

Химические реакторы

**Общие положения. Реакторы с
различными режимами движения
среды**

Классификация химических реакторов

Классификация химических реакторов

Одним из основных элементов любой **ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ** системы (**ХТС**) является **химический реактор**.

Химическим реактором называется аппарат, в котором осуществляются химические процессы, сочетающие химические реакции с массо- и теплопереносом.

Типичные реакторы — промышленные печи, контактные аппараты, реакторы с механическим, пневматическим и струйным перемешиванием, варочные котлы, гидраторы и т.п.

**ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
СИСТЕМА
(ХТС)**

ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

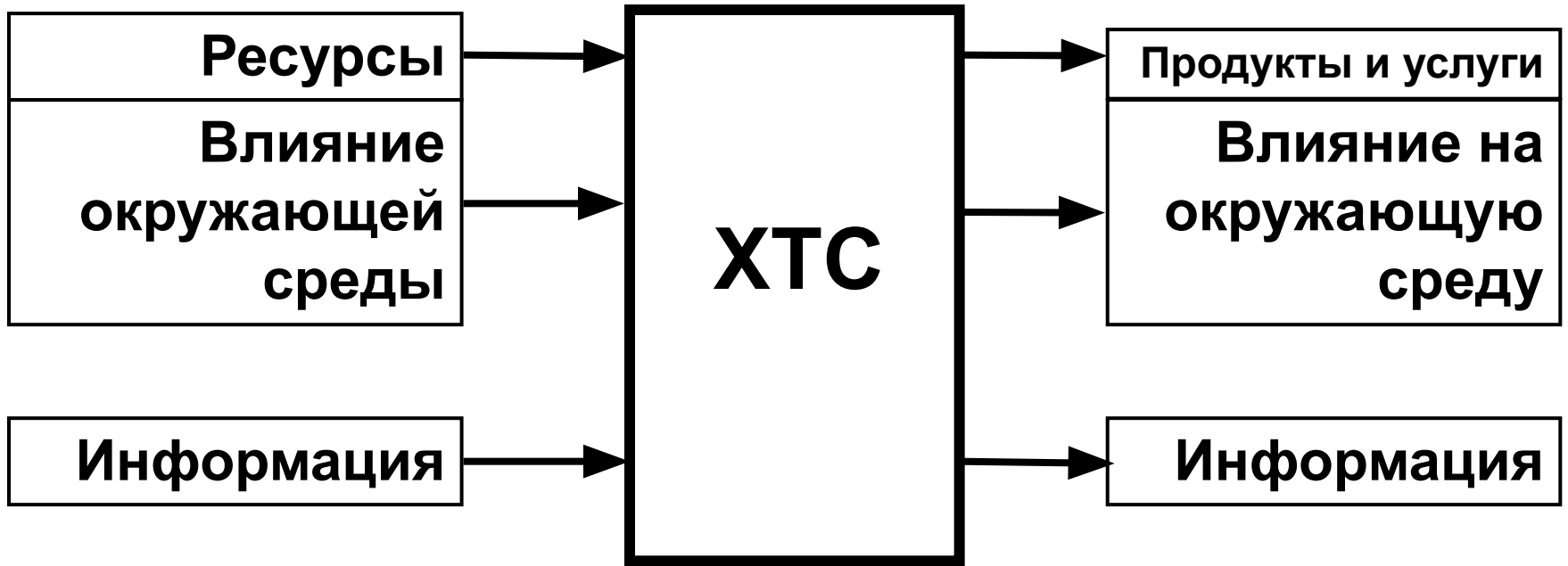
Основные элементы ХТС

Системой называют упорядоченную совокупность материальных объектов, соединенных какими-либо связями, предназначенную для достижения определенной цели наилучшим образом.

ХТС – совокупность взаимосвязанных процессов и аппаратов (операторов), функционирующих как единое целое с целью превращения сырья в качественный продукт с минимальными затратами ресурсов и сохранением качества окружающей среды.

(ХТС) многоассортиментного производства - это упорядоченная последовательность технологических процессов производства одного или нескольких целевых или промежуточных продуктов и множество технологических аппаратов с системой материальных и энергетических связей между ними, необходимое и достаточное для производства этого продукта

ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА (внешние связи)



Классификация химических реакторов

1. По организации процесса в аппарате реакторы делятся на:

- **реакторы периодического действия.** Они характеризуются единовременной загрузкой реагентов. При этом процесс складывается из трех стадий: загрузки сырья, его обработки (химическое превращение) и выгрузки готового продукта. После проведения этих стадий они повторяются вновь, т. е. Работа реактора осуществляется циклически.

- **реакторы непрерывного действия (их иногда называют проточными реакторами).** В данном типе реактора питание реагентами и отвод продуктов реакции осуществляется непрерывно.

- **полунепрерывные реакторы.** В полунепрерывных реакторах одна из вспомогательных операций — загрузка реагентов или выгрузка продуктов реакции — осуществляется периодически, а вторая непрерывно

Классификация химических реакторов

2. По тепловому режиму химические реакторы разделяются на:

- **реакторы с адиабатическим режимом**, в котором отсутствует теплообмен с окружающей средой и тепловой эффект химической реакции полностью затрачивается на изменение температуры в реакторе;
- **реакторы с изотермическим режимом**, для которых характерно постоянство температуры в реакторе, что обеспечивается подводом или отводом тепла из реактора;
- **реакторы с политропическим режимом**. Характеризуются подводом или отводом тепла из реактора при изменяющейся температуре в нем. За счет этого в реакторе устанавливается заданный тепловой режим. Данный тип реактора является наиболее распространенным.

Классификация химических реакторов

3. Химические реакторы по режиму движения компонентов делятся на:

-реакторы идеального вытеснения (РИВ) — реакторы, в которых осуществляется ламинарный гидродинамический режим. В таких реакторах, поток реагентов движется в одном направлении по длине реактора без перемешивания. Идеальное вытеснение предполагает равенство по сечению реактора скоростей потока. Перемещение реакционной массы по длине реактора носит строго поршнеобразный характер. В то же время по длине реактора в соответствии с закономерностями протекания реакции устанавливается определённое распределение концентраций участников реакции, температуры и других параметров.

-Реакторы вытеснения – трубчатые аппараты, достаточно большой длины по сравнению с диаметром. В таких аппаратах течение реакционного потока имеет поршнеобразный характер. Перемешивание в таких реакторах имеет локальный характер и вызывается неравномерностью распределения скорости потока и его флуктуациями, а также завихрениями.

Классификация химических реакторов

3. Химические реакторы по режиму движения компонентов делятся на:

-реакторы идеального смешения (РИС) — реакторы, в которых осуществляется турбулентный гидродинамический режим. В них потоки реагентов смешиваются друг с другом и с продуктами химического превращения. Для идеального смешения характерно абсолютно полное выравнивание всех характеризующих реакцию параметров по объёму реактора.

-Реакторы смешения — это емкостные аппараты с перемешиванием механической мешалкой или циркуляционным насосом. Иногда в качестве способа перемешивания используется барботаж газообразного реагента через слой жидкой реакционной массы.

Основные требования к промышленным реакторам

- 1. Максимальная производительность и интенсивность работы;**
- 2. Высокий выход продукта и наибольшая селективность процесса. Они обеспечиваются оптимальным режимом работы реактора: температурой, давлением, концентрацией исходных веществ и продуктов реакции.**
- 3. Минимальные энергетические затраты на перемешивание и транспортировку материалов через реактор, а также наилучшее использование теплоты экзотермических реакций или теплоты, подводимой в реактор для нагрева реагирующих веществ до оптимальных температур.**

Основные требования к промышленным реакторам

4. Легкая управляемость и безопасность работы. Эти условия обеспечиваются рациональной конструкцией реактора и малыми колебаниями параметров технологического режима. Позволяющими легко автоматизировать работу реактора.

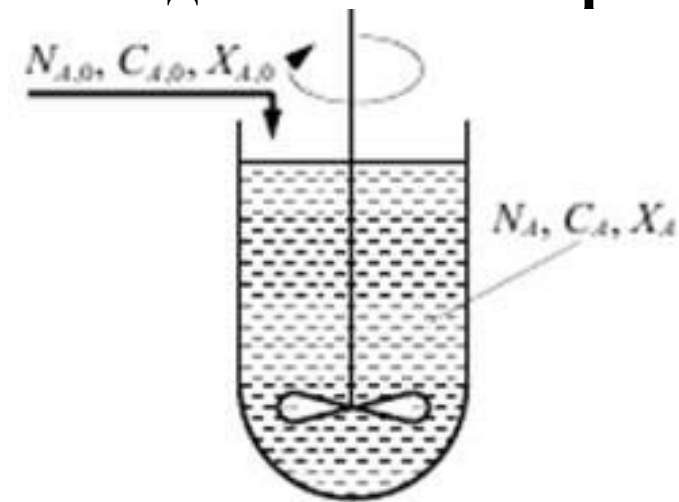
5. Низкая стоимость изготовления реактора и ремонта его. Это достигается простотой конструкции и применением дешевых конструкционных материалов: черных металлов, силикатных изделий, наиболее дешевых пластмасс.

6. Устойчивость работы реактора при значительных изменениях основных параметров режима (C , T , P , ω).

Реактор идеального смешения периодический

Этот реактор, называемый сокращенно РИС-П, представляет собой аппарат с мешалкой, в который периодически загружают исходные реагенты.

В таком реакторе создается весьма интенсивное перемешивание, поэтому в любой момент времени концентрация реагентов одинакова во всем объеме реактора и изменяется лишь во времени. По мере протекания химической реакции. Такое перемешивание можно считать идеальным. Отсюда и название реактора.



Реактор идеального смешения периодический

Периодические химические процессы по своей природе всегда являются нестационарными (неустановившимися), так как в ходе химической реакции изменяются параметры процесса во времени (например, концентрация веществ, участвующих в реакции, т. е. происходит накопление продуктов реакции).

Реакторы периодического действия просты по конструкции, требуют небольшого вспомогательного оборудования, поэтому они особенно удобны для проведения опытных работ по изучению химической кинетики. В промышленности же они обычно в малотоннажных производствах и для переработки относительно дорогостоящих химических продуктов. Большинство же промышленных процессов оформляется с использованием реакторов непрерывного действия.

Реакторы непрерывного действия

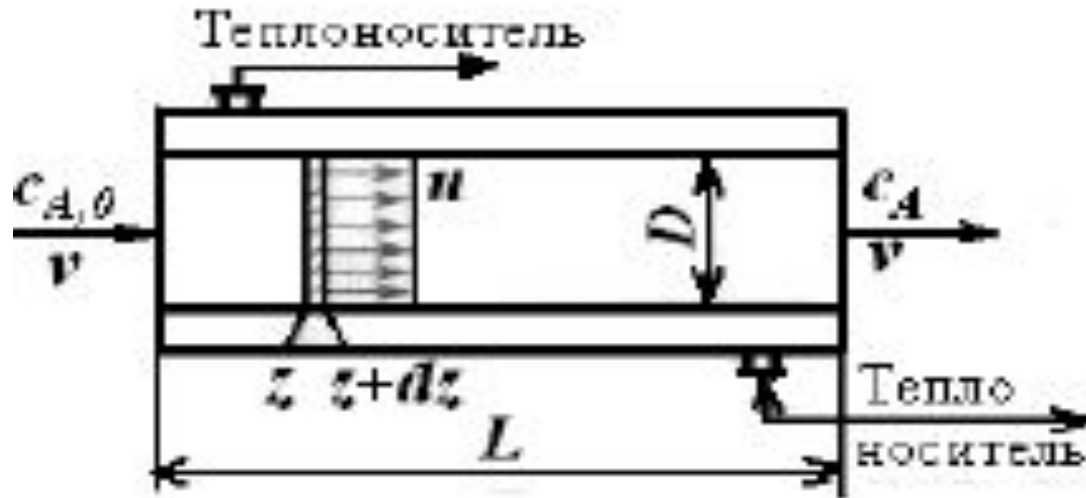
Реактор идеального вытеснения (РИВ)

Он представляет собой трубчатый аппарат. В котором отношение длины трубы L к ее диаметру d достаточно велико. В реактор непрерывно подаются исходные реагенты, которые превращаются в продукты реакции по мере перемещения их по длине реактора

Гидродинамический режим в РИВ характеризуется тем, что любая частица потока движется только в одном направлении по длине реактора, обратное (продольное) перемешивание отсутствует; отсутствует также перемешивание по сечению реактора. Предполагается, что распределение веществ по этому сечению равномерное, т. е. значения параметров реакционной смеси одинаковые.

Реакторы непрерывного действия

Реактор идеального вытеснения (РИВ)



4. Схема реактора идеального вытеснения

Каждый элемент объема реакционной массы dV_r движется по длине реактора, не смешиваясь с предыдущими элементами объема. И ведет себя как поршень в цилиндре, вытесняя все, что находится перед ним. Поэтому такой режим движения реагентов называется иногда поршневым или режимом полного вытеснения.

Реакторы непрерывного действия

Реактор идеального вытеснения (РИВ)

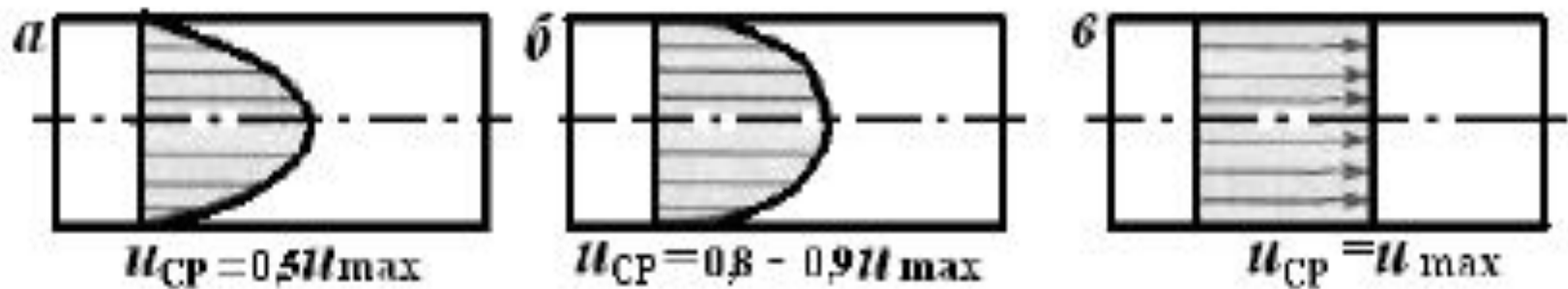
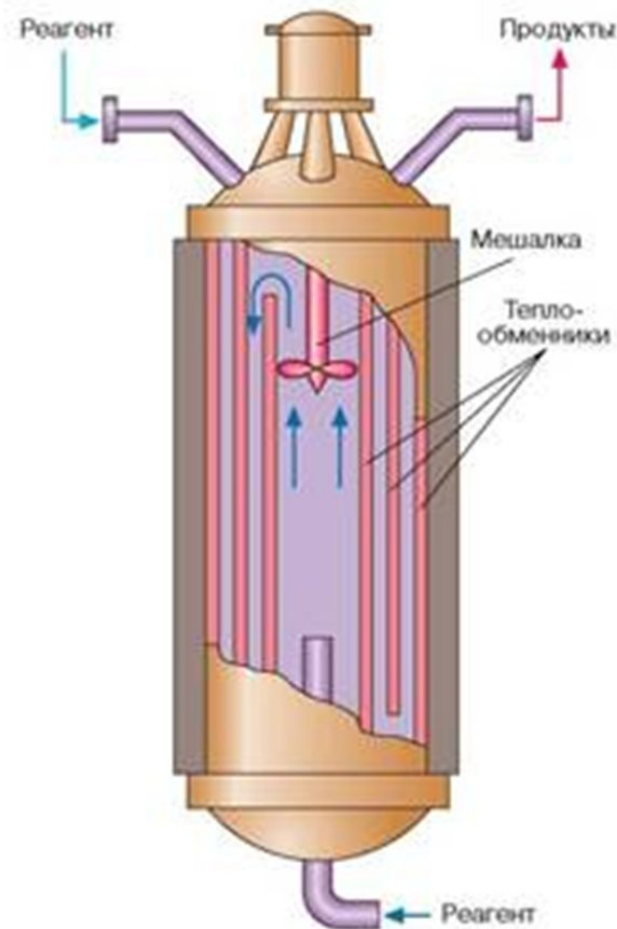
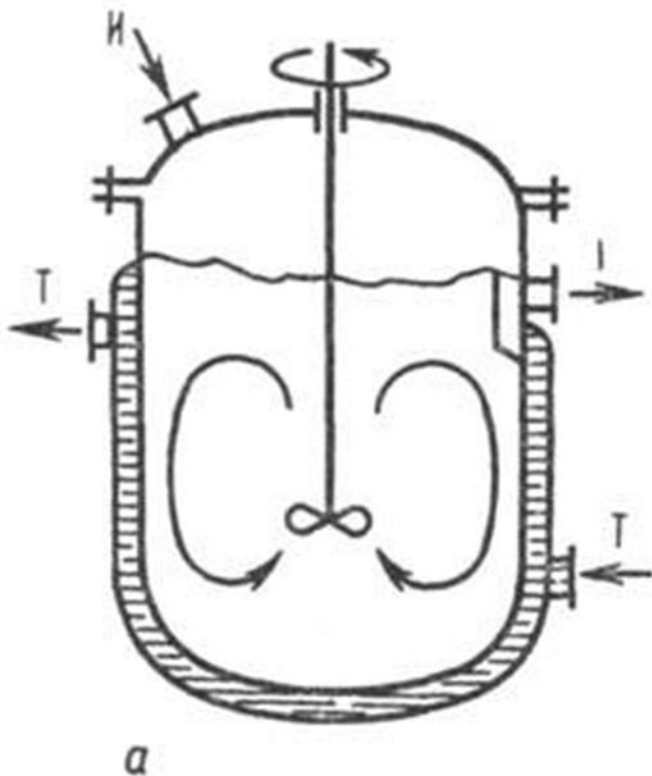


Рис. 5.5. Профили линейных скоростей потока при ламинарном (а), развитом турбулентном (б) и идеальном поршневом (в) режимах течения жидкости

Состав каждого элемента объема последовательно изменяется по длине реактора вследствие протекания химической реакции. Так, например, концентрация исходного реагента А постепенно меняется по длине реактора от начального C_{A0} до конечного значения C_A . Следствием такого режима движения реакционной смеси является то, что время пребывания каждой частицы в реакторе одно и то же.

Реакторы идеального смешения непрерывного действия

Реактор идеального смешения непрерывный (РИС-Н) представляет собой аппарат с мешалкой, в который непрерывно подают реагенты, и также непрерывно выводят из него продукты реакции



Реактор идеального смешения непрерывного действия

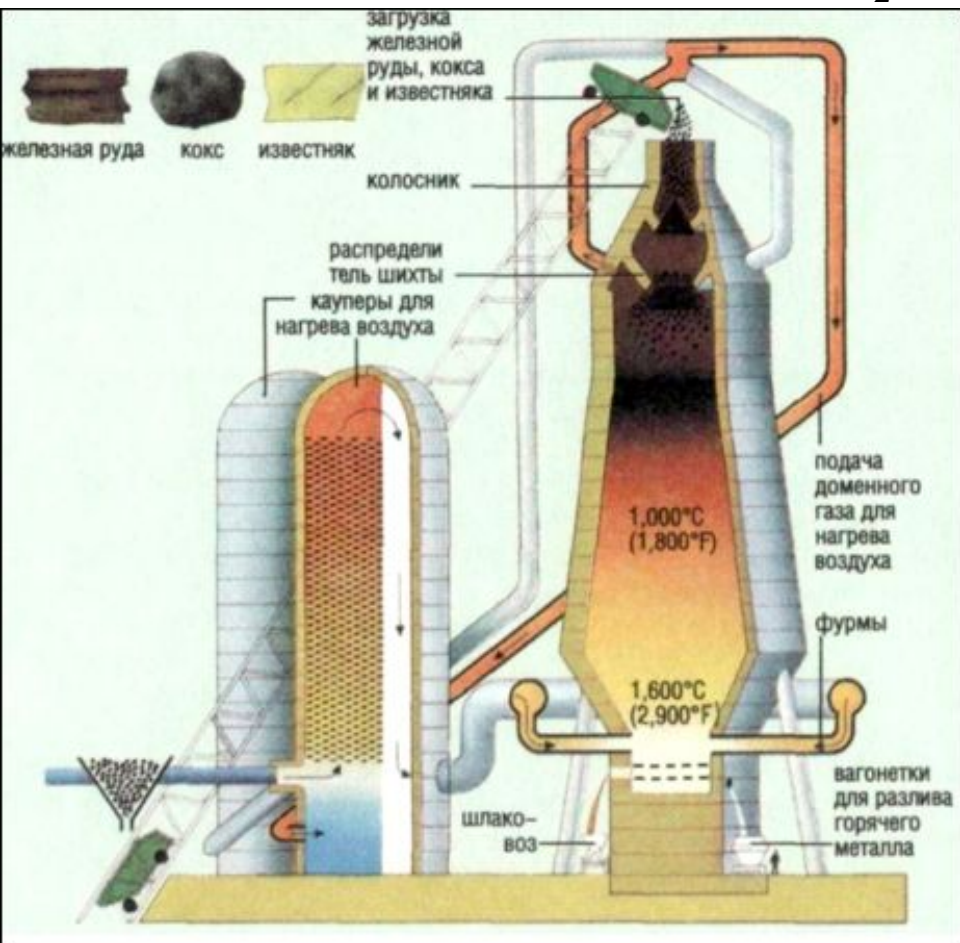
В РИС-Н наблюдается резкое изменение концентрации исходного реагента при входе в реактор в результате мгновенного смешения поступающей смеси с реакционной массой, уже находящейся в реакторе. Где концентрация исходного реагента значительно ниже, чем концентрация исходного реагента в поступающей смеси

Точка, соответствующая входу реагентов в реактор, нанесена на ось абсцисс правее начала координат, что дает более наглядное представление об изменении концентрации исходного вещества при входе реакционной смеси в реактор.

Благодаря тому, что в РИС-Н реакционная смесь мгновенно перемешивается, во всем объеме реактора одинакова концентрация исходного реагента и она тем ниже, чем больше время пребывания реагентов в реакторе. По этой же причине по всему объему реактора одинакова и степень превращения и скорость реакции.

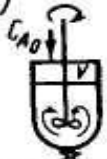
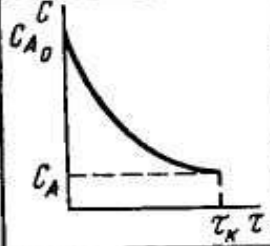
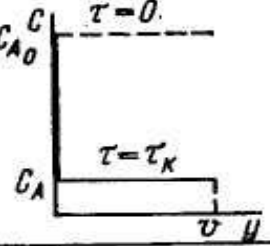
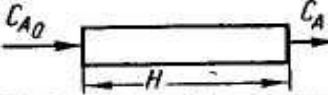
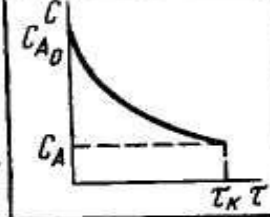
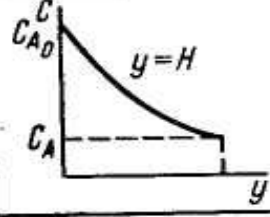

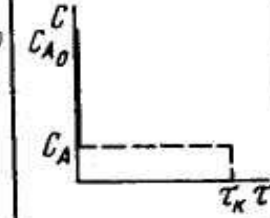
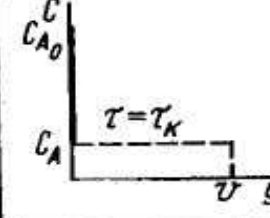
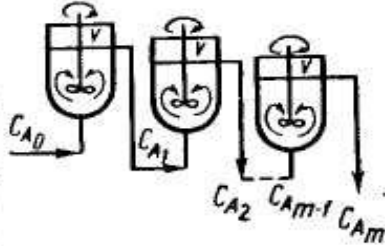
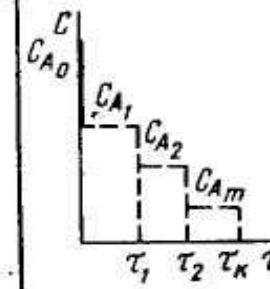
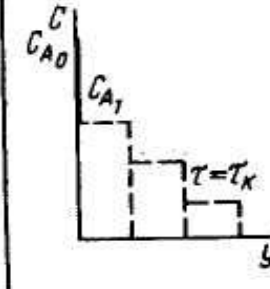
Реакторы полунепрерывного действия

Примером такого реактора может служить доменная печь, в которую непрерывно загружают твердую шихту. А готовый продукт (чугун) выпускают периодически. В печи разложения CaCO_3 с получением CaO и CO_2 , наоборот, шихта (уголь и CaCO_3) загружается периодически, а продукты реакции (CaO и CO_2) выводятся непрерывно.



Так же осуществляется процесс в газогенераторах: уголь (шихта) загружается периодически, а продукт реакции — генераторный газ — выводится непрерывно.

Сравнение реакторов различных типов

Реактор	Распределение концентраций		Характеристическое уравнение
	по времени	в пространстве реактора	
Полного смешения периодического действия (нестационарный) 			$\tau = C_{A0} \int_0^{x_A} \frac{dx_A}{u_A}$
Идеального вытеснения (стационарный) 			$\tau = C_{A0} \int_0^{x_A} \frac{dx_A}{u_A}$
Полного смешения проточный (стационарный) 			$\tau = \frac{C_{A0} x_A}{u_A}$
Каскад реакторов полного смешения 			$\tau_m = \frac{C_{Am-1} - C_{Am}}{u_m} m$

Сравнение реакторов различных типов

При прохождении реакционной смеси через реактор идеального вытеснения уменьшается концентрация исходных реагентов C_{A0} по высоте (длине) реактора и в соответствии с этим снижается движущая сила процесса, а при постоянстве других параметров — и скорость процесса.

Аналогичная картина наблюдается в реакторах периодического действия. Средняя движущая сила процесса ΔC в проточных реакторах смешения всегда ниже, чем в реакторах периодического действия и в реакторах вытеснения. Эта разница будет тем большей, чем выше степень превращения и порядок реакции.

Сравнение графиков показывает, что при прочих равных условиях для достижения заданной степени превращения потребовалось бы больше времени при использовании проточного реактора смешения.

Сравнение реакторов различных типов

Однако константа скорости процесса в реакторах смешения, как правило значительно больше, чем в реакторах вытеснения благодаря изотермическому режиму. Вследствие перемешивания увеличивается поверхность контакта фаз F в гетерогенных системах.

В реакторах смешения, как правило, эффективнее, чем при режиме вытеснения, протекают реакции с высокими концентрациями реагентов и при больших тепловых эффектах реакции. Интенсивное перемешивание улучшает условия теплопередачи; уменьшаются теплообменные поверхности для отвода (или подвода) теплоты от реагирующей системы.

Сравнение реакторов различных типов

С другой стороны перемешивание может вызвать нежелательное истирание твердых реагентов, эрозию аппаратуры, усиление уноса из реактора измельченных твердых частиц или капель жидкости. Энергетические затраты в реакторах смешения могут быть в несколько раз выше, чем при режиме вытеснения.

Таким образом, для выбора модели реактора необходимо составить все положительные и отрицательные стороны предполагаемых типов реакторов и остановиться на такой модели, которая обеспечит в конечном счете наиболее экономическое осуществление процесса.

Реакторы с различным тепловым режимом

Классификация реакторов с различным тепловым режимом.

Температура существенно влияет на результат химического процесса в целом и особенно на химическую реакцию. Поэтому для создания в реакторе оптимальных температурных условий, в частности определенного профиля температур, необходимо учитывать тепловой эффект реакции. Подвод или отвод теплоты, теплофизические свойства реагирующих веществ, температуры на входе и выходе из реактора, а также гидродинамическую обстановку в нем. Каждый тип ректора может работать в трех режимах: *адиабатическом, изотермическом и политропическом.*

Классификация реакторов с различным тепловым режимом

Политропическими называют реакторы, которые характеризуются частичным отводом теплоты реакции или подводом теплоты извне в соответствии с заданной программой изменения температуры по высоте реактора вытеснения или неполного смешения. Реакторы такого типа называют также программно-регулируемыми.

Политропичны во времени реакторы полного смешения периодического действия. Политропический режим наблюдается в реакторах следующих типов: шахтных печах, доменных печах, известковообжигательных печах и т.д. Подобный сложнополитермический режим работы имеет большинство насадочных башен, применяемых в промышленности для сорбционных и десорбционных процессов, т.к. процессы абсорбции сопровождаются теплообменом между газом и жидкостью, возможным испарением растворителя в нижней части башен с последующей конденсацией в ее верхних участках.

Классификация реакторов с различным тепловым режимом

Изотермическими называют реакторы, в которых процесс протекает при постоянной температуре во всем объеме реактора. Изотермичность достигается прежде всего весьма интенсивным перемешиванием реагентов, в результате которого температура во всех точках реактора становится одинаковой. Это происходит в реакторах с сильным перемешиванием реагентов, близким к полному смешению. Необходимая температура в реакторе устанавливается или благодаря подводу или отводу теплоты реакции, или за счет регулирования температуры поступающей реакционной смеси. Изотермический режим приближенно достигается и в реакторах вытеснения при протекании в них процессов с малыми тепловыми эффектами или при весьма низкой концентрации реагентов.

Классификация реакторов с различным тепловым режимом

При моделировании промышленных реакторов к полностью изотермическим относятся все жидкостные (Ж, Ж-Ж, Ж-Т) реакторы с механическими, пневматическими и струйно-циркуляционными перемешивающими устройствами. Изотермический режим наблюдается на полке (тарелке) пенного и барботажного аппаратов небольших размеров, а также в свободном взвешенном (кипящем) слое твердого зернистого материала. Близок к изотермическому режим в адсорбционных и адсорбционных аппаратах для очистки негорячих газов от вредных примесей малой концентрации.

Классификация реакторов с различным тепловым режимом

Адиабатическими называют реакторы идеального вытеснения, работающие без подвода и отвода теплоты в окружающую среду через стенки реактора или при помощи теплообменных элементов. Вся теплота, выделяемая (поглощаемая) в реакторе, аккумулируется реакционной смесью.

По модели адиабатического реактора вытеснения рассчитывают контактные аппараты с фильтрующим слоем катализатора. Эта модель применима к расчету камерных реакторов. В которых протекают гомогенные реакции, например для печи синтеза хлороводорода. Прямоточные абсорберы с изолирующей футеровкой. В которых газ движется сверху вниз. Параллельно разбрызгиваемой жидкости, тоже близки по температурному режиму к адиабате.

Уравнение теплового баланса

Основой для расчета реакторов с учетом теплового режима служит уравнение теплового баланса, составленное обычно на единицу времени. В общем виде это уравнение может быть записано так:

$$Q_{np} = Q_{расх}$$

Для экзотермической реакции приход и расход тепла можно выразить в виде:

$$Q_{np} = Q_{реаг} + Q_{х.р}$$
$$Q_{np} = Q_{нак} + Q_{прод} + Q_{т}$$

где $Q_{реаг}$ - количество тепла, вносимого исходными реагентами;

$Q_{х.р}$ - количество тепла, выделяющегося при химической реакции;

$Q_{нак}$ - количество тепла, накапливающегося в реакторе;

$Q_{прод}$ - количество тепла, уносимого продуктами;

$Q_{т}$ - количество тепла, выводимого теплообменом

Уравнение теплового баланса

Подставив эти значения в уравнение (1), находим:

$$Q_{\text{нак}} = -(Q_{\text{прод}} - Q_{\text{реак}}) - Q_m + Q_{\text{х.р}}$$

где $(Q_{\text{прод}} - Q_{\text{реак}}) = Q_{\text{конв}}$

Здесь $Q_{\text{конв}}$ — обозначает количество тепла, выносимого конвективным потоком, с учетом которого получим

$$Q_{\text{нак}} = -Q_{\text{конв}} - Q_m + Q_{\text{х.р}}$$

Полученное уравнение теплового баланса может принимать различную форму в зависимости от типа реактора и теплового режима процесса.

Условия поддержания устойчивого режима работы реакторов

Решить уравнение теплового баланса — значит найти переменные параметры, при которых будет соблюдаться равенство между приходом тепла и его расходом ($Q_{пр} = Q_{расх}$). Однако в производственных условиях обычно необходимо, чтобы это равенство соблюдалось при возможно более высокой степени превращения и при условии обеспечения устойчивой работы реактора.

Понятие устойчивости формулируется следующим образом: система считается устойчивой, если после наложения какого-либо возмущения она самопроизвольно возвращается в прежнее состояние при снятии этого возмущения.

Условия поддержания устойчивого режима работы реакторов

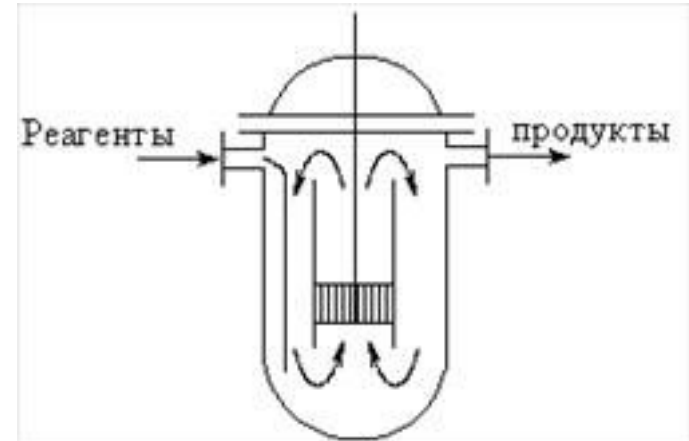
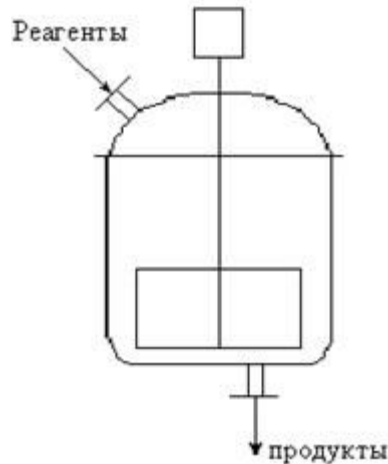
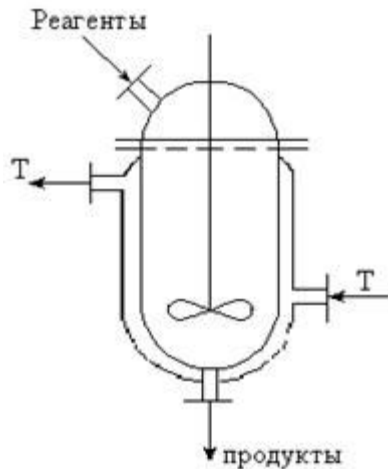
При стационарном (установившемся) режиме реактора все параметры, характеризующие его работу, не изменяются во времени, т.е. отсутствуют возмущения. Однако практически всегда могут иметься хотя бы небольшие возмущения. Прежде всего изменения состава и температуры поступающей реакционной смеси, а также изменения давления, степени перемешивания и активности катализатора внутри реактора, которые вызывают изменение стационарного состояния. Поэтому для оценки работоспособности реактора необходимо выяснить, какие изменения стационарного состояния возможны и не приведут ли они к возникновению неустойчивости. При заданных начальных условиях возможно существование нескольких стационарных режимов химических реакторов, соответствующих разным значениям основных параметров технологического режима.

Условия поддержания устойчивого режима работы реакторов

Рассмотрим *температурную устойчивость* реакторов на примере необратимой экзотермической реакции, протекающей в реакторе полного смешения. При низких температурах скорость реакции мала, а потому и выделение теплоты невелико. С повышением температуры резко возрастает скорость реакции и соответственно скорость выделения теплоты. При этом быстро падает концентрация реагентов, что замедляет реакцию. При степени превращения, приближающейся к единице или к равновесной, скорость реакции, а соответственно и выделение теплоты стремятся к нулю. При температуре выше и ниже оптимального значения превращение исходного реагента снижается и потому регулирование и контроль теплоотвода имеет решающее значение для обеспечения эффективной работы реактора. Устойчивость технологического режима реактора можно определять его чувствительностью при изменении того или иного параметра.

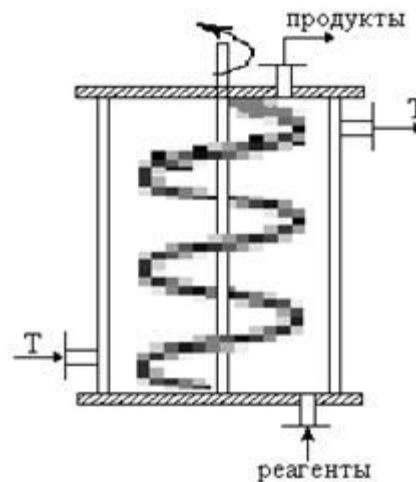
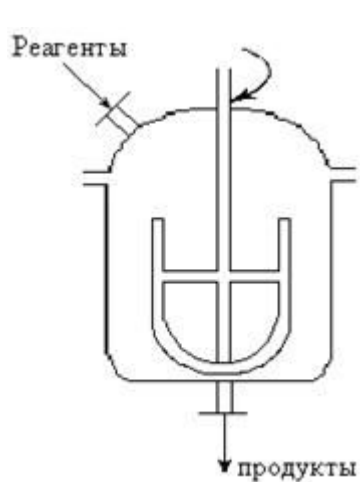
Промышленные химические реакторы

Реакторы для гомогенных процессов



Рассмотрим наиболее типичные реакторы для гомогенных процессов. Среди них различают емкостные и трубчатые. Емкостные аппараты – периодические и проточные – снабжены мешалками, конструкции которых разнообразны: пропеллерные (рис. а), лопастные (б), турбинные с центральной трубой (в), обеспечивающие наиболее интенсивное перемешивание реакционной массы.

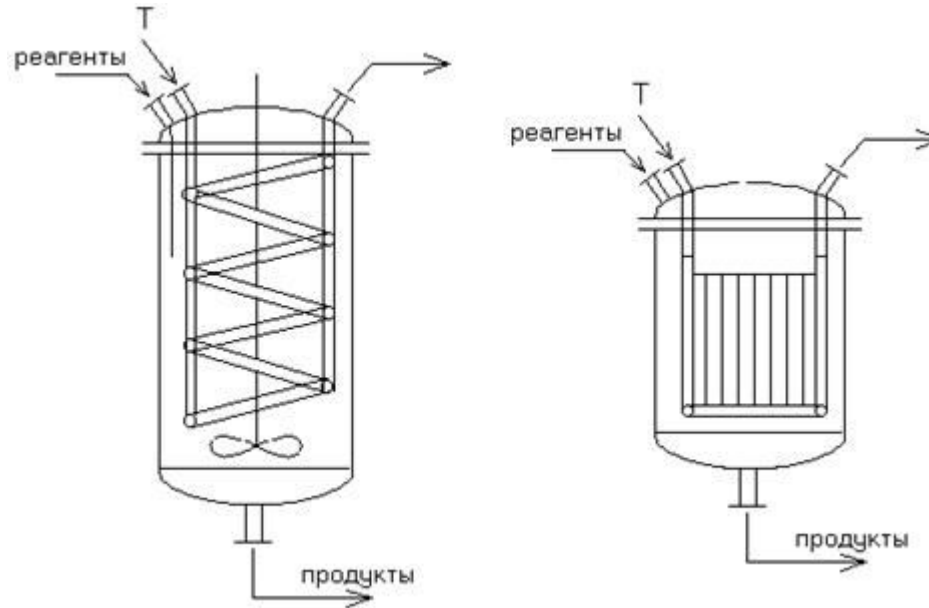
Реакторы для гомогенных процессов



Особый тип мешалок – для вязких жидкостей – рамные и червячные (г,д).
Реакторы а, б, г) используются в периодических процессах, реакторы в), д) – в непрерывных. В то же время реактор а) может быть приспособлен для непрерывного режима, однако в этом случае необходимо изменить порядок подачи реагентов и отвода продуктов реакции: снизу – реагенты, сверху – продукты. В последнем случае необходимо организовать отвод через боковой штуцер.

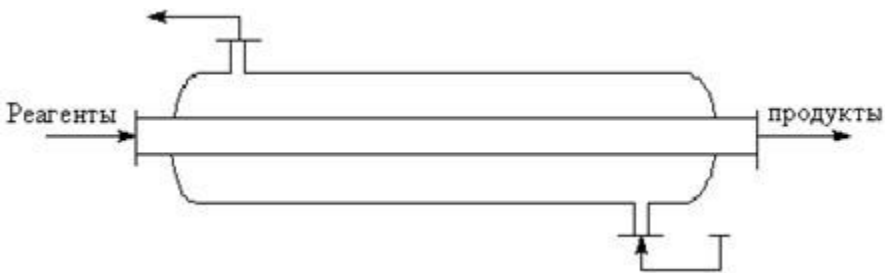
Реакторы, изображенные на рис. а и в, используют во многих процессах органического синтеза, на рис. б — в производстве красок, на рис. г и д — в производстве полимеров.

Реакторы для гомогенных процессов



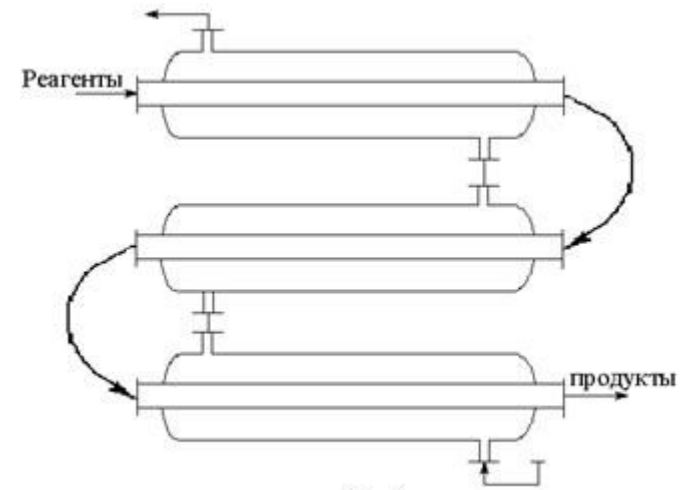
В случае необходимости подвода или отвода тепла предусматриваются теплообменные устройства в реакторах. В качестве таковых используются рубашки или теплообменники внутри реактора в виде змеевиков или секций трубок (е)

Реакторы для гомогенных процессов

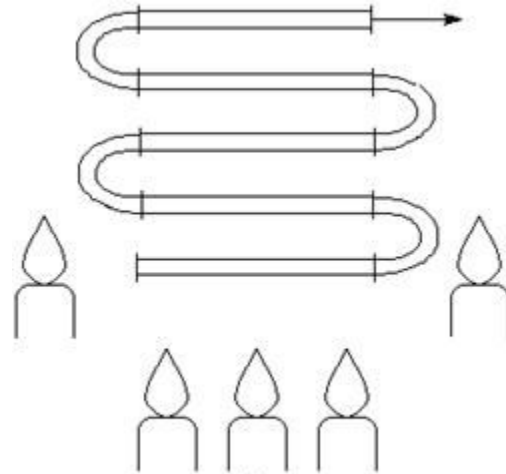
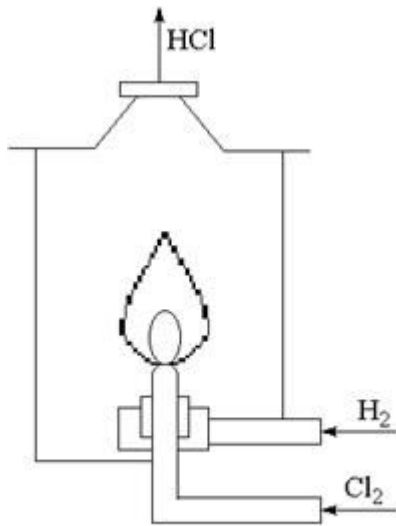


Типичным примером трубчатого реактора является реактор типа "труба в трубе" (ж).

В таком реакторе теплоноситель циркулирует через рубашку реактора. Выбор пространства для теплоносителя и реакционной массы определяется тем, какой из этих потоков быстрее загрязняет пространство. Для того, который загрязняет быстрее, выбирается внутренняя труба, т.к. ее проще прочищать. Если требуется достаточно большое время пребывания реакционного потока в зоне реакции, то выбирается многосекционный аппарат "труба в трубе" (з).



Реакторы для гомогенных процессов



В высокотемпературных процессах (например) в термическом крекинге углеводородов проще помещать секцию трубок в камеру сгорания, в которой аккумулируется тепло, необходимое для обеспечения необходимой температуры. Такие реакторы называются *трубчатыми печами*.

Реакторы для гомогенных процессов

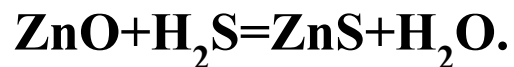
В трубчатом реакторе (рис. ж) теплоноситель циркулирует в рубашке. Реакторы, схемы которых даны на рис ж и з, используют в производстве 3-хлорпрена (рис. ж), синтеза гликоля (рис.б, з). Трубчатые реакторы используют для термического крекинга в нефтепереработке. Реактор в виде змеевика помещают в камеру горения; такие реакторы называют трубчатой печью. Синтез HCl из Cl_2 и H_2 проводят в полом пламенном реакторе. К гомогенным твердофазным реакторам можно отнести печь коксования. Сырье (уголь) загружают в камеры коксования, обогреваемые снаружи дымовым газом, циркулирующим по вертикальным отопительным каналам. Газообразные продукты непрерывно удаляются.

Реакторы для гетерогенных процессов

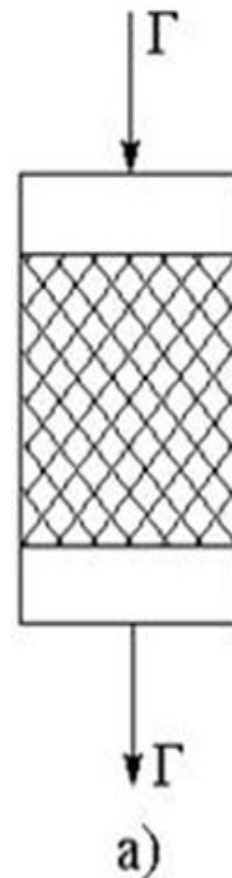
Реакторы для гетерогенных процессов подразделяются на реакторы для *гетерогенных процессов с твердой фазой*, реакторы для *газожидкостных гетерогенных процессов*, реакторы для *гетерогенно-каталитических процессов*.

Реакторы для гетерогенных процессов с твердой фазой.

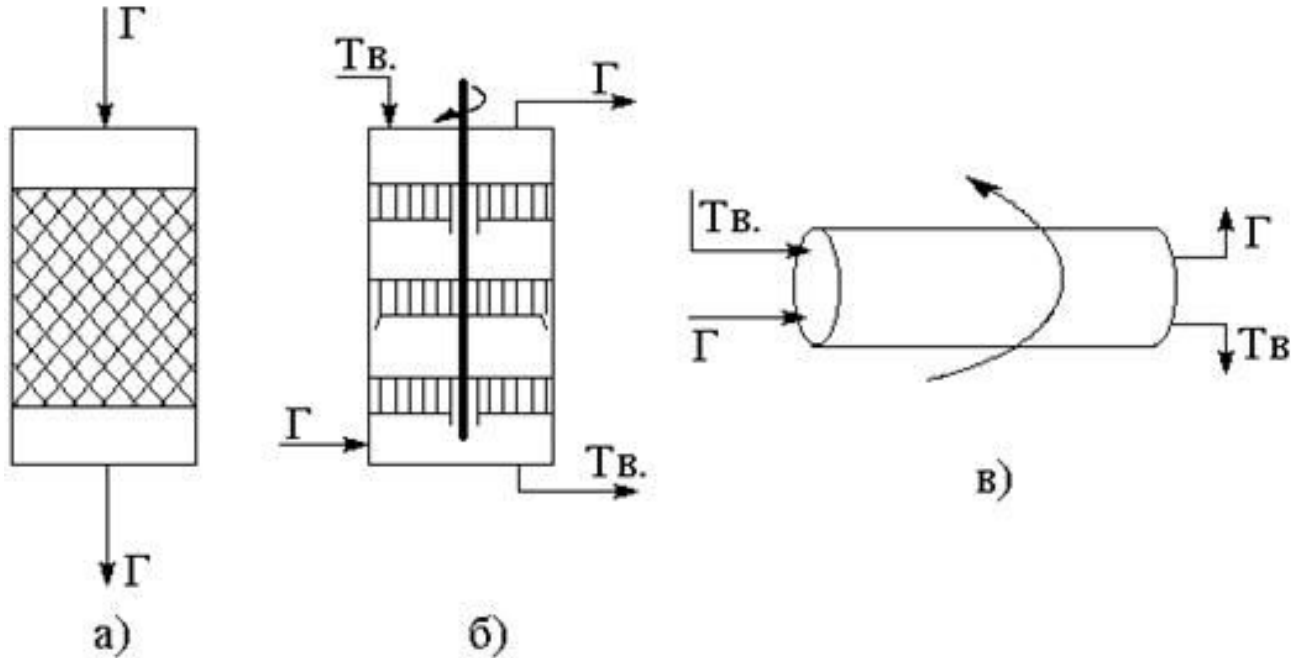
В простейшем реакторе (рис. а) твердое вещество загружают в реактор. А газ циркулирует через неподвижный слой. В таком реакторе проводят многие процессы адсорбционной очистки газов и жидкостей, например очистку природного газа от серосодержащих соединений (от «серы»). В начале их все гидрируют до H_2S , который затем поглощают оксидом цинка:



Поглощение H_2S протекает в сравнительно узкой зоне слоя, послойно. После появления «проскока» H_2S (неполного его поглощения из-за расходования сорбента) поглотитель заменяют.



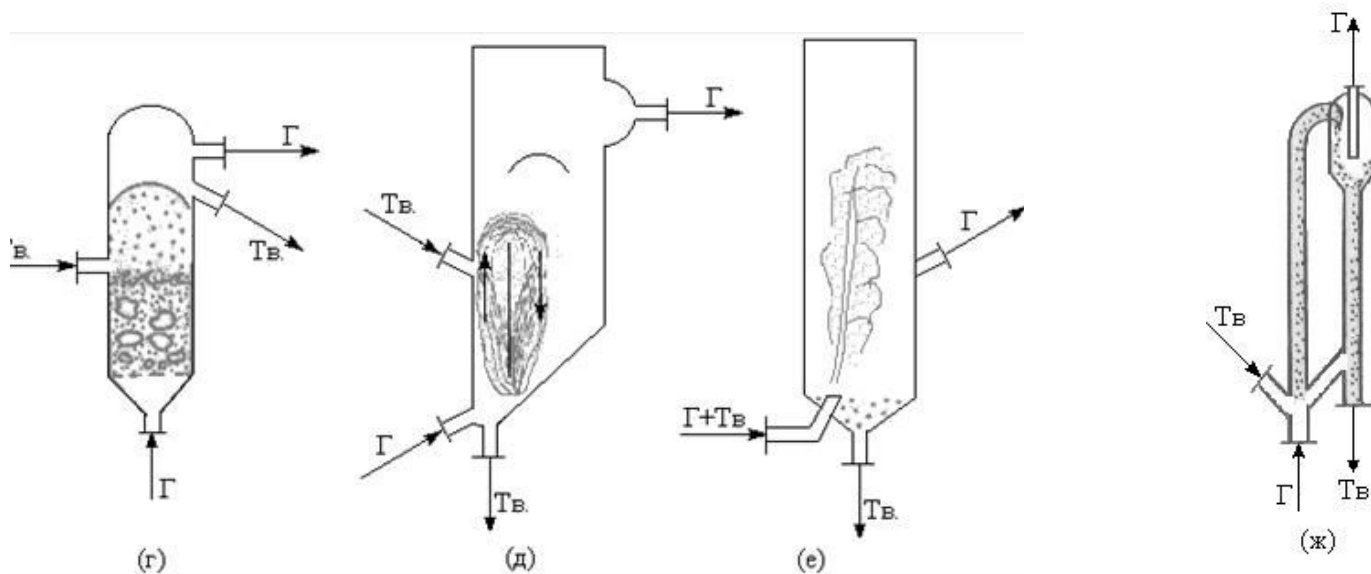
Реакторы для гетерогенных процессов



Недостаток такого процесса – его цикличность. Для организации непрерывного процесса обновления твердой фазы предлагается процесс, осуществляемый в многоколоночном реакторе, снабженном скребком на каждой полке, которые передвигают материал по полке и пересыпают его с одной полки на другую (б). Так устроен реактор обжига серного колчедана. Удобен и распространен процесс непрерывного движения твердого материала на вращающейся наклонной трубе (в). Классическим примером является вращающаяся печь получения клинкера в цементном производстве. Такого же типа реактор аммиачный нейтрализатор в производстве двойного суперфосфата.

Реакторы для гетерогенных процессов

Химические процессы «газ-твердое» протекают много интенсивнее при дроблении твердого реагента. В описанных выше реакторах это сделать практически невозможно. С уменьшением размера частиц резко возрастает гидравлическое сопротивление слоя, возрастает вероятность их слипания, комкования. Обойти это ограничение можно в аппаратах со взвешенным слоем твердых частиц — в псевдооживленном (рис. г), или фонтанирующем (рис. д) слоях, с распылительным инжектированием твердого материала через специальную форсунку (рис. ж) в режиме пневмотранспорта (рис. з), в котором мелкие твердые частицы пролетают реактор вместе с газом.



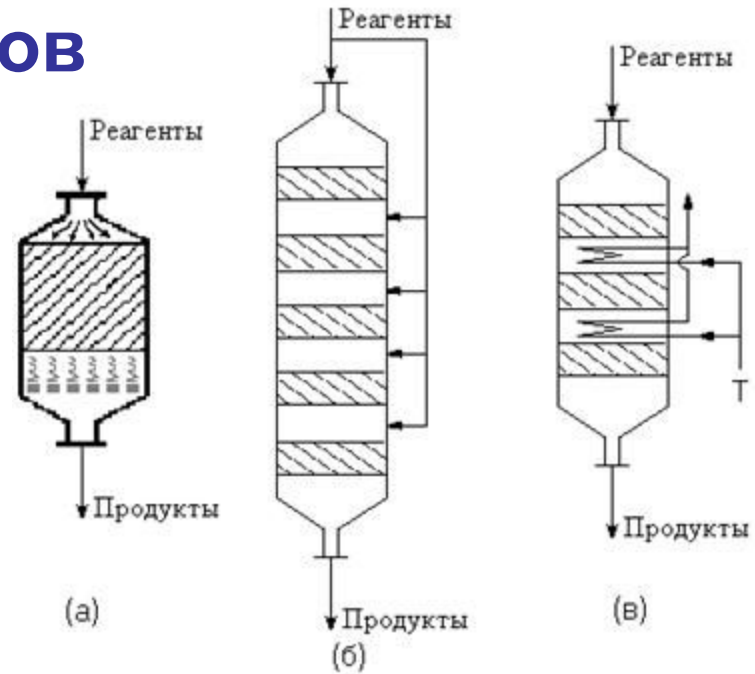
Реакторы для гетерогенных процессов

Основные недостатки этих способов — эрозия стенок аппарата, дробление частиц, унос пыли и загрязнение ею газового потока. В потоке жидкости твердые частицы легче образуют однородную смесь (суспензию) из-за более близких плотностей компонентов, чем в системе «газ-твердое». Поэтому нередко применяют реактор с мешалкой, подобный изображенному на рис. б, для гомогенного процесса. Такой реактор типичен для кислотного разложения апатита.

Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов

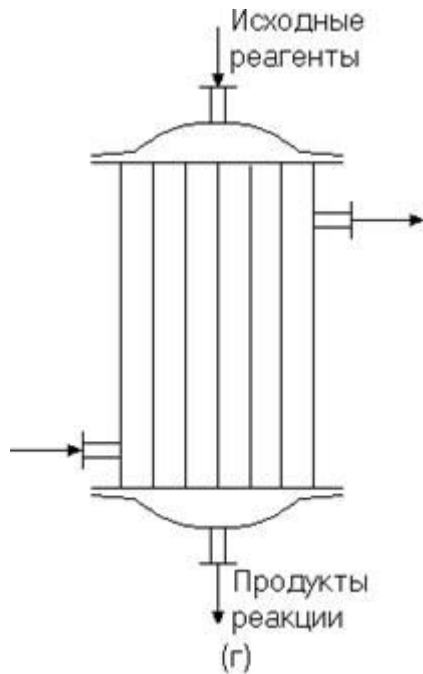
Наиболее распространенным типом реакторов являются реакторы с неподвижным слоем катализатора. Для адиабатического режима катализатор в виде частиц различной формы засыпают в аппарат (а). Характерный размер частиц (зерен) катализатора составляет 3-8 мм. Слой располагается на жесткой опорной решетке, выдерживающей массу катализатора и перепад давления в слое. Масса загруженного катализатора может составлять тонны и даже десятки тонн в крупнотоннажных производствах (серной кислоты, аммиака). Чтобы мелкие зерна катализатора не проваливались и не закрывали отверстия в опорной решетке, на нее обычно насыпают тонкий слой крупнокускового материала, а сверху – катализатор.

Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов



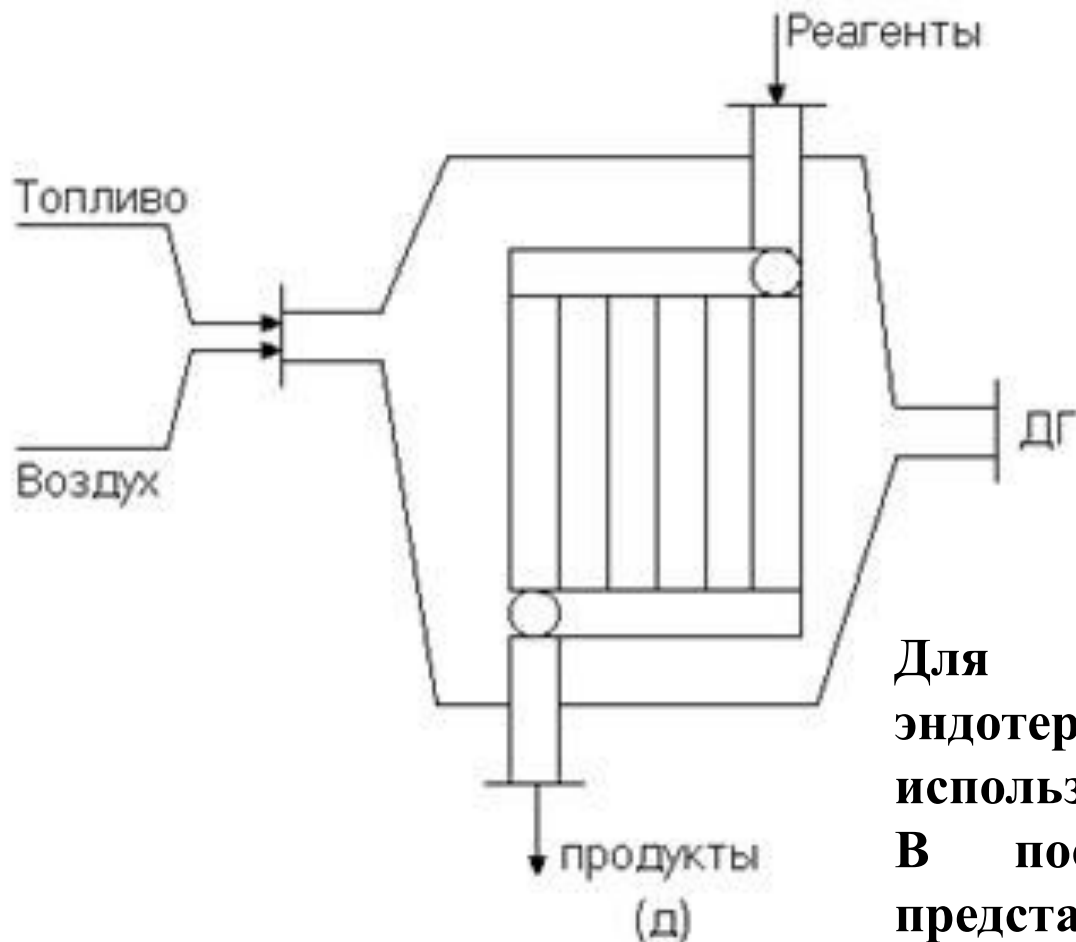
Катализатор насыпают "в навал", после чего требуется тщательное выравнивание слоя для обеспечения равномерного прохождения через него реакционной смеси. Использование варианта адиабатического реактора часто приводит к большим перепадам температур по высоте каталитического слоя и существенного отклонения средней температуры от ее оптимального значения. Для того, чтобы приблизить температурный режим к оптимальному используются многотоннажные (многосекционные) реакторы, в которых выравнивание температурного режима осуществляют съемом или подводом тепла с помощью теплообменных устройств между секциями или путем подачи между секциями захлажденного или перегретого реагента (компонента) (б,в).

Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов



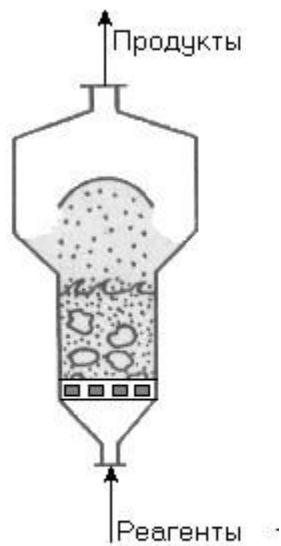
Часто необходим отвод тепла непосредственно из реакционной зоны. С этой целью используют реакторы типа кожухотрубных теплообменников – универсальный тип каталитического реактора (г). Обычно в трубки загружают катализатор, а в межтрубное пространство поступает теплоноситель. Если необходимо снимать тепло, то в межтрубное пространство снизу поступает конденсат, а сверху отводится водяной пар. В другом варианте в межтрубном пространстве циркулирует солевой расплав – нитрит-нитратная смесь – $\text{NaNO}_3\text{-NaNO}_2\text{-KNO}_3$. Аккумулированное им тепло далее используется для генерирования водяного пара. Диаметр трубок обычно невелик, так как объем тепла лимитируется теплопроводностью в каталитическом слое и при большом диаметре следует ожидать высоких градиентов температур по сечению каталитического слоя.

Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов



Для обеспечения теплотой эндотермических процессов используют горячие дымовые газы. В последнем случае реактор представляет собой трубчатую печь (д). Отводить тепло реакции можно не только теплоносителем, но и свежей реакционной смесью.

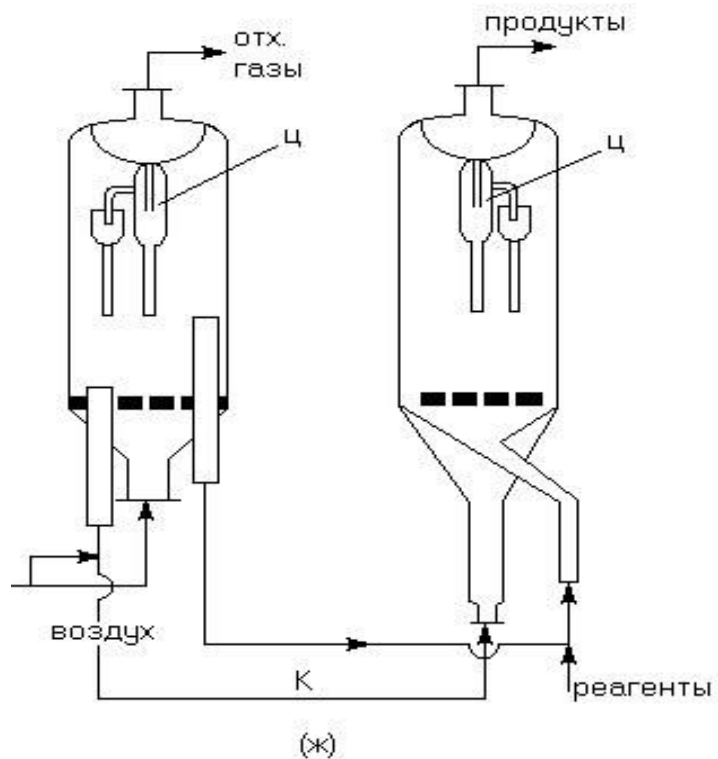
Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов



(e)

Другая группа реакторов – со взвешенным (кипящим) или восходящим слоем катализатора. При подаче реакционной смеси снизу слоя с достаточной скоростью твердые частицы будут витать в воздухе, не уносясь с ним (e); в этом случае применяют частицы не крупнее 1 мм. Это обеспечивает полное использование их внутренней поверхности. Циркулирующие частицы выравнивают температуру в слое – процесс в нем протекает практически изотермически. Интенсивное движение частиц обеспечивает хороший теплоотвод – коэффициент теплоотдачи от кипящего слоя более чем на порядок превышает таковой от неподвижного слоя. Подвижность каталитического слоя дает возможность организовать течение твердых частиц через реактор, что существенно для процесса с меняющейся активностью катализатора. Благодаря этому можно организовать непрерывный транспорт его из зоны реакции в зону регенерации и обратно.

Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов



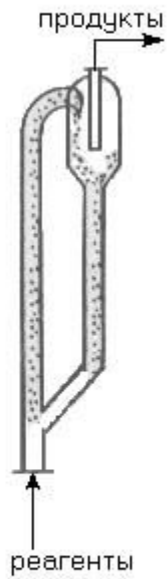
В целом такая система "реактор – регенератор" обеспечивает непрерывность процесса в целом. Такой тип реакционного узла можно организовать в процессе каталитического крекинга нефтепродуктов, в котором катализатор быстро закоксуывается, теряя свою активность. Его непрерывно выводят из реактора в регенератор (ж), где происходит "выжигание" кокса и восстанавливается активность катализатора.

Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов

При организации псевдооживленного слоя часть газа проходит слой в виде пузырей. Коэффициент массопередачи между пузырями и остальной частью слоя невысокий - фактически образование пузырей газа – это образование байпасных потоков. Это нежелательное явление, т.к. в пузырях реакция не идет и это в целом снижает производительность. Устраняется это явление путем разбивки пузырей. Это осуществляется специальной массообменной насадкой, например, в виде проволочных спиралей. Другой способ заставить работать пузыри – добавить в катализатор очень мелкую фракцию. Такая катализаторная "пыль" попадает в пузыри, где частично будет протекать реакция.

Циркуляция частиц в псевдооживленном слое вызывает истирание катализатора. Для очистки газа от пыли после реактора устанавливают циклоны.

Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов



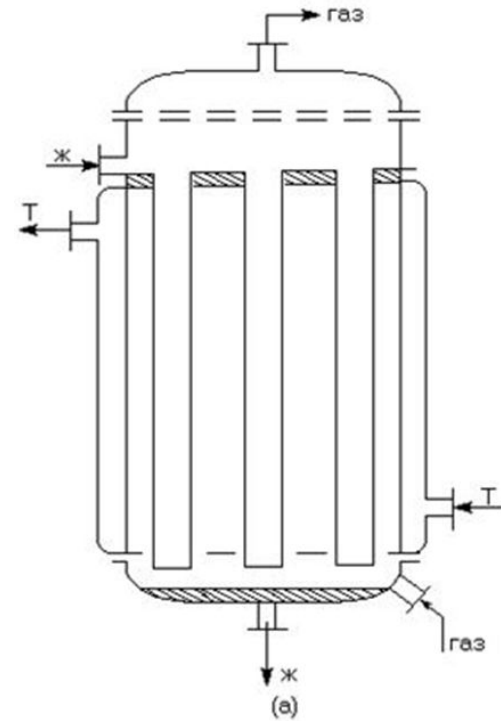
(3)

Если скорость газового потока будет такой, что твердые частицы будут увлекаться им, то реализуется режим пневмотранспорта (3) и реакция в восходящем потоке катализатора. Такая организация процесса эффективна для быстрых реакций – т.к. время прохождения реакционной смеси в длинном узком реакторе небольшое. Теплота реакции идет не только на нагрев (охлаждение) реакционной массы, но и на нагрев (охлаждение) летящего с ней твердого катализатора, теплоемкость которого в 3000-600 раз больше теплоемкости газа. Процесс протекает почти изотермически. Отделив катализатор в циклоне, его нагревают или охлаждают в отдельном аппарате и возвращают в процесс.

Реакторы для гетерофазных процессов

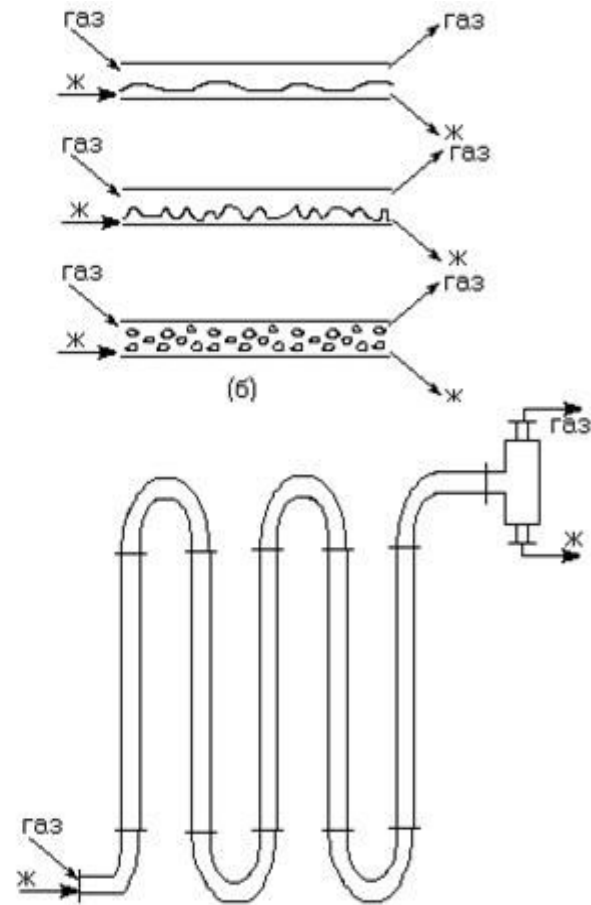
Принципиально взаимодействие газа с жидкостью осуществляют тремя способами: прямоточное или противоточное движение сплошных потоков газа и жидкости; барботаж газа через жидкость (газ диспергирован в объеме жидкости); разбрызгивание жидкости в газе (жидкость диспергирована в объеме газа).

В трубчатом реакторе (а) жидкость стекает по стенкам трубок и контактирует со встречным потоком или попутным потоком газа. Это наиболее организованный процесс, т.к. здесь строго поддерживается поверхность контакта фаз, равная поверхности трубок. Тепловой режим поддерживается регулированием температуры трубок. Обычно такие реакторы используют в малотоннажных производствах тонкого органического и неорганического синтеза. Эти реакторы характеризуются устойчивостью гидродинамического и температурного режимов, однако у них низкая производительность из-за низкой поверхности контакта фаз.



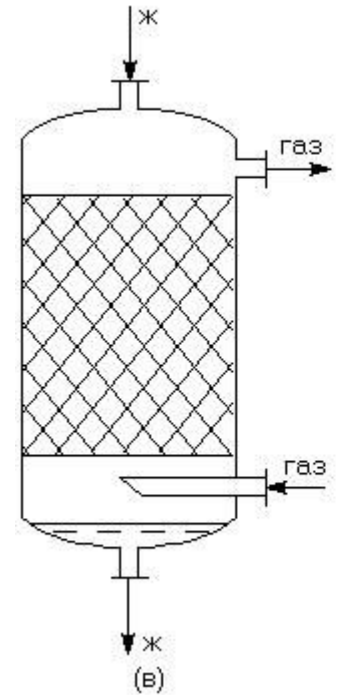
Реакторы для гетерофазных процессов

Более интенсивное взаимодействие фаз достигается в спутном (движущемся в одном направлении) газожидкостном потоке (рис. б). В зависимости от скорости потоков возможны различные режимы течения. На схеме показаны: полное расслоение фаз; отдельно течение с сильно возмущенной развитой поверхностью контакта фаз; хорошо перемешанный газожидкостной поток. Такие реакторы компактны даже при необходимости большого времени реакции — их делают в виде вертикального или горизонтального змеевика, схематически показанного на рис. б. Такого типа реактор используется в производстве полиэтилена и окисления этилена в ацетальдегид.



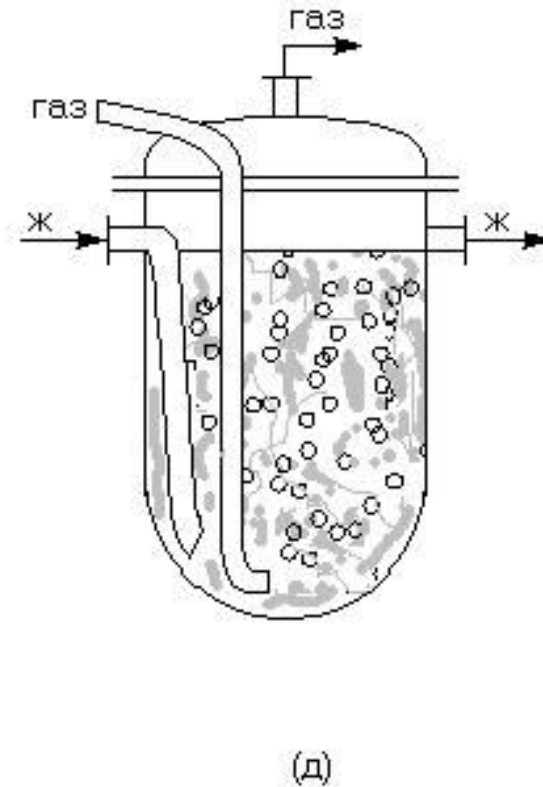
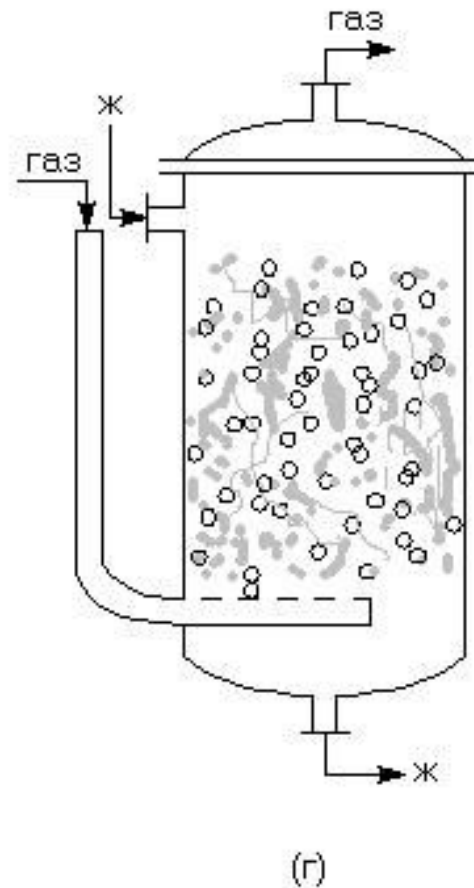
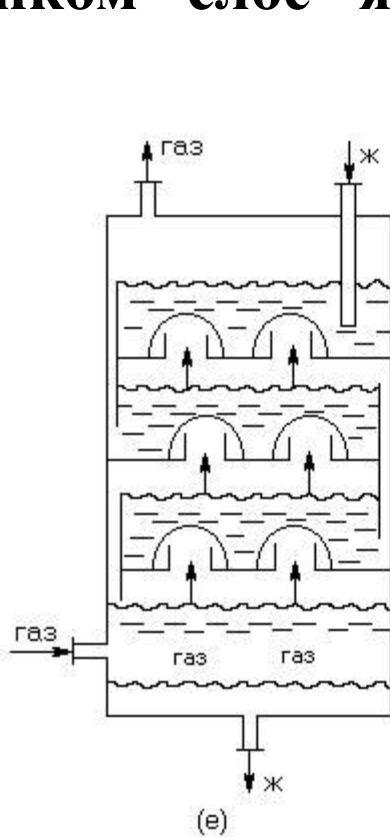
Реакторы для гетерофазных процессов

Более распространены насадочные реакторы (рис.8, в). В аппарат засыпана насадка — сравнительно небольшие элементы, по поверхности которых стекает жидкость, а в пространстве между ними, как правило, противотоком движется газ. Насадка — кольца или элементы другой формы размеров (в среднем 10-50 мм). Взаимодействие фаз достаточно интенсивное. При достаточно большом газовом потоке последний захватывает жидкость, препятствуя ее стеканию.



Реакторы для гетерофазных процессов

Простейшее взаимодействие жидкости и газа — барботаж последнего через жидкость (рис. г, д) и разбрызгивание жидкости в газе (рис. е). Мелкие пузыри, размер которых зависит от выходного отверстия в барботере удаётся сохранить в тонком слое жидкости.



Реакторы для гетерофазных процессов

Это удобно сделать в многослойном реакторе как с переливными устройствами (рис. ж), так и с ситчатыми провальными распределителями потока — тарелками (рис. з). В реакторе с разбрызгивателем (рис. е) мелкие капли более устойчивы в размерах. Но скорость их падения определена силами гравитации и захватом потока газа (особенно для мелких капель).

