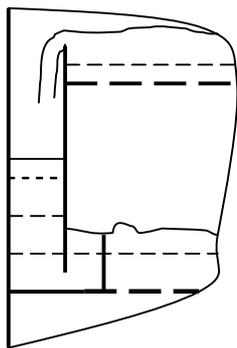
Достоинства клапанных и балластных тарелок: сравнительно высокая пропускная способность по газу и гидродинамическая устойчивость, постоянная и высокая эффективность в широком интервале нагрузок по газу. Недостатки этих тарелок: повышенное гидравлическое сопротивление, обусловленное весом клапана или балласта. Известны разновидности клапанных и балластных тарелок, отличающиеся конструкцией клапанов (балластов) и ограничителей.



Пластинчатые тарелки отличаются односторонним движением фаз и низким гидравлическим сопротивлением. Жидкость с вышележащей тарелки поступает по сливному устройству 1 и через гидравлический затвор 2 поступает на тарелку, собранную из наклонных параллельных пластин 3. Достигнув первой щели, образованной двумя пластинами, жидкость контактирует с газом, который с большой скоростью (20-40 м/с) проходит через щели.

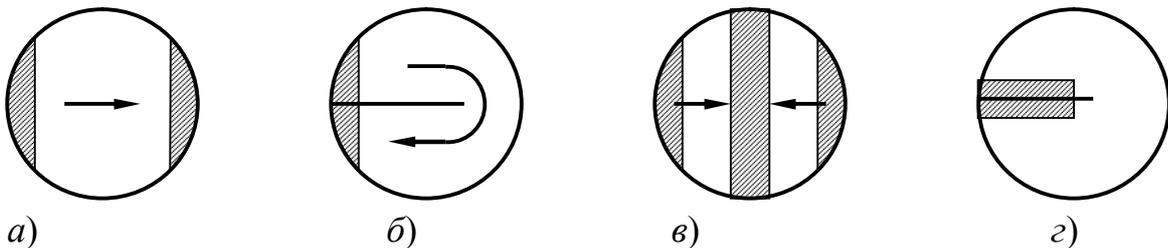
При этом происходит эжектирование жидкости, которая диспергируется газовым потоком на мелкие капли и перемещается вдоль тарелки к следующей щели, где процесс массообмена повторяется. В результате жидкость с большой скоростью движется по тарелке и нет необходимости в установке переливного порога у конца тарелки.

Все виды тарелок различаются расположением переливов и направлением движения жидкости на тарелке. Сливные устройства могут быть в виде



труб или сегментов, ограниченных плоской перегородкой. Верхняя часть сливного устройства должна возвышаться над вышележащей тарелкой. Причем эта высота может регулироваться, а их нижние концы опущены под слой жидкости. Нижележащая тарелка под сливным устройством не должна иметь каких-либо отверстий во избежание попадания газа в него. Для создания гидравлического затвора предусмотрен специальный барьер в виде кольца для трубчатых сливов или в виде пластины для сегментных сливов.

Наиболее часто встречающиеся типы переливов приведены на схеме.



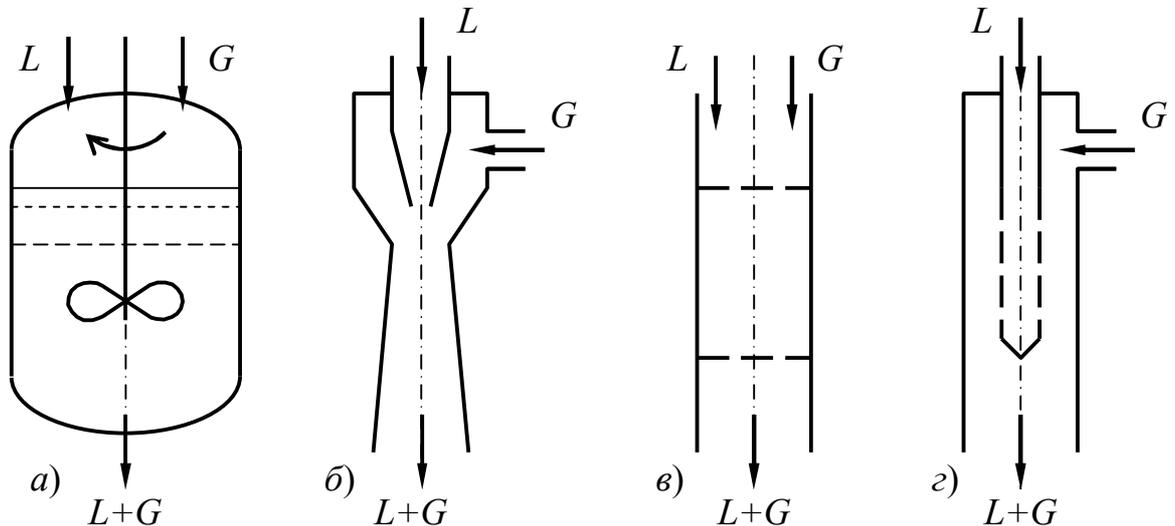
## 25. Экстракторы

Аппараты, предназначенные для осуществления процесса экстракции, называются экстракторами. В химической промышленности используются следующие основные типы экстракторов: смесительные, вибрационные, пульсационные и роторные массообменные аппараты.

Для осуществления экстракции можно использовать один аппарат, в котором процесс проводят периодически (сначала перемешивание, затем расслоение), или два аппарата: в одном – перемешивание, во втором - расслоение; в этих аппаратах процесс проводится непрерывно.

При перемешивании одна из жидкостей диспергируется на мелкие капли (дисперсная фаза), которая распределяется в другой жидкости (сплошная фаза). Дисперсной фазой может быть легкая или тяжелая жидкость.

Простейшим смесительно-отстойным экстрактором периодического действия является аппарат с мешалкой. При проведении однократной экстракции непрерывным способом используют аппарат с мешалкой и отстойник.



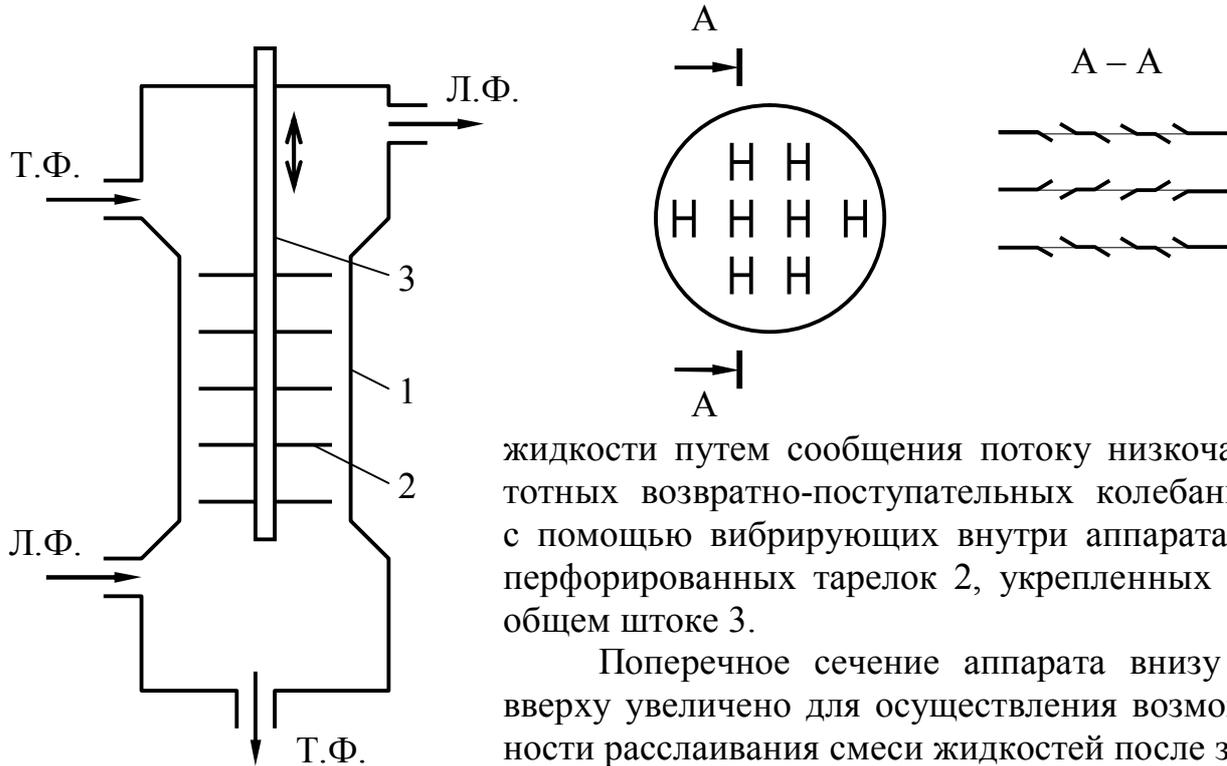
В смеситель типа аппарат с мешалкой исходный раствор и растворитель подаются непрерывно и также непрерывно выводится смесь из аппарата в последующий отстойник (схема *a*).

В инжекционном смесителе жидкость  $L$  вытекает с большой скоростью из сопла и всасывает за счет своей кинетической энергии другую жидкость  $G$  (схема *б*). Перемешивание жидкостей завершается при протекании через диффузор и смесь поступает далее в отстойник.

Диафрагменный смеситель представляет собой цилиндрический аппарат, в котором закреплены диафрагмы с несколькими отверстиями (схема *в*). Жидкости  $L$  и  $G$  проходят через отверстия, перемешиваются и направляются из смесителя в отстойник. К диафрагменным смесителям следует отнести трубу, заполненную насадкой, а также сопла или обычный вентиль.

Трубчатый смеситель (схема *г*) состоит из двух концентрических труб, в которые отдельно поступают жидкости  $L$  и  $G$ . Из отверстий внутренней трубы с большой скоростью вытекает жидкость  $L$  и смешивается в кольцевом зазоре с жидкостью  $G$ .

В вибрационных экстракторах дополнительная энергия подводится к



жидкости путем сообщения потоку низкочастотных возвратно-поступательных колебаний с помощью вибрирующих внутри аппарата 1 перфорированных тарелок 2, укрепленных на общем штоке 3.

Поперечное сечение аппарата внизу и вверху увеличено для осуществления возможности расслаивания смеси жидкостей после завершения процесса экстракции. Тяжелая фаза вводится в аппарат сверху и отводится снизу. Легкая подводится снизу и отводится в верхней части.

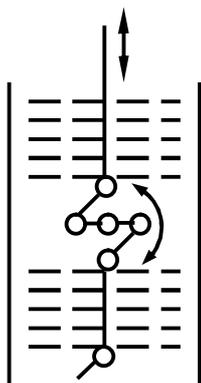
В тарелках выполнено множество отверстий, через которые при движении штока вверх-вниз проходит жидкость и образует новые поверхности для контакта фаз. Отверстия могут быть круглого, квадратного и прямоугольного сечения. Наиболее эффективны отверстия прямоугольной формы, образованные наклонными лопатками на верхней и нижней плоскостях тарелок и образующие незамкнутые сопла. Ширина отгиба примерно в 2 раза больше длины. Тарелки собираются так, чтобы нижняя представляла собой зеркальное отражение верхней. При возвратно-поступательном движении штока в каждом межтарельчатом сечении движение потоков противоположно предыдущему и последующему, а при колебаниях оно периодически меняется.

Тарелки в вибрационных аппаратах создают упорядоченную структуру потока, т. е. обеспечивают равномерность распределения реагентов по сечению колонны и при определенных условиях, которые определяются оптимальной нагрузкой и интенсивностью колебаний, сравнительно невысокое продольное перемешивание.

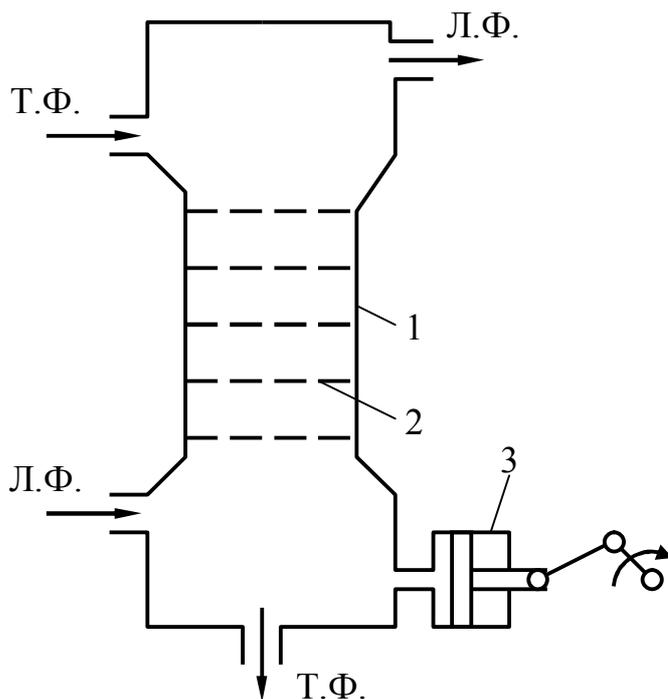
Движение жидкости через каждые полпериода колебаний штока с тарелками меняет направление на противоположное, что существенно интенсифицирует диспергирование и поперечное перемешивание фаз.

Диаметр экстракторов достигает 2 м, а производительность для системы жидкость-жидкость 80 м<sup>3</sup>/час. Размер отверстий на ситчатой тарелке 3-5 мм; площадь всех отверстий 20-25% площади поперечного сечения колонны; расстояние между тарелками 50 мм.

Для снижения затрат подводимой энергии колонна снабжена парными



пакетами тарелок, шарнирно соединенных друг с другом посредством рычагов. В такой конструкции соседние пакеты движутся в противоположных направлениях. Низкие затраты энергии обусловлены тем, что привод разгружен от веса тарелок, и на их подъем энергия практически не затрачивается. На днище воздействуют малые динамические нагрузки. Для снижения затрат энергии на перемещение веса тарелок целесообразно также использовать упругие деформации пружин.



Ввод дополнительной энергии в двухфазный поток может быть осуществлен также приданием возвратно-поступательного движения жидкости в пульсационных экстракторах. Для придания жидкости колебаний используют бесклапанный поршневой, плунжерный, мембранный, сифонный насос или специальное пневматическое устройство. При малой интенсивности пульсаций попеременно диспергируется легкая жидкость в слой тяжелой жидкости над тарелкой (первый полупериод), затем тяжелая жидкости в слой легкой жидкости под тарелкой (второй полупериод).

При увеличении интенсивности пульсаций рабочая зона равномерно заполнена мелкими каплями, движущимися противотоком в сплошной фазе. Это оптимальный режим работы пульсационного экстрактора. При дальнейшем увеличении интенсивности пульсаций наступает захлебывание экстрактора вследствие образования стойкой эмульсии.

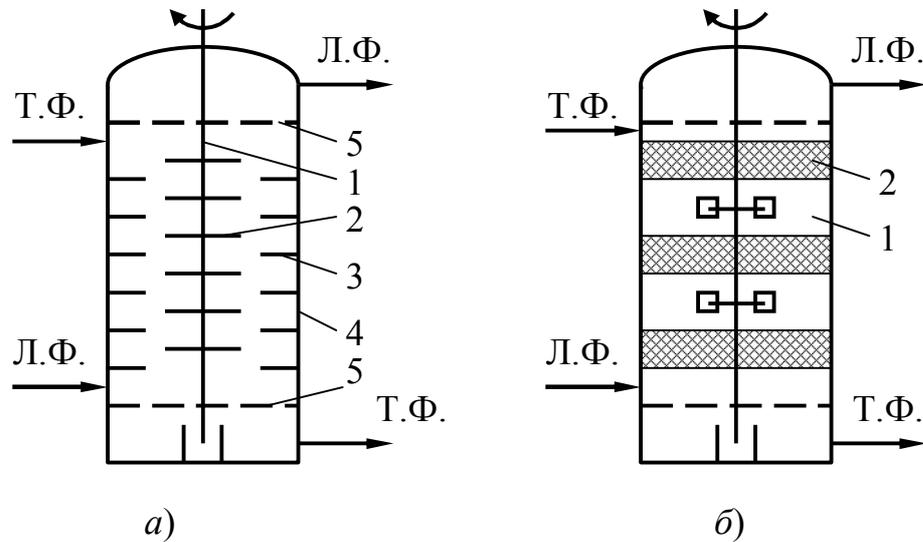
В пульсационном экстракторе перфорированные тарелки 2 жестко закреплены в корпусе 1. Колебания придается пульсационным устройством 3. Такая конструкция более экономична и в ней отсутствуют движущиеся части в самом аппарате.

Возрастание эффективности под действием пульсаций достигается благодаря увеличению поверхности контакта фаз, в то время как коэффициент массопередачи несколько снижается из-за продольного перемешивания.

Использование пульсаций как средства интенсификации массообмена при экстракции возможно и в экстракторах других конструкций, например, в насадочных, которые могут различаться конструкцией насадки.

Основной недостаток пульсационных экстракторов – ограниченность диаметра этих аппаратов. С увеличением диаметра возрастают трудности гидродинамического характера (неравномерность распределения фаз по

сечению колонны, возникновение кавитации), а также резко увеличивается расход энергии на сообщение пульсаций большим объемам жидкости в аппарате.



Роторно-дисковый экстрактор содержит ротор-вал 1, на котором на равном расстоянии друг от друга насажены горизонтальные плоские диски 2, перемешивающие двухфазный поток (схема *a*). Колонна делится на секции кольцевыми перегородками 3, закрепленными на стенке корпуса 4. Диски ротора вращаются в середине каждой секции. Вверху и внизу размещены успокоительные перегородки 5.

Если в экстракторе сплошной фазой является тяжелая жидкость, то для окончательного расслоения ее с легкой дисперсной фазой служит верхняя часть аппарата, отделенная от рабочей зоны перфорированной перегородкой.

Движущиеся противотоком легкая и тяжелая жидкости смешиваются в каждой секции вращающимися дисками 2 и затем частично расслаиваются вследствие разности плотностей около неподвижных кольцевых перегородок 3. При этом легкая фаза движется вверх, а тяжелая опускается вниз.

Разновидностью аппаратов этого типа является колонный экстрактор, в котором вместо плоских дисков на валу закреплены лопастные или открытые турбинные мешалки.

Для улучшения расслаивания фаз используют экстракторы (схема *б*), у которых между смесительными секциями 1 расположены отстойные зоны 2, заполняемые для ускорения потоков сеткой, насадочными телами либо блоками концентрических цилиндров. Такие колонны устанавливаются как в вертикальном, так и в горизонтальном положениях.

Эти экстракторы компактны, занимают малую производственную площадь. В них достигается хорошее диспергирование одной фазы в другой и высокая интенсивность массопередачи. Недостатком этих аппаратов является то, что при большом количестве ступеней (примерно  $> 6-8$ ) усложняется конструкция ротора и чрезмерно возрастает высота аппарата. Допустимые нагрузки ограничены, причем они снижаются с уменьшением разности плотностей фаз, а также в случаях легкого эмульгирования фаз.

## 26. Кристаллизаторы

Кристаллизация – процесс выделения твердой фазы в виде кристаллов из растворов и расплавов. По своей природе кристаллизация является диффузионным массообменным процессом.

В основе процесса кристаллизации лежит способность веществ растворяться в различных жидкостях, называемых растворителями. Для многих неорганических веществ растворителем является вода.

Растворы, находящиеся в равновесии с твердой фазой, называются насыщенными. Иногда концентрация растворенного вещества может быть больше его растворимости. Такие растворы называются пересыщенными.

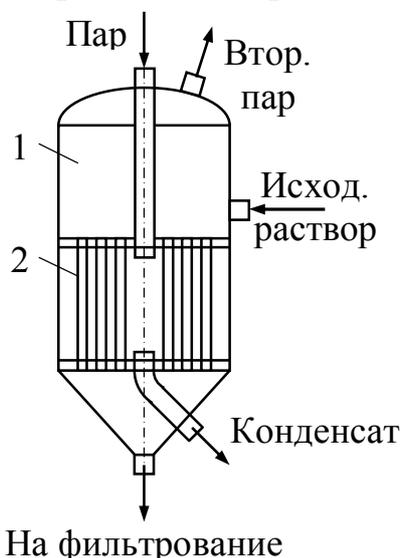
По принципу действия аппараты для кристаллизации разделяются на:

1) кристаллизаторы с удалением части растворителя, осуществляемым выпариванием или вымораживанием. Наибольшее применение получили выпарные кристаллизаторы. Этот способ кристаллизации называется изотермическим;

2) кристаллизаторы с изменением температуры раствора. Процесс осуществляется при постоянном содержании в растворе растворителя. Такой способ называется изогидрическим. Наибольшее применение получили кристаллизаторы с охлаждением раствора, когда растворимость снижается;

3) вакуум-кристаллизаторы без охлаждающих устройств, в которых охлаждение раствора осуществляется испарением части растворителя при снижении давления раствора и охлаждении таким образом остальной его части. Процесс проходит адиабатически;

4) кристаллизаторы с псевдооживленным слоем.



Кристаллизатор с удалением части растворителя состоит из корпуса 1, заполненного выпариваемым раствором. В нижней части корпуса 1 размещена подвесная нагревательная камера 2. В результате испарения части растворителя из пересыщенного раствора выпадают кристаллы. Они оседают вниз, выводятся из аппарата и отделяются от раствора фильтрованием. Фильтрат возвращается на выпаривание.

Греющая камера обогревается паром, подводимый к греющей камере. Образующийся конденсат отводится из камеры.

Выпаривание раствора может быть организовано в аппарате с выносной греющей камерой.

Наиболее производительны и надежны в эксплуатации выпарные аппараты–кристаллизаторы с принудительной циркуляцией раствора и выносной нагревательной камерой. Принудительная циркуляция предотвращает кристаллообразование на теплопередающих поверхностях и позволяет повысить концентрацию кристаллов в растворе, которое может достигать 15–20%. Скорость раствора в трубках нагревательной камеры не должна превышать 3

м/с, т. к. при бóльших скоростях наблюдается истирание кристаллов. Процесс кристаллизации легко подвергается регулированию. Продукт получается сравнительно крупнокристаллическим и однородным.

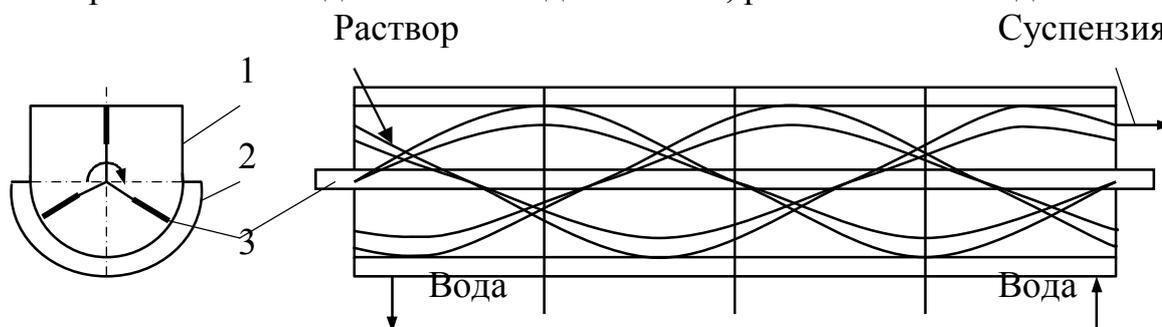
Для снижения энергозатрат целесообразна организация многокорпусного выпаривания, когда вторичный пар предыдущего корпуса направляется на обогрев последующего корпуса. При выпаривании с одновременной кристаллизацией удобнее использовать параллельное питание исходным раствором с выводом суспензии из каждого корпуса. При этом отсутствуют переточные трубопроводы из корпуса в корпус и устраняется возможность их засорения кристаллами.

Прямоточная схема многокорпусного выпаривания для кристаллизации растворов нежелательна, т. к. постепенное снижение температуры раствора при переходе из корпуса в корпус может вызвать преждевременную кристаллизацию и засорение трубопроводов.

Противоток применяют в случае, если раствор поступает на выпаривание сильно разбавленным. В первых корпусах по ходу движения раствора его выпаривают и только в последнем корпусе с наиболее высокой температурой, кристаллизуют. Высокая температура в последнем по ходу раствора корпусе способствует более полному высаживанию кристаллов.

#### Кристаллизаторы с охлаждением раствора.

Простейшие кристаллизаторы периодического действия с охлаждением раствора представляют собой вертикальные цилиндрические аппараты с охлаждающими змеевиками или рубашками и механическими мешалками для перемешивания раствора. С целью увеличения времени пребывания раствора эти аппараты часто соединяют последовательно, располагая каскадом.

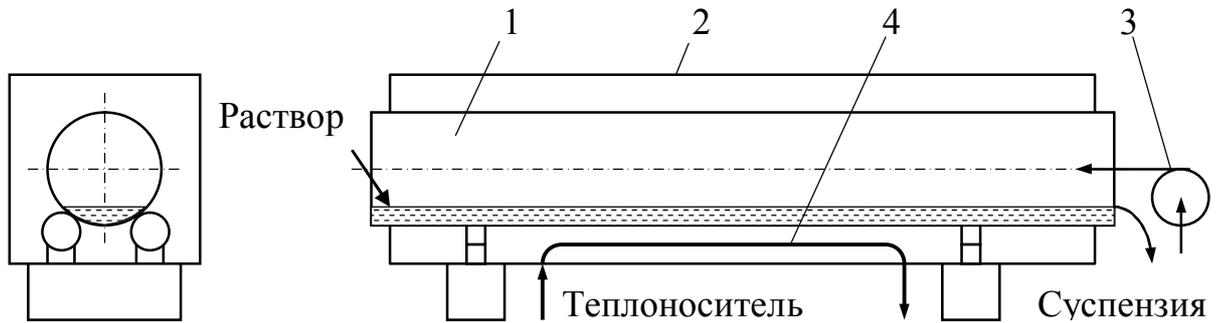


Кристаллизатор шнекового типа – это горизонтальное неподвижное закрытое корыто 1 с водяной рубашкой 2, внутри которого медленно вращается ленточная или шнековая мешалка 3, которая не только перемещает образующиеся кристаллы к месту выгрузки, но и поддерживает их во взвешенном состоянии, что способствует свободному и равномерному росту кристаллов. Ленточная мешалка, изображенная на рис., выполняется из спиралевидных металлических полос. Охлаждающая вода движется в рубашке 2 противоток к раствору.

В отличие от ленточных собственно шнековые кристаллизаторы имеют мешалку в виде бесконечного винта – шнека. Средний размер кристаллов не превышает 0,5 – 0,6 мм. Для получения более крупных кристаллов иногда применяют воздушное охлаждение и аппараты выполняют без рубашек и от-

крытыми сверху. Однако в таких аппаратах падает производительность из-за снижения интенсивности теплообмена.

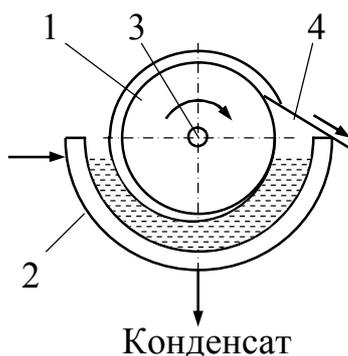
Барабанные кристаллизаторы имеют водяное или воздушное охлаждение. Они состоят из слегка наклонной вращающейся от привода трубы 1, зак-



люченной в корпус 2. Раствор поступает с верхнего конца трубы, а кристаллы выгружаются из ее нижнего конца. Воздух нагнетается вентилятором 3, движется противотоком к направлению движения раствора. При вращении трубы раствор смачивает ее стенки, что увеличивает поверхность испарения. При воздушном охлаждении тепло от раствора отводится довольно медленно и кристаллы получаются более крупными, чем при водяном охлаждении, но при этом снижается производительность аппарата. Для предотвращения образования кристаллов на поверхности трубы ее покрывают снаружи тепловой изоляцией или помещают в кожух, обогреваемый трубой 4. Средний расход воздуха на 1 кг кристаллов составляет  $20 \text{ м}^3$ .

Кристаллизаторы с водяным охлаждением по своей конструкции аналогичны барабанным кристаллизаторам с воздушным охлаждением. Раствор охлаждают водой через рубашку, что интенсифицирует теплообмен. Расход воды составляет  $3 - 5 \text{ м}^3/\text{м}^3$  охлаждаемого раствора.

Вальцовые кристаллизаторы представляют собой горизонтальный вращающийся охлаждаемый изнутри металлический барабан 1. Он частично по-



ружен в корыто 2 с кристаллизующим раствором. Во избежание преждевременной кристаллизации корыто обогревается. Через полые валы 3 внутрь барабана поступает и с противоположного конца удаляется охлаждающая вода или холодильный рассол. При вращении барабана на его поверхности образуется плотный тонкий слой кристаллов, которые снимаются ножом 4.

Вальцовые кристаллизаторы применяют главным образом для кристаллизации из расплавов или концентрированных растворов, содержащих небольшое количество маточника.

Вакуум-кристаллизаторы не имеют охлаждающих устройств. Охлаждение раствора осуществляется путем испарения части растворителя при снижении давления и охлаждения тем самым остального раствора. Вакуум-кристаллизаторы могут быть одно- и многокорпусными, состоящими из 3-4 ступеней, в которых давление снижается по ходу движения раствора.

Общий материальный баланс процесса кристаллизации с удалением влаги

$$G_p = G_{кр} + G_m + W,$$

где  $G_p$ ,  $G_{кр}$ ,  $G_m$  – количество исходного раствора, полученных кристаллов и маточника, кг;

$W$  – количество испаренного растворителя, кг.

Материальный баланс по абсолютно сухому растворенному веществу

$$G_p c_p = G_{кр} a + G_m c_m,$$

где  $c_p$ ,  $c_m$  – концентрации исходного и маточного растворов, масс. доли;

$a = M/M_{кр}$  – отношение молекулярных масс сухого растворенного вещества и кристаллогидрата. При кристаллизации без образования кристаллогидратов  $M = M_{кр}$  и  $a = 1$ .

Количество полученных кристаллов равно

$$G_{кр} = \frac{G_p (b_m - b_p) - W b_m}{b_m - a}.$$

При  $a = 1$

$$G_{кр} = G_p \left( 1 - \frac{b_p}{b_m} \right) W.$$

При кристаллизации без удаления растворителя  $W = 0$ . Количество полученных кристаллов

$$G_{кр} = \frac{G_p (b_p - b_m)}{a - b_m}.$$

При  $a = 1$

$$G_{кр} = \frac{G_p (b_m - b_p)}{1 - b_m}.$$

Тепловой баланс кристаллизатора состоит из следующих теплот

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 \pm Q_9,$$

где  $Q_1 = G_p i_p$  – приход тепла с раствором, кДж;

$Q_2 = G_{кр} r$  – теплота кристаллизации, кДж;

$Q_3 = \pm G_m b_m q_d$  – теплота кристаллизации, кДж;

$Q_4 = G_m (i_{m1} - i_{m2})$  – приход тепла с теплоносителем, кДж;

$Q_5 = G_{кр} i_{кр}$  – расход тепла с кристаллами, кДж;

$Q_6 = G_m i_m$  – расход тепла с маточником, кДж;

$Q_7 = W i$  – расход тепла с парами растворителя, кДж;

$Q_8 = G_o i_o$  – расход тепла с охлаждающим агентом, кДж;

$Q_9$  – потери тепла в окружающую среду, кДж;

$i_p$ ,  $i_{кр}$ ,  $i_m$  – энтальпия раствора, кристаллов и маточного раствора, кДж/кг;

$r$  – теплота образования кристаллической решетки, кДж/кг;

$i_{m1}$ ,  $i_{m2}$  – начальная и конечная энтальпия охлаждающей среды, кДж/кг;

$q_d$  – тепловой эффект концентрирования раствора при изменении его концентрации, кДж.

## 27. Выпарные аппараты

Выпаривание – это процесс концентрирования растворов твердых нелетучих веществ путем частичного испарения растворителя при кипении жидкости, т. е. когда давление пара над раствором равно давлению в рабочем объеме аппарата. Выпаривание ведут под вакуумом, при атмосферном и при избыточном давлении. При выпаривании под вакуумом снижается температура кипения раствора, что дает возможность использовать для обогрева аппарата пар низкого давления. Этот способ применим при выпаривании растворов, чувствительных к высокой температуре. При выпаривании под атмосферным давлением, образующийся вторичный пар обычно не используется и выбрасывается в атмосферу. Выпаривание при повышенном давлении вызывает повышение температуры кипения раствора и дает возможность использовать вторичный пар для обогрева других корпусов выпарной установки с меньшим давлением.

Процесс выпаривания проводится в выпарных аппаратах.

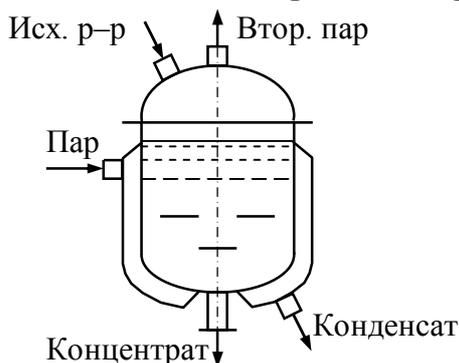
По принципу работы выпарные аппараты разделяются на периодические и непрерывно действующие. Периодическая выпарка применяется при малой производительности установки. В химической промышленности применяют в основном установки непрерывного действия.

По числу корпусов различают одно- и многокорпусные выпарные установки. В многокорпусных выпарных установках вторичный пар одних корпусов используется для обогрева других.

Все конструкции выпарных аппаратов подразделяются в зависимости от расположения и вида поверхности нагрева, рода теплоносителя, расположения рабочих сред, кратности и режима циркуляции выпариваемого раствора.

По методу выпаривания выпарные установки делятся на следующие группы: 1) выпарные установки поверхностного типа, в которых раствор контактирует с поверхностью нагрева; 2) выпарные установки контактного типа, в которых нагревание осуществляется без разделяющей поверхности теплообмена; 3) выпарные установки адиабатного испарения.

Выпарные аппараты поверхностного типа получили широкое применение в химической промышленности. В зависимости от режима движения кипящей жидкости их разделяют на аппараты со свободной циркуляцией, аппараты с естественной циркуляцией, аппараты с принудительной циркуляцией, пленочные выпарные аппараты.

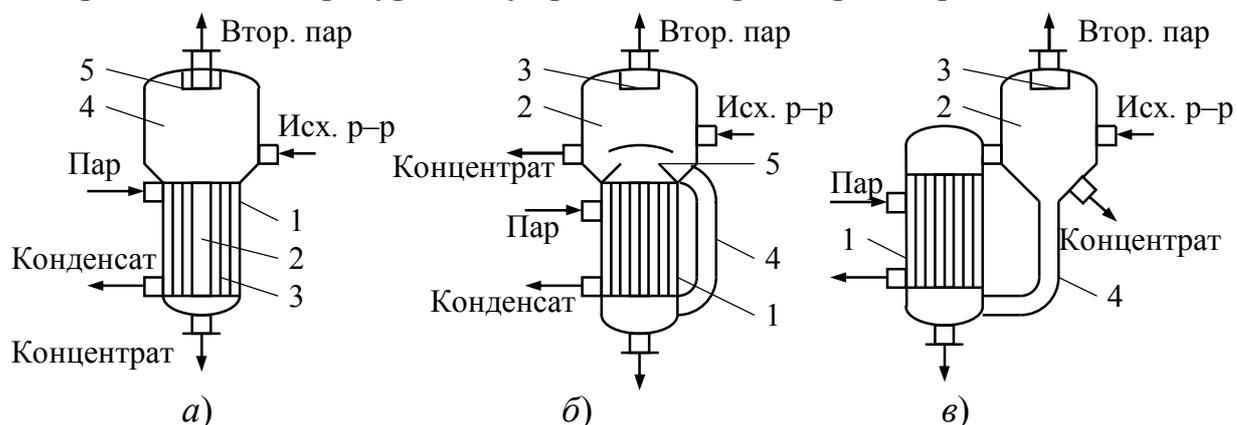


Для выпаривания вязких и кристаллизующихся продуктов находят еще применение выпарные аппараты периодического действия с паровой рубашкой (со свободной циркуляцией). Исходный раствор подается в аппарат, где за счет обогрева возникает свободная циркуляция раствора. После выпаривания до необходимой концентрации упаренный раствор сливается из аппарата и аппарат вновь заполняется исходным

раствором. Для обогрева может быть использована не только рубашка, но и встроенный теплообменник, например, в виде змеевика.

Такие аппараты просты по устройству, но имеют низкие коэффициенты теплопередачи и небольшую производительность. Их применение ограничено производительностями до 3 т/ч.

В выпарных аппаратах с естественной циркуляцией циркуляция раствора осуществляется за счет разности плотностей в кипятильных трубах и циркуляционной трубе. Для циркуляции, которая достигает 20–30, необходима разность температур между греющим паром и раствором 7–10 °С.



Выпарной аппарат с центральной циркуляционной трубой (схема а) имеет соосную греющую камеру 1, состоящую из кипятильных труб 3, обогреваемых паром. В центре греющей камеры установлена циркуляционная труба 2. Выпариваемый раствор циркулирует по кипятильным трубам 3 снизу вверх и опускается по циркуляционной трубе 3 вниз. В сепараторе 4 пар отделяется от раствора, освобождается от капелек жидкости в брызгоуловителе 5 и выводится из аппарата. Упаренный раствор отводится из аппарата.

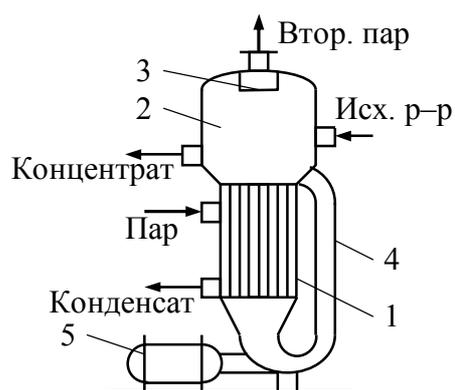
Циркуляция раствора происходит вследствие разности плотностей жидкости в циркуляционной трубе и парожидкостной смеси в кипятильных трубах. Благодаря циркуляционной трубе в аппарате усиливается естественная циркуляция, увеличивается коэффициент теплоотдачи и уменьшается осаждение накипи и твердых частиц на внутренней поверхности кипятильных труб. Аппарат компактен, удобен в обслуживании, но вызывает затруднения замена греющей камеры.

Выпарной аппарат с выносной циркуляционной трубой и сосной греющей камерой (схема б) состоит из греющей камеры 1, сепаратора 2 с брызгоуловителем 3 и циркуляционной трубы 4. Выпариваемый раствор поднимается по трубкам греющей камеры и вскипает в них. Пар отделяется от раствора в сепараторе, освобождается от капелек жидкости в брызгоуловителе 3 и выводится из аппарата. В одной из модификаций этого аппарата вскипание раствора происходит не в трубках, а в трубе вскипания 5, установленной внутри сепаратора над греющей камерой. Кипение в трубках предотвращается благодаря гидростатическому столбу жидкости в трубе вскипания и трубках. Аппараты второго типа используют при выпаривании растворов, образующих осадок на греющих поверхностях.

Выпарной аппарат с вынесенной греющей камерой (схема в) состоит из греющей камеры 1, сепаратора 2 с брызгоуловителем 3 и циркуляционной трубы 4, установленной соосно с сепаратором 2. Выпариваемый раствор поднимается по трубкам греющей камеры и вскипает в них. Образующая парожидкостная смесь направляется в сепаратор (преимущественно тангенциально), где происходит разделение фаз. Пар очищается от капелек раствора в брызгоуловителе. Упаренный раствор опускается по циркуляционной трубе вниз и частично выводится из аппарата.

В таких аппаратах облегчается доступ для осмотра и чистки труб при открытых крышке и днище греющей камеры. Плотность раствора в выносной циркуляционной трубе больше, чем при размещении трубы в греющей камере, что обеспечивает сравнительно высокую скорость циркуляции раствора и препятствует образованию отложений на поверхности нагрева.

С целью повышения интенсивности циркуляции раствора и увеличения коэффициента теплопередачи применяют аппараты с принудительной циркуляцией. Их целесообразно использовать при упаривании вязких жидкостей, когда естественная циркуляция затруднена. Такие аппараты имеют лучшие показатели при меньшем перепаде температур. Принудительная циркуляция организуется с помощью мешалок, насосов или подачи газа.



Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией, соосной греющей камерой и кипением раствора в трубках состоит (схема а) из греющей камеры 1, представляющей собой пучок труб, заключенных в цилиндрический корпус. В межтрубное пространство подается греющий пар. Над греющей камерой расположен сепаратор 2 с брызгоуловителем 3. Аппарат оборудован вынесенной циркуляционной трубой 4 и циркуляционным насосом 5, который обеспечивает скорость потока в трубках 2–2,5 м/с.

Выпарной аппарат может быть выполнен с вынесенной греющей камерой, с кипением раствора не в трубках греющей камеры, а в трубе вскипания.

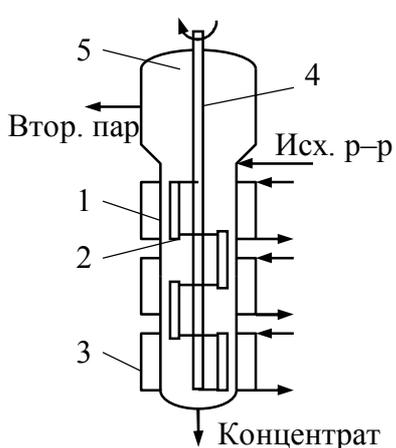
Недостатком аппарата является необходимость расхода электроэнергии на привод насоса.

Пленочные выпарные аппараты используются для упаривания очень вязких и пастообразных растворов и суспензий. Кроме того их применяют для выпарки чистых некристаллизующихся раствором и растворов, чувствительных к высоким температурам.

В пленочных выпарных аппаратах выпариваемый раствор движется вдоль поверхности теплообмена в виде тонкой пленки, что дает возможность осуществить упаривание при однократном прохождении раствора вдоль поверхности без его циркуляции. В таких аппаратах снижаются потери полезной разности температур и повышается коэффициент теплопередачи. Температурный напор в пленочных аппаратах составляет 2–3 °С, что значительно

меньше, чем в кожухотрубчатых выпарных аппаратах (5–8 °С). Это дает возможность при заданном температурном напоре в установке снизить удельный расход теплоты на выпаривание и увеличить производительность.

По способу организации течения пленки испаряемой жидкости пленочные аппараты делятся на вертикальные с падающей и восходящей пленкой и горизонтальные – трубные и роторные. По принципу действия их разделяют на аппараты с гравитационным течением пленки на поверхности нагрева и аппараты с размазыванием пленки по поверхности роторными мешалками.

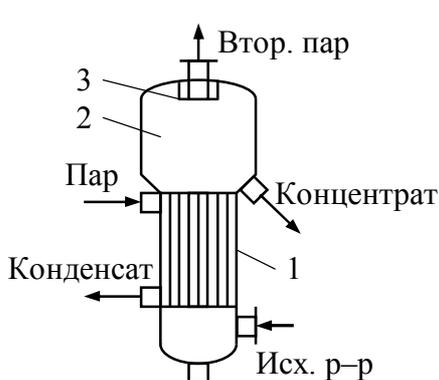


Роторно-пленочный испаритель применяется для выпаривания температурноустойчивых вязких и пастообразных растворов и суспензий. Благодаря малому времени пребывания в зоне нагрева обработка продукта происходит без его разложения.

Внутри цилиндрического корпуса 1, снабженного паровыми рубашками 3, вращается ротор 4 с закрепленными на нем лопатками 2. При вращении ротора они прижимают к внутренней стенке корпуса 1 пленку выпариваемого раствора, поступающего сверху. При выпаривании может образовываться тонкий слой отложений, который снимается скребками. Обогрев выполняется водяным паром или органическим теплоносителем.

Обогрев выполняется водяным паром или органическим теплоносителем.

Роторный испаритель – непрерывно действующий аппарат. Даже при выпаривании вязких продуктов обеспечивается высокая производительность таких аппаратов. К недостаткам роторных испарителей относятся сложность изготовления и высокая стоимость эксплуатации.



Выпарной аппарат пленочного типа с восходящей пленкой и сосной греющей камерой отличается наличием длинных труб длиной 6 и 9 м, которые заполняются раствором на 20–25 % высоты. Раствор поступает в нижнюю часть аппарата и распределяется по трубкам греющей камеры 1. При достижении температуры кипения в растворе бурно образуются пузырьки, которые движутся вверх, увлекают раствор и распределяют его тонким слоем по стенкам. Испарение жидкости происходит в тонком слое, движущемся с большой скоростью (20 м/с).

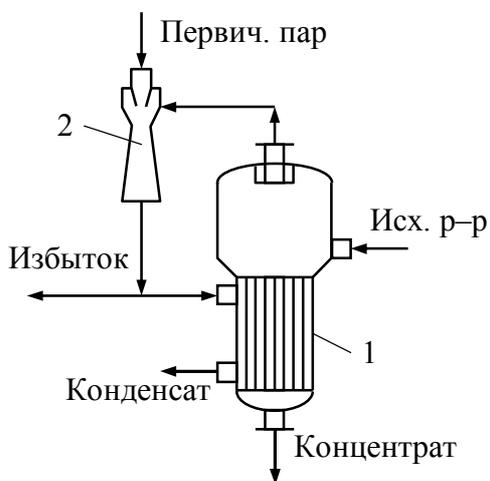
В сепараторе 2 парожидкостная смесь разделяется. Пар очищается от брызг в брызгоуловителе 3, а упаренный раствор отводится из нижней части сепаратора.

Недостатками такого аппарата являются возможность температурных деформаций длинных труб, трудность очистки труб от накипи и необходимость в зданиях большой высоты.

Имеются выпарные аппараты со свободно падающей пленкой.

## 28. Пути энергосбережения процессов выпаривания

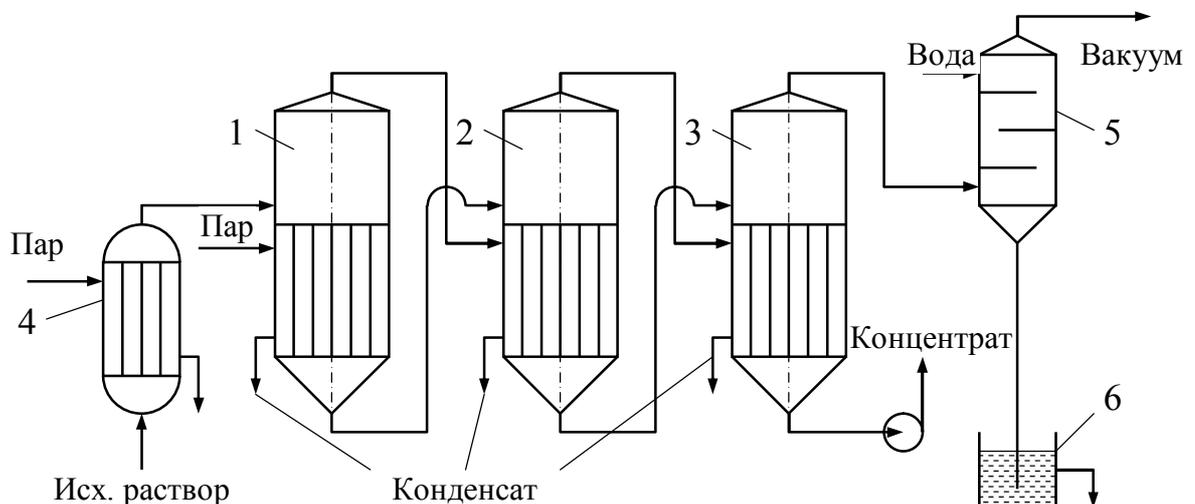
Выпаривание является энергоемким процессом. Снижение затрат энергии может быть достигнуто при использовании теплонасосных установок или многокорпусных выпарных установок. Иногда использование многокорпусных аппаратов может быть неприемлемым. В таких случаях возможно и экономически целесообразно использование теплового насоса, который повышает экономичность работы однокорпусного аппарата путем сжатия вторичного пара до необходимого давления и направления его взамен свежего в греющую камеру. Сжатие вторичного пара производят в турбокомпрессорах с приводом от электродвигателя или в струйных компрессорах (инжекторах). Струйные компрессоры, несмотря на невысокий к.п.д., нашли широкое применение в промышленности в качестве тепловых насосов вследствие компактности, простоты устройства и надежности эксплуатации.



Первичный пар поступает по соплу струйного компрессора 2 и инжектирует вторичный пар более низкого давления, выходящий из сепаратора выпарного аппарата 1. Смесь первичного и вторичного пара большей частью поступает в греющую камеру выпарного аппарата, а оставшая избыточная часть отводится на сторону, к другим потребителям.

Экономичность применения теплового насоса определяется отношением стоимости энергии, затрачиваемой на сжатие вторичного пара, к стоимости первичного пара, расходуемого для обогрева аппарата. Использование теплового насоса для выпаривания растворов, обладающих значительной температурной депрессией неэкономично. Обычно тепловой насос экономичен при невысокой степени сжатия, соответствующей повышению температуры пара на 10–15 °С.

Расход пара на выпаривание можно значительно снизить, если проводить процесс в многокорпусной выпарной установке.



Установка состоит из нескольких (на схеме трех) корпусов. Исходный раствор нагревается до температуры кипения в теплообменнике 4 и поступает в первый корпус, обогреваемый свежим паром. Вторичный пар из первого корпуса направляется в качестве греющего во второй корпус, где вследствие пониженного давления раствор кипит при более низкой температуре, чем в первом. Упаренный в первом корпусе раствор самотеком перетекает во второй корпус с более низким давлением и здесь частично охлаждается до температуры кипения в этом корпусе. За счет выделяющегося при этом тепла образуется некоторое количество вторичного пара. Такое явление носит название самоиспарением раствора.

Аналогичным образом упаренный раствор перетекает из второго в третий корпус, который обогревается вторичным паром из второго корпуса. Вторичный пар из последнего корпуса конденсируется в барометрическом конденсаторе 5, в котором при конденсации пара создается необходимое разрежение. Воздух и неконденсируемые газы, попадающие в установку с паром и охлаждающей водой, а также через неплотности в трубопроводах и резко снижающих теплопередачу, отсасываются вакуум-насосом.

Многокорпусные выпарные установки различаются количеством корпусов, взаимным направлением движения греющего пара и раствора (прямоток на схеме, и противоток и параллельное питание корпусов).

Для испарения 1 кг воды необходимо затратить водяного пара (в кг/кг выпариваемой воды):

Число корпусов	1	2	3	4	5
Расход пара, кг/кг	1,1	0,57	0,4	0,3	0,27

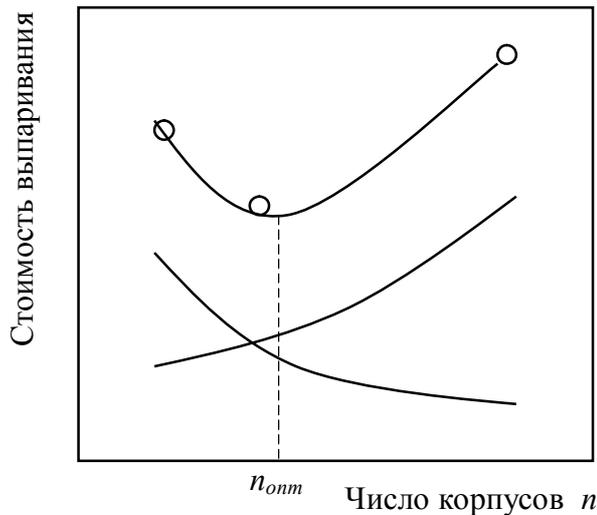
Из этих данных видно, что если при переходе от однокорпусной выпарной установки к двухкорпусной экономия греющего пара составляет примерно 50%, то при переходе от четырехкорпусной к пятикорпусной установке эта экономия уменьшается до 10 % и становится еще меньше при дальнейшем возрастании числа корпусов, что указывает на целесообразность ограничения числа корпусов. При этом возрастают затраты энергии на создание разрежения. Поэтому обычно число корпусов многокорпусных выпарных установок не меньше двух, но не превышает пяти-шести. Наиболее часто многокорпусные установки имеют три, четыре корпуса.

Чем больше число корпусов установки, тем меньшая полезная разность температур приходится на каждый корпус и тем больше при одинаковой производительности общая поверхность нагрева выпарной установки. Приблизительно общая поверхность нагрева выпарной установки увеличивается пропорционально числу ее корпусов. Таким образом, экономия греющего пара в выпарных установках связана с увеличением общей поверхности нагрева установки.

Практически выбор числа корпусов наиболее целесообразно производить, исходя из технико-экономических соображений.

С увеличением числа корпусов достигается все большая экономия греющего пара и снижается общая стоимость пара, расходуемого на выпари-

вание. Одновременно с увеличением числа корпусов возрастают капитальные затраты и амортизационные расходы.



Зависимость стоимости выпаривания показана на рис. кривой 1, а амортизационные расходы — линией 2. Сложением ординат линий 1 и 2 получается стоимость выпаривания 1 кг воды, показанная кривой 3. Точка минимума на этой кривой соответствует минимальным суммарным расходам на выпаривание и отвечающее ей число корпусов  $n_{опт}$  может быть в первом приближении принято в качестве оптимального.

Уравнение материального баланса выпарной установки

$$G_H = G_K + W,$$

где  $G_H$ ,  $G_K$  — массовые расходы начального и конечного раствора, кг/с;  $W$  — массовый расход выпариваемой воды, кг/с.

Уравнение материального баланса по сухому веществу

$$G_H x_H = G_K x_K,$$

где  $x_H$ ,  $x_K$  — массовые доли растворенного вещества или взвесей в начальном и конечном растворе.

Из этих уравнений находятся неизвестные величины, например, количество испаренной воды

$$W = G_H - G_K = G_H \left( 1 - \frac{x_H}{x_K} \right).$$

Уравнение теплового баланса одного корпуса выпарной установки

$$Q + G_H c_H t_H = G_K c_K t_K + W i_{вм} + Q_{пот},$$

где  $Q$  — расход теплоты на выпаривание, Вт;  $c_H$ ,  $c_K$  — удельная теплоемкость начального и конечного раствора, Дж/кг·К;  $t_H$ ,  $t_K$  — температура раствора на входе и выходе из аппарата, °С;  $i_{вм}$  — удельная энтальпия вторичного пара на выходе из аппарата, Дж/кг;  $Q_{пот}$  — расход теплоты на компенсацию потерь в окружающую среду, Вт.

Расход греющего пара на выпаривание

$$D_n = \frac{Q}{(i'' - i')W} = \frac{Q}{r_n W},$$

где  $i''$ ,  $i'$  — удельная энтальпия насыщенного пара и его конденсата, Дж/кг;  $r$  — удельная теплота конденсации греющего пара.

Площадь поверхности теплообмена выпарного аппарата

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{пол}},$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\Delta t_{пол}$  – полезная разность температур, равная разности температур конденсации греющего пара и кипения раствора, °С.  $\Delta t_{пол} = t_{2.n} - t_{кин}$ .

*Общая разность температур* – это разность температур между температурой пара, греющего первый корпус, и температурой пара, уходящего из последнего корпуса, т. е. разность температур теплоносителя и чистого растворителя

$$\Delta t_{общ} = t_{2.n} - t_o.$$

Полезная разность температур всегда меньше общей разности температур на величину температурных потерь

$$\Delta t_{пол} = \Delta t_{общ} - \Sigma t_{ном}.$$

т. к. температура кипения раствора выше температуры кипения чистого растворителя. Разность этих температур называется температурной депрессией, которая складывается из температурной, гидростатической и гидравлической депрессий.

$$\Sigma \Delta t_{ном} = \Delta t_{депр} + \Delta t_{2.c} + \Delta t_2$$

*Температурная депрессия* зависит от свойств растворителя и растворенного вещества, концентрации растворителя и давления.

*Гидростатическая депрессия* или повышение температуры кипения раствора вследствие гидростатического давления столба жидкости в аппарате. Обычно в зависимости от высоты трубок в аппарате и степени их заполнения раствором принимают для каждого корпуса  $\Delta t_{2.c} = 1-3^\circ\text{C}$ .

*Гидравлическая депрессия* или изменение температуры вторичного пара на участке сепаратор – барометрический конденсатор, вызванное падением давления пара из-за гидравлического сопротивления паропровода вторичного пара

$$\Delta t_r = t_1 - t_6,$$

где  $t_6$  – температура вторичного пара в барометрическом конденсаторе, °С.

Температура кипения раствора с учетом температурных потерь

$$t_{кин} = t_o + \Sigma \Delta t_{ном}.$$

Установки адиабатного испарения часто называют установками мгновенного испарения. Концентрирование растворов в них осуществляется путем испарения перегретого раствора при повышенном давлении и подачей его в камеру вскипания, в которой давление ниже. При низком давлении часть растворителя испаряется, охлаждая основную массу раствора. Далее частично упаренный раствор опять возвращается на перегрев и цикл повторяется снова.

Снижение расхода греющего пара может быть достигнуто надлежащей тепловой изоляцией выпарных аппаратов. Тепловую изоляцию корпусов и другого оборудования выпарной установки необходимо выполнять с точки зрения техники безопасности, поскольку допускаемая температура на поверхности теплоиспользующих аппаратов не должна превышать 40°С.

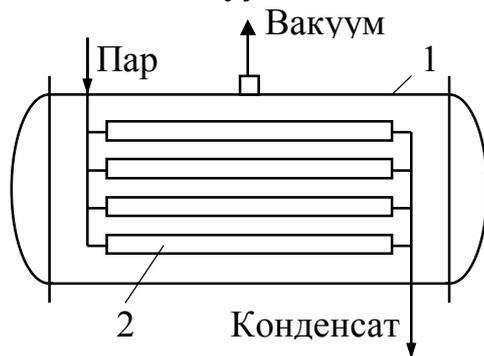
## 29. Сушилки

Сушка – это процесс удаления влаги из материала путем испарения и отвода образующихся паров. Для сушки необходимо к высушиваемому материалу подводить теплоту, за счет которой происходит испарение влаги.

Существуют следующие виды сушки:

- 1) контактная сушка – теплота от теплоносителя к материалу передается через разделяющую их стенку;
- 2) конвективная сушка – теплота передается при непосредственном соприкосновении высушиваемого материала с сушильным агентом;
- 3) радиационная сушка – теплота передается инфракрасными лучами;
- 4) диэлектрическая сушка – теплоты сообщается высушиваемому материалу с помощью токов высокой частоты;
- 5) сублимационная сушка – материал высушивается в замороженном состоянии при глубоком вакууме.

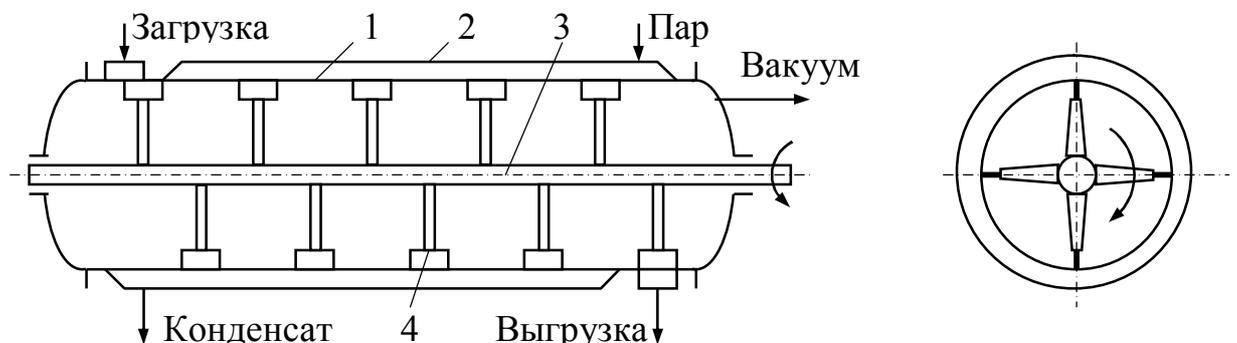
Контактные сушилки используют в тех случаях, когда недопустим непосредственный контакт высушиваемого материала с сушильным агентом. Наибольшее применение получили сушильные шкафы, гребковые, распылительные и вальцовые сушилки. Для ускорения сушки в контактных сушилках часто создают вакуум.



Вакуум-сушильный шкаф представляет собой цилиндрическую или прямоугольную камеру 1, в которой размещены полые плиты 2, обогреваемые паром или горячей водой. Высушиваемый материал вручную загружается в шкаф в лотках (противнях) на плиты 2 и после сушки вручную выгружается. Малопроизводительны и малоэффективны, т. к. сушка происходит в неподвижном слое.

В гребковых вакуум-сушилках скорость сушки несколько увеличивается за счет перемешивания материала мешалкой с гребками.

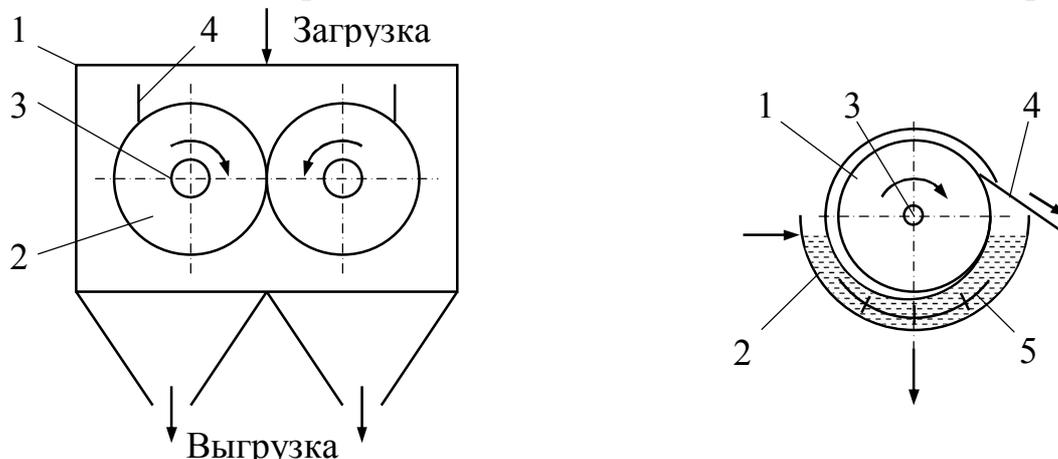
Однако загрузка и выгрузка материала в них выполняется периодически вручную.



Гребковая сушилка состоит из цилиндрического корпуса 1 с паровой рубашкой 2 и мешалкой 3, имеющей реверсивный привод. На валу мешалки 3 закреплены гребки 4, которые перемешивают материал.

Применение вакуумных сушилок в химической промышленности обусловлено чувствительностью высушиваемого продукта в высоким температурам, требованиями к высокой чистоте продукта а также условиями токсичности, взрывоопасности и необходимости улавливания паров растворителя.

Основной частью двухвальных сушилок, наиболее часто применяемых в химических производствах, являются вальцы 2, медленно вращающиеся



(2–10 об/мин) в кожухе 1 навстречу друг другу. Сверху между вальцами подается высушиваемый материал. Греющий пар поступает через полые цапфы 3 каждого из вальцов, а образующийся конденсат отводится из них. Вальцы могут также обогреваться горячей водой или ВОТ.

Высушиваемый материал покрывает поверхность вальцов тонкой пленкой, толщина которой регулируется расстоянием между вальцами (0,5–1 мм). Высушивание материала происходит в течение одного неполного оборота вальцов. Высушенный материал снимается ножами 4 и сыпается вниз.

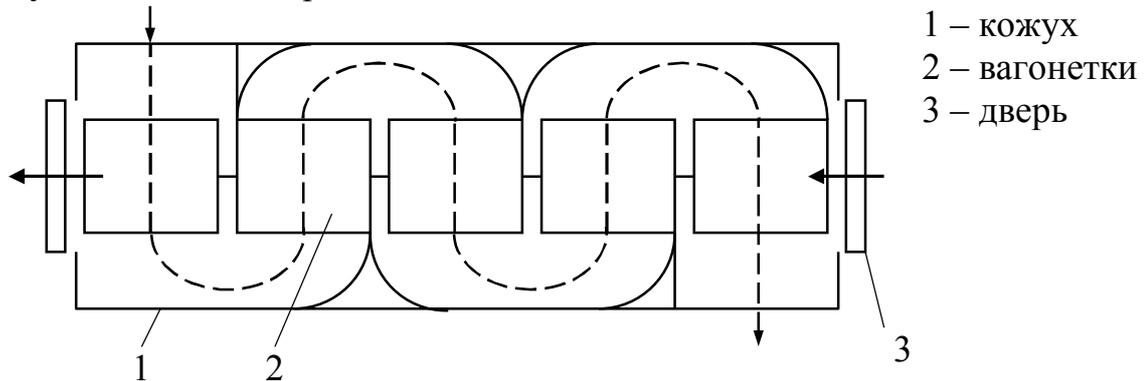
В двухвальных сушилках напряжение поверхности вальцов зависит от свойств высушиваемого продукта и колеблется в пределах  $15 - 30 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$  для вакуумных сушилок.

В одновальной сушилке в корыте 2 погружен вращающийся полый обогреваемый изнутри барабан (валец) 1. Под ним имеется устройство с мешалкой 5 для перемешивания содержимого корыта. При вращении барабана материал наносится тонким слоем (1-2 мм) на него, высушивается и срезается ножом 4. Продолжительность сушки регулируется числом оборотов вальца. Для сушки пригодны материалы, выдерживающие длительного воздействия высоких температур, например, красителей.

К конвективным сушилкам относятся камерные, туннельные, ленточные, барабанные, распылительные, пневматические, со взвешенным слоем и другие сушилки.

Камерные или полочные сушилки работают периодически при атмосферном давлении. Высушиваемый материал в зависимости от его свойств и вида помещается на полках, противнях, сетках, вагонетках и др. устройствах внутри сушильной камеры, которая изготавливается из различных материалов (дерева, кирпича, бетона, металла и т. п.) и теплоизолируется снаружи.

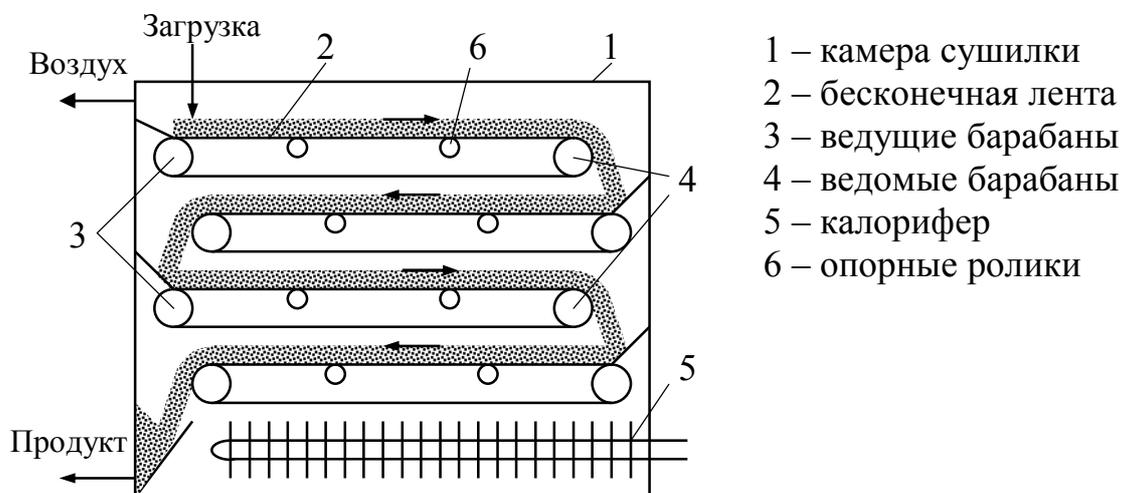
Туннельные сушилки представляют собой длинные камеры, внутри которых по рельсам передвигаются (постоянно или периодически) вагонетки с высушиваемым материалом.



На входе и выходе вагонеток имеются двери 3, которые периодически открываются для пропуска вагонеток 2. Перемещение вагонеток может осуществляться с помощью троса и лебедки или гидравлического толкателя. В туннеле могут быть установлены вентиляторы для циркуляции воздуха и калориферы для нагрева воздуха.

Туннельные сушилки обычно используются для сушки больших количеств штучных материалов, например, кирпичей. По интенсивности эти сушилки соизмеримы с камерными. Сушка длительная и неравномерная.

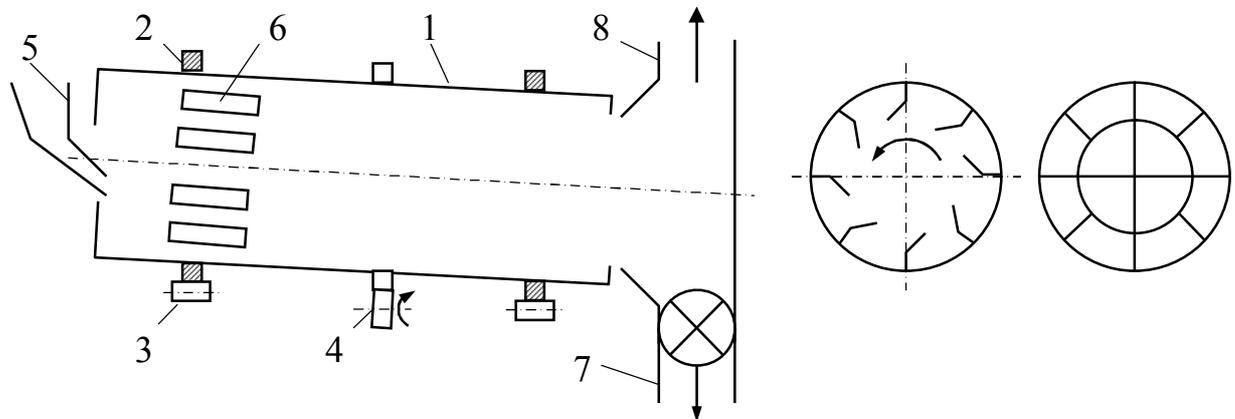
В ленточных сушилках сушка производится непрерывно при атмосферном давлении. В камере 1 сушилки слой высушиваемого материала дви-



жется на бесконечной ленте 2, натянутой между ведущим 3 и ведомым 4 барабанами. Влажный материал подается с одной стороны ленты, а подсушенный удаляется с другого конца. Сушка осуществляется горячим воздухом или топочными газами, которые движутся противотоком или перекрестным током к высушиваемому материалу. Пересыпание материала обновляет и увеличивает поверхность сушки, что увеличивает равномерность и скорость сушки. Эффективно применение сушилок с лентами из сеток, в которых сушильный агент движется перпендикулярно плоскости ленты.

Ленточные сушилки громоздки, сложны в обслуживании, удельная производительность на  $1 \text{ м}^2$  ленты невелика, а удельные затраты энергии на  $1 \text{ кг}$  испаренной влаги довольно высоки.

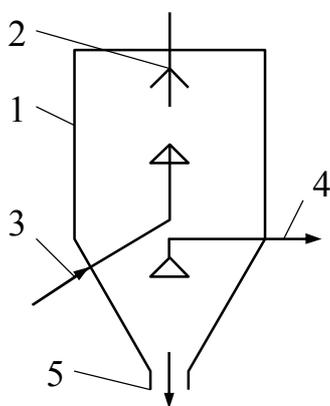
Барабанные сушилки широко применяются для непрерывной сушки кусковых и сыпучих материалов при атмосферном давлении. Сушилка имеет



цилиндрический барабан 1, установленный с небольшим наклоном к горизонту ( $1/15$ – $1/50$ ) и опирающийся с помощью бандажей 2 на ролики 3. Барабан приводится во вращение электродвигателем через редуктор и зубчатую передачу 4. Число оборотов барабана обычно составляет 5 – 8 об/мин. Материал подается в барабан по лотку 5, предварительно подсушивается, перемешиваясь лопастями 6 приемной насадки, а затем поступает во внутреннюю насадку, расположенную вдоль почти всей длины барабана. Насадка обеспечивает равномерное распределение и хорошее перемешивание, а также тесный контакт с сушильным агентом – топочными газами, которые движутся прямотоком с материалом. Во избежание уноса частиц материала с газами последние движутся со скоростью 2 – 3 м/с. Степень заполнения барабана материалом 20%.

Высушенный материал удаляется через разгрузочное устройство 7. Отработанный сушильный агент по патрубку 8 направляется на очистку от пыли в циклон.

В распылительных сушилках достигается высокая интенсивность испарения



влаги за счет тонкого распыления высушиваемого материала в сушильной камере, через которую движется сушильный агент (горячий воздух или топочные газы). При сушке в распыленном состоянии удельная поверхность испарения достигает столь большой величины, что процесс сушки завершается очень быстро ( $\approx 15$ – $30 \text{ с}$ ).

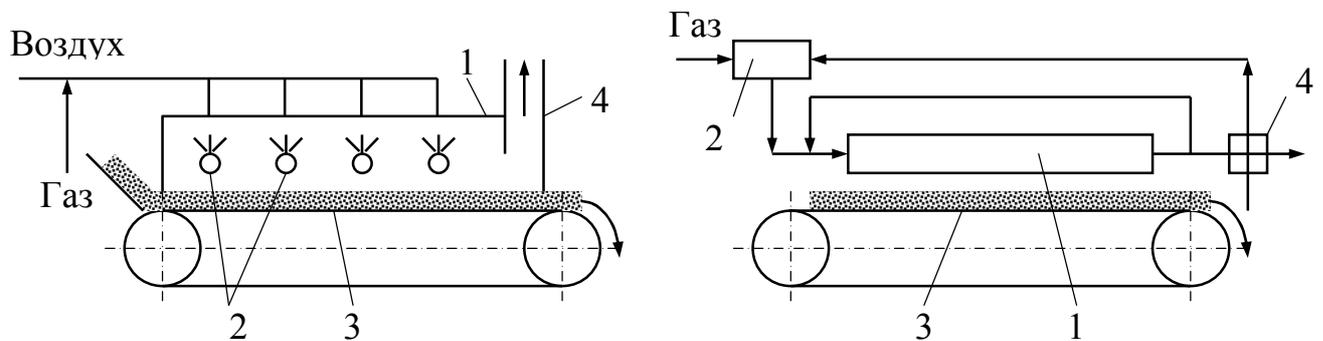
Материал подается в сушильную камеру 1 через механическую или пневматическую форсунку 2. Сушильный агент подается по патрубку 3, а после сушки отводится по патрубку 4 на очистку в циклоне или фильтре. Высушенный продукт осаждается на дно камеры и отводится через патрубок 5.

Распылительные сушилки работают по принципу прямотока, противотока и смешанного тока. Наиболее распространен противоток.

### 30. Специальные сушилки

В терморрадиационных сушилках необходимое для сушки тепло сообщается инфракрасными лучами. Таким образом к высушиваемому материалу можно подводить удельные потоки тепла, приходящиеся на  $1 \text{ м}^2$  его поверхности, в десятки раз превышающие потоки тепла при конвективной или контактной сушке. Поэтому при сушке инфракрасными лучами значительно увеличивается интенсивность испарения влаги из материала. Однако при высушивании толстослойных материалов скорость сушки определяется не скоростью подвода тепла, а скоростью внутренней диффузии влаги.

Применяются сушилки с электрическим и газовым нагревом. В качестве электрических излучателей используют зеркальные лампы или элементы сопротивления, а также электрические спирали, запрессованные в керамической массе. Газовый обогрев проще и экономичнее электрического. При газовом обогреве излучателями являются металлические или керамические плиты, которые нагреваются открытым пламенем или продуктами сгорания газов. По первой схеме обогрев излучающей панели 1 производится открытым



пламенем газовых горелок 2, обращенных к материалу, который перемещается на транспортере 3. Более высокий к.п.д. и лучшие условия труда достигаются при использовании второй схемы – с нагревом излучающей панели 1 продуктами сгорания газов, поступающих внутрь излучателя из топки 2. На пути в излучатель дымовые газы эжектируют (подсасывают) часть отработанных рециркулирующих газов после излучателя для повышения скорости движения теплоносителя и коэффициента теплоотдачи от газов к поверхности излучения. Тепло отработанных дымовых газов используется для подогрева воздуха, поступающего на горение, а в некоторых случаях – для предварительной подсушки материала.

В современных радиационных сушилках с газовым обогревом эффективно используют также излучающие насадки с беспламенным горением. Сущность этого способа нагрева заключается в пропускании смеси газов с воздухом через пористую плиту из огнеупорного материала со скоростью, превышающей скорость воспламенения смеси.

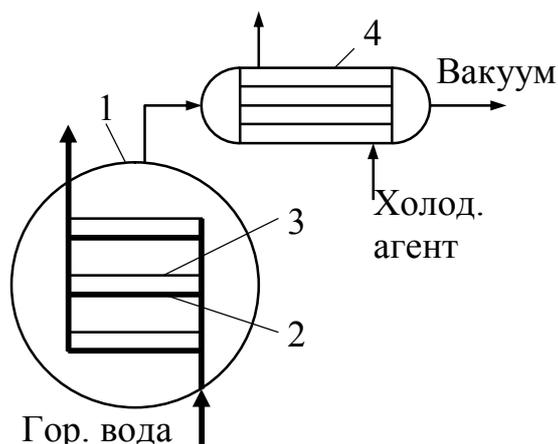
Терморрадиационные сушилки компактны и эффективны для сушки тонкослойных материалов, но отличаются относительно высоким расходом энергии ( $1,5 - 2 \text{ кВт час/кг исп. влаги}$ ), что ограничивает их применение.

Для сушки толстослойных материалов, когда необходимо регулировать температуру и влажность не только на поверхности, но и в глубине слоя материала, эффективно применение сушки в поле токов высокой частоты.

Высокочастотная сушилка состоит из высокочастотного генератора 1 и сушильной камеры 2. Ток высокой частоты из генератора 1 подводится к пластинам 3 и 4 конденсатора, между которыми по транспортеру 5 движется высушиваемый материал. Под действием высокочастотного поля ионы и электроны материала, содержащего обычно некоторое количество электролита, меняют направление движения на противоположное в соответствии с изменением напряженности поля. Дипольные молекулы начинают вращаться, а неполярные молекулы поляризуются. Эти процессы сопровождаются трением, приводят к выделению тепла и нагреванию высушиваемого материала.

В поле токов высокой частоты достигается быстрая и равномерная сушка толстослойных материалов. Однако затраты электроэнергии на сушку высоки и в несколько раз выше соответствующих расходов при конвективной и контактной сушке (2,5 – 5 кВт час/кг исп. влаги). Оборудование более сложное и дорогое в эксплуатации. В связи с этим высокочастотная сушка рентабельна только в определенных условиях, например, для сушки дорогостоящих диэлектрических материалов.

Сушка материалов в замороженном состоянии, при которой находящаяся в них влага в виде льда переходит в пар, минуя жидкое состояние, называется сублимационной сушкой. Сублимационная сушка проводится при глубоком вакууме (остаточное давление 130–13 Па) и соответственно – при низких температурах.



В сушильной камере 1, называемой сублиматором, находятся пустотелые плиты 2, внутрь которых подведена горячая вода. На плиты устанавливаются противни с высушиваемым материалом. Паровоздушная смесь из сублиматора 1 поступает в конденсатор-вымораживатель 4, охлаждаемый низкотемпературным хладагентом, например, аммиаком. В трубах конденсатора происходит конденсация и замораживание водяных паров.

Непосредственно на сушку сублимацией расходуется умеренное количество тепла низкого потенциала (40–50°C), но суммарный расход энергии и эксплуатационные расходы больше, чем при любом другом способе сушки. Таким способом сушатся продукты, не выдерживающие обычной тепловой сушки и требующие сохранения их свойств (медпрепараты).

Материальный баланс процесса сушки

$$G_H = G_K + W,$$

где  $G_H, G_K$  – начальный и конечный расход материала, кг/с;  
 $W$  – расход испаренной влаги, кг/с.

Материальный баланс по абсолютно сухому веществу

$$G_H (100 - w_H) = G_K (100 - w_K),$$

где  $w_H, w_K$  – начальная и конечная влажность материала, %.

Расход испаренной влаги

$$W = G_H \frac{w_H - w_K}{100 - w_K} = G_K \frac{w_H - w_K}{100 - w_H}.$$

Если на сушку расходуется  $L$  кг/с абсолютно сухого воздуха и влаго-содержание воздуха на входе в сушилку  $x_0$  кг/кг сухого воздуха, а на выходе из сушилки  $x_2$  кг/кг сухого воздуха, то баланс сушилки по влаге будет

$$Lx_0 + W = Lx_2,$$

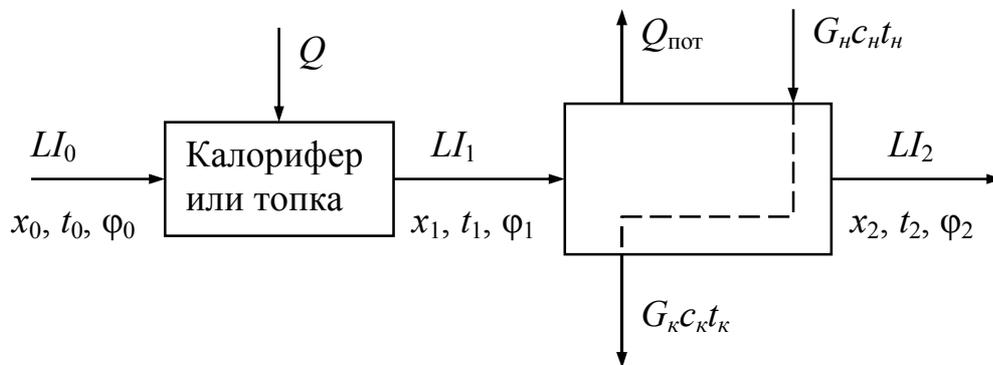
откуда расход воздуха

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}.$$

Удельный расход воздуха на испарение 1 кг влаги равен

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0}.$$

Тепловой баланс конвективной сушилки иллюстрируется расчетной схемой



Уравнение теплового баланса конвективной сушилки

$$Q_K + LI_0 + G_K c_M t_H + W c_{вл} t_H = LI_2 + G_K c_M t_K + Q_{пот},$$

где  $Q_K$  – приход тепла на нагрев воздуха в калорифере, Вт;

$LI_0$  – приход теплоты с сушильным агентом, Вт;

$G_K c_M t_H$  – приход тепла с влажным материалом, Вт;

$W c_{вл} t_H$  – приход тепла с влагой из материала, Вт;

$LI_2$  – расход теплоты с отработанным сушильным агентом, Вт;

$G_K c_M t_K$  – расход тепла с высушенным материалом, Вт;

$Q_{пот}$  – потери тепла в окружающую среду, Вт;

$I_0, I_2$  – теплосодержание воздуха до калорифера и после сушки, кДж/кг °С;

$c_M, c_{вл}$  – удельная теплоемкость материала и влаги, кДж/кг °С;

$t_H, t_K$  – температура материала до и после сушки, °С.

Расход тепла на конвективную сушку

$$Q_k = L(I_2 - I_0) + G_k c_M (t_k - t_H) - W(I'_k - I'_H) c_{вл} t_H + Q_{ном}.$$

Уравнение теплового баланса контактной сушилки

$$DI_n + G_k c_M t_H + W c_{вл} t_H = D c_{конд} t_{конд} + G_k c_M t_k + WI_B + Q_{ном},$$

где  $DI$  – приход тепла с греющими паром, Вт;

$D c_{конд} t_{конд}$  – расход тепла с конденсатом греющего пара, Вт;

$D$  – расход греющего пара, кг/с;

$I_n$  – энтальпия греющего пара, кДж/кг °С;

$c_{конд}$  – удельная теплоемкость конденсата греющего пара, кДж/кг °С;

$I_B$  – энтальпия испаренной влаги, кДж/кг °С;

$t_{конд}$  – температура конденсата, °С.

В связи со значительными затратами тепловой энергии на осуществление процесса сушки важное значение приобретает снижение энергетических затрат. Экономия энергии может быть получена следующими способами.

1. Повышение начальной температуры сушильного агента, что при прочих равных условиях снижает удельный расход сушильного агента и, соответственно, потери теплоты с отходящим потоком. Этот способ применим для сушки материалов, выдерживающих высокую температуру, или при кратковременной продолжительности сушки.

2. Снижение температуры отработанного сушильного агента, что также снижает потери теплоты с отходящим потоком. Способ ограничен необходимостью поддерживать определенную движущую силу и точкой росы – температурой, при которой начинается конденсация испаренной влаги.

3. Рециркуляция части отработанного сушильного агента, снижающая расход тепла на нагрев сушильного агента. Способ ограничен точкой росы, а также зависит от начальной и конечной влажности высушиваемого материала. Способ схематически рассмотрен применительно к терморadiационной сушилке, но может быть использован и для сушилок других типов.

4. Использование тепла отработанного сушильного агента для подогрева воздуха, поступающего в топку, или для подготовки сушильного агента, например, смеси воздуха и дымовых газов.

5. Утилизация тепла отработанного сушильного агента для других технологических или вспомогательных целей.

6. Снижение расхода теплоносителя путем замены воздуха водяным паром, у которого удельная теплоемкость в два раза выше, чем у первого.

7. Снижение влажности высушиваемого материала перед сушкой механическими способами, например, фильтрованием, центрифугированием или даже выпариванием и др., которые в энергетическом плане более выгодны.

8. Снижение потерь тепла в окружающую среду через стенки оборудования, которое достигается при надлежащей тепловой изоляции оборудования и трубопроводов.

### 31. Печи

В химической промышленности для нагрева теплоносителей, продуктов и аппаратов широко используются печи.

Печь – это устройство, в котором в результате горения топлива или превращения химической или электрической энергии выделяется теплота, используемая для отопления или тепловой обработки материалов.

В зависимости от источника теплоты печи делят на пламенные и электрические.

По областям применения различают бытовые и промышленные печи.

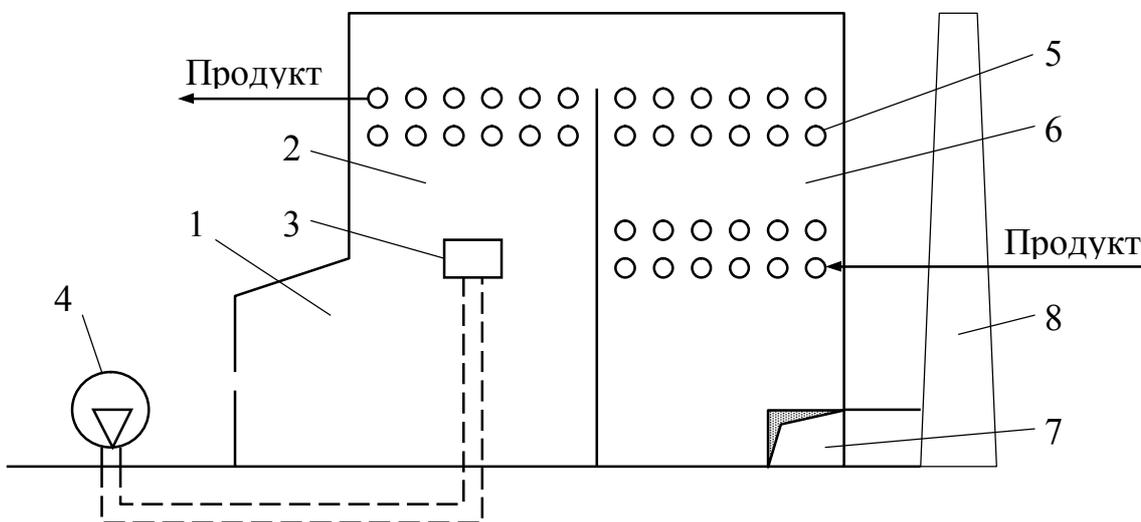
По технологическому назначению печи могут быть разделены на следующие виды:

- 1) для удаления влаги из материала, например, сушильная печь;
- 2) нагревательные печи, например, термическая печь;
- 3) обжиговые печи, например, для обжига известняка;
- 4) плавильные печи, например, мартеновская или стекловаренная печи;
- 5) печь для разложения и возгонки материалов, например, коксовая печь;

Многообразие назначений обусловлено многообразием конструктивных особенностей печей – башенная печь, вращающаяся печь, двухванная печь, колпаковая печь, кольцевая печь, конвейерная печь, протяжная печь, тигельная печь, шахтная печь и др.

Непосредственное нагревание топочными газами осуществляется в трубчатых печах, а также в печах для реакционных котлов.

Трубчатая печь для нагревания жидких продуктов включает топку 1,

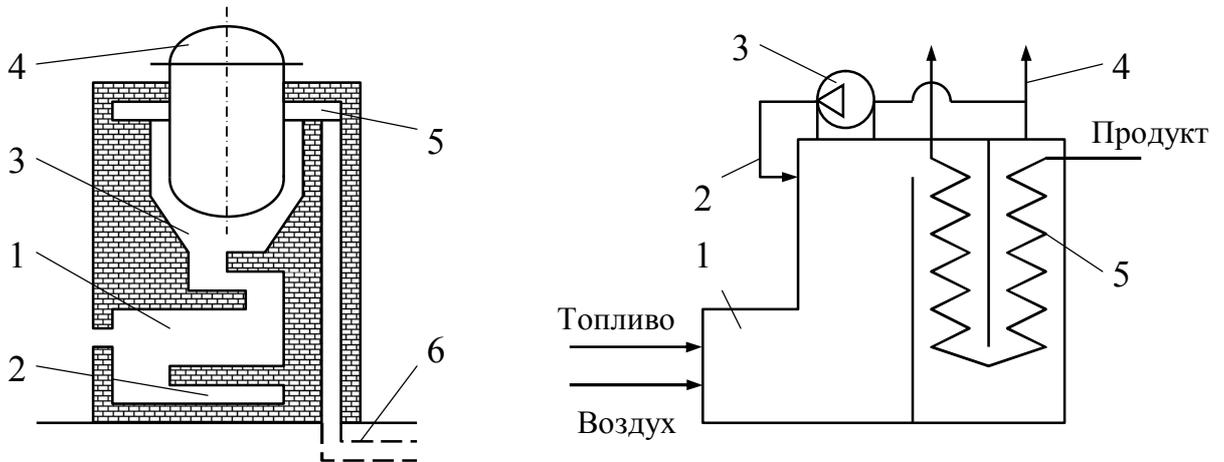


куда вводится топливо (твердое, жидкое, газообразное) и необходимый для горения воздух. Для снижения температуры газов в топочном пространстве в топочную камеру 2 через окно 3 вентилятором 4 может нагнетаться воздух. Топочные газы обтекают змеевик 5, расположенный в шахте 6, а затем удаляются через бор 7 и дымовую трубу 8.

Первая по ходу движения топочных газов часть печи называется радиантной, в которой основная часть тепла передается трубчатому змеевику терморрадиацией за счет излучения, а вторая – конвективной, в которой тепло передается трубам главным образом конвекцией.

Дымовыми газами может нагреваться не только промежуточный теплоноситель, но и непосредственно стенки реактора.

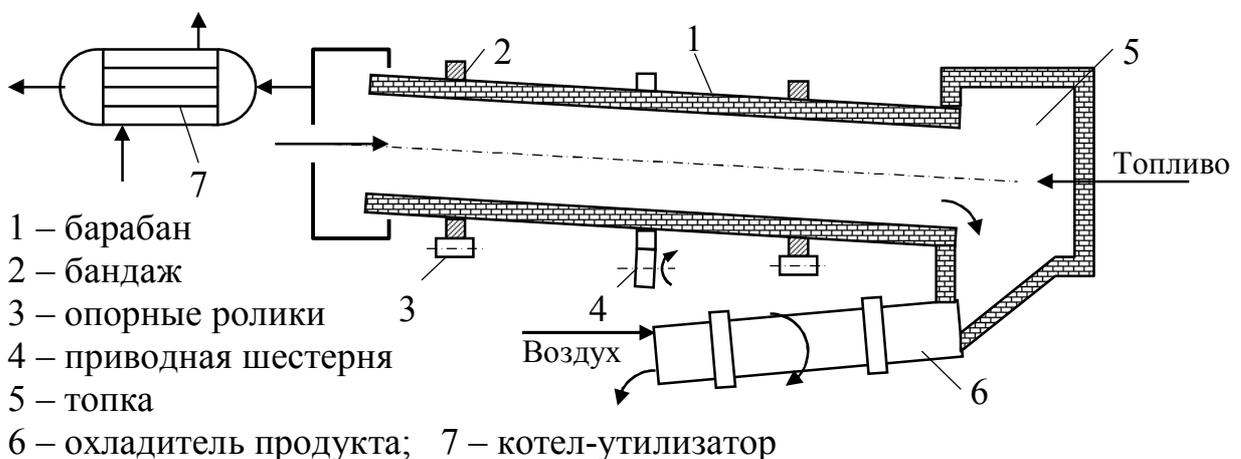
Печь для реакционных котлов или автоклавов содержит топку 1, куда



через канал 2 подается необходимый для горения воздух. Образующиеся в топке дымовые газы направляются в камеру 3, где отдают свое тепло обогреваемому аппарату 4. Отработанные дымовые газы через кольцевой канал 5 направляются в боров 6.

В нагревательной печи с рециркуляцией дымовых газов сгорание топлива осуществляется в топке 1. Образующиеся дымовые газы смешиваются с отработанными дымовыми газами и обогревают теплоноситель, проходящий по змеевику 5. Дымовые газы отводятся через дымовую трубу, а часть их вентилятором 3 возвращается в топку по трубопроводу 2.

Барабанные печи широко применяются для обжига цемента. Их конструкции аналогичны барабанным сушилкам. Однако в отличие от сушилок печи более протяженные и температура внутри барабана более высокая. Для предохранения от воздействия высоких температур барабан изнутри футерован огнеупорным кирпичом. Барабан 1 опирается с помощью бандажей 2 на опорные ролики 3 и приводится в движение с помощью приводной шестерни 4.



Продукт загружается в барабан и движется в нем противоточно дымовым газам, которые отдают свою теплоту на нагрев сырья и осуществление реакций.

После барабана продукт охлаждается воздухом и отправляется потребителям. Подогретый воздух используется для сгорания топлива в топке 5. Тепло отработанных дымовых газов утилизируется в котле 7, например, для выработки пара. Перед выбросом в атмосферу дымовые газы очищаются от унесенной пыли до или после котла-утилизатора.

Непосредственное нагревание дымовыми газами оборудования, протекающее в жестких условиях при больших перепадах температур, может привести к недопустимому перегреву продуктов у стенок обогреваемых аппаратов.

Простейшим способом смягчения условий нагревания является снижение температуры дымовых газов при одновременном повышении коэффициента теплоотдачи от газов к стенке обогреваемого аппарата. Для осуществления этого способа часть отработанных дымовых газов возвращается в печь для смешения с горячими дымовыми газами, выходящими из топки, что приводит к снижению температуры смеси и увеличению объема дымовых газов, обогревающих аппарат. При этих условиях снижается перепад температуры, увеличивается скорость газов и, следовательно, коэффициент теплоотдачи. Подобные способы нагревания называются нагреванием с рециркуляцией газов.

Общее количество теплоты, которое необходимо внести с топливом:

$$Q_m = Gc(t_k - t_n) + Q_2 + Q_{нз} + Q_{пот}$$

где  $G$  – расход нагреваемого продукта, кг/с;

$c$  – удельная теплоемкость нагреваемого продукта, кДж/кг °С;

$t_k, t_n$  – конечная и начальная температура перерабатываемого продукта, °С;

$Q_2$  – потери тепла с уходящими дымовыми газами, кВт;

$Q_{нз}$  – потери тепла от неполноты горения топлива, кВт;

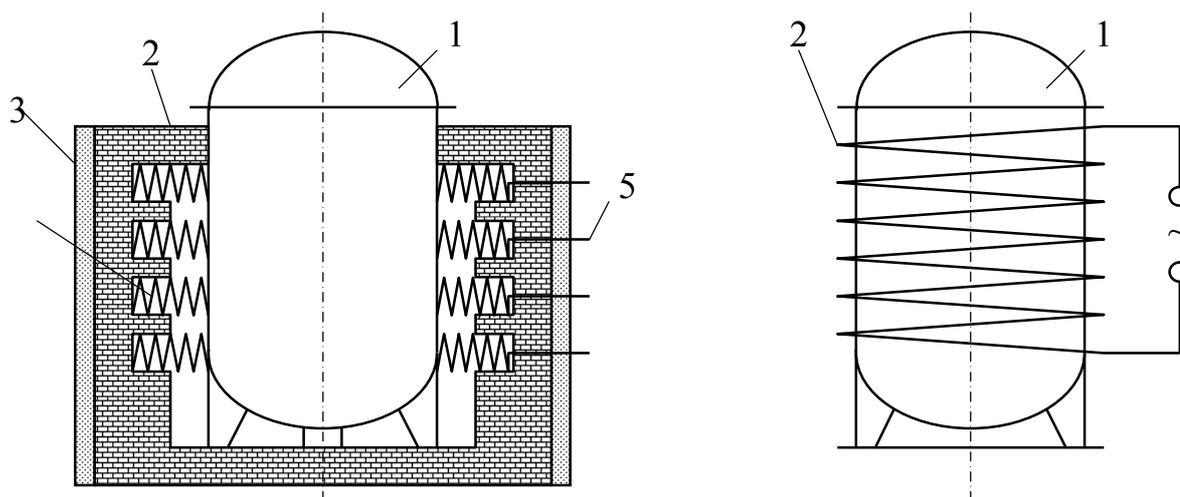
$Q_{пот}$  – потери тепла в окружающую среду, кВт.

В химической технике используется также нагревание электрическим током в различных электрических печах. При таком способе нагрева можно легко и точно регулировать процесс при равномерном обогреве.

По способу превращения электрической энергии в тепловую различают электрические печи сопротивления, индукционные и дуговые. Электрические печи сопротивления делятся на печи прямого действия и печи косвенного действия.

В электрических печах прямого действия нагреваемое тело включают непосредственно в электрическую цепь и нагревается при прохождении через него электрического тока. Часто печь прямого действия представляет собой аппарат, корпус которого является одним из электродов; другой электрод размещают в аппарате. Между электродами помещают жидкие или расплавленные нагреваемые материалы.

Электрические печи косвенного действия получили большое распространение. В них тепло выделяется при прохождении электрического тока по специальным нагревательным элементам. Выделяющееся при этом тепло передается материалу лучеиспусканием, теплопроводностью и конвекцией. В таких печах может осуществляться нагрев до температуры 1000–1100°С. Схема такой печи показана на рисунке.



Футеровка печи 2 выполнена из огнеупорного кирпича. В пазах футеровки уложены спиральные нагревательные элементы 4, к которым подводится ток от электрошин 5. тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока через спиральные нагревательные элементы, передается обогреваемому аппарату 1 лечеиспусканием и конвекцией. Тепловая изоляция 3 снижает потери тепла в окружающую среду.

Нагревательные элементы печей изготавливают из проволоки либо из ленты нихрома (20% Cr, 30–80% Ni и 0,5 – 50% Fe) или хроможелезо-алюминиевых сплавов. Диаметр проволоки обычно 3–7 мм; в применяемых лентах отношение ширины к толщине 5–20.

Нагревание в электрических индукционных печах осуществляется индукционными токами. Обогреваемый аппарат 1 является сердечником соленоида 2, охватывающего аппарат. При пропускании через соленоид переменного тока вокруг него возникает переменное магнитное поле, которое индуцирует в стенках обогреваемого аппарата электродвижущую силу. Под действием возникающего вторичного тока нагреваются стенки аппарата. Соленоид изготавливается из медной или алюминиевой проволоки, имеющей малое омическое сопротивление.

Количество тепла, которое необходимо подвести в процессе нагревания электрическим током, равно

$$Q = Gc(t_k - t_n) + Q_{ном},$$

где  $G$  – расход перерабатываемого продукта, кг/с;

$c$  – удельная теплоемкость перерабатываемого продукта, кДж/кг град;

$t_k, t_n$  – конечная и начальная температура перерабатываемого продукта, °С;

$Q_{ном}$  – потери тепла в окружающую среду, кВт.

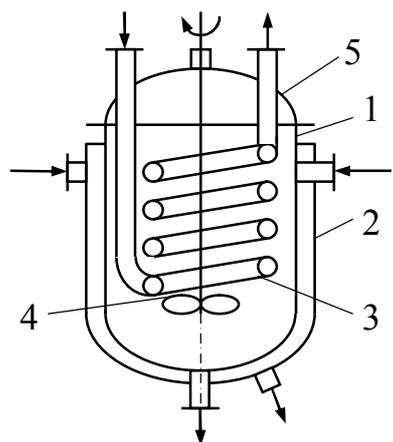
В дуговых печах применяется нагревание электрической дугой до температуры 1300–1500°С. Электрическая дуга возникает в газообразной среде. Дуговые печи применяют для плавки металлов, получения карбида кальция и фосфора.

В дуговых печах при возникающих больших температурных перепадах невозможны равномерный обогрев и точное регулирование температуры.

## 32. Реакторы

Реакторы – аппараты, предназначенные для осуществления химических реакций. По фазовому состоянию системы различают реакторы гомогенные, гетерогенные и гетерофазные. В гомогенных реакторах обрабатываемая среда однородна. К гетерогенным относят системы «газ-газ», «жидкость-жидкость». К гетерофазным относят системы «жидкость-твердое вещество», «жидкость-газ» и «твердое вещество-газ». Наиболее широко используют гетерогеннокаталитические реакторы.

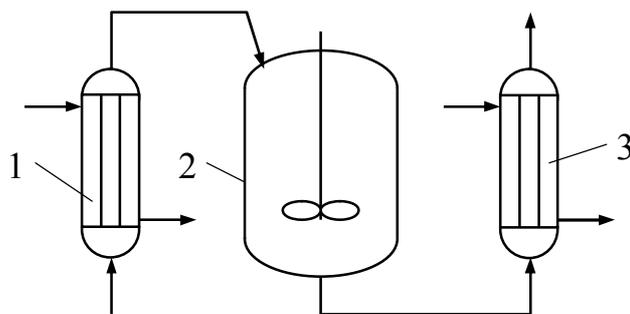
По организации процесса реакторы подразделяются на следующие три группы.



- 1 – корпус; 2 – рубашка;  
3 – змеевик; 4 – мешалка;  
5 – крышка

1. В реакторе периодического действия все отдельные стадии процесса протекают последовательно в разное время. Характер изменения концентрации реагирующих веществ одинаков во всех точках реакционного объема, но различен во времени для одной и той же точки объема. Время реакции и время пребывания реагентов в реакционном объеме одинаковы. Параметры технологического процесса в периодически действующем реакторе изменяются во времени.

Реакторы периодического действия малопроизводительны и плохо поддаются автоматическому контролю и регулированию.



- 1, 3 – теплообменники; 2 – реактор

2. В реакторе непрерывного действия все отдельные стадии процесса химического превращения вещества (подача исходных веществ, химические превращения, вывод продуктов реакции) осуществляются параллельно и одновременно. Характер изменения концентраций реагирующих веществ в реакционном объеме различен в каждый момент времени в разных точках объема аппарата, но постоянен во времени для одной и той же точки аппарата.

Время реакции может не совпадать со временем пребывания частиц в аппарате, т. к. каждая элементарная частица вещества находится в реакционном объеме разное время и общее время пребывания зависит от характера распределения времени пребывания отдельных частиц.

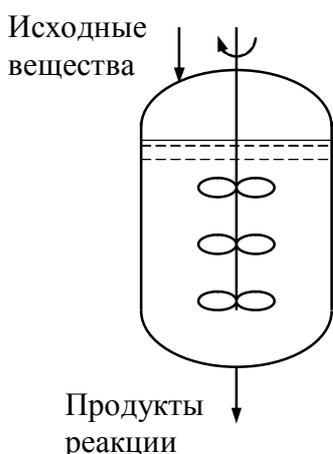
Непрерывно действующие аппараты высокопроизводительны, легко поддаются автоматическому контролю и регулированию.

3. Реакторы полунепрерывного действия работают в неустановившихся условиях, т. к. одни реагенты поступают непрерывно, а другие периодически.

Возможны варианты, когда реагенты поступают в аппарат периодически, а продукты реакции выгружаются непрерывно. Такой реактор можно рассматривать как непрерывно действующий аппарат, в котором потоки поступающих и выходящих веществ не равны (вследствие чего изменяется общая масса реагирующих веществ в объеме), а также как периодически действующий аппарат, в котором ввод одного из реагирующих веществ или вывод продуктов реакции осуществляется периодически.

Реакторы полунепрерывного действия используются на малотоннажных производствах, когда изменение скорости подачи реагентов позволяет регулировать скорость процесса, например при проведении экзотермических реакций.

По гидродинамическому режиму реакторы делят на три группы.



1. Реакторы идеального смешения – это аппараты, в которых потоки реагентов мгновенно и равномерно перемешиваются во всем реакционном объеме. Состав и температура реакционной смеси принимается одинаковыми во всем объеме аппарата. Практически к аппаратам такого типа могут быть отнесены аппараты небольшого объема с мешалками при малой вязкости среды, аппараты с кипящим слоем, проточно-циркуляционные аппараты при большой кратности циркуляции.

2. Реакторы идеального (полного) вытеснения – это аппараты, в которых движение компонентов носит поршневой характер, т. е. каждый предыдущий объем, проходящий через аппарат, не смешивается с последующим, а как бы вытесняется им. В результате состав и температура реакционной смеси



в центре аппарата и у его стенок отличаются друг от друга, а также существует значительный перепад концентраций и температур на входе и выходе из аппарата. На практике этому типу реактора близки аппараты кожухотрубчатого типа, колонны, заполненные сплошным слоем неподвижного катализатора и др.

3. Очень широко распространены реакторы с промежуточным гидродинамическим режимом. Наиболее часто отклонение от идеального режима перемешивания в реакционном объеме наблюдается, например, в аппаратах большого объема при малоинтенсивном перемешивании, большой скорости подачи реагентов и т. п.

В аппарате идеального вытеснения регулярный режим может быть нарушен в результате образования зоны циркуляции: поперечного и особенно

продольного перемешивания, что приводит к частичному выравниванию концентраций и температур по сечению и длине реактора

По тепловому режиму различают следующие типы реакторов.

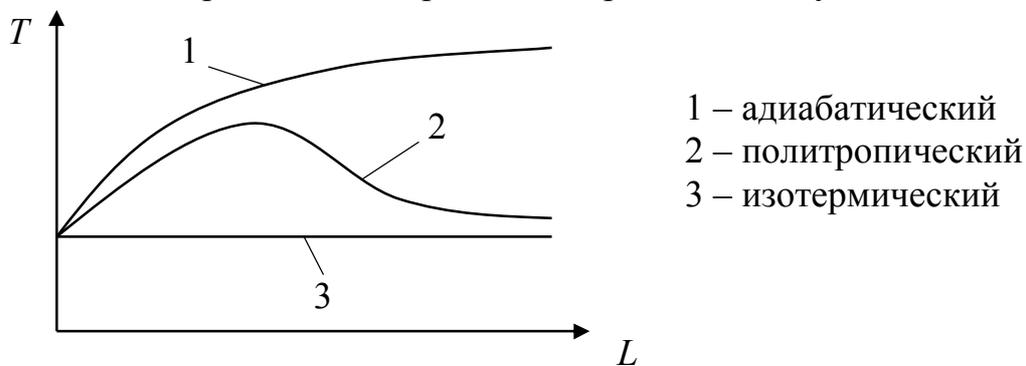
1. Изотермический реактор характеризуется постоянством температуры во всем реакционном объеме. В таком реакторе скорость подвода или отвода теплоты равны количеству теплоты, выделенному или поглощенному в процессе реакции. В аппарате должна быть обеспечена достаточная поверхность теплообмена. На практике такой режим достигается при условии полного перемешивания реагирующих веществ.

2. В адиабатическом реакторе полностью отсутствует теплообмен с окружающей средой. Вся теплота реакции аккумулируется реакционным объемом и идет на изменение теплового состояния системы, что влияет на скорость реакции. В адиабатическом реакторе имеет место наибольший перепад температур веществ на входе и выходе из аппарата. Для экзотермических реакций температура повышается, для эндотермических – понижается. Для адиабатического режима нужна хорошая тепловая изоляция реакционного объема.

3. В политропическом реакторе теплообмен с внешней средой происходит, но он не пропорционален эффекту тепловой реакции. Изменение температуры в реакционном объеме определяется не только тепловым эффектом реакции, но и конструктивными и режимными факторами реакционной аппаратуры.

Подача теплоты может осуществляться через стенку, разделяющей охлаждающийся и ли нагревающийся потоки, или непосредственно их смешением. Теплообмен в реакторе может быть непрерывным, когда теплообменник расположен внутри аппарата, или ступенчатым, когда теплообменные устройства выносятся из зоны реакции. В качестве теплоносителя могут быть использованы реакционная смесь или сырье, катализатор, инертные газы и др. Теплоту реакции целесообразно использовать для подогрева исходных реагентов.

Изменения температуры в реакторе вытеснения с различными тепловыми режимами для простой экзотермической реакции следующие.



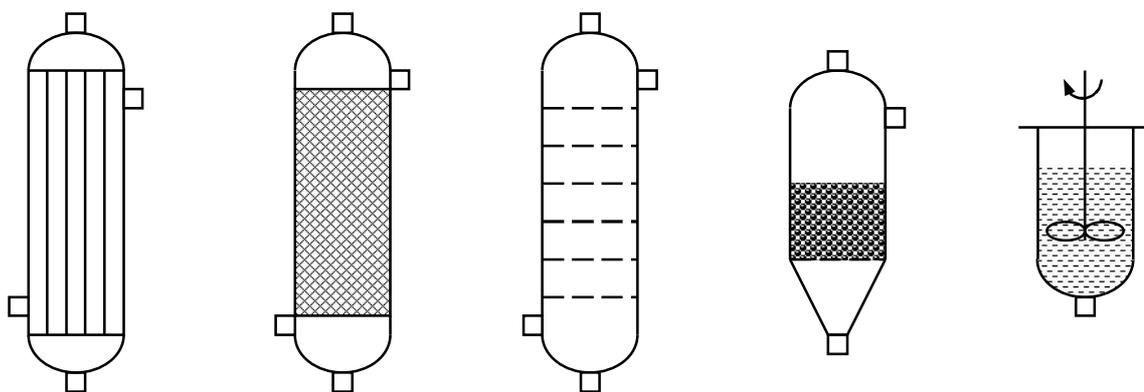
Реактор должен работать эффективно, т. е. обеспечивать требуемую глубину и избирательность химических превращений, определенный режим движения реагентов, иметь необходимый реакционный объем, создавать тре-

буемую поверхность контакта взаимодействующих фаз, поддерживать необходимый тепловой режим, уровень активности катализатора и т. д.

В промышленных условиях важнейшее значение имеет не только скорость химического превращения вещества, но и производительность аппаратов. Поэтому выбор типа и конструкции оборудования является одним из самых главных и ответственных этапов реализации химико-технологического процесса.

По конструкции реакторы классифицируются следующим образом: по типу реакционной камеры, по типу колонны, по типу теплообменника, по типу печи и др.

Для систем газ-газ, жидкость-газ, жидкость-жидкость применяются трубчатые реакторы (крекинг бензина, полимеризация этилена), насадочные



трубчатые      насадочные      ступенчатые      со взвеш. слоем      с мешалкой

колонные реакторы непрерывного действия (окисление углеводородов, нейтрализация аммиака, окисление ксилола). Для систем газ-твердое, жидкость-твердое, газ-жидкость применяются колонные реакторы со ступенчатым контактом (обжиг известняка, газификация твердых топлив, окисление этилена). Для систем газ-твердое применяют реакторы со взвешенным слоем (каталитический крекинг углеводородов, сжигание твердых топлив). Для систем жидкость-жидкость, газ-жидкость применяют реакторы с мешалкой. Кроме того для перемешивания систем часто используют сопла, инжекторы, лабиринтные и каскадные смесители и другие устройства.

К важнейшим факторам, определяющим устройство реактора, относятся: агрегатное состояние исходных веществ и продуктов реакции, а также их химические свойства; температура и давление процесса; тепловой эффект процесса и скорость теплообмена; интенсивность перемешивания реагентов; непрерывность или периодичность процесса; удобство монтажа и ремонта аппарата, простота его изготовления и т. д.

Из всех перечисленных факторов агрегатное состояние вещества оказывает наибольшее влияние на принцип действия реактора и определяет конструктивный тип реакторного устройства. Кроме того, от этого фактора зависит выбор организации движения и контакта взаимодействующих фаз, а также некоторых основных и вспомогательных деталей аппарата, таких как питатель, перемешивающее устройство, поверхность теплообмена и т. д.

### 33. Расчет реакторов

Объем реактора непрерывного действия равен

$$V = \frac{v\tau}{\phi},$$

где  $v$  – расход реакционной смеси, м<sup>3</sup>/с;

$\tau$  – длительность реакции, с;

$\phi$  – коэффициент заполнения аппарата. Для непенящихся, слабо перемешиваемых жидкостей  $\phi = 0,7-0,8$ , для кипящих, пенящихся жидкостей  $\phi = 0,5-0,6$ ,

Объем реактора периодического действия равен

$$V = \frac{v\tau_{ц}}{\phi},$$

где  $\tau_{ц}$  – время цикла, с.

$$\tau_{ц} = \tau_{загр} + \tau + \tau_{выгр},$$

где  $\tau_{загр}$ ,  $\tau_{выгр}$  – время загрузки и выгрузки, с.

Длительность загрузки и выгрузки жидких или газообразных компонентов определяют по формуле

$$\tau_{загр(выгр)} = \frac{4V\phi}{\pi d^2 w},$$

где  $d$  – диаметр трубопровода для ввода реакционной массы, м;

$w$  – скорость движения среды, м/с. При движении маловязких жидкостей под напором  $w = 1$  м/с, самотеком – 0,5 м/с. Для газов принимается  $w = 10-20$  м/с. (Более подробно скорости движения сред рассмотрены на ПЗ).

При загрузке твердых компонентов время загрузки определяется производительностью питателя, дозатора или транспортера

$$\tau_{загр} = \frac{G}{w_m},$$

где  $G$  – масса твердых компонентов, загружаемая в реактор, кг;  $w_m$  – массовая скорость загрузки, кг/с.

При загрузке реактора компонентами вручную время загрузки не рассчитывается, а задается, исходя из конкретных условий.

В реакторах идеального вытеснения время реакции первого порядка равно

$$\tau = -\frac{\ln\left(1 - \frac{c_A}{c_{A0}}\right)}{k},$$

где  $c_{A0}$ ,  $c_A$  – начальная и конечная концентрации реагента  $A$ , % или кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – константа скорости реакции.

Время реакций других порядков ( $n \neq 1$ ) в реакторе идеального вытеснения

$$\tau = \frac{c_{A0}^{1-n}}{(n-1)k} \left[ \left( 1 - \frac{c_A}{c_{A0}} \right)^{1-n} - 1 \right],$$

где  $n$  – порядок реакции.

В реакторах идеального смешения время реакции первого порядка

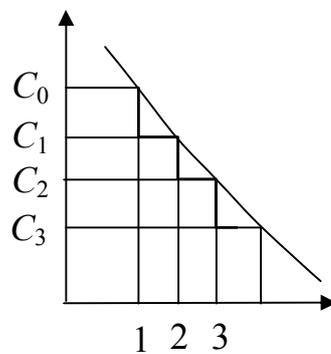
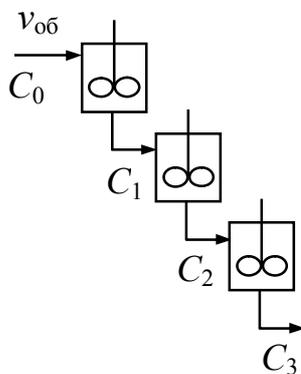
$$\tau = \frac{x_A}{k(1-x_A)}. \quad x_A = 1 - \frac{C_A}{C_{A0}} \quad - \text{степень превращения.}$$

Время реакции других порядков ( $n \neq 1$ ) в реакторе идеального смешения

$$\tau = \frac{c_{A0} - c_A}{k c_A^n}.$$

Величина  $k \cdot \tau$  может служить мерой эффективности процесса.

Для повышения эффективности использования реакторов их объединяют в каскад. Каждый реактор в каскаде реакторов представляет одну ступень



мень изменение концентраций. Концентрации в каждом реакторе изменяются скачком. Чем больше реакторов в каскаде, тем ближе система к реактору идеального вытеснения. С другой стороны, трубчатый реактор идеального вытеснения можно представить как каскад

из большого числа проточных реакторов с мешалками, обладающий тем же самым суммарным объемом.

Изменение концентраций в каскаде реакторов равно

$$\frac{C_{A0}}{C_A} = \frac{1}{\left( 1 + \frac{k\tau}{m} \right)^m}, \quad \begin{array}{ccc} m & 1 & 2 & 3 \\ k\tau & 9 & 4,3 & 3,1 \end{array}$$

где  $m$  – количество реакторов.

Из анализа формулы следует, что для  $x_A = (1 - C_A/C_{A0}) = 0,9$  при двух реакторах общий объем можно уменьшить почти наполовину по сравнению с тем, который был при одном реакторе, а при трех реакторах – в 3 раза.

Химические реакторы можно охлаждать или подогревать различными методами. Выбор способа теплообмена в реакционном аппарате зависит прежде всего от температурных условий ведения химического процесса, а также от свойств теплоносителя. Различают два основных метода охлаждения или нагревания в реакторе – прямой и косвенный нагрев теплотой.

В случае прямого теплообмена передача теплоты в реакторе осуществляется при непосредственном соприкосновении реакционной смеси и теплоносителя по одному из следующих вариантов:

1) необходимую теплоту получают непосредственно в реакторе, например, путем экзотермической реакции или электрического разряда;

2) отвод теплоты осуществляют путем частичного или полного испарения одного из компонентов реакционной смеси или с помощью эндотермической реакции;

3) теплообмен происходит за счет циркуляции теплоносителя в реакционном объеме.

При косвенном теплообмене в реакторе теплоноситель и реакционная смесь разделены непроницаемой стенкой, через которую происходит теплообмен. Поверхности теплообмена могут иметь разнообразную форму (змеевик, кольцо, рубашка и др.) и располагаться как внутри реактора, так и снаружи его. Обогрев или охлаждение аппарата снаружи чаще всего осуществляется через рубашку.

Тепловой баланс реактора состоит из следующих параметров

$$\Sigma Q_{вх} + Q_p = \Sigma Q_{вых} + Q_m + Q_{ном},$$

где  $\Sigma Q_{вх}$  – тепло, вносимое входными потоками, кДж;

$Q_p$  – тепло реакции, кДж;

$Q_m$  – тепло, уносимое теплоносителем, кДж;

$\Sigma Q_{вых}$  – тепло, уносимое выходными потоками, кДж;

$Q_{ном}$  – потери теплоты в окружающую среду, кДж.

Тепло, вносимое в реактор можно определить как

$$\Sigma Q_{вх} = G_1 c_1 t_1 + G_2 c_2 t_2 + G_3 c_3 t_3 + \dots,$$

где  $G_1, G_2, G_3$  – количество индивидуальных компонентов, вносимых в реактор, кг;

$c_1, c_2, c_3$  – удельная теплоемкость индивидуальных компонентов, кДж/кг·град;

$t_1, t_2, t_3$  – температура индивидуальных компонентов на входе в аппарат, °С.

Аналогичным образом находится тепло, уносимое из аппарата выходными потоками.

При изменении фазового состояния в тепловом балансе необходимо учитывать удельную теплоту парообразования или конденсации

$$\Sigma Q_{вх} = \Sigma G_i c_i t_i + G_u r,$$

где  $G_u$  – количество испарившегося (сконденсированного) вещества, кг;

$r$  – удельная теплоты испарения (конденсации), кДж/кг.

Тепло, уносимое теплоносителем равно,

$$Q_m = G_m c_m (t_{кон} - t_{нач}),$$

где  $G_m$  – количество теплоносителя, прошедшее через реактор в единицу времени, кг;

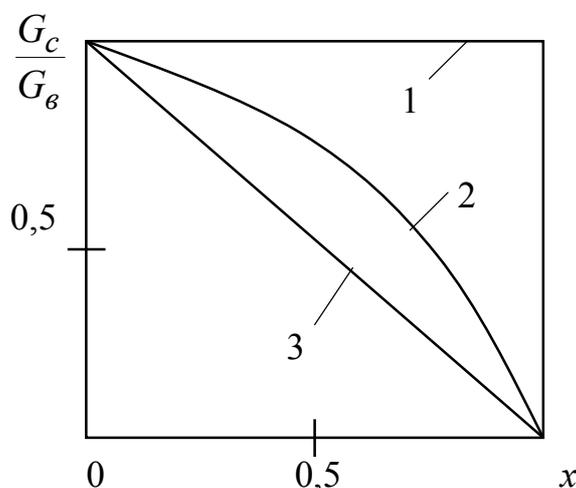
$c_m$  – удельная теплоемкость теплоносителя, кДж/кг·град;

$t_{кон}, t_{нач}$  – конечная и начальная температура теплоносителя, °С.

Для снижения энергозатрат на осуществление процесса целесообразно использовать тепло выходящих потоков для подогрева входных потоков.

Количество теплоты, выделяющееся в реакторе, пропорционально количеству реагирующих веществ т. е. реакционному объему. Количество теплоты, подводимое или отводимое от реакционной массы пропорционально поверхности теплообмена реактора. Объем и поверхность теплообмена пропорциональны диаметру в третьей и второй степени соответственно. Отсюда следует, что с увеличением размеров аппарата уменьшается удельный теплоотъем в нем, т. е. количество теплоты, приходящееся на единицу объема реактора. Поэтому с увеличением реакционного объема тепловые условия работы реактора приближаются к адиабатическим, а с уменьшением – к изотермическим. Таким образом при ограниченном теплообмене целесообразно использовать реакторы большого размера, а при интенсивном – наоборот, с малыми реакционными объемами.

Относительная эффективность реакторов идеального вытеснения и смешения приведена на рис.



$$x = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} \text{ степень превращения}$$

Относительная эффективность реакторов для реакций различных порядков:

1 – нулевой; 2 – первый; 3 – второй;  
 $G_b, G_c$  – производительность реакторов идеального вытеснения и смешения соответственно

Отношение эффективностей тем больше, чем выше степень превращения и меньше порядок реакции. Следовательно, наиболее производительны при прочих равных условиях реакторы непрерывного действия идеального вытеснения. Вместе с тем широкое применение гетерогенных процессов, особенно сопровождаемыми интенсивными тепловыделениями или поглощениями тепла, требуют применения аппаратов с интенсивным перемешиванием взаимодействующих фаз. Для увеличения производительности таких аппаратов широко используют их секционирование или организацию каскада последовательно соединенных аппаратов.

Большое влияние на процесс химического превращения оказывает способ подачи реагирующих веществ в аппарат. Например, все реагенты вводятся одновременно для сохранения высоких концентраций, и, наоборот, постепенно вводятся для обеспечения низких концентраций, одновременно загружается один компонент и постепенно вводится другой при сильно эндотермических превращениях. Или организуется рециркуляция реакционной смеси с выхода реактора на его вход.

Кроме кинетических закономерностей процесса на выбор реактора влияют также экономические показатели: себестоимость продукта, доход от удельной производительности аппарата и др.

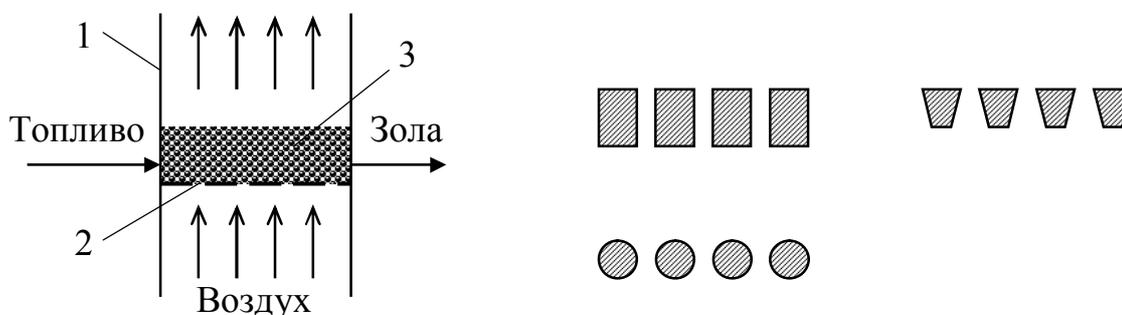
## Топки

Топка – это часть котла или печи, где сжигают органическое топливо для получения дымовых газов, тепло которых используется для технологических целей или для преобразования в электрическую или механическую энергию. Топки для твердых топлив разделяют на слоевые и камерные (циклонные и вихревые). Жидкое (мазут) или газообразное топливо сжигают в камерных топках. Работа топок характеризуется поверхностной плотностью теплового потока (тепловым напряжением зеркала горения при слоевом сжигании и тепловым напряжением сечения топки при камерном сжигании) в  $\text{Вт}/\text{м}^2$  и пространственной плотностью теплового потока (тепловым напряжением топочного объема) в  $\text{Вт}/\text{м}^3$ , коэффициентом избытка воздуха и коэффициентом полезного действия (к.п.д.).

Коэффициент избытка воздуха – отношение фактического расхода воздуха к теоретически необходимому. В факельных топках достигает 1,05 – 1,15 при сжигании жидкого и газообразного топлива и 1,25 при сжигании угольной пыли, в слоевых топках 1,3 – 1,6. Недостаток воздуха в топке ведет к неполному сгоранию топлива и резкому понижению к.п.д. котла. Чрезмерный избыток воздуха увеличивает массу уходящих газов, потерю тепла с ними, что также понижает к.п.д. котла и ведет к образованию копоти, вредных оксидов серы, азота, углерода.

Коэффициент полезного действия топки – отношение части тепла, которое пошло на нагрев материала, нагрев воды, образование пара и др. цели, к теплу, которое выделяется при полном сгорании топлива.

Слоевая топка – устройство для сжигания твердого топлива на колосни-

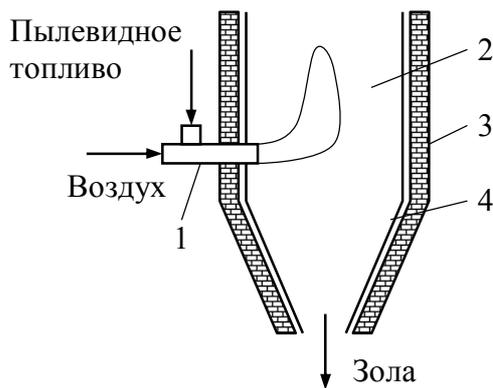


ковой решетке 2 в паровых котлах или печах. Колосниковая решетка крепится к стенкам камеры 1 и предназначена для поддержания слоя 3 горящего твердого топлива в топке. Собирается из чугуновых колосников, имеющих прямоугольное, круглое или трапециевидальное сечения. При небольших размерах может отливаться как единое целое.

Различают слоевые топки с неподвижной колосниковой решеткой и слоем топлива, с движущейся цепной решеткой, с неподвижной решеткой и перемещающимся по ней слоем топлива, например, по наклонной решетке при помощи шурующей планки.

Камерная топка – топка котла, выполненная обычно в виде вертикальной прямоугольной призматической камеры 2, в которой топливо сгорает в

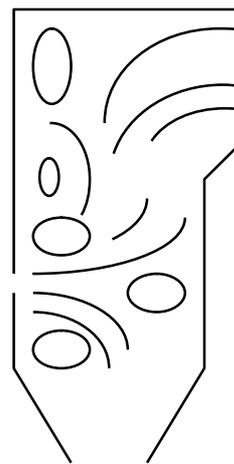
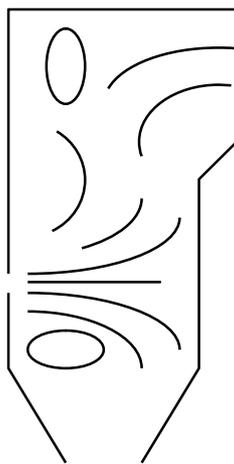
струе воздуха (в факеле). В таких топках сжигают твердое пылевидное топливо, а также жидкое и газообразное топливо.



На внутренней поверхности камерной топки размещают топочные экраны 4, которые снаружи обкладывают обмуровкой 3. При необходимости выполняют тепловую изоляцию. Топливо вводится в камерную топку вместе с необходимым для горения воздухом через горелочные устройства 1. Основная часть золы отводится снизу топки. Некоторое количество золы в виде пыли отводится из топки с дымовыми газами и

очищается от них в дополнительных устройствах, например, циклонах. Камерные топки устанавливают к крупным водогрейным и паровым котлам.

Факельная топка – камерная топка для сгорания газообразного, жидкого и твердого топлива в факеле. Газообразное топливо перед подачей на горение не требует какой-либо подготовки. Жидкое топливо распыляется в форсунках. Твердое топливо размалывается в тонкий порошок.



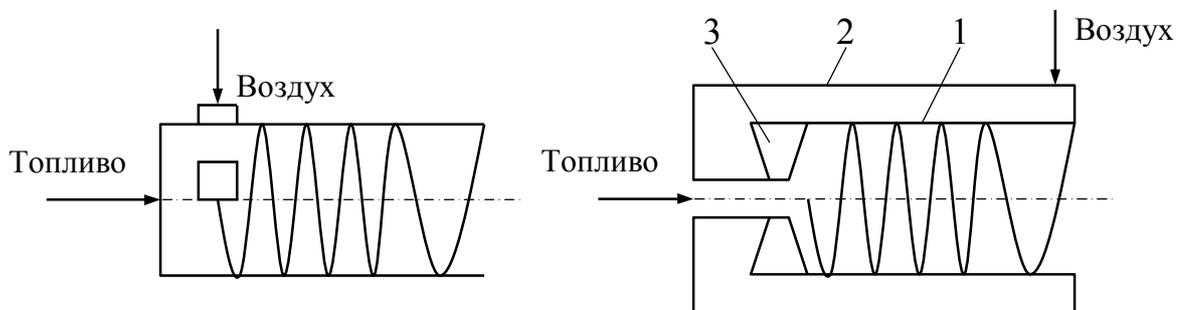
а) с прямоточными горелками

б) с вихревыми горелками

Факельные топки для пылевидного топлива подразделяются на топки с удалением шлака в твердом состоянии (сухое шлакоудаление) и с жидким шлакоудалением. Факельная топка для жидкого и газообразного топлива выполняют с горизонтальным или слегка наклонным подом. Факельные топки классифицируют по типу горелок: а) прямоточные и б) вихревые, по расположению горелок (однофронтальное, встречное, угловое) и по числу ярусов горелок.

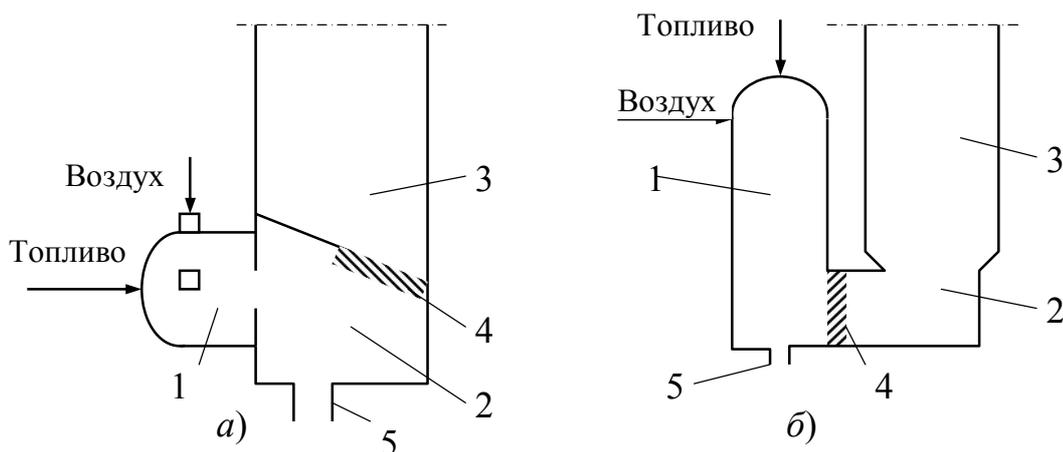
Вихревая топка – камерная топка с вихревым движением газов в топочной камере, которое достигается особым расположением горелок и конструкцией топочной камеры. При этом движение среды в топке сопровождается вращением элементарных объемов вокруг мгновенных осей, проходящих через эти объемы.

Циклонная топка – камерная топка, в которой твердое топливо, измельченное до пылевидного состояния либо мазут сжигаются в газовом вихре, создаваемом при тангенциальном вводе воздуха. За счет появления тангенциальной составляющей скорость воздуха значительно возрастает, что турбулизирует смесь в топке, перемешивает топливо и окислитель, ускоряет процесс горения и повышает полноту сгорания топлива.



Для снижения потерь теплоты и предотвращения прогорания стенки топki она оборудуется дополнительной стенкой 2, расположенной коаксиально внутренней стенке 1 с зазором между ними. В этот зазор подается воздух, который нагревается и поступает на горение через завихритель 3. При этом воздух охлаждает внутреннюю стенку и замедляет ее износ в результате прогорания при высоких температурах. Одновременно снижаются потери теплоты в окружающую среду и затраты на тепловую изоляцию топki.

Циклонный ввод воздуха или смеси воздуха и топлива может производиться в горизонтальном а) или вертикальном б) предтопке 1. Скорость воздуха, подаваемого в предтопок, 50–200 м/с. Продукты сгорания твердого топлива из предтопков поступают в камеры дожигания 2, а из них – в камеры охлаждения 3, для нагрева материалов или технологического оборудования.

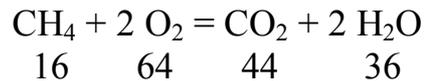


Для улавливания шлака устанавливается устройство 4, шлак удаляется через патрубок 5.

Шахтная топка – слоевая топка для сжигания кускового торфа и дров высокой влажности имеет вертикальную шахту, в которой происходит подсушка и разогрев топлива дымовыми газами перед поступлением его в активную зону горения на колосниковой решетке.

Шахтно-мельничная топка – камерная топка с молотковой мельницей и шахтным сепаратором. Такая топка используется для сжигания фрезерного топлива, бурых углей и сланцев во взвешенном состоянии без применения сложных пылеприготовительных систем и горелочных устройств. Топливо, измельченное в мельнице, установленной в нижней части вертикальной шахты, транспортируется в топочную камеру подсушивающим горячим воздухом.

Рассмотрим определение расхода воздуха для горения топлива, например, метана.



Теоретически необходимый расход кислорода

$$64/16 = 4 \text{ кг/кг метана.}$$

Теоретически необходимый расход воздуха

$$4/0,23 = 17,4 \text{ кг/кг метана,}$$

где 0,23 – массовая доля кислорода в воздухе.

Фактический расход воздуха для горения

$$17,4 \cdot 0,715 \cdot 1,1/1,293 = 10,58 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 13,685 \text{ м}^3/\text{кг},$$

где 0,715 – плотность метана, кг/м<sup>3</sup>;

1,293 – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

1,1 – коэффициент, учитывающий 10%-й избыток воздуха.

Аналогичным образом определяется расход воздуха для горения других видов топлива. Если известен атомарный состав твердого и жидкого топлива, то теоретически необходимый расход воздуха

$$V_g = 0,0889 C + 0,265 H - 0,0333 O, \text{ м}^3/\text{кг},$$

где  $C, H, O$  – массовый состав соответственно углерода, водорода и кислорода, %.

Калориметрическая температура печи

$$T_k = \frac{q_n + i_m + i_g}{V_2 c_2}, \text{ К},$$

где  $q_n$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$i_m, i_g$  – теплосодержание топлива и воздуха, кДж/кг;

$V_2$  – расход дымовых газов, м<sup>3</sup>/кг;

$c_2$  – теплоемкость дымовых газов, кДж/кг·К.

Действительная температура

$$T_d = \frac{q_n + i_m + i_g - q_{пот} - q_{дис}}{V_2 c_2}, \text{ К}$$

где  $q_{пот}$  – потери теплоты в окружающую среду, кДж/кг;

$q_{дис}$  – теплота диссоциации, кДж/кг.

На практике пользуются понятием температура печи  $T_n$

$$T_n = \mu T_k,$$

где  $\mu$  – пирометрический коэффициент. При сжигании газа или мазута изменяется в пределах 0,75–0,85 в зависимости от конструкции печи.