

## **ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ**

Среди аппаратов ТС всегда выделить аппараты, в которых происходят химические превращения, т.е. основная технологическая операция (химические реакторы) и вспомогательные аппараты, в которой осуществляются подготовительные (измельчение, растворение, нагрев и т.д.) и завершающие (разделение продуктов реакции и т.д.) операций.

Иногда вспомогательные операции и собственно химические превращения могут происходить в одном и том же аппарате – реакторе.

### **Требования, предъявляемые к химическим реакторам**

Многообразие процессов выдвигает различные требования к химическим реакторам. Все без исключения химические реакторы должны удовлетворять основным требованиям:

- Обеспечивать высокую производительность
- Давать, возможно, более высокую степень превращения при максимальной селективности
- Иметь малые энергозатраты на транспортировку и перемешивание реагентов
- Быть достаточно простыми в устройстве и дешевыми (изготавливаться из черных металлов, недорогих пластмасс и т.д.)
- Наиболее полно использовать теплоту экзотермических реакций для проведения эндотермических процессов и иметь минимальные теплотери в окружающую среду.
- Быть надежными в работе и наиболее полно механизированными.

Эти требования часто противоречивы, например, увеличение степени превращения приводит к снижению производительности, это особенно наблюдается для реакторов идеального вытеснения (РИВ). В них степень превращения возрастает по логарифмическому закону, при этом концентрация исходных веществ уменьшается, скорость падает, выход с течением времени почти не увеличивается.

Требования о новых энергетических затратах находятся в противоречии с увеличением производительности, т.к. при интенсификации работы аппарата энергозатраты возрастают быстрее, чем выход продукта.

Рассмотрим аппараты с насадкой. Наибольшие затраты приходятся на преодоление сопротивления неподвижного слоя твердого материала.

Производительность аппарата с ростом скорости движения материала увеличивается почти линейно, а сопротивление движению, а, следовательно, и энергозатраты по квадратичной энергозависимости.

Линейную скорость движения реагентов целесообразно увеличить лишь до определенного предела. Зависимость степени превращения и сопротивления аппарата от высоты потом почти не увеличивается, следовательно, высота должна быть оптимальной.

Противоречивы и многие другие требования, поэтому окончательный выбор реактора с учетом всех требований осуществляется лишь после тщательных комплексных экономических расчетов.

### **Классификация химических реакторов**

Наиболее важными критериями для классификации химических реакторов являются:

- Непрерывность или периодичность операций
- Режим движения и перемешивания реагентов
- Температурный режим

Различают реакторы периодического, непрерывного и полунепрерывного действий.

В реакторе периодического действия реагенты загружаются в начале операции. После определенного времени, необходимого для достижения заданной степени превращения аппарат разгружают.

Основными параметрами процессами являются концентрации реагентов и продуктов реакции, температура, давление и т.д.

Скорость процесса сильно меняется в течение периода работы реактора (в сторону уменьшения) из-за снижения концентрации реагентов, иногда из-за появления новых фаз. В реакторе периодического действия работают, как правило, при сильном перемешивании реагентов и соответственно, при одинаковых параметрах во всем реакционном объеме в любой момент времени, но меняющиеся с течением времени.

Реакторы непрерывного действия от пуска до остановки непрерывно или систематическими порциями подают исходные реагенты и выводят из них продукты реакции.

Важной характеристикой такого реактора является объемная скорость

$$V = \frac{V_p}{\nu}$$

где  $V_p$  - объем загрузки материала за время  $\tau$ ,  $\nu$  - реакционный объем.

С ростом объемной скорости производительности реактора увеличивается, но уменьшается выход и растет сопротивление движению реагентов через аппарат, поэтому из экономических соображений объемную скорость увеличивают лишь до определенных пределов

Реакторы полунепрерывного действия характеризуются тем, что сырье поступает в аппарат непрерывными или определенными порциями через равные промежутки времени, а продукты реакции выгружаются периодически, возможна и непрерывная выгрузка продукта при периодической подаче сырья, т.е. они по данному показателю (нечто среднее между реакторами периодического и непрерывного действий).

Второй критерий. Режим движения и перемешивания реагентов.

По режиму движения реагентов различают два предельных типов реакторов непрерывного действия: ИВ (идеального вытеснения) и ИС (идеального смешения).

Реактор ИВ характеризуется тем, что реагенты последовательно, слой за слоем, без перемешивания ламинарным потоком проходят весь реакционный

путь, определяемый высотой реактора, которая значительно больше его диаметра (трубчатый аппарат).

Время пребывания  $\tau'$  любого элемента объема равно среднерасходному времени

$$\tau' = \tau_{\text{ср}} = \frac{H}{\omega} = \frac{V}{V_p}$$

где  $H$  – высота реакционного пространства,  $\omega$  – фиктивная, рассчитанная на полное сечение, скорость потока,  $V_p$  – реакционный объем аппарата,  $V$  – рабочий объем реагентов. В этом аппарате перемешивание отсутствует.

По длине или по высоте такого реактора монотонно уменьшается концентрация реагентов и скорость реакции, поскольку исходные реагенты расходуются, а выход продукта увеличивается.

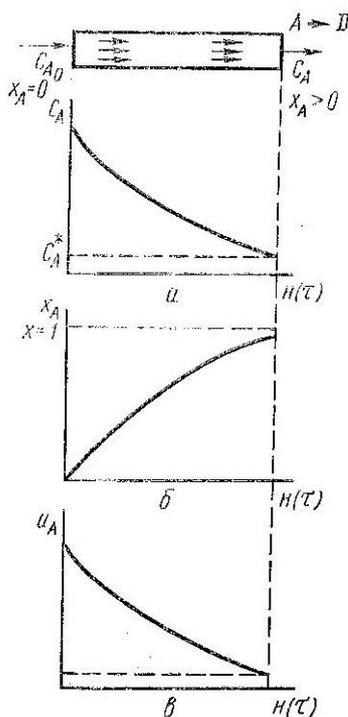


Рис. 11. Изменение концентрации реагентов (а), степени превращения (б) и скорости реакции (в) в реакторе идеального вытеснения.

В режиме, близком к идеальному вытеснению работают контактные аппараты с катализатором внутри труб и полые (пустотелые реакторы для гомогенных процессов в газовой фазе).

Реактор полного смещения характеризуется тем, что частицы реагента, попавшие в данный момент времени в аппарат, благодаря интенсивному

перемешиванию имеют равную со всеми частицами вероятность первыми покинуть его.

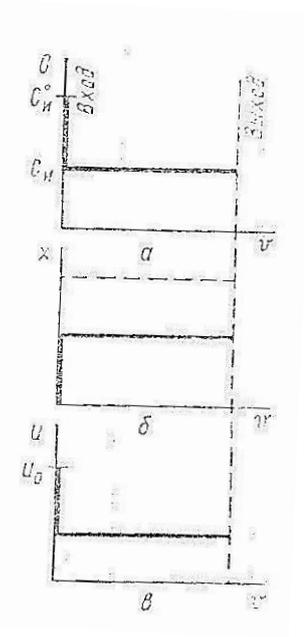


Рис. 12. Изменение концентрации (а), степени превращения (б) и скорости превращения (в) в реакторе полного перемешивания

В реакторах полного смешения любой элемент объема мгновенно смешивается со всем содержимым реактора, физическая модель – смеситель с пропеллерной мешалкой.

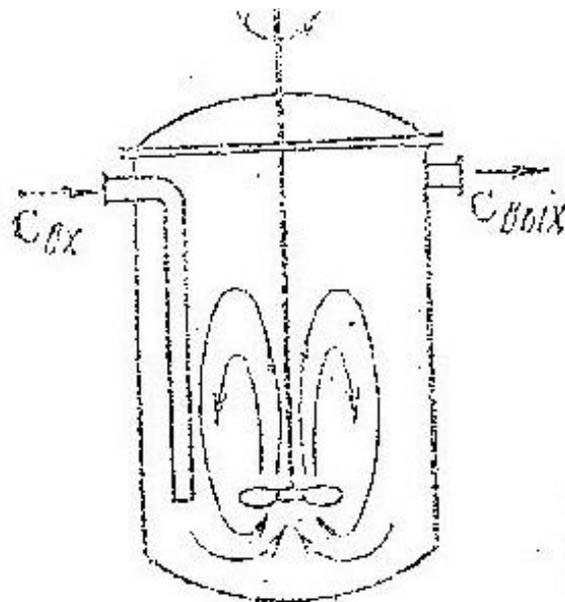


Рис. 13. Реактор полного смешения – смеситель с пропеллерной мешалкой

Истинное время пребывания отдельной частицы в реакторе может колебаться от 0 до  $\infty$ , а среднее время

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{V}{V_p}$$

По типу реакторов полного смешения в системах Г-Ж, Ж-Т, Г-Ж-Т работают обычно установки со смесителями.

Увеличение числа оборотов смесительного устройства или скорости потоков газа и жидкости обеспечивает приближение режима работы реактора к реактору полного смешения, а также к росту скорости процесса (до некоторого предела, когда диффузионные сопротивления уже незначительно и далее уменьшается).

Чрезмерное увеличение скорости мешалки приводит к росту затрат и экономически не выгодно.

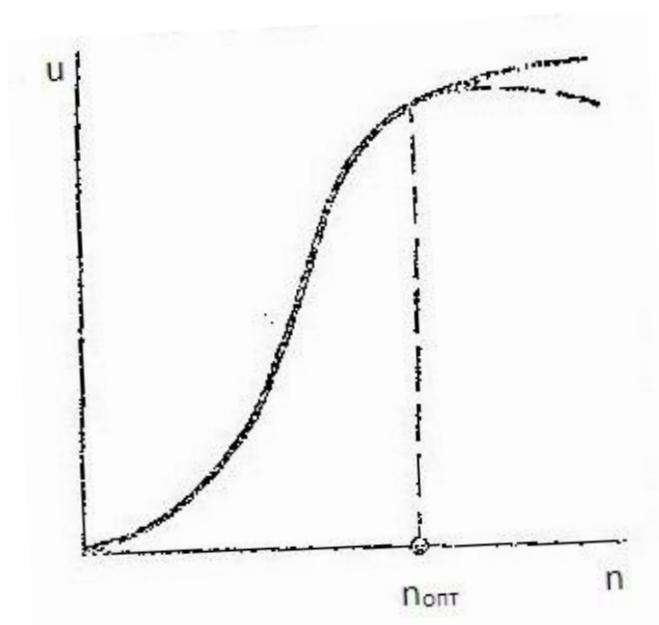


Рис. 14. Зависимость скорости процесса  $u$  от числа оборотов  $n$  мешалки в реакторе полного смешения

В системе Г-Т к типу полного смешения приближаются режимы работы аппаратов кипящего слоя, причем наиболее близки к нему аппараты кипящего слоя с мешалками.

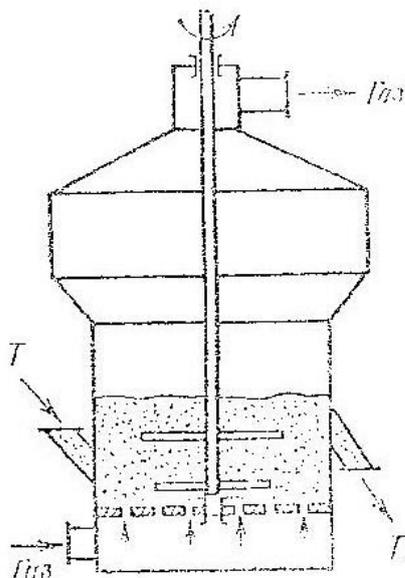


Рис. 15. Реактор полного смешения – аппарат КС с мешалкой

Также близки к этому режиму аппараты циклонного типа, схематично показанные на Рис. 31.

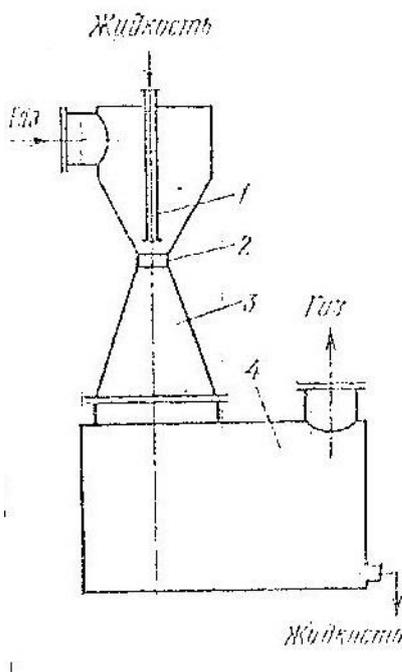


Рис. 16. Реактор полного смешения – абсорбер Вентури:

1 – сопло; 2 – горловина; 3 – камера смешения; 4- разделительная камера.

Поскольку в единичном реакторе смешения при больших степенях превращения движущая сила стремиться к 0, скорость процесса в целом очень низкой, поэтому для обеспечения достаточного выхода продукта применяют каскад реакторов полного перемешивания со сравнительно небольшой степенью превращения в каждой ступени.

При числе реакторов  $> 4$  изменение движущей силы процесса приближается к режиму идеального вытеснения.

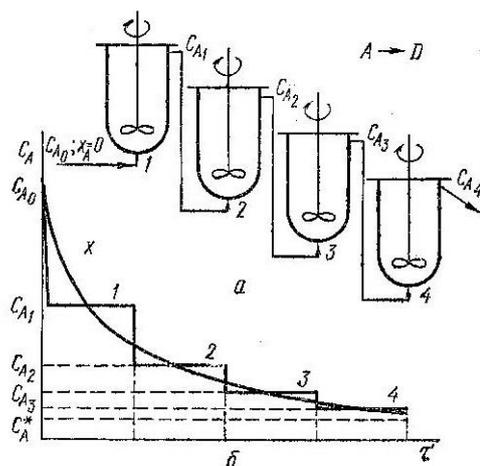


Рис. 17. Каскад реакторов смешения:  
а – принципиальная схема; б –  
изменение концентрации основного  
исходного вещества по ступеням  
каскада (1) и среднее (2)

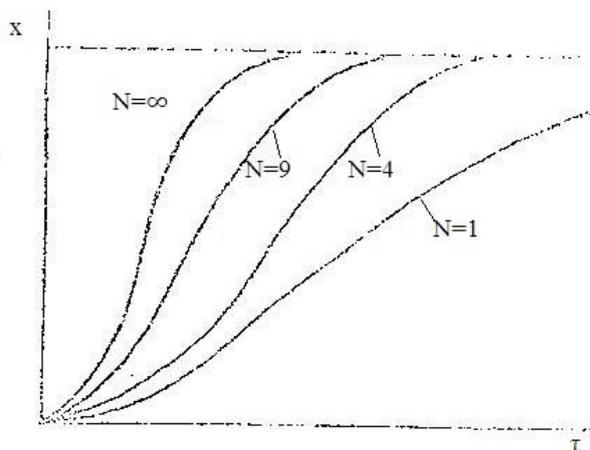


Рис. 18. Влияние на степень  
превращения числа реакторов N в  
каскаде

Третий критерий классификации химических реакторов – это температурный режим. По температурному режиму подразделяют реакторы на адиабатические и политермические (программно-регулируемые).

### Адиабатические реакторы

При спокойном (без перемешивающегося течения реагентов) не имеют теплообмена с окружающей средой, т.е. снабжены хорошей тепловой изоляцией и вся теплота реакции аккумулируется потоком реагирующих веществ. Степень превращения, скорость реакции и температура по высоте адиабатического реактора вытеснения, в котором протекает изотермическая реакция. Скорость реакции на выходе в аппарат мала из-за низкой температуры, а на выходе мала из-за высокой степени превращения. По такому типу работают контактные аппараты с фильтрующим слоем катализатора и прямоточные абсорберы с изолирующей футеровкой.

### Изотермические реакторы

Реакторы такого типа имеют постоянную температуру во всех точках инерционного объема, скорость процесса определяется только концентрацией

реагентов, изотермичность достигается теплообменными устройствами, помещенными в реакционный объем, и отводящими тепло в экзотермических процессах, и подводящими в эндотермических.

Также изотермический режим достигается при интенсивном перемешивании реагентов. Аппараты с мешалками и реакторы кипящего слоя, еще он приближенно достигается в реакторах с малой концентрацией реагентов в реакциях с малыми тепловыми эффектами.

### **Политермические реакторы**

Это реакторы, в которых теплота реакции лишь частично компенсируется за счет подвода или отвода теплоты. Также это реакторы, в которых идут реакции с различными тепловыми эффектами. Поскольку частичный подвод теплоты рассчитывается (программируется) при проектировании и может регулироваться, такие аппараты называются регулируемыми.

### **Сравнение реакторов с различными гидродинамическими и температурными режимами**

Основная цель сравнения – выбор реактора для конкретного процесса. При выборе нужно учитывать, что реакторы смешения работают в изотермических условиях. В реакторах вытеснения режим адиабатический или политермические

Характер изменения температуры по длине или высоте реактора ИВ (1) и полного перемешивания (2) при осуществлении экзотермических процессов без теплообмена, следовательно, константа скорости реакции возрастает с повышением температуры по уравнению Аррениуса. В реакторах смешения при значительном тепловом эффекте может быть значительно больше, чем в реакторах вытеснения. Константа скорости процесса в промышленных реакторах, близких к режиму полного смешения реагентов повышается вследствие отсутствия локальных очагов охлаждения, которые обычно имеются в реакторах вытеснения (особенно у стенок). Таким образом, у реакторов перемешивания константа скорости процесса  $u = kF\Delta C$  всегда больше, чем в реакторах вытеснения.

Движущая сила процесса в реакторах ИВ всегда больше, так же недостатком метода смешения является дополнительные энергозатраты на перемешивание реагентов. Следовательно, реакторы смешения экономично выгоднее тогда, когда возрастание константы скорости процесса будет снижать превышение движущей силы.

Для эндотермических процессов они менее предпочтительны (особенно, если нет подвода теплоты). В этом случае исчезает их основное преимущество – высокая константа скорости процесса.