

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Кафедра органической и биологической химии

Р. С. Бегунов
А. Н. Валяева

Химические реакторы в промышленности

Методические указания

Рекомендовано

*Научно-методическим советом университета для студентов,
обучающихся по специальности
Прикладная информатика в химии*

Ярославль 2011

УДК 66
ББК Л 11я73
Б 37

*Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2010/2011 учебного года*

Рецензент
кафедра органической и биологической химии
Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова

Бегунов, Р. С. Химические реакторы в промышленности : методические указания / Р. С. Бегунов, А. Н. Валяева; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль : ЯрГУ, 2011. – 56 с.

В методических указаниях рассмотрены основные типы химических реакторов, используемых в химической промышленности. Приводятся классификация и конструктивные элементы химических реакторов. Подробно представлены аппараты для гомогенных, гетерогенных некаталитических и гетерогенных каталитических процессов.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 080801.65 Прикладная информатика в химии (дисциплина «Основы химической технологии», блок ОПД), очной формы обучения.

УДК 66
ББК Л 11я73

© Ярославский государственный
университет им. П. Г. Демидова, 2011

1. Химический реактор

Химический реактор – устройство, аппарат для проведения химических превращений (химических реакций).

На практике, исходя из назначения или даже внешнего вида, используют много различных названий химических реакторов: реактор, колонна, башня, автоклав, камера, печь, контактный аппарат, полимеризатор, дожигатель, гидрогенизатор, окислитель и другие. Общие схемы некоторых из них приведены на рис. 1.

Реактор 1 – емкостной. Реагенты (чаще жидкость, суспензия) загружают в начале рабочего цикла. Мешалка обеспечивает перемешивание реагентов. Температурный режим поддерживается с помощью теплоносителя, циркулирующего в рубашке или во встроенном теплообменнике. После проведения реакции продукты выгружают, и после очистки реактора цикл повторяется. Процесс периодический.

Реактор 2 – емкостной, проточный. Реагенты (чаще газ, жидкость, суспензия) непрерывно проходят через реактор. Газ барботирует через жидкость.

Реактор 3 – колонный. Характерное для промышленных колонных реакторов отношение высоты к диаметру составляет 4–6 (в емкостных реакторах это отношение около 1). Взаимодействие газа и жидкости подобно таковому в реакторе 2.

Реактор 4 – насадочный. Взаимодействуют газ и жидкость. Объем реактора заполнен кольцами Рашига или другими небольшими элементами – насадкой. Жидкость стекает по насадке. Газ движется между элементами насадки.

Реакторы 5–8 используют в основном для взаимодействия газа с твердым реагентом.

В реакторе 5 твердый реагент неподвижен, газообразный (или жидкий) реагент непрерывно проходит через реактор. Процесс периодический по твердому веществу.

В реакторах 6–8 процесс по твердому реагенту непрерывный. Твердый реагент продвигается вдоль вращающегося наклонно установленного круглого реактора 6 или просыпается через реактор 7 (подобно песочным часам). В реакторе 8 газ подается снизу,

и при достаточно большой скорости подачи газа твердые частицы оказываются во взвешенном состоянии. Это псевдооживленный, или кипящий, слой, который обладает некоторыми свойствами жидкости. Можно организовать непрерывный поток твердого материала через аппарат.

Реакторы 5, 9 используют также для проведения процессов на твердом катализаторе.

Реактор 9 – трубчатый. По виду он подобен кожухотрубному теплообменнику. Через трубки, в которых протекает реакция, проходят газообразные или жидкие реагенты. Обычно в трубки загружен катализатор. Температурный режим обеспечивается циркуляцией в межтрубном пространстве теплоносителя.

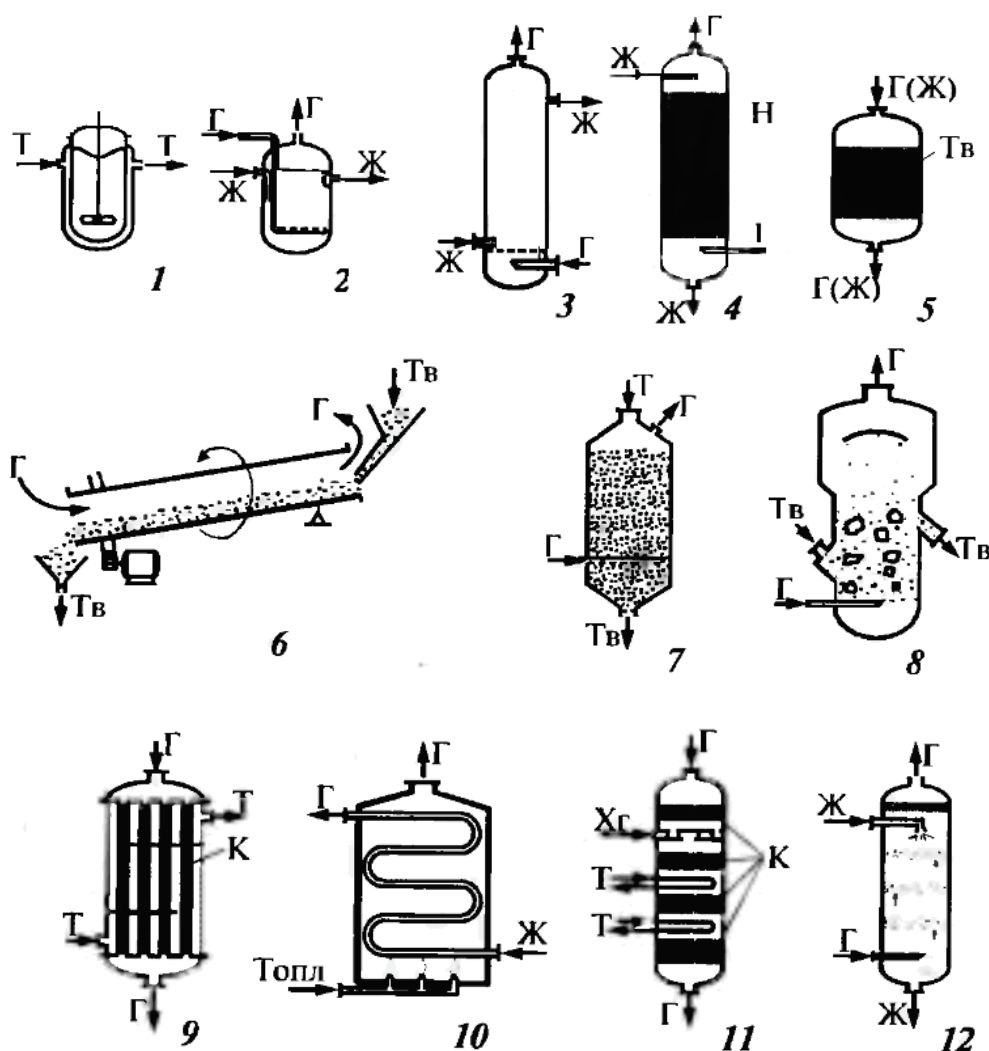


Рис. 1. Схемы химических реакторов: Г – газ; Ж – жидкость; Т – теплоноситель; Н – насадка; Тв – твердый реагент; К – катализатор; Хг – холодный газ

Трубчатый реактор 10 часто используют для проведения высокотемпературных гомогенных реакций, в том числе в вязкой жидкости (например, пиролиз тяжелых углеводородов). Нередко такие реакторы называют печами.

Реактор 11 – многослойный реактор (несколько слоев, например, катализатора) с промежуточным охлаждением (или нагревом) реагирующей смеси. На рисунке показано охлаждение путем ввода холодного газа после первого слоя и нагрев при помощи теплообменников после второго и третьего слоев.

Реактор 12 – многослойный для газожидкостных процессов.

2. Классификация химических реакторов

Наиболее употребимы следующие основания классификации химических реакторов и режимов их работы: 1) режим движения реакционной среды (гидродинамическая обстановка в реакторе); 2) условия теплообмена в реакторе; 3) фазовый состав реакционной смеси; 4) способ организации процесса; 5) характер изменения параметров процесса во времени; 6) конструктивные характеристики.

Классификация реакторов по гидродинамической обстановке. В зависимости от гидродинамической обстановки можно разделить все реакторы на реакторы смешения и вытеснения.

Реакторы смешения – это емкостные аппараты с перемешиванием механической мешалкой или циркуляционным насосом.

Реакторы вытеснения – трубчатые аппараты, имеющие вид удлиненного канала. В трубчатых реакторах перемешивание имеет локальный характер и вызывается неравномерностью распределения скорости потока и ее флуктуациями, а также завихрениями.

В теории химических реакторов обычно сначала рассматривают два идеальных аппарата – реактор идеального, или полного, смешения и реактор идеального, или полного, вытеснения.

Для *идеального смешения* характерно абсолютно полное выравнивание всех свойственных реакции параметров по объему реактора.

Идеальное вытеснение предполагает, что любое количество реагентов и продуктов через реактор перемещается как твердый поршень, и по длине реактора (в пространстве) в соответствии с

особенностями реакции и сопровождающих ее физических явлений устанавливается определенное распределение концентраций участников реакции, температуры и других параметров.

Реальные реакторы в большей или меньшей степени приближаются к модели идеального вытеснения или идеального смешения. Внесение определенных поправок на неидеальность позволяет использовать модели идеальных аппаратов в качестве исходных для описания реальных реакторов.

Классификация по условиям теплообмена. Протекающие в реакторах химические реакции сопровождаются тепловыми эффектами (это тепловые эффекты химических реакций и сопровождающих их физических явлений, таких, например, как процессы растворения, кристаллизации, испарения и т. п.). Вследствие выделения или поглощения теплоты изменяется температура и возникает разность температур между реактором и окружающей средой, а в определенных случаях температурный градиент внутри реактора. Разность температур ΔT является движущей силой теплообмена.

При отсутствии теплообмена с окружающей средой химический реактор является *адиабатическим*. В нем вся теплота, выделяемая или поглощаемая в результате химических процессов, расходуется на «внутренний» теплообмен – на нагрев или охлаждение реакционной смеси.

Реактор называется *изотермическим*, если за счет теплообмена с окружающей средой в нем обеспечивается постоянство температуры. В этом случае в любой точке реактора за счет теплообмена полностью компенсируется выделение или поглощение теплоты.

В реакторах с *промежуточным тепловым режимом* тепловой эффект химической реакции частично компенсируется за счет теплообмена с окружающей средой, а частично вызывает изменение температуры реакционной смеси.

Особо следует выделить *автотермические* реакторы, в которых поддержание необходимой температуры процесса осуществляется только за счет теплоты химического процесса без использования внешних источников энергии. Обычно стремятся

к тому, чтобы химические реакторы, особенно применяемые в крупнотоннажных производствах, были автотермическими.

Классификация по фазовому составу реакционной смеси. Реакторы для проведения гомогенных процессов подразделяют на аппараты для газофазных и жидкофазных реакций. Аппараты для проведения гетерогенных процессов, в свою очередь, подразделяют на газожидкостные реакторы, реакторы для процессов в системах «газ – твердое вещество», «жидкость – твердое вещество» и др. Особо следует выделить реакторы для проведения гетерогенно-каталитических процессов.

Классификация по способу организации процесса. По способу организации процесса (способу подвода реагентов и отвода продуктов) реакторы подразделяют на периодические, непрерывно действующие и полунепрерывные (полупериодические).

В реакторе *периодического действия* все отдельные стадии протекают последовательно, в разное время. Все реагенты вводят в аппарат до начала реакции, а смесь продуктов отводят после окончания процесса. Продолжительность реакции можно измерить непосредственно, так как время реакции и время пребывания реагентов в реакционном объеме одинаковы. Параметры технологического процесса в периодически действующем реакторе изменяются во времени.

Между отдельными реакционными циклами в периодическом реакторе необходимо осуществить вспомогательные операции – загрузку реагентов и выгрузку продуктов. Поскольку во время этих вспомогательных операций не может быть получено дополнительное количество продукта, их наличие обуславливает снижение производительности периодического реактора.

В реакторе *непрерывного действия (проточном)* все отдельные стадии процесса химического превращения вещества (подача реагирующих веществ, химическая реакция, вывод готового продукта) осуществляются параллельно, одновременно и, следовательно, непроизводительные затраты времени на операции загрузки и выгрузки отсутствуют. Поэтому на современных крупнотоннажных химических производствах, где требуется высокая производительность реакционного оборудования, большинство химических реакций осуществляют в непрерывно действующих реакторах.

Время пребывания отдельных частиц потока в непрерывно действующем реакторе, в общем случае, – случайная величина. Так как от времени, в течение которого происходит реакция, зависит глубина химического превращения, то она будет разной для частиц с разным временем пребывания в реакторе. Средняя глубина превращения определяется видом функции распределения времени пребывания отдельных частиц, зависящим, в свою очередь, от характера перемешивания, структуры потоков в аппарате и для каждого гидродинамического типа реактора индивидуальным.

Реактор *полунепрерывного (полупериодического) действия* характеризуется тем, что один из реагентов поступает в него непрерывно, а другой – периодически. Возможны варианты, когда реагенты поступают в реактор периодически, а продукты реакции выводятся непрерывно или наоборот.

Классификация по характеру изменения параметров процесса во времени. В зависимости от характера изменения параметров процесса во времени одни и те же реакторы могут работать в стационарном и нестационарном режимах.

Рассмотрим некоторую произвольную точку, находящуюся внутри химического реактора. Режим работы реактора называют *стационарным*, если протекание химической реакции в произвольно выбранной точке характеризуется одинаковыми значениями концентраций реагентов или продуктов, температуры, скорости и других параметров процесса в любой момент времени. В стационарном режиме параметры потока на выходе из реактора не зависят от времени. Обычно это постоянство выходных параметров обеспечивается постоянством во времени параметров на входе в реактор.

Если в произвольно выбранной точке происходят изменения параметров химического процесса во времени по тому или иному закону, режим работы реактора называют *нестационарным*. Нестационарный режим является более общим. Стационарный режим возможен для непрерывно действующих проточных реакторов. Но даже эти реакторы работают в нестационарном режиме в моменты их пуска и остановки. Нестационарными являются все периодические процессы.

Нестационарные реакторы характеризуются положительным или отрицательным накоплением вещества или энергии в

реакторе. Например, для периодического реактора характерно положительное накопление продуктов реакции и отрицательное накопление (убыль) исходных реагентов. При протекании в таком реакторе экзотермической реакции в отсутствие теплообмена с окружающей средой будет иметь место накопление теплоты (энергии), которое приведет к росту температуры.

Стационарные проточные реакторы проще для моделирования (описываются более простыми уравнениями); протекающие в них процессы легче автоматизировать.

Нестационарность процесса в реакторе, естественно, вносит определенные осложнения и в описание реактора, и в управление его работой, однако во многих случаях нестационарные режимы технологических процессов, протекающих в химических реакторах, легче приблизить к оптимальным.

Классификация по конструктивным характеристикам. Химические реакторы отличаются друг от друга и по ряду конструктивных характеристик, оказывающих влияние на расчет и изготовление аппаратов. По этому принципу классификации можно выделить такие типы реакторов: емкостные реакторы (автоклавы; реакторы-камеры; вертикальные и горизонтальные цилиндрические конверторы и т. п.); колонные реакторы (реакторы-колонны насадочного и тарельчатого типа; каталитические реакторы с неподвижным, движущимся и псевдоожиженным слоем катализатора; полочные реакторы); реакторы типа теплообменника; реакторы типа реакционной печи (шахтные, полочные, камерные, вращающиеся печи и т. п.).

3. Конструктивные элементы химических реакторов

Выделим структурные элементы, характерные для всех реакторов. В реактор засыпано несколько слоев катализатора, где протекает химическая реакция. Это *реакционная зона 1*, имеющаяся во всех реакторах. Исходная реакционная смесь подается через верхний штуцер. Чтобы обеспечить однородное прохождение газа через реакционную зону, установлен распределитель потока. Это *устройство ввода 2*. В реакторе 2 на рис. 2 распре-

делителем газа является барботер. К смесителям предъявляются особые требования обеспечить однородный контакт реагентов. Между первым (сверху) и вторым слоями в смесителе 3 смешиваются два потока – после первого слоя и добавляемый холодный газ, а после второго слоя помещен теплообменник 4. Продукты выводятся через выходное устройство 5. Возможны устройства разделения потоков.

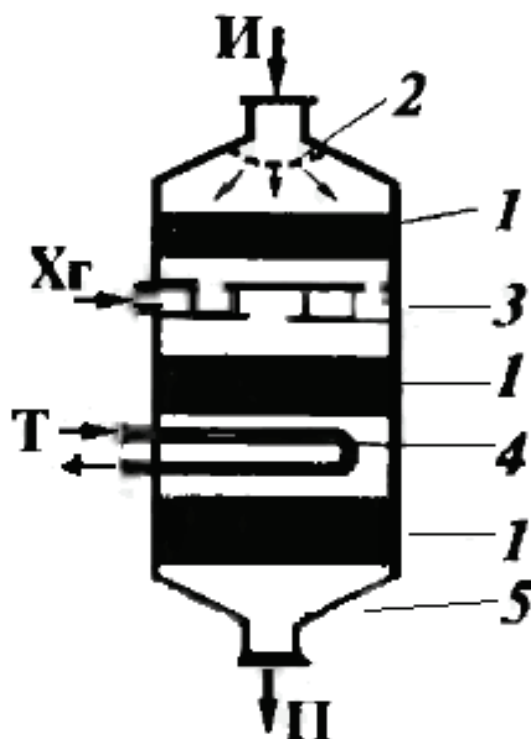


Рис. 2. Структурные элементы реактора: 1 – реакционная зона; 2 – устройство ввода реакционной смеси; 3 – смеситель; 4 – теплообменник; 5 – выходное устройство; Хг – холодный газ; Т – теплоноситель; И и П – исходный и конечный продукты соответственно

Неоднородности распределения потока по сечению реактора. Входной поток не распределяется равномерно по сечению, и части объема реакционной зоны работают не в одинаковых условиях. Избежать этого можно установкой специальных распределителей, некоторые из которых показаны на рис. 3.

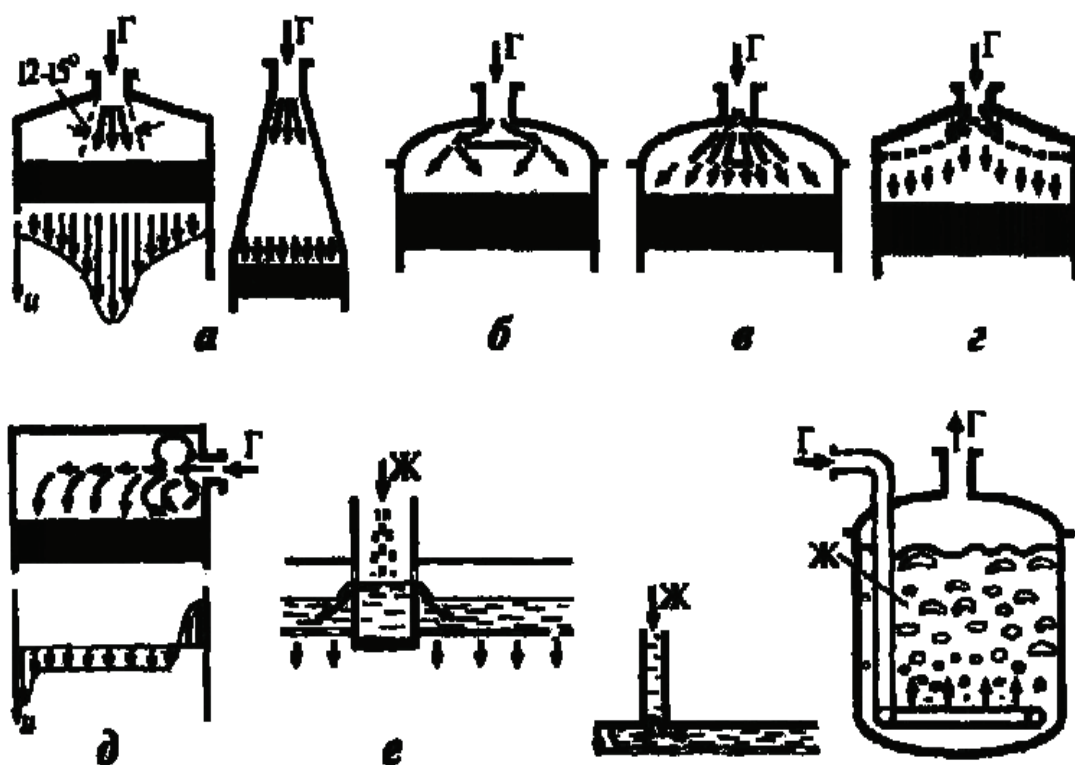


Рис. 3. Распределители потоков в химических реакторах

Известно, что выходящая из трубы струя расширяется с углом раскрытия 12° . Чтобы обеспечить равномерное распределение вещества по сечению реактора, необходимо иметь очень длинный конусообразный переход от входного патрубка (рис. 3 а). Его длину можно рассчитать, учитывая, что отношение диаметров аппарата и входного патрубка равно пяти и более. Поэтому устанавливают или «отбойную» пластину (рис. 3 б), разбивающую входной поток, или систему конусов (рис. 3 в), распределяющих поток по сечению, или профилированную сетку (рис. 3 г), по которой поток плавно растекается по сечению аппарата. Даже боковой ввод (рис. 3 д) не гарантирует равномерного распределения. В месте резкого изменения геометрии пространства, в котором движется поток (боковой ввод в стенке аппарата), происходит отрыв потока от стенки. Общая энергия потока состоит из кинетической энергии струи и статического давления ее. Поскольку скорость и, соответственно, кинетическая энергия струи большие, статическое давление ее мало. Преобладают силы давления со стороны окружающей

среды, и возникает течение в сторону струи. И если вдали от входного патрубка, где струя «успокаивается», движение потока будет направлено к выходу из аппарата, у входного патрубка скорость потока может быть направлена даже в обратную сторону (профиль скоростей по сечению аппарата показан в нижней части рис. 3 д). Необходимы устройства, смягчающие отрицательное влияние отрывных течений. Например, надо исключить порог у входного патрубка.

Для распределения жидкости применяют также равномерную ее раздачу по системе лотков со строгим поддержанием уровня жидкости в них (рис. 3 в, е) или по системе труб с переменным (увеличивающимся) размером отверстий (рис. 3 ж). Последнее связано с уменьшением энергии потока по мере вытекания его части. То же приходится делать при распределении газа через боковую поверхность труб, например при барботаже (рис. 3 з).

Смешение потоков, казалось бы, более простая задача. Но два потока, направленные в одну трубу, перемешаются при турбулентном течении на расстоянии 12, а то и 20 калибров (диаметров) трубы. Это, во-первых, связано с большими затратами. Представьте себе, что между слоями катализатора реактора окисления SO_2 реакционная смесь охлаждается вводом холодного газа. Диаметр реактора 12 м. Можно оценить, что для смешения потоков потребуется расстояние более 150 м. Во-вторых, смешиваемые вещества могут образовывать взрывоопасную смесь (аммиак с воздухом в производстве азотной кислоты, углеводороды с воздухом во многих процессах органического синтеза). В каких-то частях потока до полного перемешивания могут локально образовываться взрывоопасные концентрации, что, естественно, недопустимо. В-третьих, до полного смешения потоков локально могут создаваться условия для нежелательных реакций. Например, при смешении горячего пара с углеводородами в процессах их дегидрирования локальные перегревы, пока вещества не перемешаются и температура потока не выравнивается, приведут к крекингу углеводородов.

Ускорить смешение потоков (примеры приведены на рис. 4) возможно профилированием газохода в месте ввода потока (труба Вентури – рис. 4 а), инъекцией одного скоростного потока в

другой (рис. 4 б), установкой специальных устройств для энергичного, например в вихревом потоке, перемешивания (рис. 4 в, г), подачей встречных потоков (рис. 4 д). Хорошие результаты дают так называемые статические смесители (рис. 4 е). В последнем примере в трубе установлены в ряд винтообразные вставки.

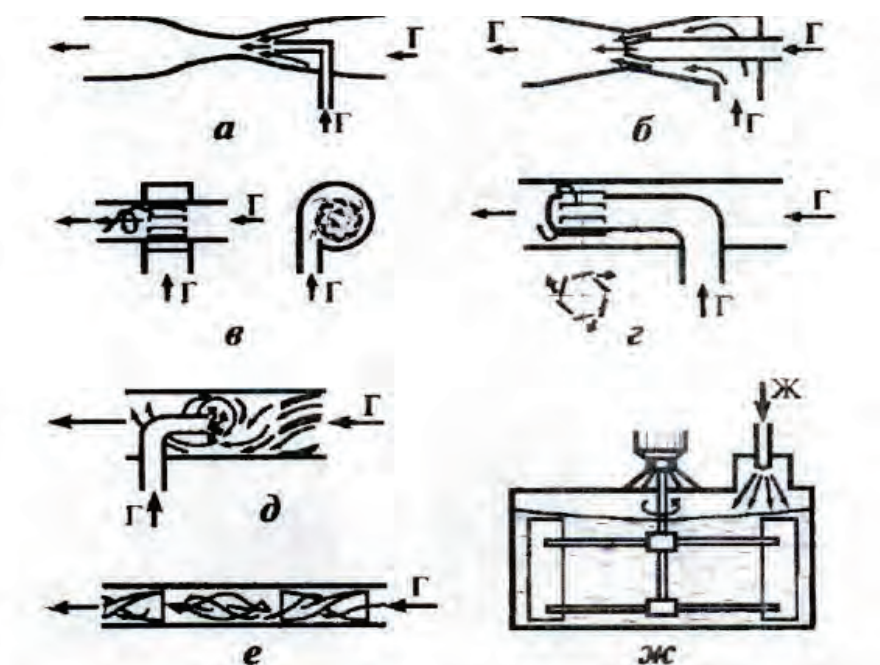


Рис. 4. Смесители потоков в химических реакторах

Каждая из них закручивает поток в разные стороны поочередно. Даже несмешивающиеся фазы в таком устройстве не расслаиваются. Подача реакционной смеси в реактор с мешалкой не гарантирует отсутствия локальных концентрационных неоднородностей. Разбрызгивание жидкости через форсунку (рис. 4 ж) создает распределенный многоточечный ввод реагента и интенсивное его перемешивание с основной массой в аппарате.

4. Реакторы для гомогенных процессов

Гомогенные процессы, т. е. процессы, протекающие в однородной среде (жидкие или газообразные смеси, не имеющие поверхностей раздела, отделяющих части систем друг от друга), сравнительно редко встречаются в промышленности.

Устройство реакторов для проведения гомогенных процессов проще, чем устройство реакторов для гетерогенных процессов,

ввиду легкости перемешивания. Все реальные аппараты занимают промежуточное положение между аппаратами идеального вытеснения и полного смешения. Движущая сила процесса в реальных реакторах меньше, чем в реакторах идеального вытеснения. Следовательно, в реакторах для гомогенных процессов перемешивание необходимо усиливать только до перехода процесса из диффузионной области в кинетическую, дальнейшее же усиление перемешивания снижает скорость процесса. В некоторых случаях бывает необходимо усиление перемешивания и в кинетической области, например для устранения местных перегревов реакционной смеси, для усиления теплопередачи между реакционной смесью и теплообменными поверхностями и т. п. Конструкции реакторов зависят от характера среды (газ, жидкость), параметров процесса и свойств соединений, участвующих в реакциях.

Для газовых гомогенных процессов применяются в основном камерные и трубчатые реакторы. Для смешения газа применяются сравнительно простые устройства: сопло, эжектор, центробежный лабиринтный, каскадный смеситель и др. Наиболее типичные и широко применяемые аппараты для процессов в газовой фазе:

1. Камерные реакторы с эжекторными смесителями газов и паров. Например, печь для синтеза хлороводорода (рис. 5); форсуночная печь для сжигания серы, печь для термоокислительного крекинга метана.

2. Камерный реактор с центробежным перемешиванием газовой смеси (рис. 6) по режиму работы близок к полному смешению и изотермическому типу.

3. Трубчатый реактор с теплообменом между двумя газами работает по режиму вытеснения (рис. 7). Этот реактор поли-термичен.

4. Реакторы типа «труба в трубе» с водяным или другим жидкостным охлаждением или нагревом (рис. 8) работают по принципу идеального вытеснения. Реакторы типа «труба в трубе» политермичны и обычно используются для реакций, протекающих с большим тепловым эффектом. Количество труб, расположенных друг над другом и соединенных коленами, может достигать 15 и более; они составляют секцию. В реакторах

большой мощности устанавливаются десятки секций, работающих параллельно и объединенных коллекторами.

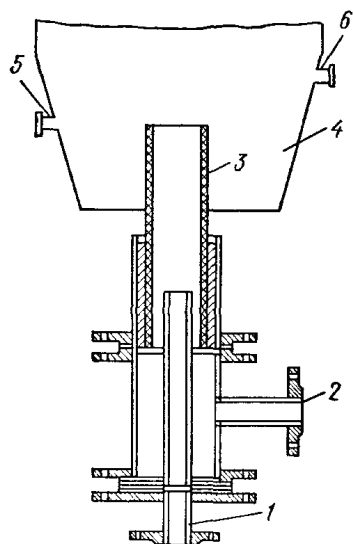


Рис. 5. Схема горелки печи для синтеза хлороводорода: 1 – трубка для синтеза хлора; 2 – трубка для ввода водорода; 3 – динасовый наконечник горелки; 5 – запальный люк; 6 – смотровой штуцер с кварцевым стеклом

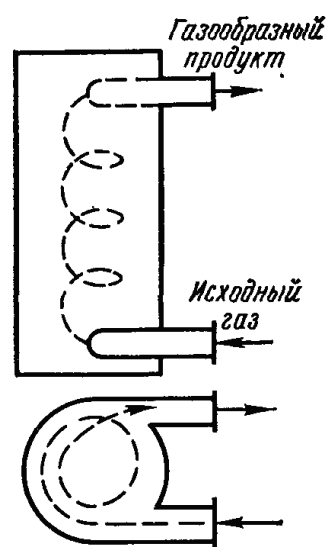


Рис 6. Камерный реактор с центробежным перемешиванием газовой смеси

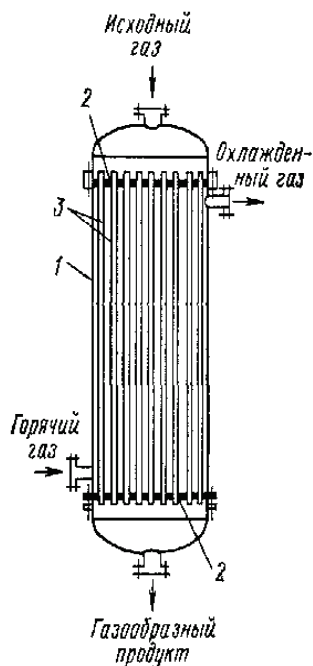


Рис. 7. Кожухотрубный реактор с теплообменом: 1 – кожух с двумя днищами; 2 – трубная решетка; 3 – трубки

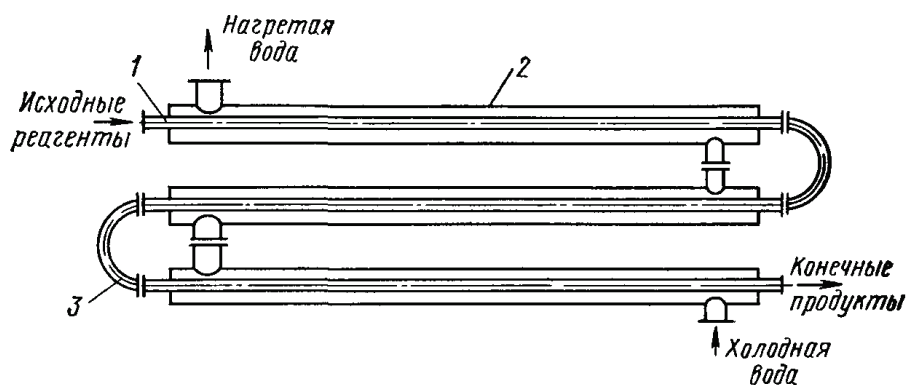


Рис. 8. Схема трубчатого реактора типа «труба в трубе»: 1 – внутренняя труба; 2 – внешняя труба (рубашка); 3 – колено

Для жидкостных гомогенных процессов применяются реакторы с различными перемешивающими устройствами механического и пневматического типа. Для повышения КПД (выхода продукта) используют прямоточные аппараты большой длины, батареи из нескольких реакторов, а также многосекционные аппараты, в которых степень превращения возрастает с увеличением числа секций. Реакционные аппараты снабжены теплообменниками (рубашки, змеевики) для подвода или отвода теплоты.

Широко применяются реакторы с различными видами механических мешалок и другими типами перемешивающих устройств, обеспечивающих режим, близкий к полному смешению.

В качестве примеров следует указать реакторы смешения с пропеллерной мешалкой (рис. 9), пневматическим перемешиванием (рис. 10), со струйно-эжекторным смешением (рис. 11).

В установке со струйно-эжекторным смешением теплообменник может служить холодильником или подогревателем. Вследствие перемешивания эти реакторы изотермичны. Для повышения КПД используется каскад реакторов с мешалками или секционированные реакторы с мешалками или без мешалок.

Колонные реакторы обычно представляют собой высокие цилиндры, в которых могут быть установлены теплообменные элементы. Полые колонны работают по принципу идеального вытеснения. Для перемешивания реакционной смеси и выравнивания температуры часто применяют насадку, нередко колонны секционируют перфорированными решетками или разделяют перегородками (рис. 12).

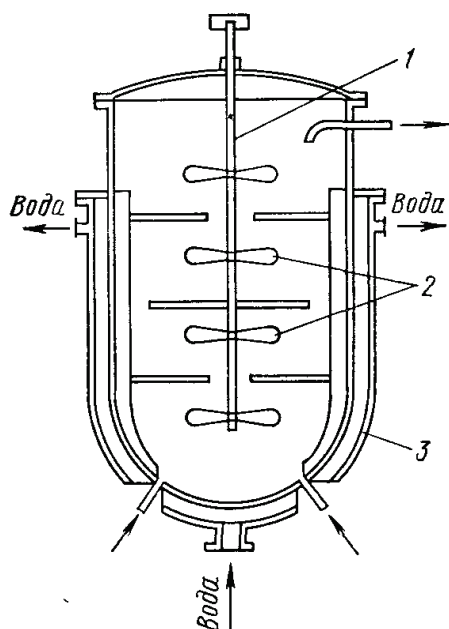


Рис. 9. Реактор с пропеллерной мешалкой: 1 – вал; 2 – мешалка; 3 – водяная рубашка

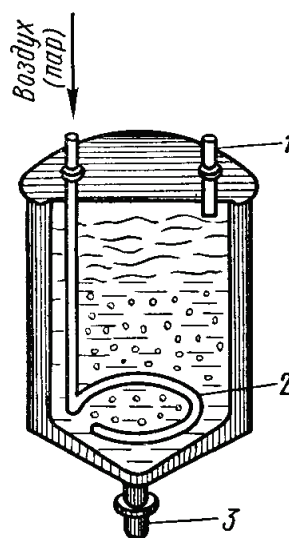


Рис. 10. Реактор с пневматическим перемешиванием: 1 – выход воздуха и загрузка жидкости; 2 – барботер; 3 – выход продукта

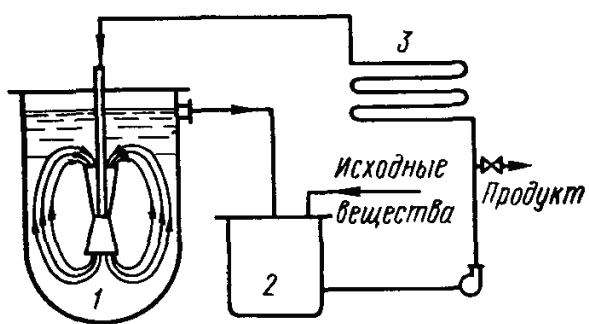


Рис. 11. Установка со струйно-циркуляционным смешением: 1 – реактор струйно-эжекторного смешения; 2 – приемник; 3 – теплообменник

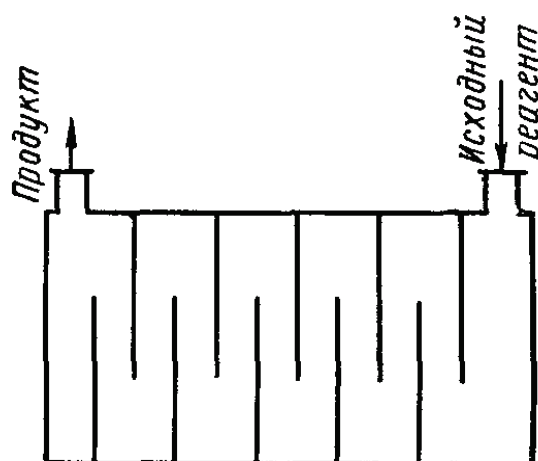


Рис. 12. Реактор с перегородками

Непрерывно действующие реакторы проточного типа работают по принципу идеального вытеснения подобно реакторам для гомогенногазовых процессов (см. рис. 8). Так, непрерывно действующий проточный реактор для гидролиза дихлорэтана имеет длину труб около 1 км. Только при такой длине обеспечивается необходимое взаимодействие реакционной смеси и должная теплоотдача.

Для работы под давлением применяют автоклавы периодического действия (рис. 13).

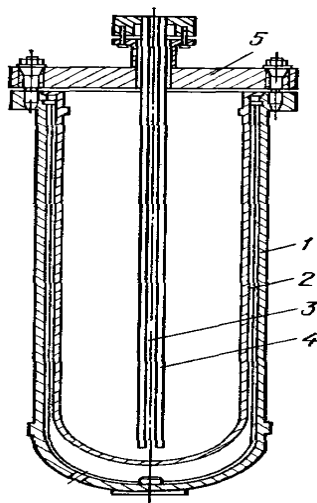


Рис. 13. Автоклав периодического действия: 1 – корпус; 2 – реакционный сосуд; 3, 4 – трубы; 5 – крышка

5. Реакторы для гетерогенных некаталитических процессов

Гетерогенные химико-технологические процессы основаны на реакциях между реагентами, находящимися в разных фазах. Большинство промышленных химико-технологических процессов относится к гетерогенным. Огромное разнообразие гетерогенных процессов затрудняет их классификацию. В соответствии с принятой классификацией некаталитические гетерогенные процессы делят по фазовому состоянию реагентов на процессы в системах Г – Ж, Ж – Т, Г – Т и т. п.

5.1. Системы «газ – жидкость» (Г – Ж)

Процессы, основанные на взаимодействии газообразных и жидких реагентов, широко используются в химической и смежных с ней отраслях промышленности. К таким процессам относятся абсорбция и десорбция газов, испарение жидкостей, перегонка жидких смесей (дистилляция и ректификация), пиролиз жидкостей с испарением продуктов пиролиза, ассоциация газовых молекул с образованием жидкостей, полимеризация в газовой фазе с образованием жидких полимеров и т. п.

В химических гетерогенных процессах Г – Ж реакции протекают в основном в жидкой фазе, причем реакции предшествует доставка газообразного реагента диффузией его в газе и растворением в жидкости. Для системы Г – Ж наиболее характерны абсорбционные и десорбционные процессы.

Абсорбцией называется поглощение газа (или компонента газовой смеси) жидкостью с образованием раствора. Если абсорбция сопровождается химическими реакциями в жидкой фазе, то такие процессы называются хемосорбционными.

Десорбция – процесс, обратный абсорбции, заключается в выделении из жидкости растворенного в ней газа. В технике десорбция иногда называется отгонкой. При десорбции (отгонке) переход компонентов из раствора в газ происходит или вследствие нагревания жидкости, или в потоке инертного газа или водяного пара.

Реакторы для проведения гетерогенных процессов в системе Г – Ж не имеют характерных особенностей и служат типовой аппаратурой, в которой на химических заводах осуществляют также физические массообменные процессы и операции – физическую абсорбцию и десорбцию, испарение, дистилляцию и ректификацию, промывку газов, теплообмен. В таких же реакторах осуществляют и хемосорбционные процессы (например, в производстве соды, минеральных кислот, ряда органических веществ).

Конструктивное оформление реакторов Г – Ж определяется принятым методом развития поверхности контакта газовой и жидкой фаз, т. е. приемом увеличения поверхности жидкой фазы.

В пленочных реакторах с насадкой (колоннах с насадкой) (рис. 14) жидкость распределяется по поверхности насадочных

тел тонкой пленкой и стекает вниз противотоком взаимодействующему с ней газу. Иногда применяется прямоток.

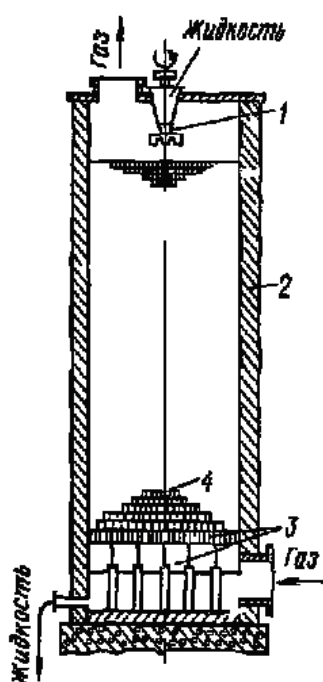


Рис 14. Башня с насадкой:
1 – разбрызгиватель жидкости;
2 – корпус; 3 – колосниковая
решетка; 4 – насадка (кольца)

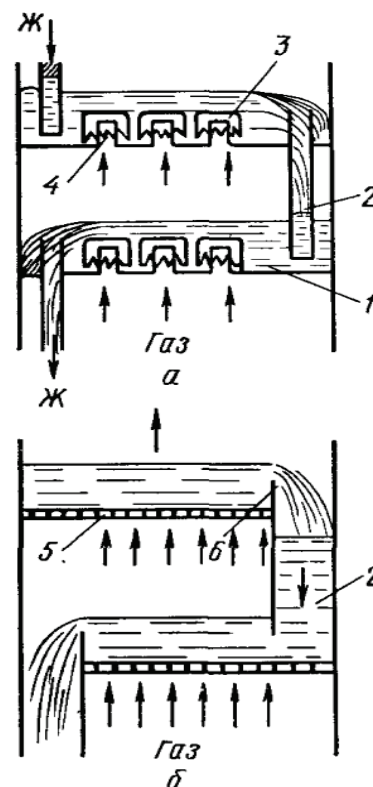


Рис. 15. Схема устройства
барботажного реактора с колпачковыми
тарелками и внутренними переливами
(а) и с ситчатыми тарелками (б):
1 – колпачковая тарелка;
2 – переливная труба; 3 – колпачок;
4 – патрубок для газа; 5 – ситчатая
тарелка (решетка); 6 – сливной порог

Реактор состоит из колонны, колосниковой решетки, поддерживающей насадку, насадки и оросительного устройства. Нормальная работа реактора зависит от выбора насадки. Необходимо, чтобы она обладала большой удельной поверхностью, большим свободным объемом, была легкой, механически прочной и дешевой. Кроме того, насадка должна оказывать минимальное сопротивление потоку газа и хорошо смачиваться жидкостью. Применяются насадки различной формы: кольца из стали или керамики с равными размерами высоты и внешнего диа-

метра. Для интенсификации работы реактора увеличивают скорости потоков газа и жидкости и применяют специальные типы насадок (спиральные, седлообразные, плоскопараллельные), обладающие большим свободным объемом и малым гидравлическим сопротивлением и позволяющие применять более интенсивные режимы. Насадочные колонны – наиболее распространенные реакторы для абсорбционно-десорбционных процессов, их широко применяют в производстве серной кислоты, азотной кислоты, при переработке коксового газа, в ряде процессов органического синтеза и т. п.

Барботажный реактор (рис. 15) может иметь от одной до нескольких десятков колпачковых или ситчатых тарелок в зависимости от характера процесса Г – Ж, от заданного КПД реактора и требуемой селективности. На каждой тарелке происходит диспергирование газа в объеме жидкости путем барботажа, т. е. пропускания пузырьков газа через слой жидкости, протекающей по тарелке. На каждой тарелке фазы взаимодействуют по принципу перекрестного тока, но по высоте колонны соблюдается принцип противотока. Барботажные реакторы тоже широко применяются в химической технологии – при концентрировании кислот, в производстве соды, при переработке нефти, для процессов дистилляции и ректификации, в технологии органических веществ. Эти реакторы конструктивно более сложны, чем колонны с насадкой, их эксплуатация связана с большими затратами, но они обеспечивают более высокие расходы жидкости и газа, работают более интенсивно, обеспечивают возможность тонкого разделения смесей.

Полая башня с разбрызгиванием жидкости представлена на рис. 16. В реакторах такого типа (а также в полых камерах с разбрызгиванием жидкости) развитие поверхности жидкой фазы происходит ее диспергированием, т. е. разбрызгиванием, распылением пневматическим или механическим путем в объеме при потоке газа. Полый колонный реактор с разбрызгиванием жидкости применяется, например, в производстве серной кислоты для очистки газов от пыли и газообразных примесей.

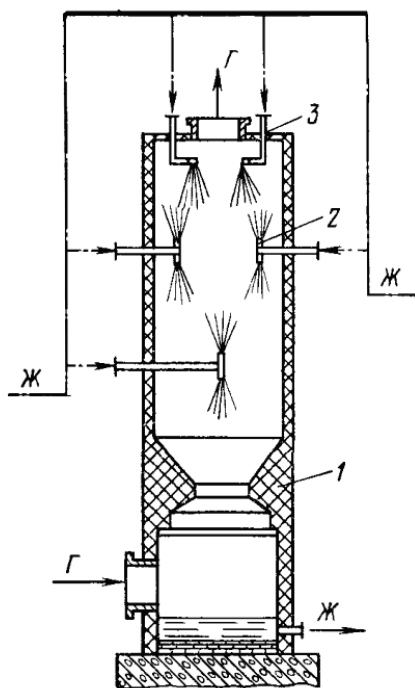


Рис. 16. Полная башня с разбрызгиванием жидкости:
1 – корпус; 2 – двойной распылитель жидкости; 3 – одинарный распылитель жидкости

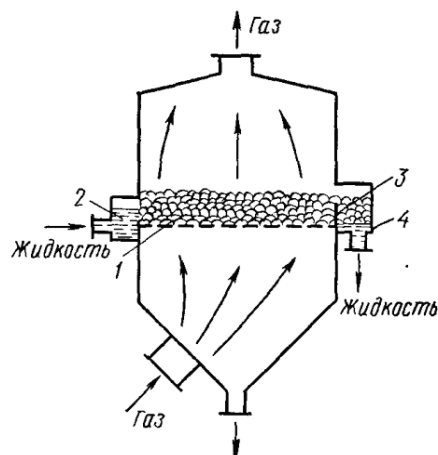


Рис. 17. Пенный аппарат:
1 – решетка; 2 – приемная коробка; 3 – сливной порог; 4 – коробка для разрушения пены

Устройство пенного реактора показано на рис. 17. В этом реакторе газ проходит снизу вверх через решетку и находящийся на ней слой жидкости с такой скоростью, при которой силы трения газа о жидкость уравнивают вес последней. В результате образуется взвешенный слой подвижной пены в виде быстро движущихся пленок, капель и струй жидкости, тесно перемешанной с пузырьками и струями газа. Скорость газа в сечении реактора может составлять от 0,7 до 3,5 м/с. При более высокой скорости газа взвешенный слой пены разрушается и уносится с газом в виде потока взвеси капель. При сильном же уменьшении расхода газа происходит барботаж и полное протекание жидкости через отверстия решетки. Однополочные пенные аппараты эффективно применяются для очистки отходящих газов от пыли и вредных газообразных примесей.

Для абсорбционно-десорбционных процессов применяются главным образом многополочные пенные реакторы с переливными трубами или без переливных устройств; в последнем

случае вся поступающая жидкость постепенно протекает через отверстие решетки с верхней полки на следующую нижнюю навстречу газу, образуя при взаимодействии с ним на каждой полке слой пены. Число полок определяется заданными КПД и селективностью процесса.

Трубчатые реакторы (типа «труба в трубе», см. рис. 8) для гетерогенных систем Г – Ж служат главным образом для высокотемпературных процессов пиролиза в органической технологии; они применяются также для абсорбционно-десорбционных процессов, например для абсорбции хлороводорода в производстве соляной кислоты.

5.2. Системы «газ – твердое» (Г – Т)

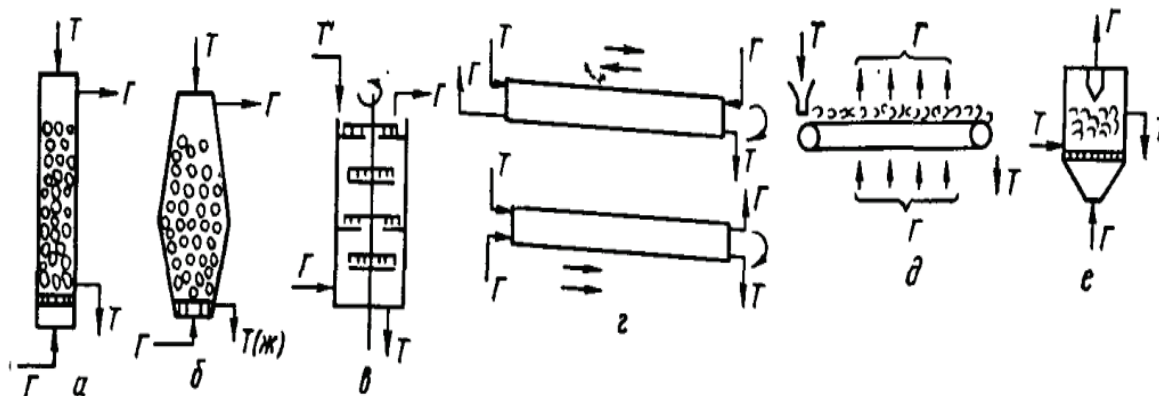
Наиболее типичными технологическими процессами с участием газообразных и твердых реагентов (Г – Т) являются адсорбция газов твердыми адсорбентами и десорбция адсорбированных газов, реакции компонентов газовой фазы на твердых катализаторах, возгонка и конденсация паров твердых веществ, пиролиз твердого топлива, различные виды обжига твердых материалов и т. п. Наиболее характерны для системы Г – Т обжиг твердых веществ, а также адсорбционные процессы.

Обжигом называют многие высокотемпературные химико-технологические процессы с участием твердых и газообразных реагентов. При обжиге твердых материалов могут происходить разнообразные процессы, в том числе возгонка, пиролиз, диссоциация, кальцинация в сочетании с химическими реакциями.

Адсорбция – поглощение газов, паров или растворенных веществ из растворов твердыми или жидкими телами (сорбентами). Адсорбция тесно связана с поверхностными явлениями: удельной поверхностью адсорбента, поверхностным натяжением на границе адсорбент – газ (или адсорбент – жидкость), ориентацией молекул в поверхностном адсорбированном слое газа или жидкости и т. п. Различают физическую адсорбцию, при которой не происходит химического взаимодействия, и хемосорбцию, сопровождающуюся образованием поверхностных химических соединений адсорбента с адсорбатом.

Большинство некаталитических процессов в системе Г – Т основано на химических реакциях и протекает при высоких температурах. Химические реакторы для осуществления такого рода процессов имеют общие характерные особенности и называются печами.

На рис. 18 приведены схемы некоторых типичных реакторов в системе Г – Т.



Промышленная печь – это аппарат, в котором вырабатывается теплота, используемая для тепловой обработки твердых материалов в самой печи. Теплота в ней выделяется за счет горения топлива, или протекания экзотермических реакций, или же за счет превращения электрической энергии в тепловую. Особенностью промышленных печей является совмещение в одном агрегате реакционного аппарата (осуществление определенного производственного процесса) и энергетического устройства (выделение и использование теплоты).

По *источнику тепловой энергии* различают:

1. Топливные печи, использующие твердое, пылевидное, жидкое и газообразное топливо.
2. Электрические печи, в которых источником теплоты является электрическая энергия.
3. Печи, в которых необходимая температура достигается за счет теплоты происходящей реакции (печи обжига колчедана и других сернистых руд, доменные печи, конверторы для выплавки металлов и т. п.).

По *способу нагрева* различают:

1. Печи прямого нагрева, подразделяемые на следующие группы:

а) печи, в которых источник тепловой энергии находится в непосредственном соприкосновении с нагреваемым материалом (например, цементные печи, печи кальцинации в производстве глинозема, электродуговые печи прямого нагрева);

б) печи, в которых тепловая энергия выделяется в нагреваемом материале (например, при обжиге шихты с топливом в шахтных печах, при обжиге колчедана, термоокислительном пиролизе метана);

в) печи, в которых теплота от источника тепловой энергии передается к нагреваемому материалу посредством нагретого воздуха или топочных газов;

г) печи, в которых значительная часть тепловой энергии передается излучением раскаленных твердых тел (туннельные печи, отражательные печи).

2. Печи косвенного нагрева, в которых теплота от источника тепловой энергии передается нагреваемому материалу через стенки (например, печи полукоксования и коксования с внешним обогревом, ретортные, тигельные и муфельные печи, трубчатые печи).

По *технологическому назначению* различают печи:

1. Печи для удаления влаги из твердых материалов, которые называются сушилами.

2. Нагревательные печи для нагрева материалов без изменения их агрегатного состояния (термическая обработка металлов, отжиг стекла).

3. Плавильные печи для расплавления обрабатываемого материала (электропечи, вагранки).

4. Обжиговые печи для обжига минерального сырья и изделий из него (обжиг колчедана, известняка, керамики).

5. Печи пиролиза для термической обработки топлива без доступа воздуха и т. п.

В химической технологии рассматриваются печи, предназначенные для осуществления химико-технологических процессов. С этой точки зрения наиболее удобно относить печи к тому или иному типу по принципу устройства и работы.

Рассмотрим некоторые из этих печей более подробно.

Доменные печи имеют полезный объем до 5000 м^3 и состоят из следующих основных частей: засыпной аппарат, колошник, шахта, распар, заплечики, горн, фурмы и лещадь (рис. 19).

При помощи засыпного аппарата в колошник каждые 5–10 мин загружают шихту. Из колошника непрерывно отводят выделяющиеся доменные газы. Исходные материалы, двигаясь вниз по шахте, имеющей вид усеченного конуса, подогреваются, после чего происходят процессы восстановления оксидов железа оксидом углерода, который образуется в домне при взаимодействии кислорода (воздуха) с коксом. В горн через фурмы вдувают горячий воздух для горения топлива, в результате этого в районе фурм (верхняя часть горна) температура достигает $1600\text{--}1800^\circ\text{C}$ и более. Для интенсификации процесса на ряде заводов в дутье добавляют кислород и природный газ. Восстановленное в области распара (900°C) и заплечиков (свыше 1000°C) металлическое железо, проходя зону высоких температур, плавится, насыщается углеродом и стекает в горн в виде чугуна. Жидкий чугун и шлак периодически выпускаются через чугунную и шлаковую летки (узкие каналы, заделанные огнеупорной массой или металлической пробкой). Заделку и пробивание чугунной летки выполняют пневматические или электрические машины с дистанционным управлением. Стальной кожух доменной печи внутри футеруется огнеупорным шамотным кирпичом. Кроме того, для уменьшения выгорания футеровка охлаждается специальными холодильниками, которые расположены внутри нее.

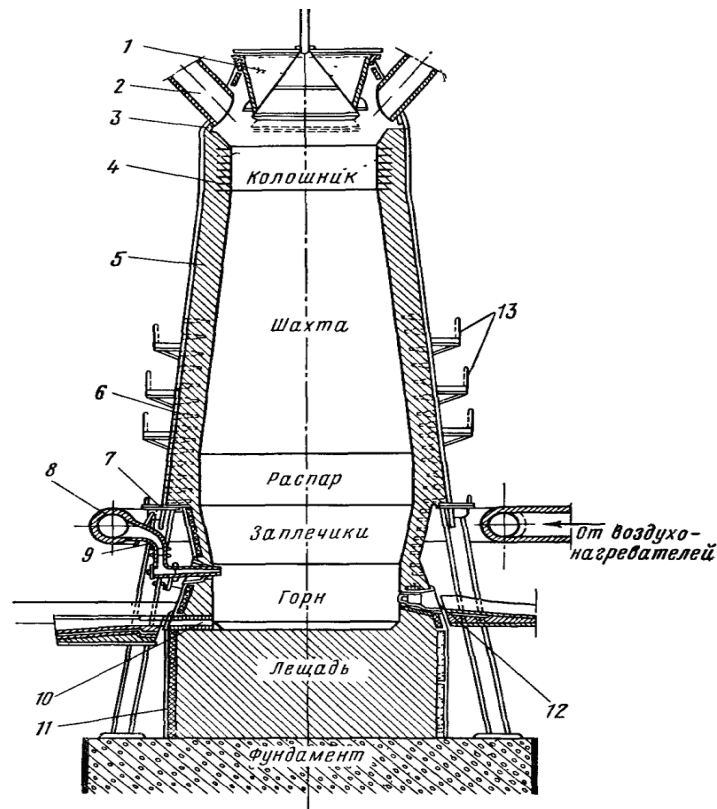


Рис. 19. Доменная печь: 1 – засыпной аппарат; 2 – газоотводы; 3 – стальной кожух; 4, 5 – футеровка; 6 – холодильник; 7 – опорное кольцо; 8 – кольцевой воздухопровод; 9 – фурменный рукав; 10 – летка для чугуна; 11 – кожух лещади; 12 – летка для шлака; 13 – кольцевая площадка

Печь кипящего (взвешенного) слоя (КС) схематично представлена на рис. 20. Частицы тонкоизмельченного обжигаемого материала (например, колчедана размером 0,01–0,5 мм в поперечнике) подаются непрерывно на решетку, под которую поступает воздух со скоростью, обеспечивающей переход частиц во взвешенное состояние, но недостаточное для уноса материала из печи. Находясь в непрерывном пульсационном движении, частицы одновременно двигаются (текут) по решетке печи, и при этом происходит интенсивный обжиг.

Недостатком печей КС является высокая запыленность печного газа (до 200 г/м³). Печи КС широко применяют в промышленности для обжига колчедана, сжигания и газификации твердого топлива, обжига известняка, термообработки различных материалов.

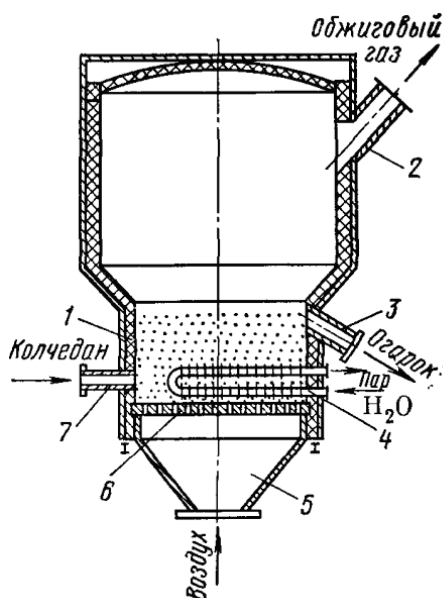


Рис. 20. Печь для обжига в кипящем (взвешенном) слое: 1 – камера горения; 2 – газоход для отвода отжигового газа; 3 – патрубок для выхода огарка; 4 – холодильник (секция парового котла); 5 – бункер; 6 – решетка; 7 – шнек для подачи обжигаемого твердого материала

Барабанная вращающаяся печь (рис. 21) представляет собой стальной, футерованный огнеупорным кирпичом барабан, установленный на опорных роликах под небольшим уклоном к горизонтали (3–4°). Применяют барабанные печи с противотоком, параллельным током и комбинированным движением исходного материала и топочных газов.

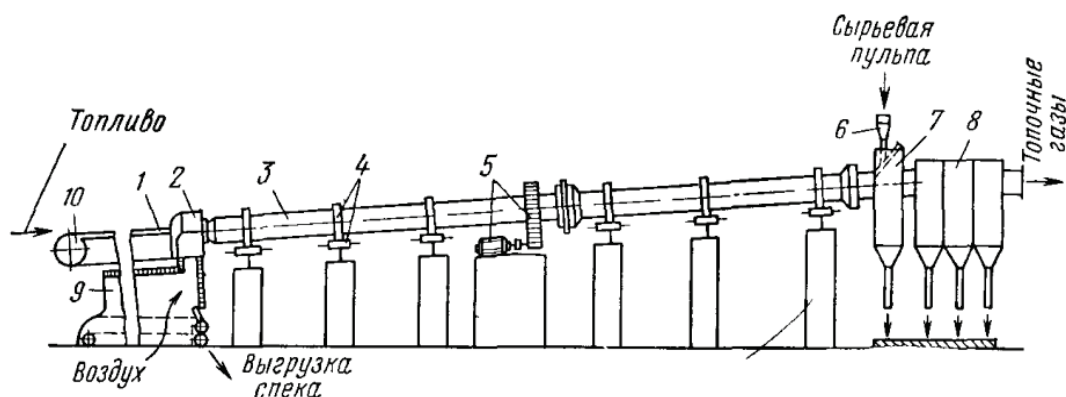


Рис. 21. Барабанная вращающаяся печь: 1 – горелка; 2 – головка печи; 3 – барабан; 4 – бандаж и опорные ролики; 5 – привод печи; 6 – питатель; 7 – пылеосадительная камера; 8 – электрофильтр; 9 – колосниковый холодильник спека; 10 – вентилятор для подачи топлива

Развитие реакционной поверхности и перемешивание твердых и газообразных реагентов достигается вращением печи; вследствие этого происходит пересыпание твердого материала в потоке газа, движущегося вдоль печи. В загрузочную часть (головку) печи подаются исходные материалы в виде жидкой пульпы или сухой сырьевой смеси. Со стороны разгрузочной части (головки) печи через форсунки подается пылевидное, жидкое или газообразное топливо.

Барабанные печи – топливные, прямого нагрева, обогреваемые главным образом непосредственным соприкосновением обжигаемого материала с источником теплоты – факелом и раскаленными топочными газами. Благодаря высокой разности температур факела и обрабатываемого материала, а также противотоку (чаще всего применяемому) в этих печах обеспечивается большая движущая сила теплопередачи. Барабанные вращающиеся печи отличаются большими размерами (длина до 200, диаметр до 5 м), высокой производительностью, простотой в устройстве и обслуживании, устойчивостью в работе, универсальностью действия. По этим причинам барабанные печи получили широкое распространение и являются типовыми печами и сушилками, применяемыми в самых разнообразных производствах: цемента и других силикатных материалов, глинозема, соды, щелочей, солей и многих других. Так как барабанные печи надежны и удобны в применении, то в настоящее время они больше распространены, чем печи КС, хотя последние обладают более высокой интенсивностью.

Вращающиеся печи для производства цементного клинкера (см. рис. 21) имеют производительность до 75 т/ч. Исходная шихта загружается непрерывно в верхнюю часть печи и вследствие ее медленного вращения (1–1,5 об/мин) и наклона постепенно передвигается к нижнему концу, где выгружается спекшийся материал (клинкер). Необходимая теплота обеспечивается сжиганием газообразного, жидкого или пылевидного топлива, которое подается во внутреннее пространство печи с нижнего ее конца. Таким образом, топочные газы движутся противотоком сырьевой смеси, которая, постепенно нагреваясь, проходит зоны сушки, подогрева, кальцинации (900–1200°C) и охлаждения.

Туннельные (канальные) печи (рис. 22) представляют собой канал длиной до 200 м, выложенный из огнеупорного кирпича или металлический, футерованный огнеупорным кирпичом. Внутри канала по рельсам движутся вплотную примыкающие друг к другу вагонетки с обжигаемым материалом или изделиями навстречу потоку воздуха или газа, взаимодействующего с твердым материалом. Для наиболее полного использования теплоты вагонетки занимают максимальную площадь туннеля. Туннельные печи – топливные прямого нагрева, причем теплота передается горячими газами, движущимися противотоком нагреваемому материалу. Канал печи разделяется на зоны подогрева, обжига и охлаждения материала. В зоне обжига при помощи форсунок сжигается газообразное, жидкое или твердое топливо, и топочные газы передаются в зону обогрева. В туннельных печах возможна наиболее тонкая регулировка температурного режима обжига во времени, их работу легко полностью автоматизировать. Печи работают непрерывно, обладают высокой мощностью, просты в обслуживании, надежны в эксплуатации. Туннельные печи применяют для обжига огнеупоров и других керамических изделий, для полукоксования сланца, сухой перегонки дерева, выплавки серы из руд и т. п.

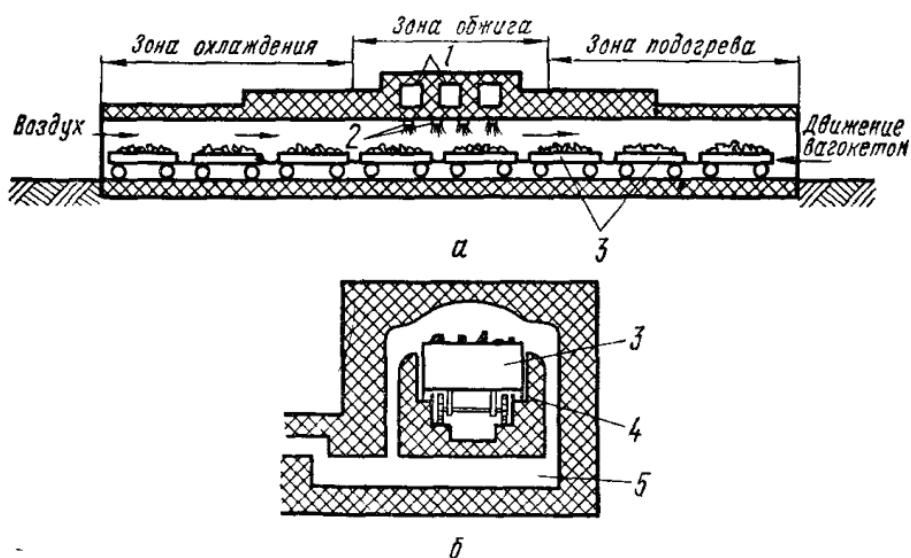


Рис. 22. Туннельная печь – продольный (а) и поперечный (б) разрезы:
1 – каналы для подачи воздуха к горелкам; 2 – горелки; 3 – вагонетка с изделиями; 4 – песочный затвор; 5 – дымоход

Камерные печи представляют собой закрытые камеры различной формы. Они применяются в разнообразных отраслях химической промышленности и могут отличаться друг от друга по условиям работы, конструкции и способу обогрева. Различные типы камерных печей работают, например, периодически или непрерывно, возможен прямой нагрев или косвенный – через стенки камеры; габариты и форма различных камерных печей меняются в широких пределах. Эти печи наиболее просты по устройству и поэтому по разнообразию применения находятся на первом месте. Они применяются в крупнотоннажных производствах, например для коксования каменных углей, которое производится в прямоугольных камерах периодического действия, обогреваемых через стенку и объединенных в батареи, включающие десятки камер. Батареи и множество камер (многокамерные печи) применяются и в других производствах, например при обжиге керамики. В этом случае осуществляется прямой нагрев изделий топочными газами. Иногда камерные печи косвенного нагрева, используемые, например, в производстве солей, называют муфелями. Для горелок и камер сгорания характерны небольшие размеры, прямой нагрев и непрерывность действия.

Трубчатые печи представляют собой камеры горения, в которых расположено большое количество труб как над огневым пространством, в котором сгорает топливо, так и в потоке горячих дымовых газов. Общая длина труб, размещенных в печи, достигает нескольких километров. В трубчатых печах осуществляется косвенный нагрев. Нагреваемая жидкостная или газовая смесь быстро движется по трубам противотоком топочным газам, обогревающим внешнюю поверхность труб. Трубчатые печи обладают высокой мощностью и интенсивностью, устойчивостью в работе, сравнительной простотой устройства. Интенсивная работа этих печей достигается благодаря высокой скорости потока нагреваемого вещества внутри труб (большой коэффициент теплоотдачи) и развитой поверхности нагрева последних при большой разности температур. Основная часть теплоты передается радиацией от пламени и раскаленной футеровки печей. Трубчатые печи широко применяются для химической переработки топлива и в органическом синтезе. В этих печах для

обогрева используется газообразное или жидкое топливо. Существует много способов расположения труб, топочных устройств и схем движения сырья.

Электрические печи применяются в электротермических процессах, при которых высокие температуры (до 3500°C) создаются преобразованием электрической энергии в тепловую. В электрических печах используют главным образом переменный электрический ток напряжением 50–130 В.

Помимо металлов, в электрических печах получают ряд неметаллических (химических) продуктов: карбид кальция, цианамид кальция, карбид кремния, карбид бора, электрокорунд, фосфор, сероуглерод, озон, ацетилен (при электрокрекинге метана), кварцевое стекло, плавленые и спеченные огне- и кислотоупорные материалы, графит и т. п. В электротермических производствах используются электрические печи различной мощности от нескольких сотен до 50 тыс. кВт. Все электротермические производства являются энергоемкими.

5.3. Системы «жидкость – твердое» (Ж – Т)

Процессы с участием твердых и жидких реагентов служат основой многих химических производств. К таким процессам относятся растворение твердых веществ и кристаллизация из растворов, экстрагирование и выщелачивание, плавление твердых тел и кристаллизация из расплавов, полимеризация в среде жидких мономеров с образованием твердых высокомолекулярных продуктов, коагуляция в коллоидных системах, диспергирование твердых частиц в жидкости, адсорбция растворенных в жидкости веществ и десорбция их, ионообмен между жидкостями и ионообменными смолами, катализ в жидкой фазе на твердых катализаторах и т. п.

Реакторы для процессов в системе Ж – Т представляют собой типовую аппаратуру, в которой проводят физические процессы и операции (физическое растворение, экстрагирование, кристаллизацию) и химические процессы. Большинство химических процессов Ж – Т идет в диффузионной области, поэтому в реакторах используют разнообразные приемы развития межфазной поверхности и повышают относительную скорость перемещения обеих

фаз. Эти приемы сводятся в основном к пропусканию жидкости через фильтрующий или взвешенный слой твердого материала или к различным способам перемешивания.

Реакторы с фильтрующим слоем обычно состоят из полого цилиндрического корпуса, внизу которого укреплена горизонтально или наклонно ситчатая или колпачковая тарелка (иногда колосниковая решетка). На тарелке расположен слой пористого твердого материала (гранулы адсорбента), через который пропускают жидкость. Величина межфазной твердой поверхности возрастает с увеличением пористости материала; внутренняя поверхность пор в сотни и тысячи раз превышает внешнюю поверхность. Основное сопротивление диффузии жидкого реагента оказывают внутренние каналы пор, т. е. процессы идут в области внутренней диффузии. Направление потока жидкости и его скорость зависят от высоты фильтрующего слоя и размеров гранул. Чаще всего поток жидкости проходит в реакторе сверху вниз. В реакторах с фильтрующим слоем осуществляют различные адсорбционные процессы, ионообмен (например, при умягчении воды), выщелачивание спеков в технологии солей, щелочей, глинозема и т. п.

На рис. 23 представлена батарея реакторов для выщелачивания пористых спеков, так называемых диффузоров. Такие каскады диффузоров работают по принципу противотока, т. е. самый концентрированный раствор отводят из последнего по ходу жидкости диффузора и в него же загружают свежий спек. Из первого диффузора выгружают отработанный спек, а в него подают наиболее слабый раствор (воду), который укрепляется по мере прохождения через батарею реакторов.

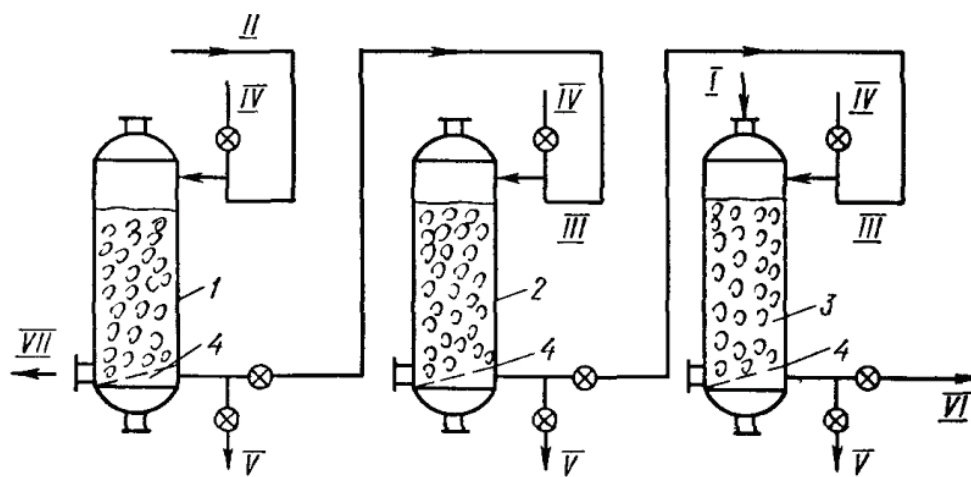


Рис. 23. Батарея диффузоров: 1–3 – диффузоры; 4 – наклонная решетка; I – загрузка твердого материала (спека); II – вход жидкости; III – вход жидкости из предыдущего диффузора; IV – вход промывной жидкости; V – выход промывной жидкости; VI – выход концентрированного раствора; VII – выгрузка отработанного спека

Реакторы со взвешенным слоем зернистого твердого материала в жидкости, работающие непрерывно, все больше применяются для процессов адсорбции и ионообмена, заменяя малоинтенсивные, периодически работающие реакторы с фильтрующим слоем.

Реакторы с взвешенным слоем пригодны при значительной разности плотностей жидкого и твердого реагентов и при крупных зернах последнего. Если разность плотностей фаз невелика и размеры гранул малы, то целесообразно применять реакторы с фонтанирующим слоем (рис. 24).

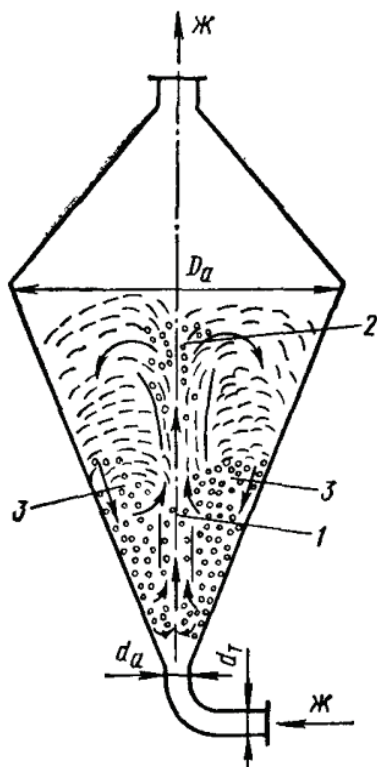


Рис 24. Реактор с фонтанирующим слоем: 1 – фонтанирующее ядро; 2 – фонтан; 3 – плотный опускающийся слой; D_a – диаметр реактора в зоне фонтана; d_a – диаметр трубопровода

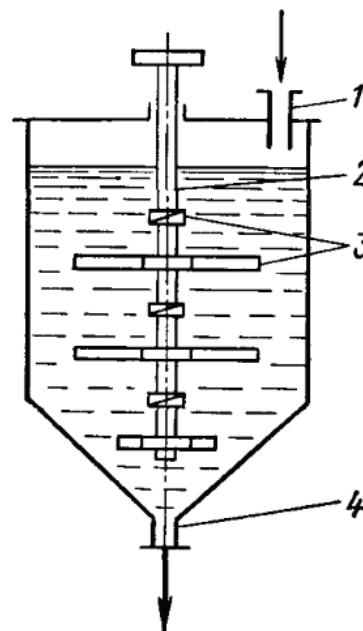


Рис. 25. Реактор с лопастной мешалкой: 1 – загрузка исходных реагентов; 2 – вал; 3 – лопасти; 4 – выгрузка продукта

Фонтанирующий слой – разновидность взвешенного слоя. Его применение особенно целесообразно при обработке полидисперсных, твердых материалов и когда из-за агрессивной реакционной среды недопустимо наличие металлической решетки (полки) реактора. Чтобы обеспечить создание фонтанирующего слоя, диаметр нижней части реактора не должен превышать диаметр трубопровода. При проведении в реакторе с фонтанирующим слоем ионообменного процесса, например извлечения из жидкости катионов редких металлов ионитными смолами, пропускают жидкость через реактор снизу вверх до насыщения ионита катионами. Регенерацию ионита ведут при том же направлении регенерирующей жидкости с получением концентратов редких металлов.

Реакторы с механическими мешалками, а также с пневматическим перемешиванием широко применяются для процессов в системе Ж – Т, в частности для растворения, экстрагирования, выщелачивания, полимеризации, в технологии солей, в гидрометаллургии, в производстве органических веществ. Эти же реакторы применяют для гомогенных реакций в жидкой фазе и для взаимодействия несмешивающихся жидкостей (Ж – Ж). Тип мешалки определяется вязкостью реакционной среды. Для жидкостей с незначительной вязкостью применяют реакторы с пропеллерными мешалками (см. рис. 9), а также с пневматическими мешалками, т. е. перемешиванием за счет барботажного воздуха или пара через реакционную массу (см. рис. 10). При средней вязкости жидкости применяют лопастные мешалки или мешалки спирального типа. Реактор с лопастной мешалкой представлен на рис. 25.

При повышенной вязкости реакционной среды применяют реакторы с якорными мешалками (рис. 26). Сечение лап якорной мешалки имеет гидродинамический профиль, который позволяет производить перемещение слоев в вязкой среде с минимальным напряжением. Внешние части мешалки почти касаются стен, очищая их поверхность от слоя твердого материала.

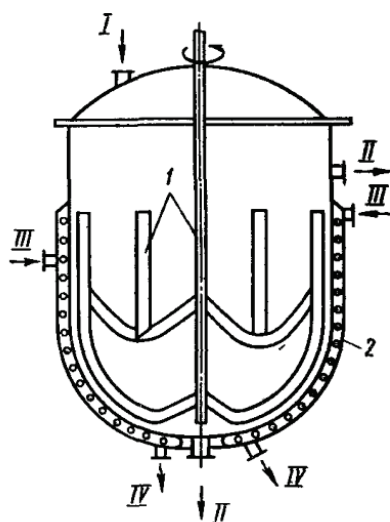


Рис. 26. Реактор с якорной мешалкой: 1 – мешалка; 2 – рубашка для обогрева; I – загрузка реагентов; II – выход продукта; III – выход пара; IV – выход конденсата

Одиночные реакторы с мешалками могут работать как периодически, так и непрерывно. Для обеспечения непрерывности процесса, а также для достижения заданной степени превращения реагентов в продукты при минимальном реакционном объеме применяют систему последовательно соединенных реакторов с мешалками (каскад, батарею). Этот прием снижает общее время пребывания реакционной смеси, требуемое для обеспечения заданной, так как с увеличением числа реакторов в батарее распределение времени пребывания в них реагентов приближается к распределению времени пребывания в реакторе идеального вытеснения.

6. Реакторы для гетерогенных каталитических процессов

Проведение каталитических реакций в однородной среде технически легко осуществимо. Аппараты, в которых проводят гомогенные каталитические процессы в газовой фазе, могут быть камерами, колоннами, трубчатыми теплообменниками и т. п.

Гомогенное окисление SO_2 оксидами азота осуществляется при нитрозном способе производства серной кислоты как в жидкой, так частично и в газовой фазе в свободном объеме насадки башен. Эндотермический процесс дегидратации уксусной кислоты в парах в присутствии катализатора парообразного триэтилфосфата ведут в трубчатых реакторах, обогреваемых топочными газами, циркулирующими в межтрубном пространстве. Жидкофазный катализ производят обычно в реакторах с различного рода перемешивающими устройствами. Например, поликонденсацию фенола и альдегида в водном растворе с катализатором соляной кислотой ведут в реакторах с механическими мешалками.

Реакторы гетерогенного катализа, особенно контактные аппараты, в которых реагируют газы на твердых катализаторах, весьма разнообразны. Контактные аппараты должны работать непрерывно, обладать высокой интенсивностью, обеспечивать режим процесса, близкий к оптимальному, в особенности оптимальный температурный режим, должны иметь минимальное

гидравлическое сопротивление, простую конструкцию и легко обслуживаться.

Классификация каталитических реакторов *по фазовому признаку* определяет конструкцию реактора.

Гетерогенно-каталитические процессы могут происходить в газовой и жидкой фазах с твердым или жидким катализатором. Подавляющее большинство промышленных каталитических процессов осуществляется в газовой фазе на твердых катализаторах.

По *температурному режиму* гетерогенно-каталитические реакторы подразделяют на адиабатические, изотермические и полигермические. По *степени перемешивания* исходных веществ с продуктами реакции различают предельные режимы идеального вытеснения и полного смешения, а также режимы неполного перемешивания, фактически существующие в промышленных каталитических реакторах и характеризующиеся диффузионной моделью.

По *гидродинамическому режиму* взаимодействия зернистого твердого катализатора с потоком газа каталитические реакторы делят на следующие группы: 1) с неподвижным (фильтрующим) слоем катализатора; 2) со взвешенным (кипящим) слоем катализатора; 3) с непрерывно движущимся катализатором по всей высоте реакционного объема. Этой классификацией не охвачены реакторы поверхностного контакта с размещением катализатора в виде труб или сеток, через которые пропускается газ.

Контактные аппараты поверхностного контакта применяются реже, чем аппараты с фильтрующим или взвешенным слоем катализатора. При поверхностном контакте активная поверхность катализатора невелика. Поэтому аппараты такого типа целесообразно применять лишь для быстрых экзотермических реакций на высокоактивном катализаторе, обеспечивающем выход, близкий к теоретическому. При этих условиях в контактном аппарате не требуется размещать большие количества катализатора.

Принципиальная схема контактного аппарата с катализатором в виде сеток показана на рис. 27. В корпусе аппарата горизонтально укреплены одна над другой несколько сеток, изготовленных из активного для данной реакции металла или сплава. Подогрев газа до температуры зажигания

производится главным образом в самом аппарате за счет теплоты излучения раскаленных сеток. Время соприкосновения газа с поверхностью сеток составляет тысячные – десятитысячные доли секунды. Такие аппараты просты по устройству и высокопроизводительны. Они применяются для окисления аммиака на платино-палладиевородиевых сетках, для синтеза ацетона из изопропилового спирта на серебряных сетках, для конверсии метанола на медных и т. п.

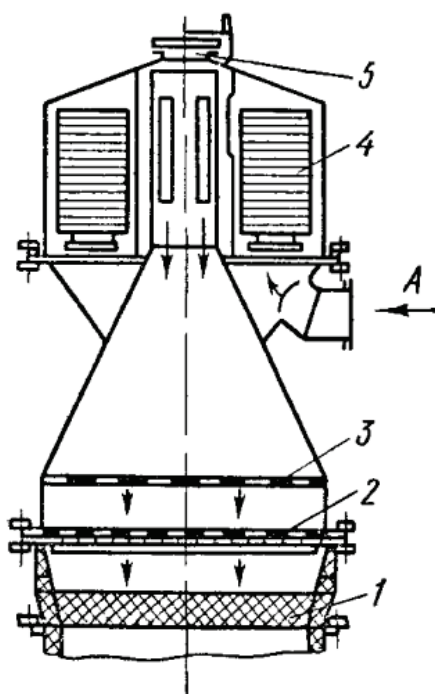


Рис. 27. Контактный аппарат поверхностного контакта с катализатором в виде сеток:
1 – кольца Рашига; 2 – сетка из катализатора; 3 – распределительная решетка; 4 – картонный фильтр; 5 – предохранительный клапан;
А – вход газа в аппарат

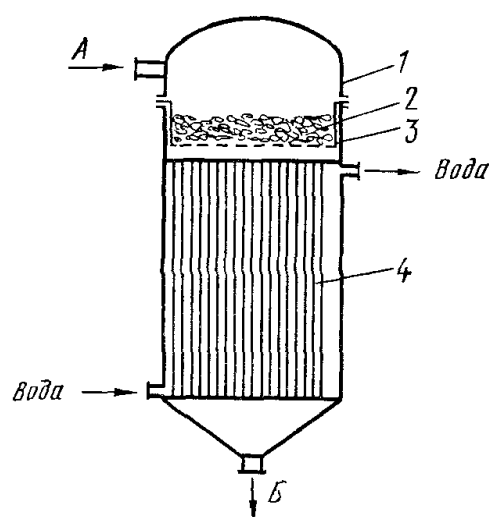


Рис. 28. Контактный аппарат с высокоактивным катализатором без теплообменных устройств, но с закладкой продуктов реакции:
1 – корпус; 2 – катализатор; 3 – решетка; 4 – холодильник;
А – исходная газовая смесь;
Б – продукты реакции

Эти же процессы с применением других, менее активных, но более дешевых катализаторов проводят в аппаратах с фильтрующим или взвешенным слоем катализатора. В некоторых случаях,

чтобы совместить катализ и нагрев газовой смеси, катализатор наносят на стенки теплообменных труб.

Аппараты с фильтрующим слоем катализатора в настоящее время наиболее распространены. Они применимы для любого типа каталитических реакций. В этих аппаратах слой или несколько слоев катализатора неподвижно лежат на решетчатой опоре (полке) или загружены в трубы и через неподвижный катализатор пропускается смесь реагирующих газов при режиме, близком к идеальному вытеснению. Чем выше слой катализатора, тем менее сказывается осевое (обратное) перемешивание газа и тем более применима к расчету реактора модель идеального вытеснения.

Катализатор имеет форму зерен, таблеток или гранул различных размеров, но, как правило, не менее 4–5 мм в поперечнике, так как при более мелких частицах резко возрастает гидравлическое сопротивление слоя катализатора и легче происходит его спекание. Количество загруженного катализатора, высота, число слоев и расположение их в аппарате зависят от активности катализатора, характера каталитической реакции, условий теплообмена. Чем активнее катализатор и больше равновесный выход и скорость реакции, тем меньше контактной массы нужно загружать в аппарат и тем меньше высота слоя катализатора.

Особенности конструкции контактных аппаратов зависят в основном от конструктивного оформления теплообменных устройств. Поддержание оптимального температурного режима – наиболее сложная задача при конструировании контактных аппаратов. Для эндотермических реакций требуется подвод теплоты в зону катализа; для многих каталитических процессов требуется тонкая регулировка температурного режима, чтобы избежать побочных процессов. Наиболее трудно проводятся обратимые экзотермические реакции, при которых требуется неравномерный по высоте аппарата интенсивный отвод теплоты из зоны катализа и полезное использование этой теплоты.

Аппараты с фильтрующим слоем без теплообменных устройств наиболее просты по конструкции. Они работают на адиабатическом тепловом режиме, причем температурный режим регулируется только изменением состава и температуры исход-

ного газа. Такие аппараты можно применять а) для практически необратимых экзотермических реакций, проводимых в тонком слое весьма активного катализатора (рис. 28), например для окисления метанола в формальдегид; б) для реакций с низкой концентрацией реагентов, например при каталитической очистке газов окислением или гидрированием примесей; в) для экзотермических реакций с небольшим тепловым эффектом (рис. 29). Количество загруженного катализатора при малой его активности может быть весьма велико, и высота слоя составляет иногда несколько метров.

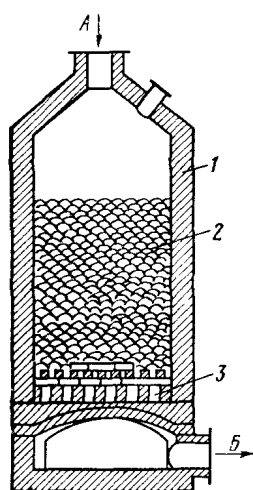


Рис. 29. Контактный аппарат без теплообмена для эндотермических и экзотермических процессов с небольшим тепловым эффектом:
1 – корпус (футерованный);
2 – катализатор; 3 – колосниковая решетка; А – исходная газовая смесь; Б – продукты реакции

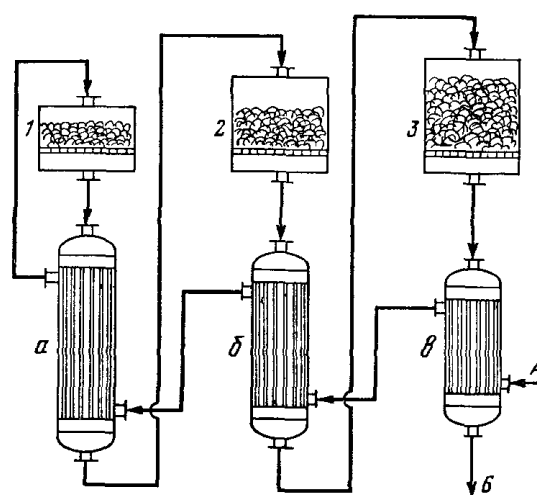


Рис. 30. Схема многоступенчатого контактирования с внешними теплообменниками:
1, 2, 3 – контактные аппараты;
а, б, в – теплообменники;
А – исходный газ;
Б – продукты реакции

Основным достоинством аппаратов без теплообменных устройств является простота конструкции. Однако они совершенно не обеспечивают оптимальный температурный режим, поэтому их заменяют более эффективными – с теплообменом.

Существует несколько способов теплообмена в контактных аппаратах, причем конструктивные приемы отвода теплоты из

реакционного объема и подведения теплоты однотипны для проведения экзотермических и эндотермических реакций. Примерная классификация контактных аппаратов с фильтрующим слоем катализатора по способам отвода (или подвода) теплоты:

I. Контактные аппараты с периодическим подводом и отводом теплоты.

II. Контактные аппараты с внешними теплообменниками.

III. Контактные аппараты с внутренними теплообменниками:

1. Полочные (ступенчатого теплообмена):

а) с теплообменниками между полками;

б) с охлаждением между полками дополнительным введением холодных реагентов.

2. Трубчатые (непрерывного отвода или подвода теплоты):

а) с размещением катализатора в трубках;

б) с размещением катализатора в межтрубном пространстве.

IV. Контактные аппараты с комбинированием нескольких приемов теплообмена.

Аппараты с периодическим подводом и отводом теплоты применяются главным образом для эндотермических каталитических реакций. Они, как правило, однослойны. Снаружи они покрыты слоем изоляции. Принцип их работы состоит в том, что аппарат, в котором на решетке расположен слой катализатора, попеременно подают то реагирующие вещества, то теплоноситель (топочные газы, перегретый пар, воздух). Теплоноситель разогревает слой катализатора, решетку и футеровку до температуры реакции, после чего вновь пропускается реагирующая газовая смесь. Катализатор, решетка и футеровка являются аккумуляторами теплоты. Иногда на решетку под катализатор насыпают слой инертного материала – теплоносителя, увеличивая общую теплоемкость аппарата и период его работы. Такие аппараты применялись для дегидрирования углеводородов, каталитического крекинга и других эндотермических процессов, в которых необходима регенерация катализатора вследствие блокировки его поверхности продуктами побочных реакций.

В контактных аппаратах с внешними теплообменниками теплообмен производится между стадиями контактирования для поддержания температурного режима, близкого к оптимальному.

На рис. 30 приведена принципиальная схема контактирования с промежуточным теплообменом во внешних теплообменниках; такая схема характерна для обратимых экзотермических реакций. Свежий газ нагревается в теплообменнике «в» за счет теплоты продуктов реакции, прошедших контактирование, и затем последовательно проходит межтрубное пространство теплообменников «б» и «а», подогреваясь до температуры начала каталитической реакции (температуры зажигания). Затем газ последовательно проходит через слои катализатора в контактных аппаратах и внутри труб соответствующих теплообменников.

В соответствии с кинетическими закономерностями выход продукта при катализе возрастает со временем по логарифмической зависимости. Поэтому доля от общего выхода в каждом из контактных аппаратов 1, 2 и 3 (рис. 30) понижается по мере контактирования. Соответственно постепенно уменьшаются тепловой эффект процесса и количество теплоты, которое требуется отвести из каждого слоя. Количество катализатора в аппаратах 1, 2, 3, как правило, последовательно увеличивается. Однако степень превращения в каждом отдельном аппарате 1, 2, 3 последовательно снижается, что соответствует закону действующих масс. Следовательно, чем больше ступеней контактирования и промежуточного охлаждения, тем выше выход продукта и режим ближе к оптимальному. В современных контактных аппаратах промежуточный теплообмен чаще всего производят в теплообменниках, расположенных в полочном аппарате между слоями катализатора.

Полочные контактные аппараты – один из наиболее распространенных типов контактных аппаратов. Принцип их устройства состоит в том, что подогрев или охлаждение газа между слоями катализатора, лежащими на полках, производится в самом контактном аппарате с использованием различных теплоносителей или способов охлаждения. Принципиальная схема полочного контактного аппарата для проведения экзотермических реакций представлена на рис. 31.

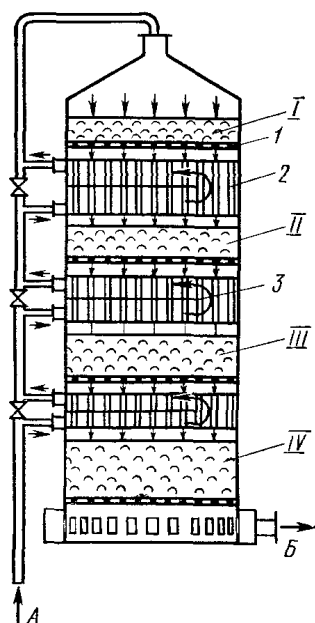


Рис. 31. Полочный контактный аппарат с теплообменниками между слоями катализатора: 1 – решетка; 2 – теплообменные трубки; 3 – перегородки; I, II, III, IV – первый, второй, третий, четвертый слои катализатора (по ходу газа); А – газ из теплообменника; Б – газ в теплообменник

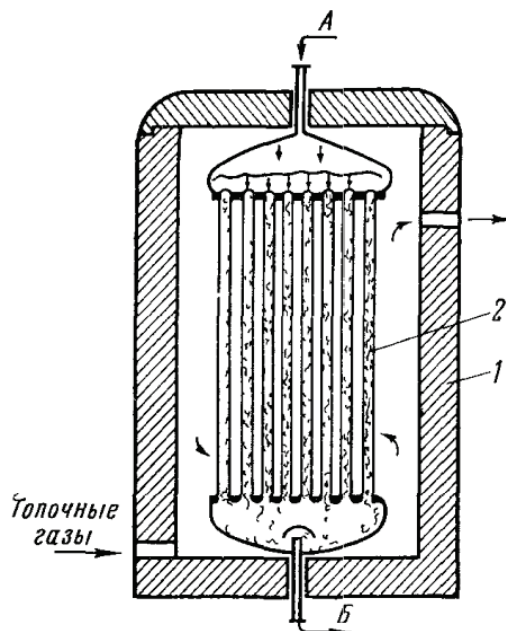


Рис. 32. Трубчатый контактный аппарат с катализатором в трубках и обогревом топочными газами: 1 – огнеупорная кладка, 2 – трубы с катализатором, А – исходная газовая смесь, Б – продукты реакции

Между дырчатыми полками, на которых расположены слои катализатора, размещены теплообменники. В аппаратах такого типа высота каждого нижележащего слоя катализатора больше, чем расположенного над ним, т. е. увеличивается по ходу газа, а высота теплообменников уменьшается, так как по мере возрастания общей степени превращения скорость реакции снижается и соответственно уменьшается количество выделившейся теплоты. В межтрубном пространстве теплообменников последовательно снизу вверх проходит свежий газ, охлаждая продукты реакции и нагреваясь до температуры начала реакции.

В некоторых каталитических процессах промежуточное охлаждение можно производить дополнительным введением одного из реагентов между стадиями контактирования. Таким реагентом может быть холодный газ, например азотоводородная смесь в синтезе аммиака, воздух – в реакциях окисления, водяной

пар – в реакциях гидратации и конверсии углеводородов с водяным паром.

В полочных контактных аппаратах происходит ступенчатый скачкообразный отвод теплоты, каталитическая реакция и теплообмен ведутся раздельно последовательными этапами.

В трубчатых контактных аппаратах теплообмен происходит непрерывно и одновременно с каталитической реакцией. Катализ происходит при политермическом режиме; тепловой эффект реакции частично компенсируется подводом или отводом теплоты. Аппараты с катализатором в трубах используются для эндотермических и экзотермических реакций. При проведении эндотермических реакций в межтрубное пространство аппарата подаются горячие топочные газы, омывающие трубы с катализатором. Иногда такие аппараты устроены по типу трубчатого теплообменника, заключенного в обмуровку, в трубках которого находится катализатор (рис. 32), а иногда как печь, по окружности которой расположены трубки с катализатором, а в центре циркулируют топочные газы.

Реагирующая газовая смесь проходит катализаторные трубки противотоком теплоносителю, непрерывно нагреваясь до температуры реакции; теплота отходящих топочных газов используется для подогрева реагентов и в котлах-утилизаторах. По такому принципу устроены контактные аппараты для дегидрирования бутана, каталитической конверсии метана (1-я стадия) и других процессов. При проведении экзотермических реакций в трубчатых аппаратах теплообмен производится между катализатором и холодным, еще не прореагировавшим газом. Катализатор находится в трубах, омываемых холодным газом, или в межтрубном пространстве. Так, например, двойные теплообменные трубки (рис. 33) пронизывают слой катализатора, лежащий на решетке.

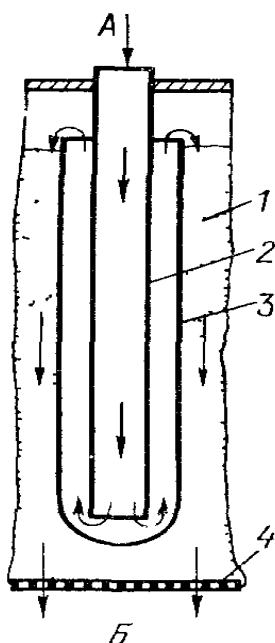


Рис. 33. Двойная теплообменная трубка: 1 – катализатор, 2 – внутренняя теплообменная трубка, 3 – внешняя теплообменная трубка, 4 – дырчатая полка (решетка), А – исходная газовая смесь, Б – продукты реакции

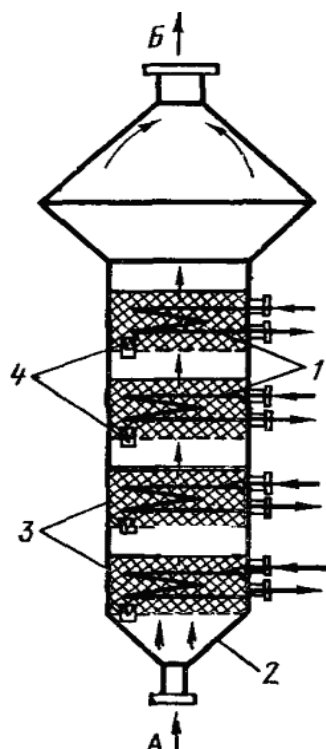


Рис. 34. Многослойный контактный аппарат с кипящими слоями катализатора: 1 – водяной холодильник, 2 – газораспределительный конус, 3 – взвешенный слой катализатора, 4 – газораспределительная колпачковая решетка

Газ, поступающий в контактный аппарат, проходит по внутренним трубам и затем по кольцевому пространству между внутренними и внешними теплообменными трубками. При этом газ подогревается до температуры реакции, охлаждая контактную массу, и затем входит в слой катализатора. Примером контактного аппарата с двойными теплообменными трубками может служить один из типов колонны синтеза аммиака при среднем давлении. В аппаратах с двойными теплообменными трубками распределение интенсивности отвода теплоты и распределение температур по высоте слоя катализатора ближе к оптимальным условиям, чем в простых трубчатых. Но эти аппараты также имеют ряд недостатков: неравномерное распределение температур по сечению аппарата, недостаточную интенсивность отвода теплоты

от катализатора вначале слоя контактной массы, громоздкость теплообменных элементов и уменьшение вследствие этого полезного объема, занятого катализатором.

При конструировании контактных аппаратов часто применяют комбинирование нескольких приемов теплообмена. Встречаются, например, трубчато-полочные аппараты с загрузкой катализатора на полках и в трубках, расположенных между полками, полочные с совмещением в одном аппарате разных приемов охлаждения между стадиями контактирования, например установка теплообменных труб и ввод холодного газа в колонне синтеза аммиака и т. п. В комбинированных многоступенчатых аппаратах достигается наибольшее приближение к оптимальному температурному режиму по сравнению с другими типами аппаратов фильтрующего слоя. Однако все контактные аппараты с фильтрующим слоем катализатора обладают следующими недостатками, присущими неподвижному катализатору и затрудняющими дальнейшую интенсификацию каталитических процессов:

1. В фильтрующем слое можно использовать лишь сравнительно крупные зерна или гранулы катализатора не менее 4–6 мм в поперечнике, так как при более мелких частицах резко возрастает гидравлическое сопротивление слоя. Внутренняя поверхность крупных частиц катализатора мало используется для катализа, и это снижает общую степень использования катализатора.

2. В процессе работы частицы неподвижного катализатора спекаются и слеживаются, вследствие чего повышается гидравлическое сопротивление аппарата, нарушается равномерность распределения газа и снижается каталитическая активность катализатора.

3. Пористые зерна катализаторов имеют низкую теплопроводность, и скорость теплоотдачи от слоя к поверхности теплообмена очень мала. Поэтому невозможны интенсивный отвод теплоты из неподвижного катализатора и равномерное распределение температур по сечению неподвижного слоя. Наиболее интенсивный отвод теплоты мог бы быть достигнут при расположении водяных или воздушных холодильников в слое катализатора; однако из-за малой теплопроводности неподвижного слоя этот прием недопустим, так как катализатор «затухает» вблизи

холодильников, т. е. температура его резко снижается и реакция прекращается.

4. Плохие условия теплообмена в фильтрующем слое катализатора не позволяют четко регулировать температуру и поддерживать оптимальный температурный режим. Поэтому, например, при экзотермических реакциях наблюдается повышение температуры по мере достижения более высоких степеней контактирования вместо постепенного снижения температуры. Отклонения от оптимального температурного режима снижают производительность катализатора.

5. В аппаратах с неподвижным катализатором невозможна его непрерывная регенерация, необходимая для многих процессов технологии органических веществ.

Аппараты со взвешенным (кипящим, псевдоожигенным) слоем катализатора применяют взамен аппаратов с фильтрующим слоем. Принцип взвешенного слоя устраняет перечисленные недостатки и позволяет значительно упростить конструкцию контактных аппаратов. В аппаратах со взвешенным слоем применяется обычно мелкозернистый катализатор с диаметром частиц 0,1–2 мм. Взвешенный слой мелких частиц катализатора образуется в газовом (или жидком) потоке реагирующих веществ. Для этого газ пропускают снизу вверх через решетку, на которой находится катализатор, с такой скоростью, чтобы частицы катализатора пришли в движение и весь слой перешел из неподвижного во взвешенное состояние. Во взвешенном слое зерна катализатора передвигаются во всех направлениях, совершая линейные и вихревые движения, в результате ускоряется диффузия реагентов из ядра потока к частицам катализатора. Внешний вид слоя напоминает кипящую жидкость. Он также пронизан пузырями газа, откуда и произошло название «кипящий» слой. Взвешенный слой обладает свойством текучести подобно жидкости. По степени перемешивания твердой фазы взвешенный слой в аппаратах малых размеров может приближаться к модели полного перемешивания. Температурный режим в каталитических реакторах с кипящим слоем катализатора изотермический.

Принципиальная схема контактного аппарата со взвешенным слоем катализатора для экзотермических реакций приведена на рис. 34. В контактном аппарате имеется одна или несколько газораспределительных решеток. Реагирующая газовая смесь проходит снизу вверх, образуя над каждой полкой взвешенный слой катализатора. Продукты реакции удаляются из верхней расширенной части аппарата. Расширение предназначено для выделения из газа унесенных частиц катализатора.

Отвод теплоты из катализатора производится при помощи водяных холодильников или труб парового котла, размещенных внутри слоев. Такой прием теплообмена позволяет отводить теплоту интенсивно и регулировать интенсивность теплоотвода по слоям. Каталитический реактор одновременно выполняет функции котла-утилизатора, т. е. производит водяной пар.

Подбирая требуемую поверхность теплообмена в каждом слое, можно добиться максимального приближения к кривой оптимальных температур. Конструкция теплообменных устройств и всего контактного аппарата со взвешенным слоем проста; не требуется сложных и громоздких промежуточных внутренних и внешних теплообменников и, кроме того, общая поверхность теплообмена меньше, чем в аппаратах с фильтрующим слоем. Такое упрощение и сокращение теплообменных устройств возможно благодаря особым свойствам взвешенного слоя. Вследствие непрерывного движения твердых частиц теплота переносится конвекцией и температура внутри слоя выравнивается. Коэффициент теплоотдачи от взвешенного слоя к поверхности теплообмена в десятки раз выше, чем для фильтрующего слоя. Поэтому возможен интенсивный отвод теплоты из слоя без опасности затухания контактной массы, а также переработка газа с высокой концентрацией реагентов без опасности перегрева катализатора. Поэтому также отпадает необходимость предварительного подогрева поступающей газовой смеси до температуры зажигания катализатора, так как подогрев легко осуществляется при поступлении в слой за счет его высокой теплопроводности. В первом слое катализатора можно не устанавливать теплообменники, регулируя температуру слоя теплотой поступающего газа. Благодаря изотермическим условиям в каждом слое в аппаратах

взвешенного слоя легко осуществляется автоматическое регулирование температурного режима.

Важнейшее преимущество взвешенного слоя – это повышение производительности катализатора в результате уменьшения размеров частиц и, следовательно, полного использования внутренней поверхности катализатора. Главным недостатком взвешенного слоя, по сравнению с неподвижным, является снижение движущей силы процесса вследствие более полного перемешивания газа, а также из-за прохождения части газа через слой в виде крупных пузырей. Другой недостаток – истирание зерен катализатора, особенно острых углов и ребер. Для взвешенного слоя необходимы высокопрочные, износоустойчивые, мелкозернистые контактные массы, те же контактные массы, которые используются в неподвижном слое, как правило, неприменимы. В зависимости от условий технологического процесса применяются контактные аппараты кипящего слоя без регенерации катализатора и с непрерывной регенерацией последнего (рис. 35).

Аппараты кипящего слоя с успехом применяются при проведении каталитических процессов, в которых необходима непрерывная смена катализатора для регенерации: дегидрирование углеводородов, гидроформинг (дегидрогенизация и дегидроциклизация парафинов), каталитический крекинг и др. При проведении эндотермических процессов в аппаратах со взвешенным слоем катализатора теплоносителем служит предварительно нагретая реагирующая газовая смесь, а иногда и сам катализатор. Реакторы взвешенного слоя начали применять для процессов, не требующих регенерации катализатора, получения фталевого ангидрида из нафталина или ксилола, окисления этилена до оксида его, в производстве акрилонитрила, для окисления диоксида серы. Весьма перспективно применение реакторов с кипящим слоем катализатора для каталитической очистки отходящих запыленных газов от вредных примесей, в том числе для окисления диоксида серы в дымовых газах с последующей сорбцией триоксида серы, для разложения оксидов азота с помощью восстановителей до элементарного азота, для дожигания органических примесей и т. п.

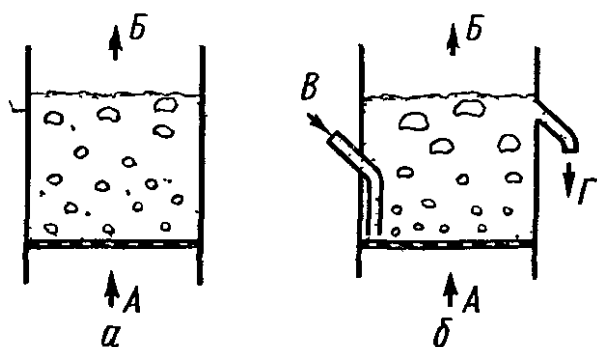


Рис. 35. Схемы взвешенного слоя:
 а – без регенерации катализатора;
 б – с регенерацией катализатора;
 А – исходная газовая смесь;
 Б – продукты реакции;
 В – регенерированный катализатор;
 Г – катализатор на регенерацию

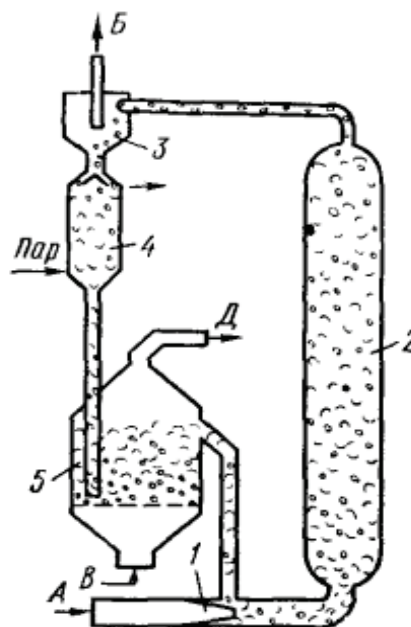


Рис. 36. Схема установки каталитического крекинга с потоком взвеси пылевидного катализатора: 1 – эжектор; 2 – контактный аппарат с движущимся катализатором; 3 – сепаратор; 4 – опорная емкость; 5 – регенератор (реактор с кипящим слоем); А – пары сырья из трубчатой печи; Б – парогазовая смесь на ректификацию; В – воздух; Д – топочные газы в котел-утилизатор

Реакторы с движущимся катализатором широко применяются для парофазного крекинга нефтепродуктов, но могут использоваться и в других процессах катализа, где требуется непрерывная циркуляция катализатора между реактором и регенератором. Здесь они успешно конкурируют с реакторами взвешенного слоя. Применяются контактные аппараты с движущимся катализатором двух типов: а) со взвесью мелкозернистого катализатора в потоке газа; б) с плотным слоем крупнозернистого катализатора, опускающегося в шахтном аппарате сверху вниз в прямотоке или противотоке с реагирующими газами (парами).

Схема установки с потоком взвеси катализатора представлена на рис. 36. Скорость парогазовой смеси столь велика, что силы трения газа о зерна катализатора превышают массу зерен. В результате этого измельченный или пылевидный катализатор движется вместе с газовым потоком и выносятся вместе с ним из верхней части контактного аппарата. Основная масса катализатора отделяется от продуктов реакции в циклонных сепараторах и эжектором передается в регенератор, где во взвешенном слое происходит выжигание углеродных веществ с поверхности катализатора воздухом. Регенерированный раскаленный катализатор через колодец и стояк отводится на смешение с парами сырья и при помощи эжектора вновь подается в реактор.

Недостатком установок с движущимся катализатором является трудность полного отделения пылевидного катализатора от газового потока. В этих установках много места занимают уловители катализаторной пыли: циклоны, электрофилтры.

Литература

1. Теоретические основы химической технологии. Ч. 1 / Мухленов И. П., Авербух А. Я., Тумаркина Е. С., Фурмер И. Э. – М. : Высш. шк., 1984. – 256 с.
2. Гельперин, Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Кн. 1, 2 / Н. И. Гельперин. – М. : Химия, 1981. – 812 с.
3. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1995. – 400 с.
4. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1995. – 368 с.
5. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : ГХИ, 1961. – 830 с.
6. Кутепов, А. М. Общая химическая технология / А. М. Кутепов, Т. И. Бондарева, М. Г. Беренгартен. – М. : Высш. шк., 1990. – 520 с.
7. Фролов, В. Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» / В. Ф. Фролов. – СПб. : Химиздат, 2008. – 608 с.

Оглавление

1. Химический реактор	3
2. Классификация химических реакторов	5
3. Конструктивные элементы химических реакторов	9
4. Реакторы для гомогенных процессов.....	13
5. Реакторы для гетерогенных некаталитических процессов.....	18
5.1. Системы «газ – жидкость» (Г – Ж).....	19
5.2. Системы «газ – твердое» (Г – Т).....	23
5.3 Системы «жидкость – твердое» (Ж – Т)	32
6. Реакторы для гетерогенных каталитических процессов.....	37
Литература	53

Учебное издание

**Бегунов Роман Сергеевич
Валяева Ася Николаевна**

Химические реакторы в промышленности

Методические указания

Редактор, корректор М. Э. Левакова
Верстка Е. Л. Шелехова

Подписано в печать 17.10.11. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бум. офсетная. Гарнитура "Times New Roman".
Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,76.
Тираж 30 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе
Ярославского государственного университета
им. П. Г. Демидова.

Отпечатано на ризографе.

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова.
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.

Р. С. Бегунов
А. Н. Валяева

Химические реакторы в промышленности

