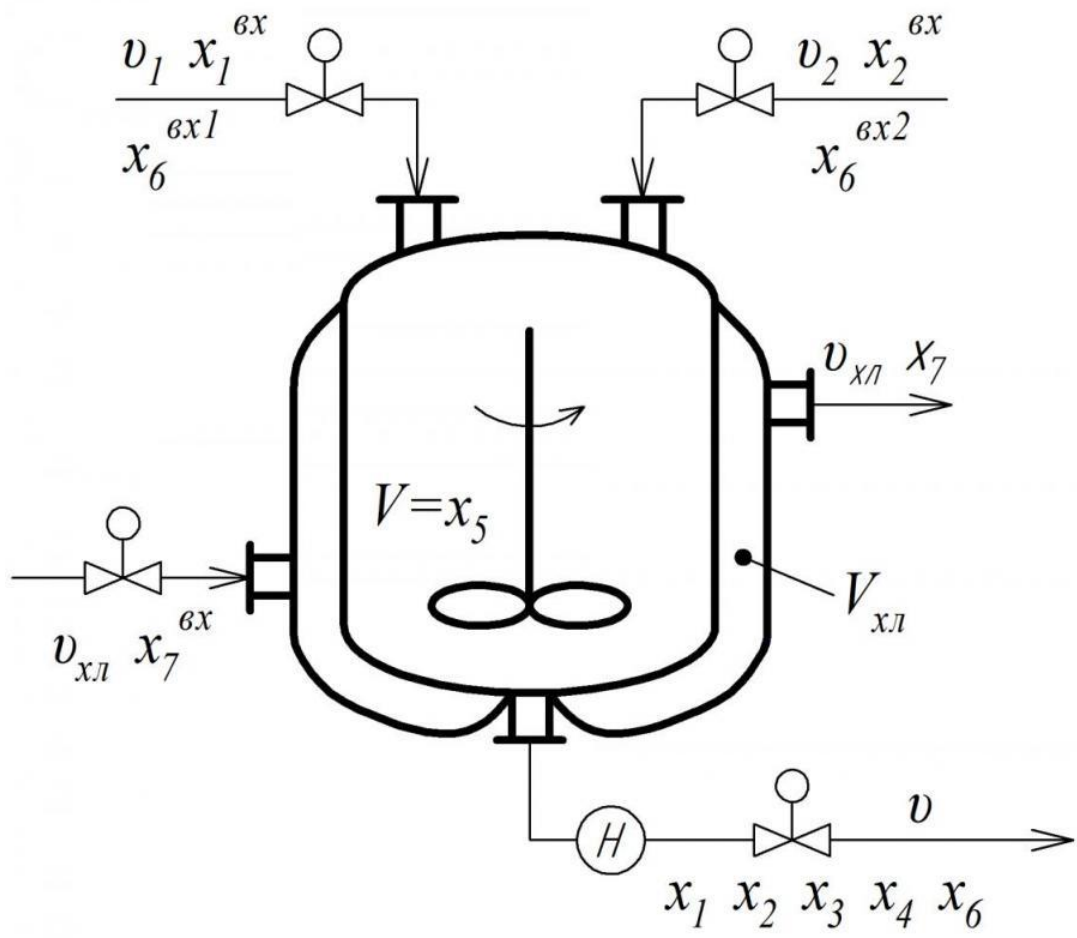
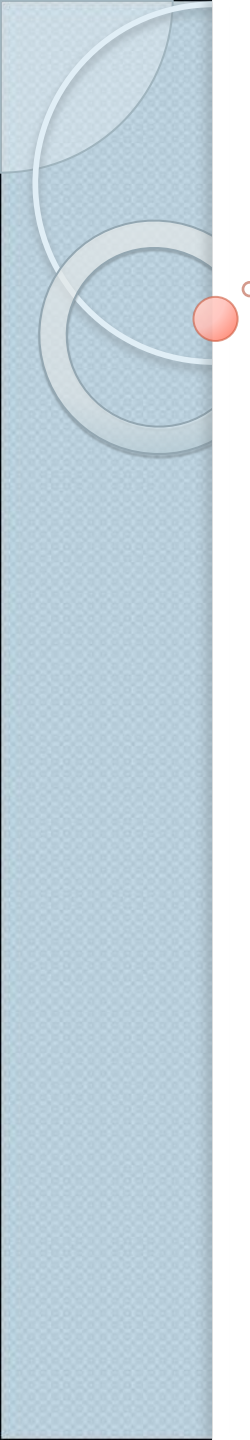


# РЕАКТОРЫ





**Химическим реактором** называется аппарат, в котором осуществляются химические процессы, сочетающие химические реакции с массопереносом (диффузией).

Типичные реакторы — контактные аппараты, реакторы с механическим, пневматическим и струйным перемешиванием, промышленные печи и пр.

# Основные требования к промышленным реакторам

1. **Мах производительность и интенсивность работы.**
2. **Высокий выход продукта и наибольшая селективность процесса.**
3. **Min энергетические затраты на транспортировку и перемешивание реагентов**
4. **Легкая управляемость и безопасность работы**
5. **Низкая стоимость изготовления и ремонта**
6. **Устойчивость работы реактора при значительных изменениях основных параметров режима ( $C$ ,  $T$ ,  $P$ ,  $\omega$ ).**

# Химические реакторы

## Классификация

Признаки классификации химических реакторов:

- гидродинамическая обстановка,
- условия теплообмена,
- фазовый состав реакционной смеси,
- способ организации процесса,
- характер изменения параметров процесса во времени,
- конструктивные характеристики.



# 1. По гидродинамической обстановке

- 1.1. Реакторы смешения  
(емкостные аппараты с мешалкой или насосом)
- 1.2. Реакторы вытеснения  
(трубчатые аппараты в виде удлиненного канала)

# Реакторы смешения

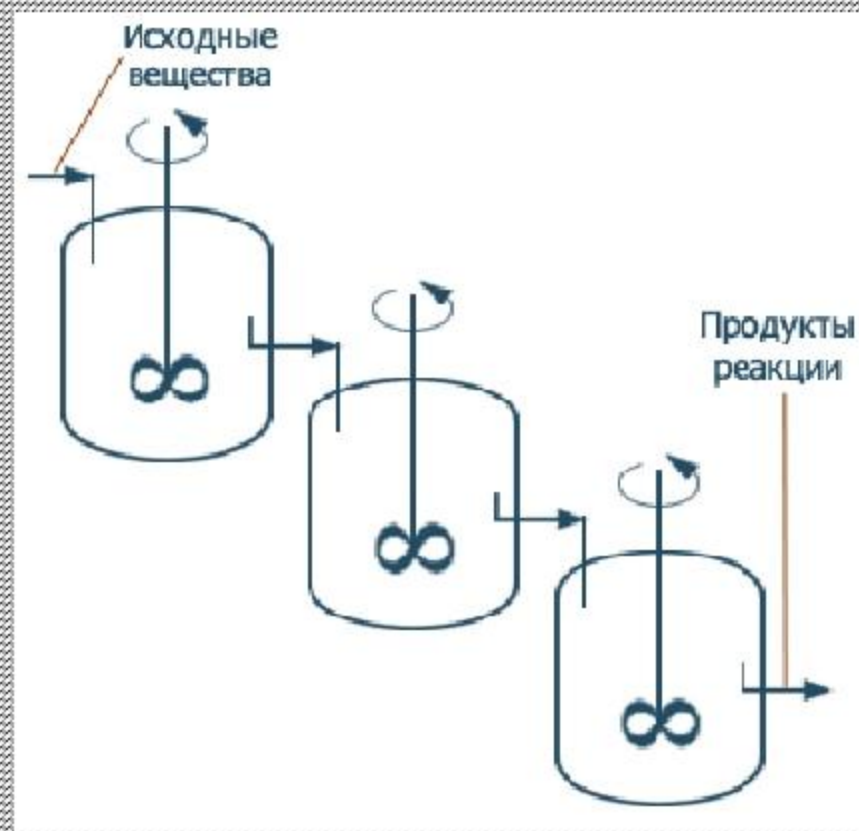
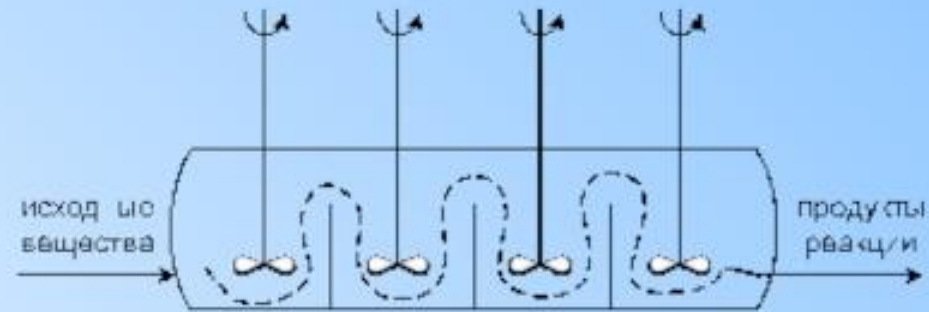
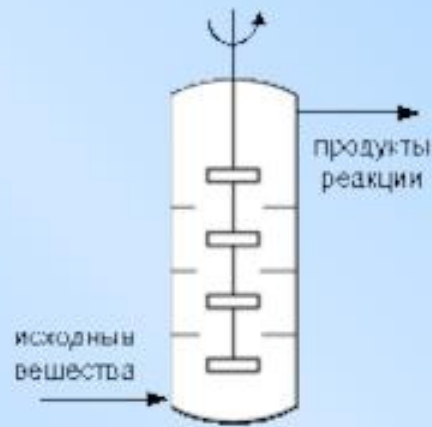
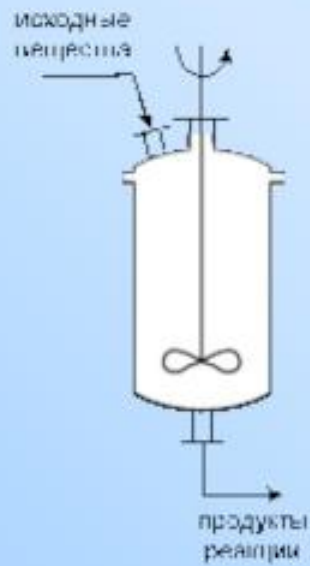




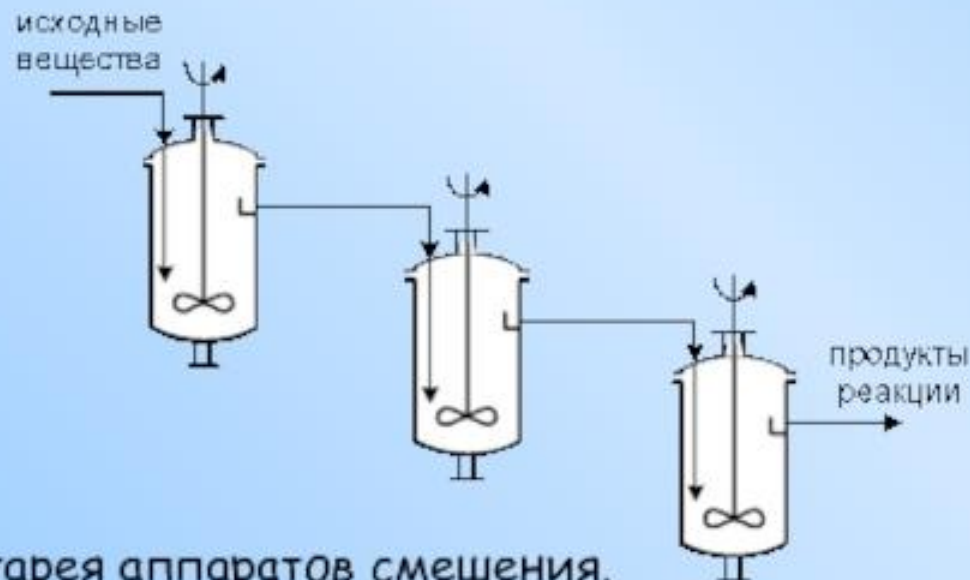
Рис. 11.6. Реакторы смешения:



в - многосекционный горизонтальный аппарат;

а - одноступенчатый аппарат;

б - вертикальный многоступенчатый аппарат;



г - батарея аппаратов смешения.

# Реакторы идеального смешения

- Реактор полного смешения обычно снабжен каким либо **перемешивающим устройством** и характеризуется **постоянством концентрации реагирующих веществ во всем объеме реактора в данный момент времени**, вследствие практически мгновенного смешения реагирующих веществ в реакционном объеме.
- Реакторы этого типа наиболее широко применяются для проведения таких процессов, как нитрование, сульфирование, полимеризация и т.д.



# Типы емкостных аппаратов

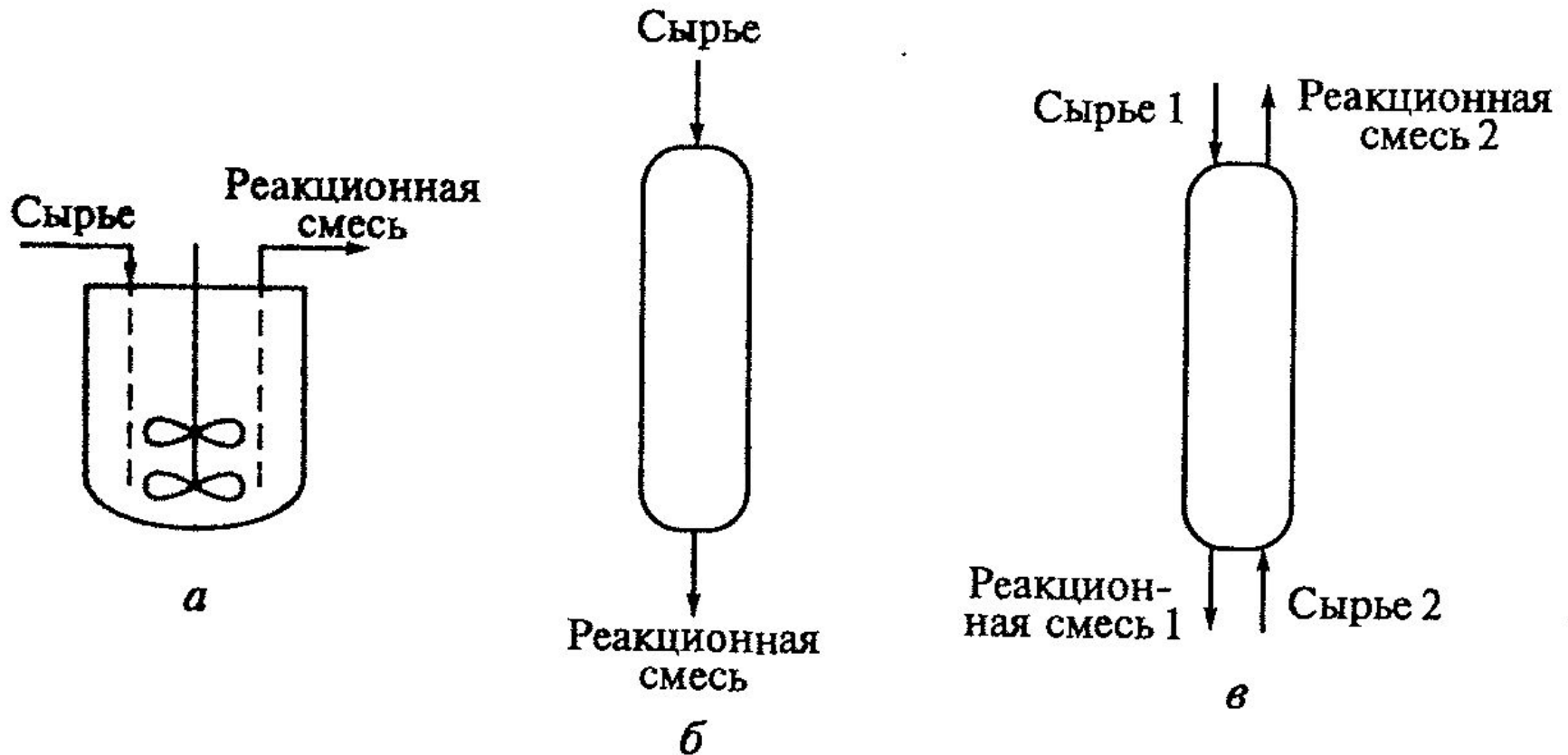
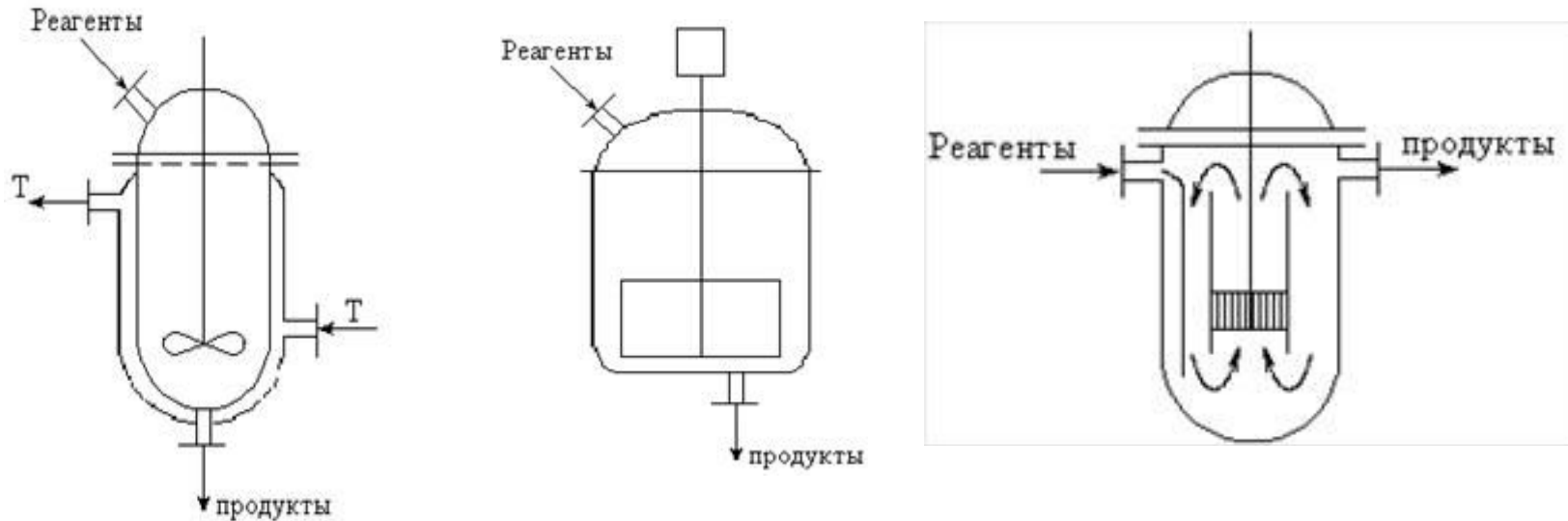


Рис. 5.1. Реакторы идеального смешивания (а), идеального вытеснения (б), противоточного типа (в)

# 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 (а), лопастные (б), турбинные с центральной трубой (в), обеспечивающие наиболее интенсивное перемешивание реакционной массы.

И-исходные вещества; П – продукты реакции; Т – теплоноситель; К – катализатор; Н – насадка; ТЭ – теплообменные элементы.

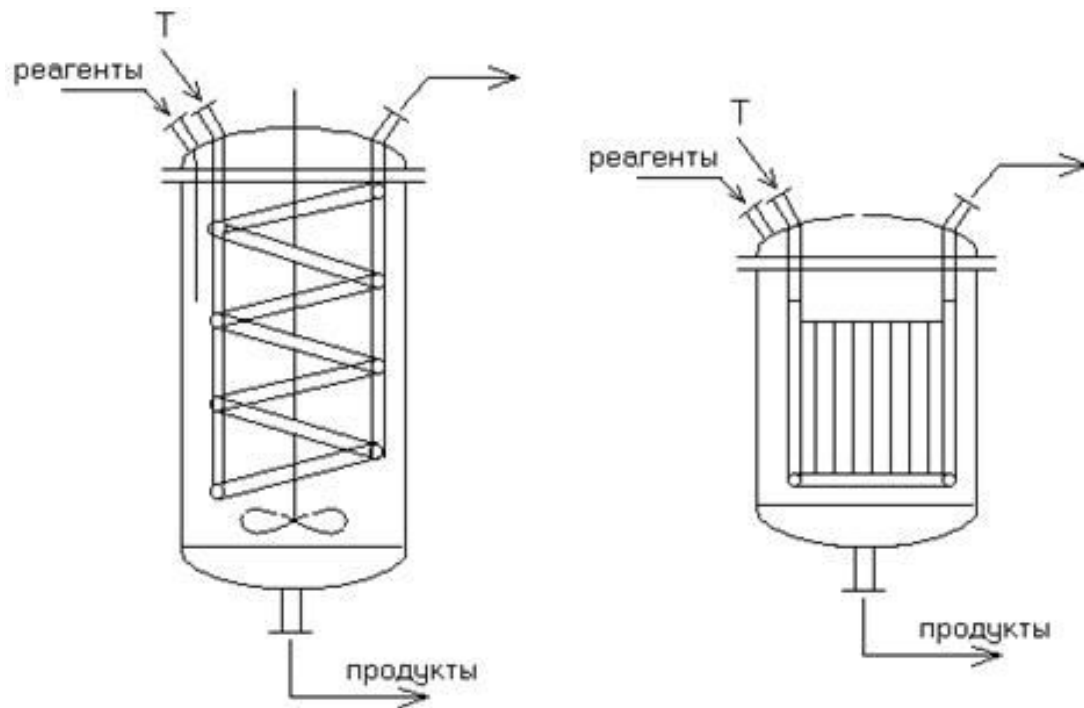
# Реакторы для гомогенных процессов



**Особый тип мешалок – для вязких жидкостей – рамные (г) и червячные (д). Применяются при производстве полимеров**

**\*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 для гомогенных процессов

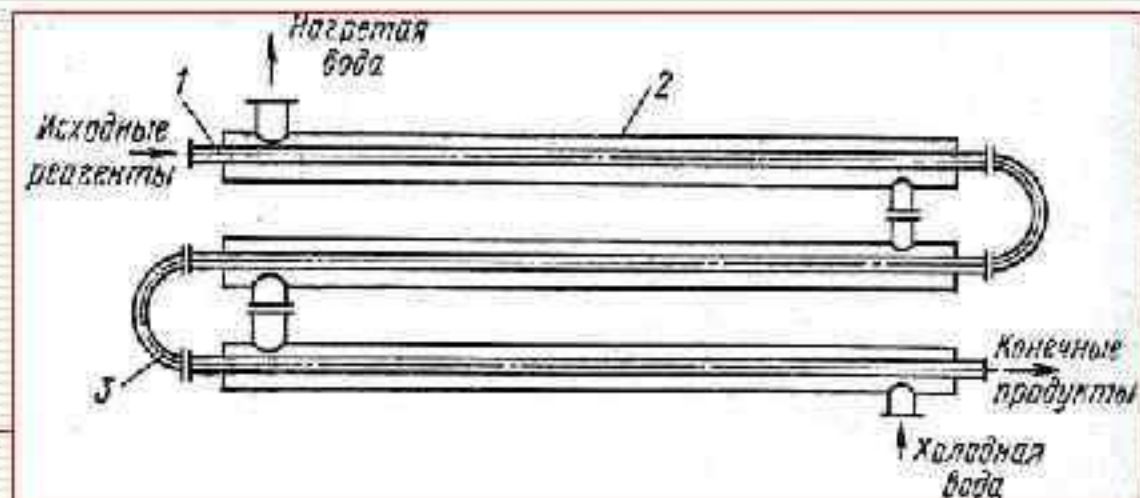


**В случае необходимости подвода или отвода тепла предусматриваются теплообменные устройства в реакторах. В качестве таковых используются рубашки или теплообменники внутри реактора в виде змеевиков или секций трубок (е)**

# Реакторы вытеснения



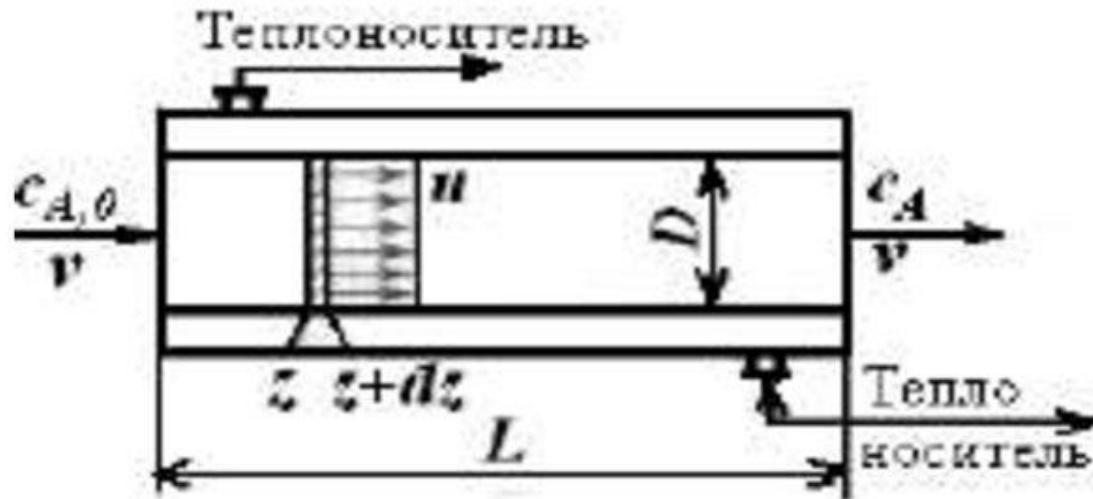
$$L/d \geq 20$$





# Реакторы непрерывного действия

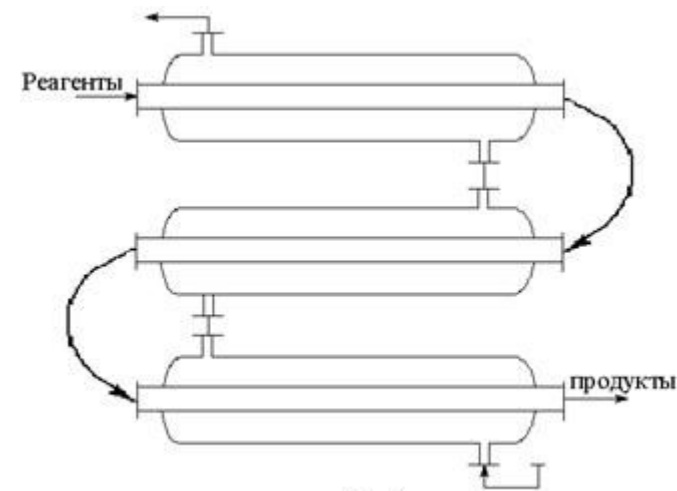
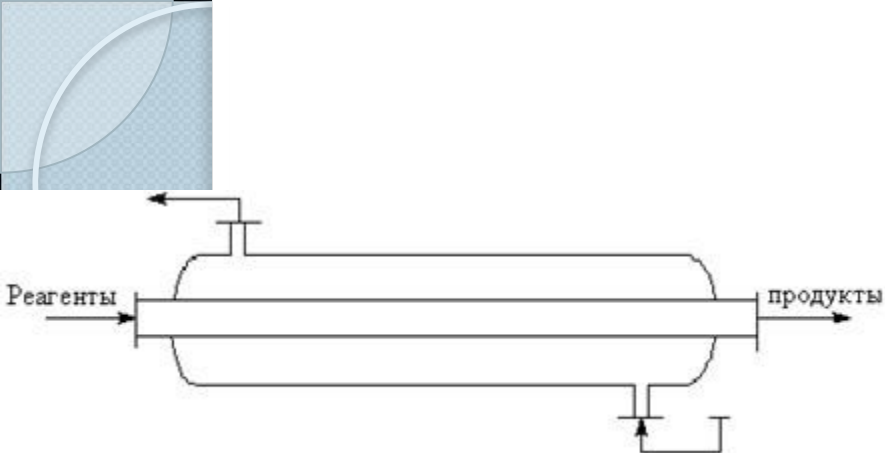
## Реактор идеального вытеснения (РИВ)



### 4. Схема реактора идеального вытеснения

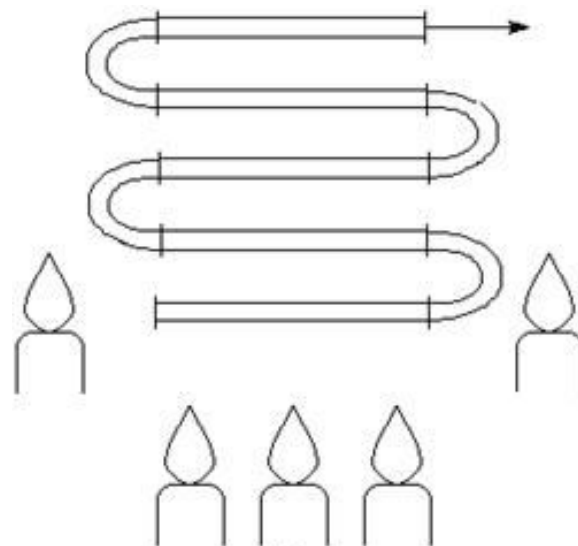
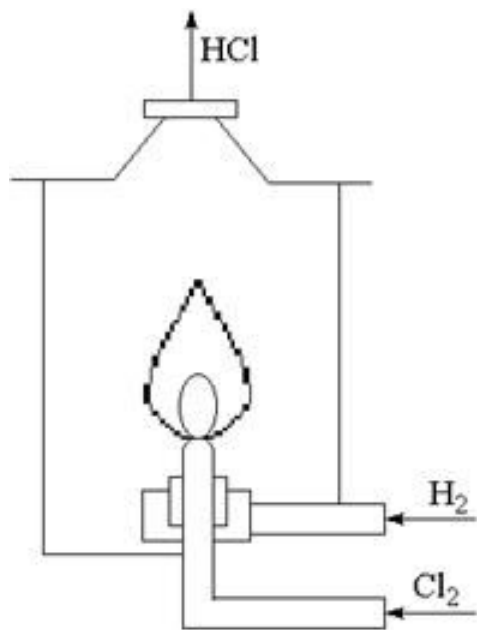
Каждый элемент объема реакционной массы  $dV_r$  движется по длине реактора, не смешиваясь с предыдущими элементами объема. И ведет себя как поршень в цилиндре, вытесняя все, что находится перед ним. Поэтому такой режим движения реагентов называется иногда поршневым или режимом полного вытеснения.





## **Типичным примером трубчатого реактора является реактор типа "труба в трубе"**


**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"**



**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*.**

## 2. По условиям теплообмена

- 2.1. изотермический
- 2.2. абиобатический
- 2.3. политермический
- (программно-регулируемый)
- 2.4. автотермический

- 
- При проведении реакции при постоянной температуре (**изотермический процесс**) **степень превращения реагентов зависит от их концентрации и не зависит от температуры**, поэтому уравнение материального баланса можно проинтегрировать и получить зависимость степени превращения от времени.
  - При неизотермическом проведении процесса (**адиабатическом или программно-регулируемом**) приходится решать совместно уравнения материального и теплового баланса с учетом зависимости скорости реакции от температуры и, при необходимости, процесса теплопередачи.

## 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.

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.

## Классификация реакторов с различным тепловым режимом

*Политермическими* 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.

Политермичны во времени реакторы полного смешения периодического действия. Политермический 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.

### 3. По фазовому состоянию реакционной смеси

- 3.1. для гомогенных процессов –  
газофазные и жидкофазные

#### Реакторы для гомогенных процессов



Реакторы для проведения гомогенных реакций работают в режиме смешения или вытеснения.

---

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

*Реакторы вытеснения* – трубчатые аппараты, имеющие вид удлиненного канала, в котором используется неподвижный слой катализатора по высоте реактора, омываемого газом и жидкостью.

Какие реакторы работают по принципу смещения, а какие – вытеснения? Определите сами.

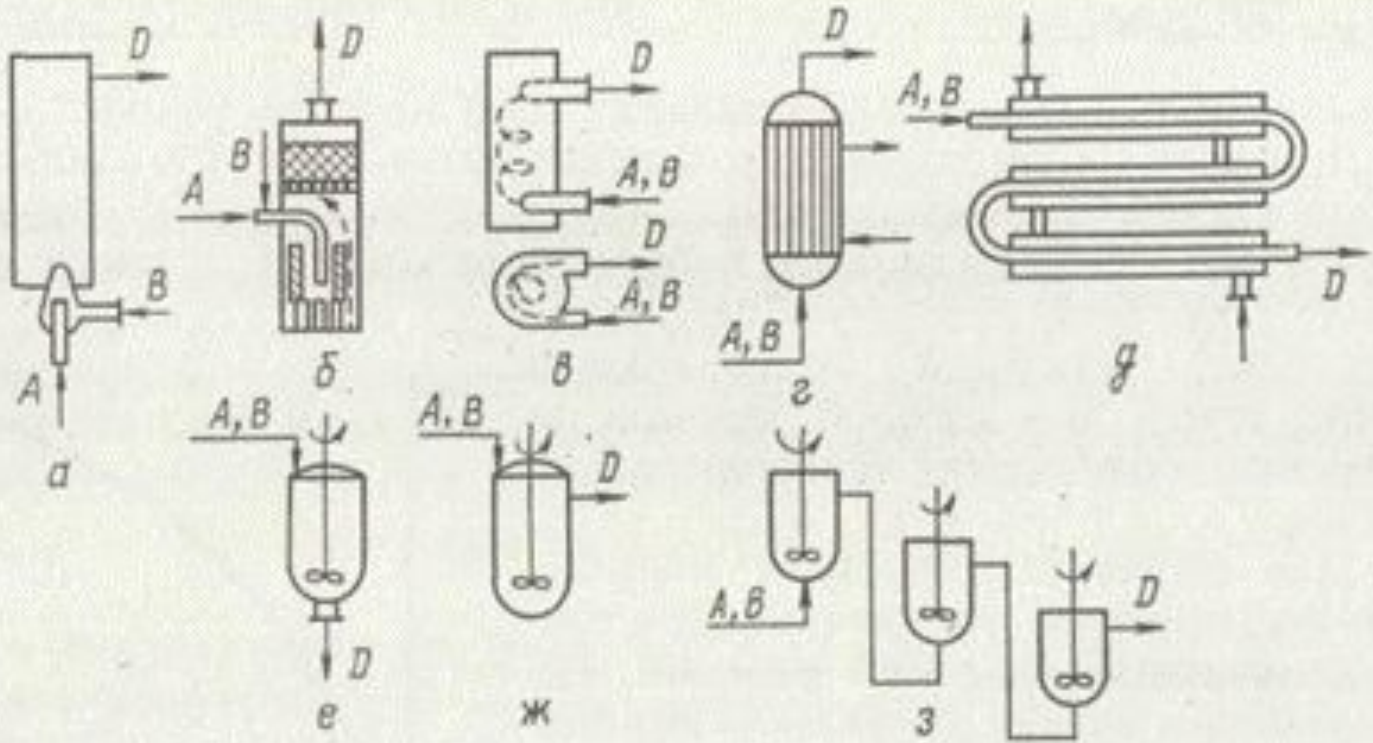


Рис. 4.3. Типы реакторов для гомогенных процессов газофазных (а—д) и жидкофазных (д—з):

а, б — камерные реакторы с горелками (а — режим идеального вытеснения; б — промежуточный); в — камерный реактор с сильным перемешиванием, изотермический; г, д — трубчатые реакторы вытеснения, политермического режима; е, з — реакторы с мешалками, режим полного смешения (е — одиночный периодического действия; ж — одиночный непрерывного действия; з — каскад реакторов); А, В — исходные реагенты; D — продукты реакции



# Реакторы для газовых гомогенных процессов.

## 1. Камерные реакторы с эжекторными смесителями газов и паров.

Например, печь для синтеза хлороводорода.

Она состоит из вертикального стального цилиндра и кожуха для охлаждения печи.

По внешней трубе (2) поступает водород, а по внутренней (1) хлор, которые при встрече перемешиваются и сгорают в камере печи.

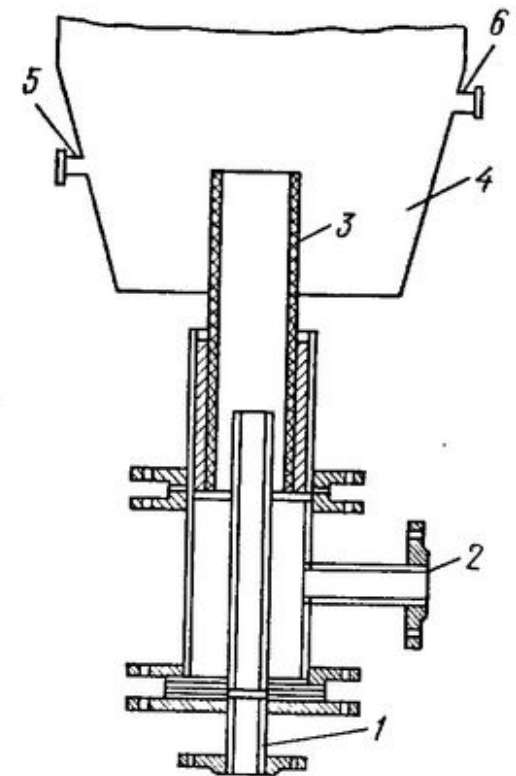


Рис. 64. Схема горелки печи для синтеза хлороводорода:  
1 — трубка для ввода хлора; 2 — трубка для ввода водорода; 3 — диносовый наконечник горелки; 4 — камера печи; 5 — запальный люк; 6 — смотровой штуцер с кварцевым стеклом



2. Камерный реактор с центробежным перемешиванием газовой смеси.

По режиму работы близок к полному смешению и изотермическому типу.

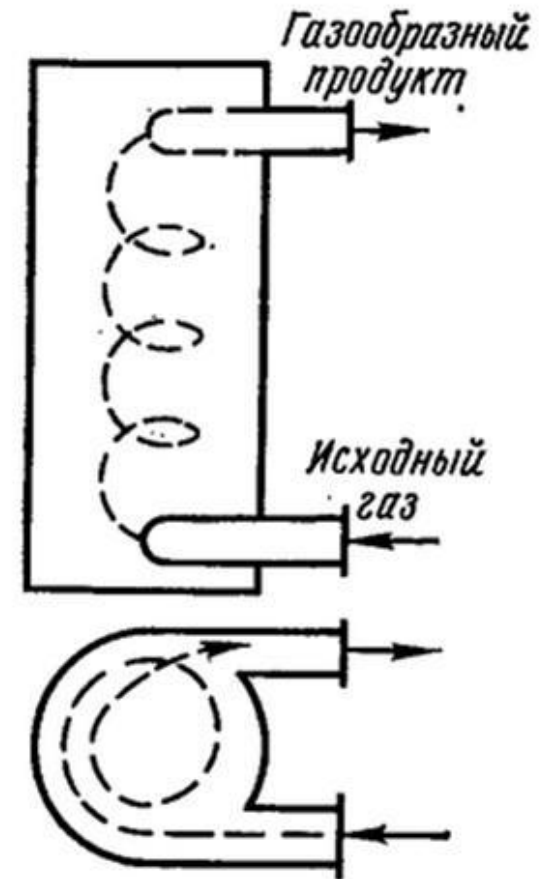
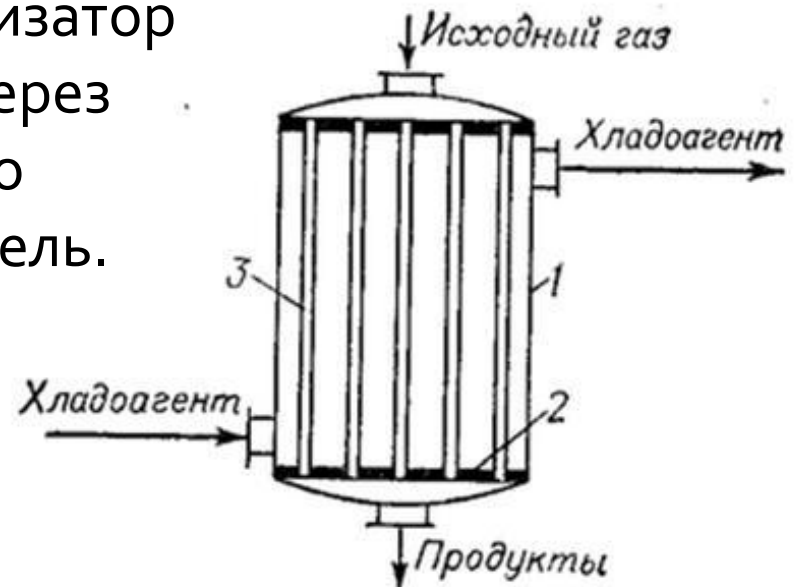


Рис. 65. Камерный реактор с центробежным перемешиванием газовой смеси

### 3. Трубчатый реактор с теплообменом между двумя газами.

Работает по режиму вытеснения.

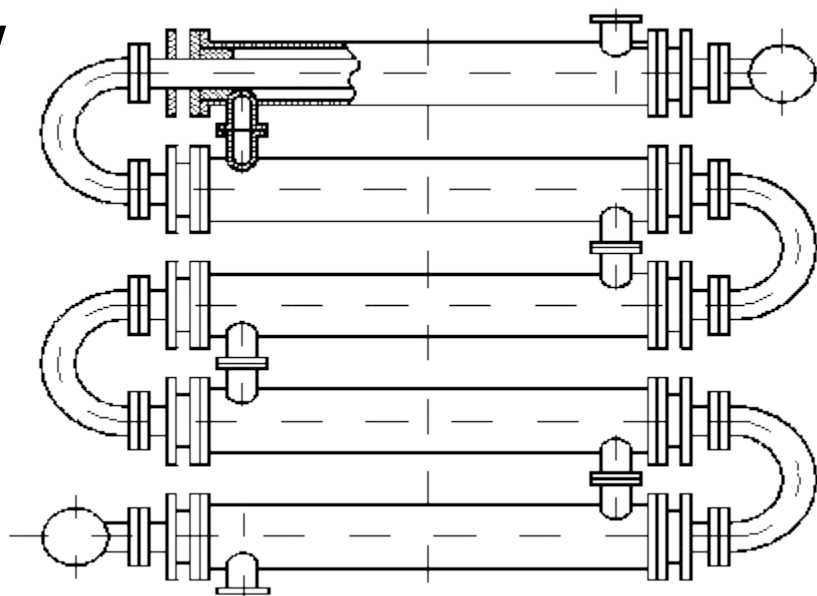
В данном реакторе катализатор загружается в трубки, а через межтрубное пространство пропускается теплоноситель.



4. Реакторы типа «труба в трубе» с жидкостным охлаждением и нагревом.

Работают по принципу идеального вытеснения.

В данном реакторе вещество поступает во внутреннюю трубу и прокачивается через реактор-теплообменник, охлаждаемый холодной водой.



# Реакторы для жидкостных гомогенных процессов.

Этот тип реакторов используется в процессах этерификации, гидролиза, нитрования и др. Реакции проводятся как в аппаратах смешения, так и в аппаратах вытеснения в периодическом, полунепрерывном или непрерывном режимах.

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

# Реакторы смешения с пропеллерной мешалкой.

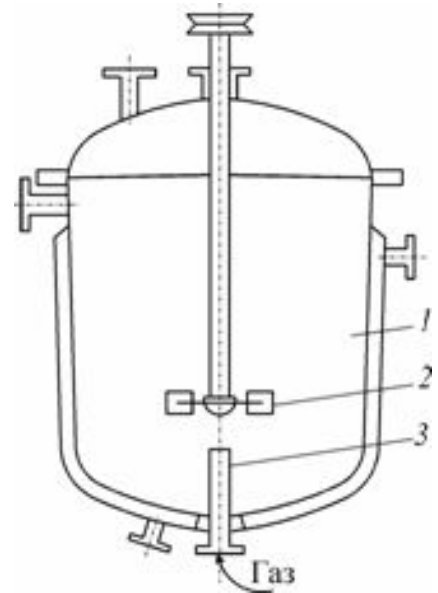
- Такой аппарат выполняется в виде сосуда (1) с мешалкой (2), под которую через трубу-барботер (3) вводится газ.

Теплообменными элементами в реакторах этого типа служат стенки сосуда, заключенные в рубашку, или теплообменники, установленные внутри аппарата.

Основными недостатками реакторов с мешалками является:

необходимость герметизации узла ввода вала мешалки в аппарат

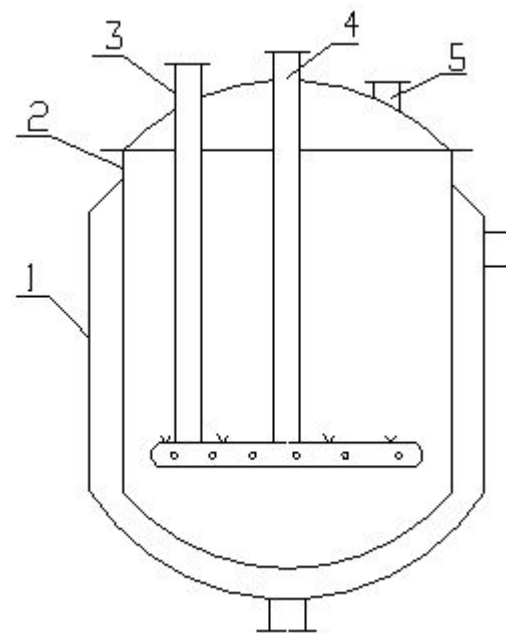
низкая надежность аппарата в целом вследствие возможного отказа привода мешалки.



## Реакторы с пневматическим перемешиванием.

- В простейшем случае состоят из трубки, проходящей через крышку реактора и опущенной открытым концом до дна. При подаче в трубку газа происходит перемешивание в результате движения через слой жидкости образующихся пузырей.

Основной недостаток в том, что применять его можно лишь в тех случаях, когда необходимо сравнительно медленное или грубое смешение.



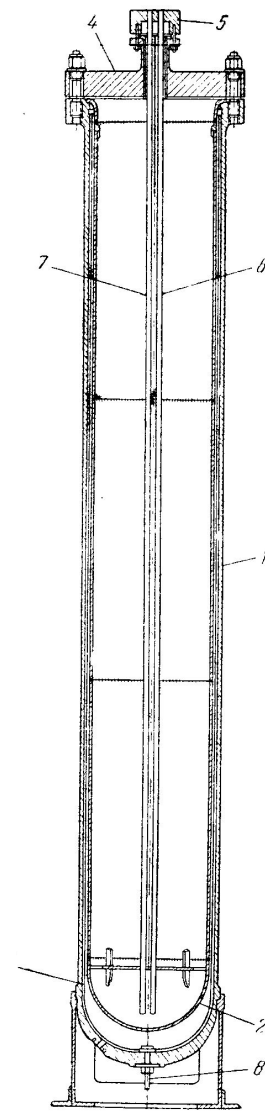


# Реакторы для работы под давлением

Для работы под давлением применяют автоклавы периодического действия.

Реактор, представленный на рисунке, состоит из толстостенного стакана, выполненного из углеродистой стали, рассчитанного на давление 50 ат.

Автоклав закрывается крышкой (на болтах), через которую проходят трубы различного диаметра. Первая служит для наполнения автоклава, вторая – для перелива избытка смеси в смеситель, третья – для отвода газов при продувке. Две длинные трубы служат: одна для отвода готовой кислоты, другая для подачи газа.



## Как повысить КПД реактора (увеличить выход продукта)?

Для повышения КПД используют прямоточные аппараты большой длины, батареи из нескольких реакторов, а также многосекционные аппараты, в которых степень превращения возрастает с увеличением числа секций.

Также для повышения КПД используется каскад реакторов с мешалками или секционированные реакторы с мешалками или без мешалок.

# 3. По фазовому состоянию реакционной смеси (продолжение)

## ● 3.2. для гетерогенных процессов

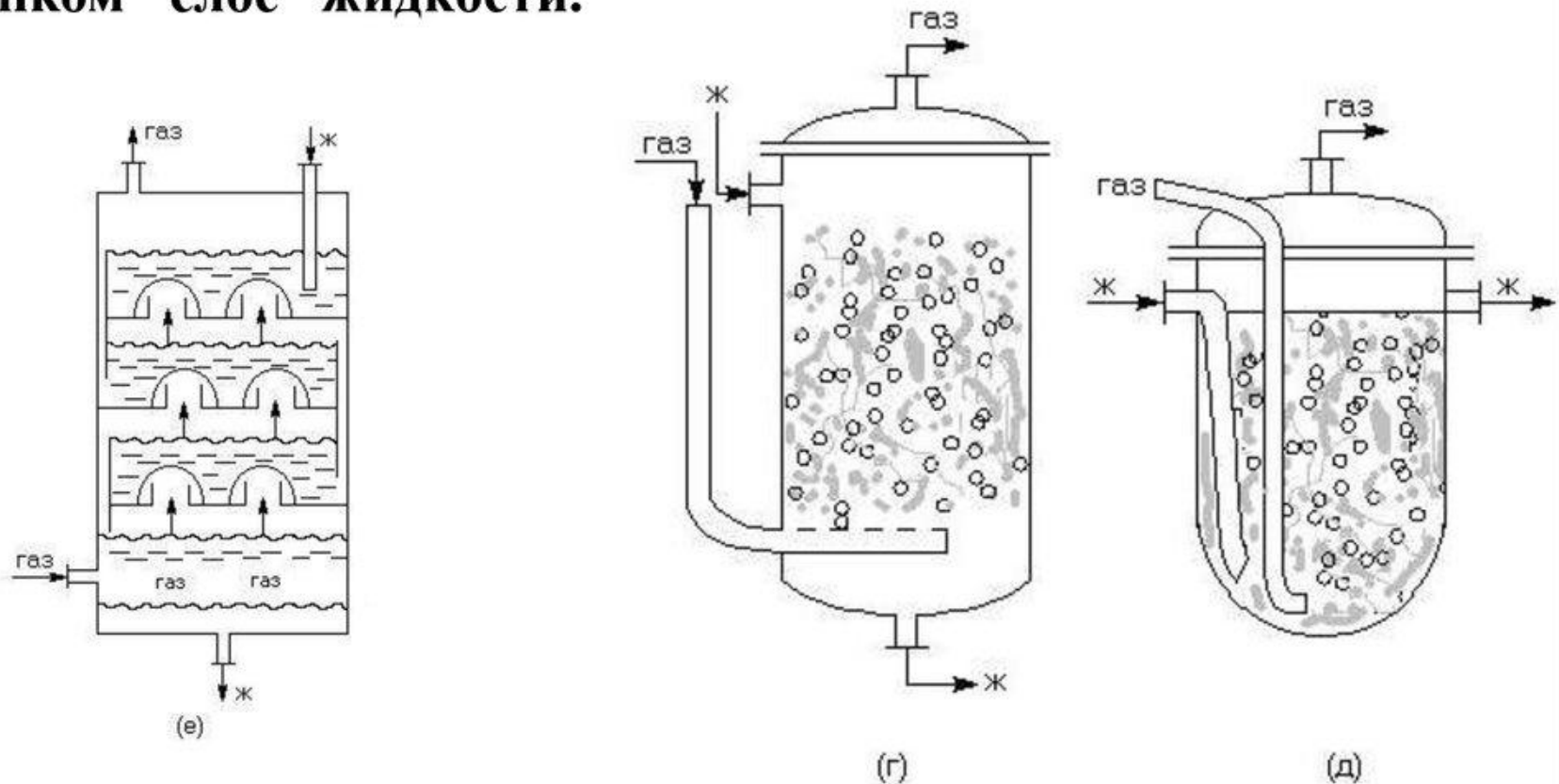
### А) Реакторы газожидкостные

В зависимости от способа образования межфазной поверхности газожидкостные реакторы можно разделить на три основные группы.

- 1. Реакторы с механическим диспергированием газа, в которых поверхность контакта фаз образуется при введении газа через газораспределительные устройства (барботеры) в слой жидкости (группа РБ).
- 2. Реакторы с механическим диспергированием газа, в которых вводимый в аппарат через барботер газ диспергируется в жидкости различными перемешивающими устройствами (группа РМ).
- 3. Реакторы пленочные, в которых контакт газа осуществляется с жидкостью, находящейся в виде пленки на стенках аппарата (группа РП).

## 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.



# Реактор с мешалкой в свободном объеме (РМС)

\*подача воздуха под барботер

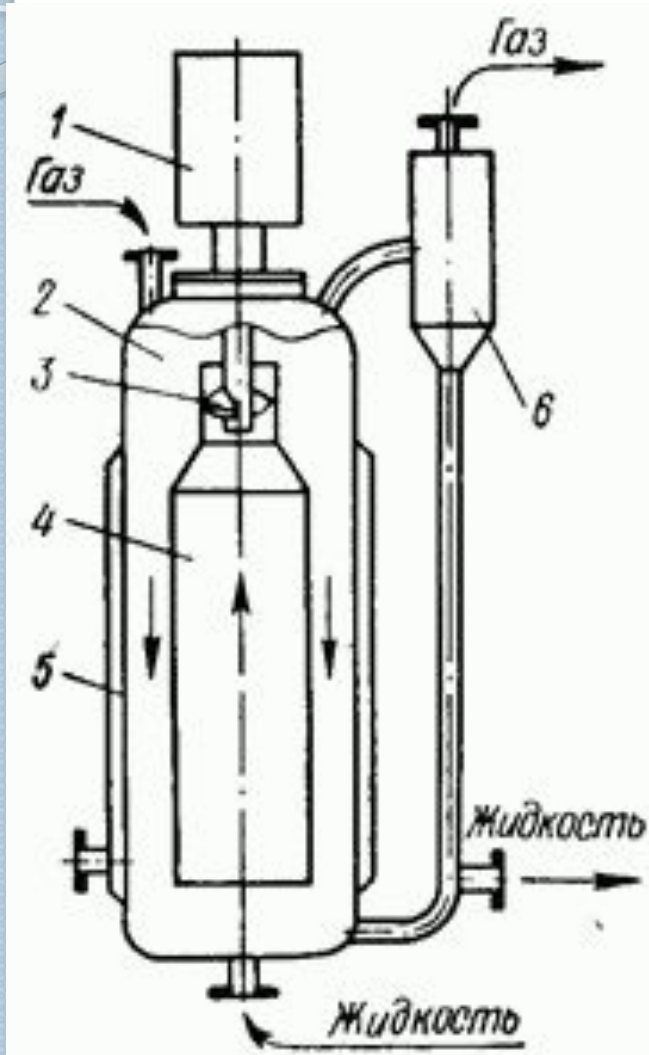
## Реакторы с механическим перемешиванием

- Воздух подается через разбрызгиватель;
- мешалки диспергируют воздух;
- характерно вспенивание





# Реактор с мешалкой в циркуляционном корпусе (РМЦ)

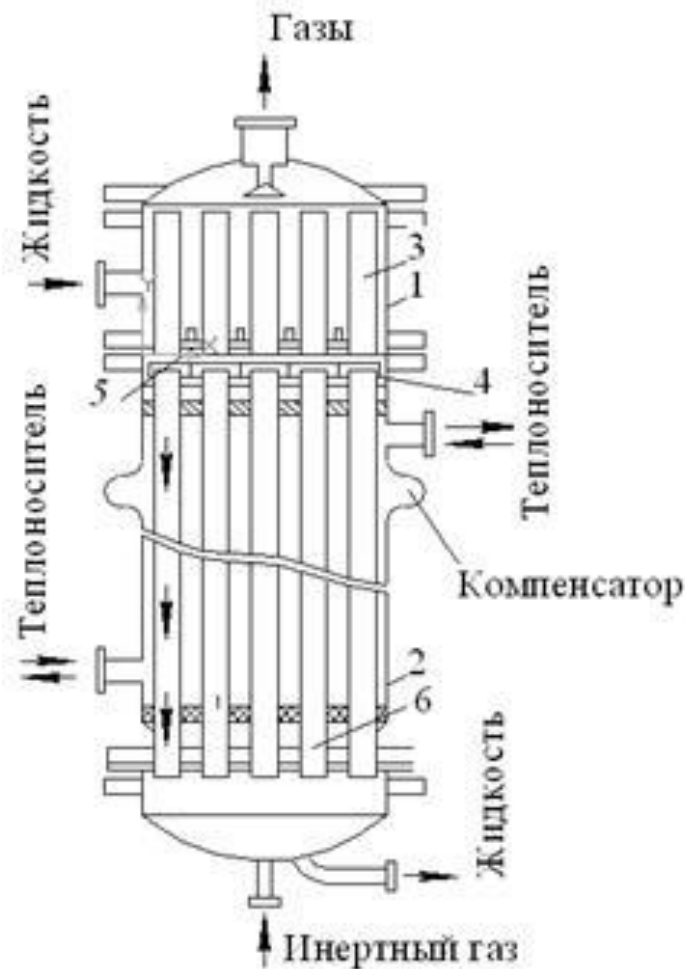


- Реакторы с мешалкой в циркуляционном контуре считаются наиболее эффективными аппаратами для проведения химических превращений в системах газ—жидкость.
- Однако вследствие сложности конструкции, особенно узла герметизации ротора привода вала мешалки, низкого к.п.д. электродвигателя аппараты пока не получили широкого распространения в промышленности.

Герметический электропривод 1, установленный на крышке сосуда 2. Винтовая мешалка 3, размещенная в узкой части центральной трубы 4, создает интенсивную циркуляцию жидкости. Изотермические условия реакции обеспечиваются вводом теплоносителя в рубашку 5. Газожидкостная смесь заполняет весь объем сосуда 2, а газ выводится из выносного сепаратора 6.



# Реакторы пленочные (РП)

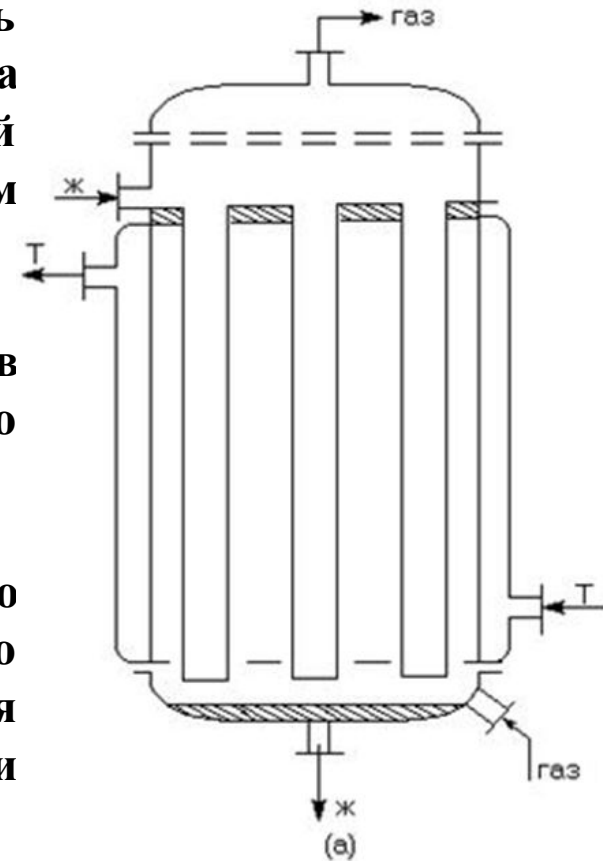


- Жидкость, подаваемая на верхнюю трубную решетку, равномерно распределяется по трубам 2 и в виде пленки, образованной оросителем 1, стекает вниз. Газ вводится в каждую трубу через газовые патрубки 3 и движется навстречу жидкости.
- Реакторы используются для проведения быстрых реакций, протекающих в диффузионной области
- При математическом моделировании пленочные реакторы считают аппаратами идеального вытеснения как по жидкой, так и по газовой фазам.

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.

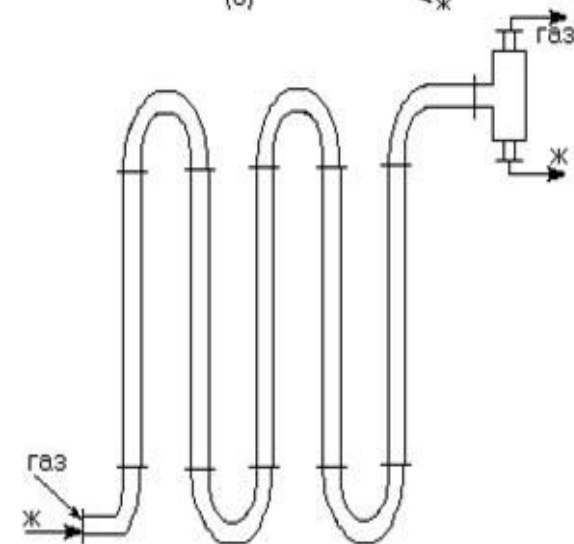
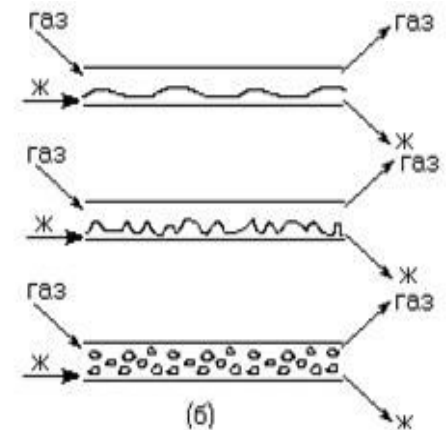


Более интенсивное взаимодействие фаз достигается в спутном (движущемся в одном направлении) газожидкостном потоке (рис. б).

В зависимости от скорости потоков возможны различные режимы течения.

На схеме показаны:

- полное расслоение фаз;
  - раздельно 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.

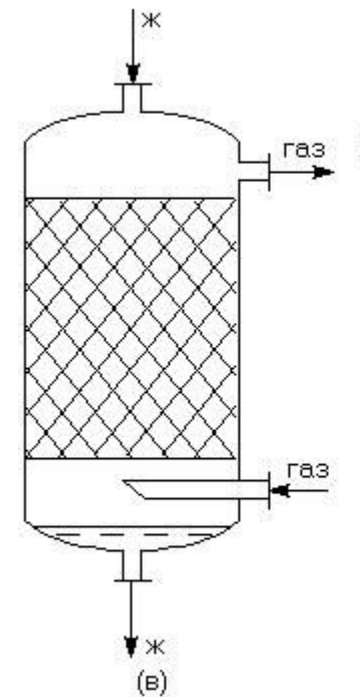


Более распространены насадочные реакторы (в).

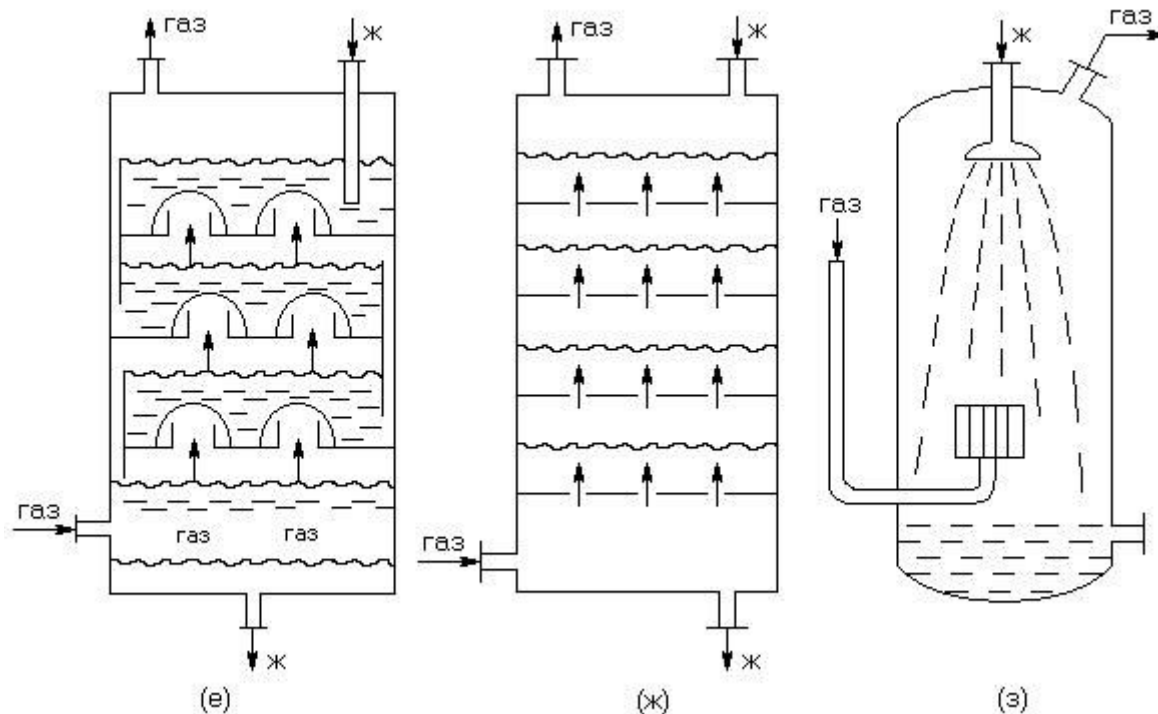
В аппарат засыпана насадка — сравнительно небольшие элементы, по поверхности которых стекает жидкость, а в пространстве между ними, как правило, противотоком движется газ.

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.



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).



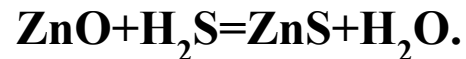


# 3. По фазовому состоянию реакционной смеси (продолжение)

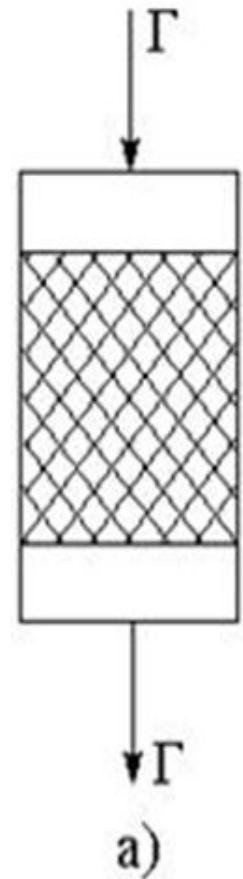
## 3.2. Реакторы для гетерогенных процессов

### Б. Реакторы для систем газ-твердое тело

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:

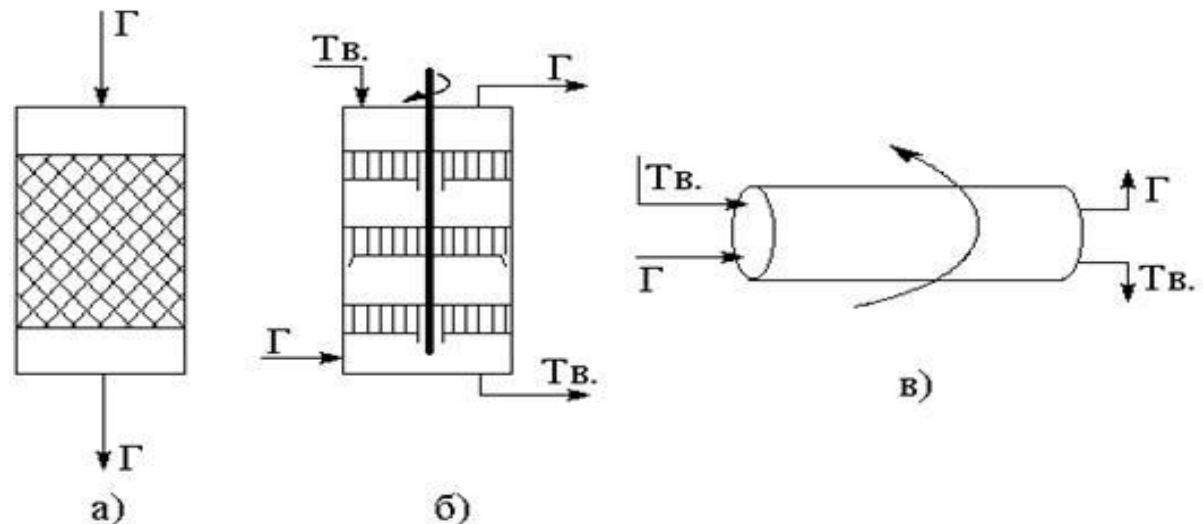


Поглощение  $H_2S$  протекает в сравнительно узкой зоне слоя, послойно. После появления «проскока»  $H_2S$  (неполного его поглощения из-за расходования сорбента) поглотитель заменяют.



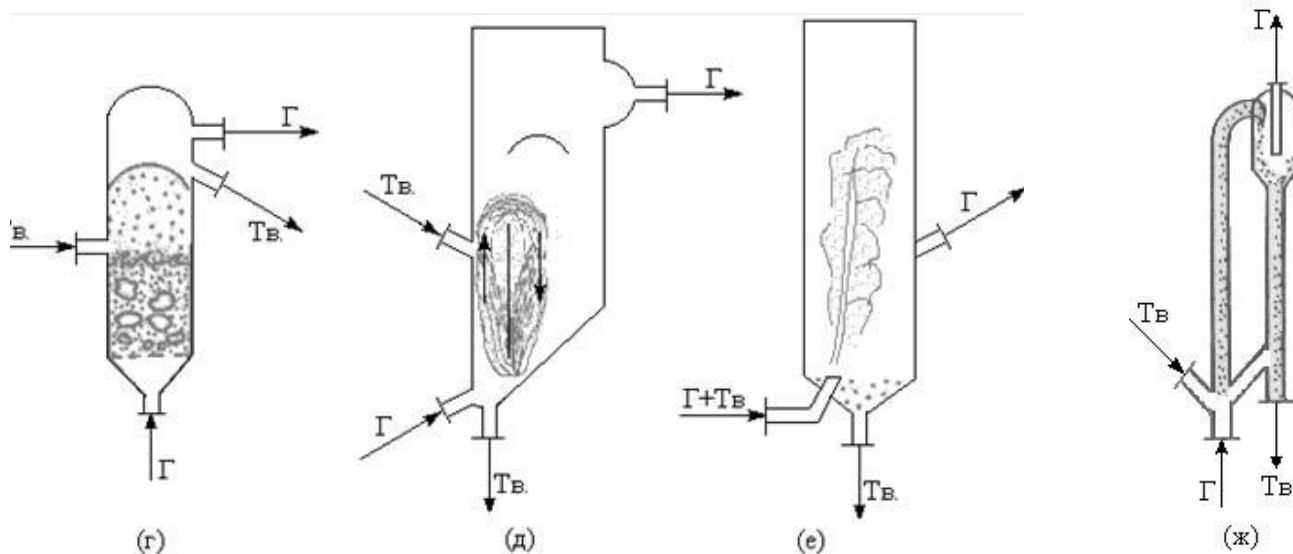


- Недостаток такого процесса в реакторе (а)– его цикличность.
- Для организации непрерывного процесса обновления твердой фазы предлагается процесс, осуществляемый в многоколоночном реакторе, снабженном скребком на каждой полке, которые передвигают материал по полке и пересыпают его с одной полки на другую (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.



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.



- **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, Такой реактор типичен для кислотного разложения апатита.**

## 3. По фазовому состоянию реакционной смеси (продолжение)

### 3.2 Реакторы для гетерогенных процессов

#### В. Реакторы для систем жидкость-твердое тело

- Процессы с участием твердых и жидких реагентов служат основой многих химических производств.
- К таким процессам относится 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 и многие другие.

# Реакторы для системы “жидкость - твердое”

Реакторы для таких процессов представляют собой типовую аппаратуру, в которой проводятся процессы растворения, экстрагирования, кристаллизации, а также химические процессы.

Большинство химических превращений проходит в **диффузионной области**, поэтому используются приемы позволяющие развить межфазную поверхность и повысить скорость перемещения фаз.

Такие приемы сводятся в основном к пропусканию жидкости через взвешенный слой твердого материала и различным способам перемешивания.



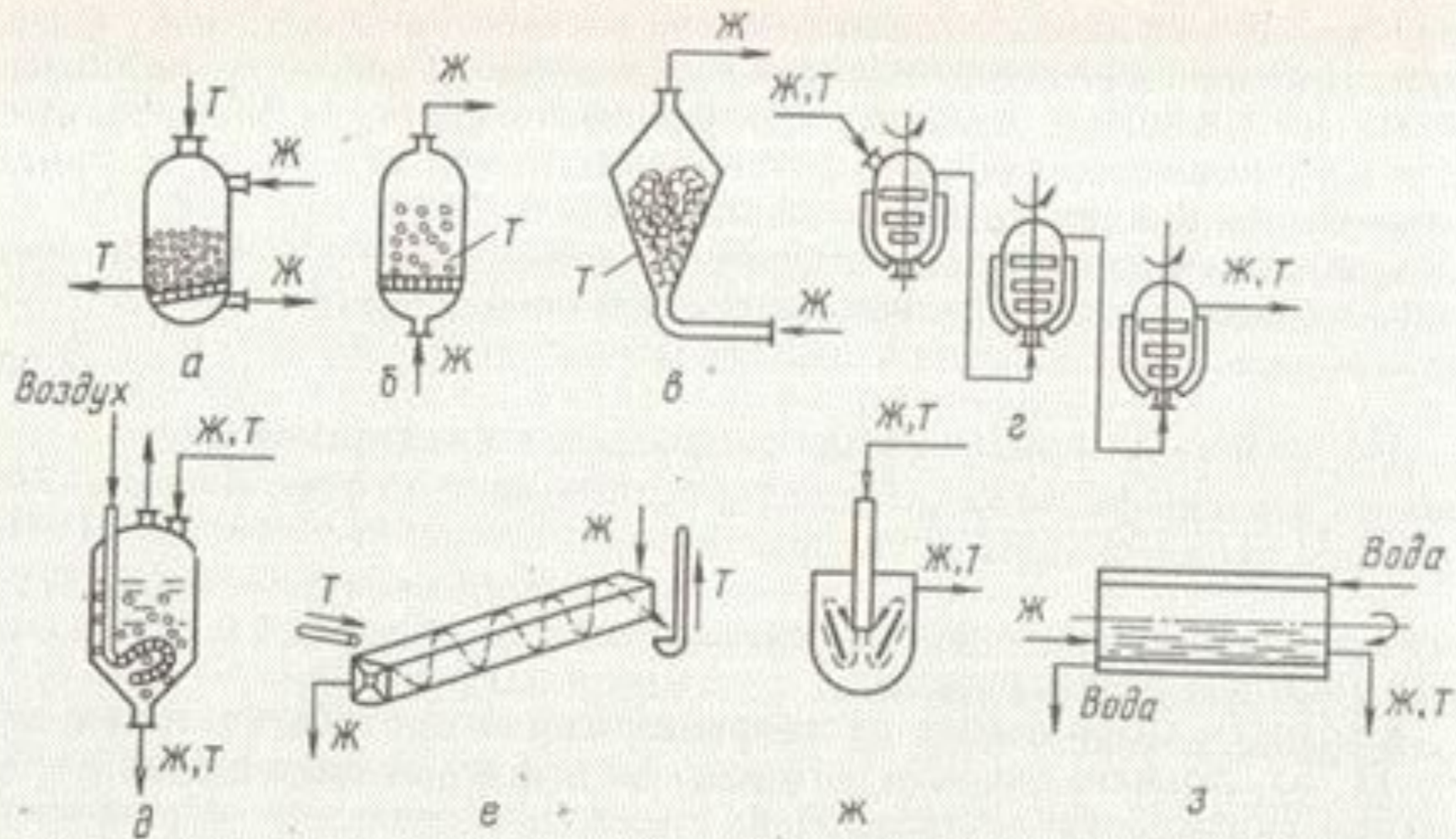


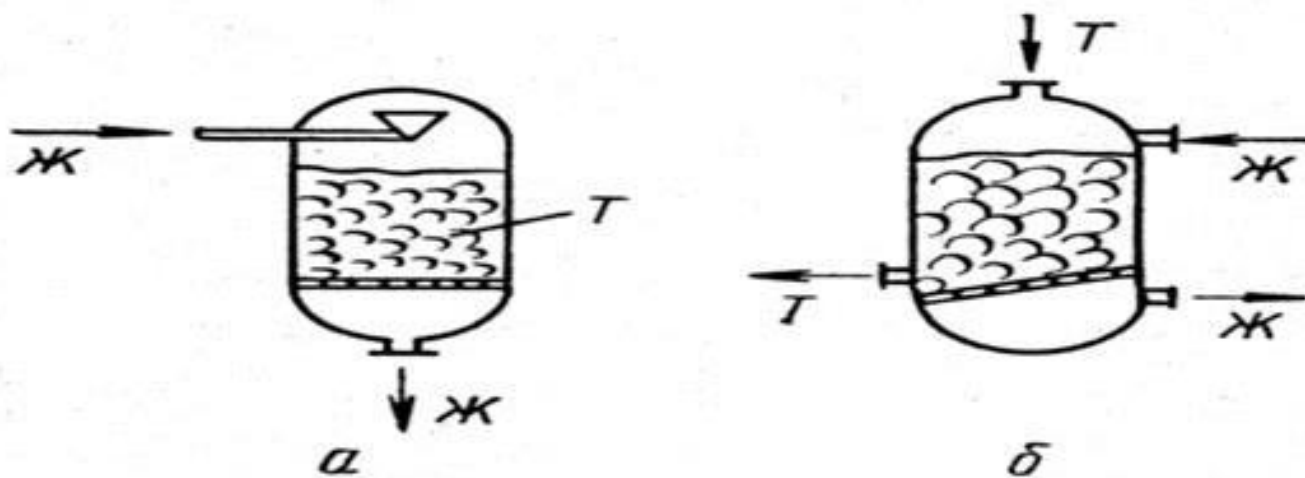
Рис. 4.20. Типы реакторов для процессов с участием твердых и жидких реагентов (Т—Ж):

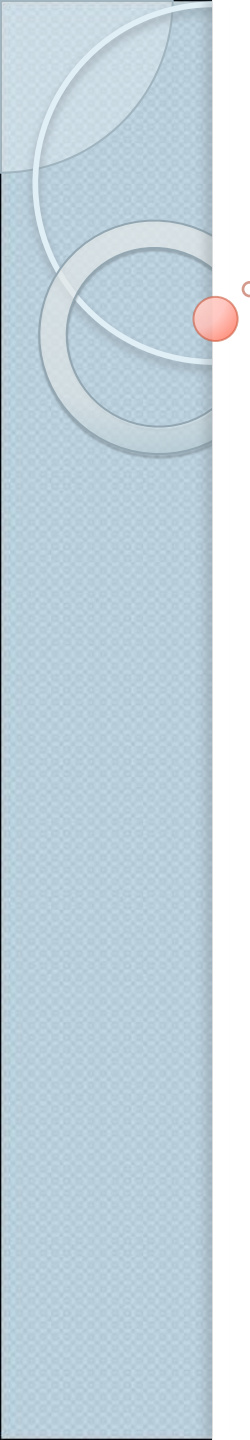
а — с фильтрующим слоем твердого реагента; б, б' — реакторы взвешенного слоя (б — с обычным взвешенным слоем; б' — с фонтанирующим слоем); в — реакторы с перемешивающими устройствами (в — с механическими мешалками, г — с пневматическим перемешиванием, г — со шнеком); ж — струйно-циркуляционный смеситель; з — трубчатый (баррельный) реактор; Т — твердый реагент; Ж — жидкий реагент.



## Реакторы с фильтрующим слоем

Реакторы с фильтрующим слоем состоят из полого цилиндрического корпуса, внизу которого укреплена горизонтально (а) или наклонно (б) ситчатая или колпачковая тарелка (иногда решетка). На тарелке расположен слой пористого материала (адсорбент), через который пропускают жидкость. Величина межфазной твердой поверхности возрастает с увеличением пористости материала; внутренняя поверхность пор в сотни и тысячи раз превышает внешнюю поверхность.





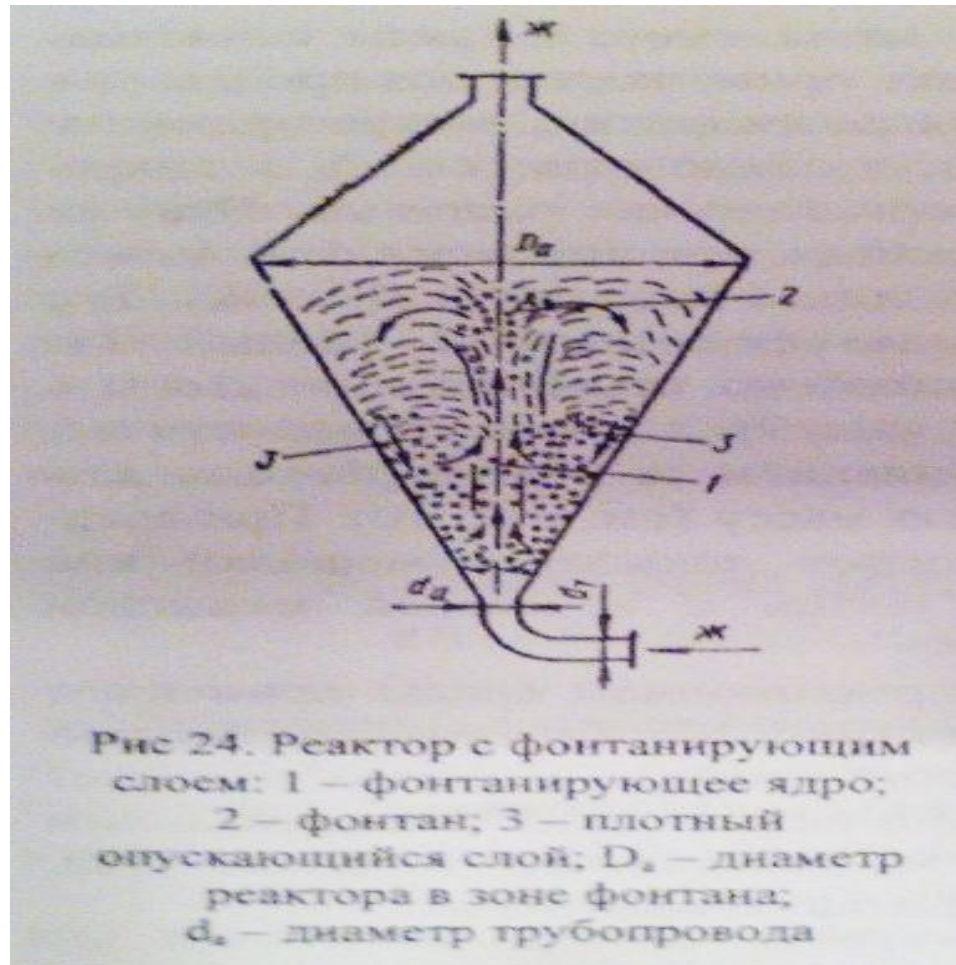
Основное сопротивление диффузии жидкого реагента оказывают внутренние каналы пор, т.е процессы идут в области внутренней диффузии.

Направление потока жидкости и его скорость зависит от высоты фильтрующего слоя и размеров гранул.

Чаще всего поток жидкости проходит в реакторе сверху вниз.

В реакторах с фильтрующим слоем осуществляются различные адсорбционные процессы, ионообмен, выщелачивание спеков в технологии солей, щелочей, глинозема.

# Реакторы с фонтанирующим слоем



# Реакторы с фонтанирующим слоем

Применяется при небольшой разнице плотностей фаз, и при крупных зернах твердого реагента.

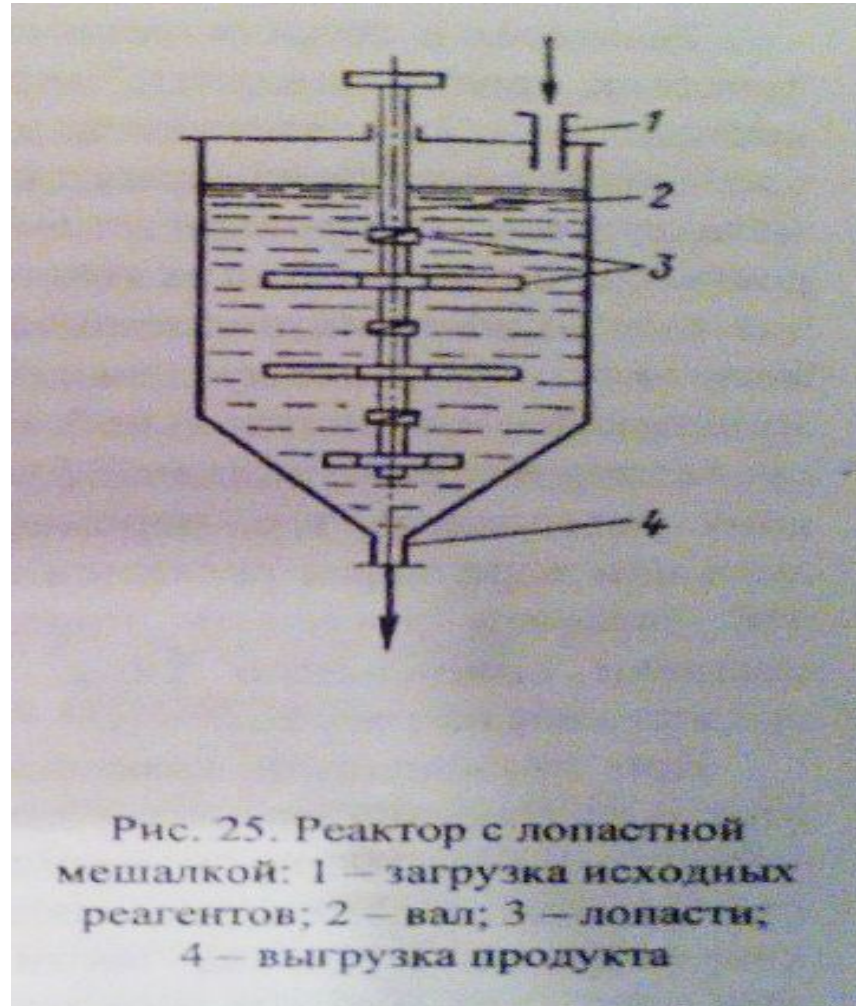
Фонтанирующий слой – разновидность взвешенного слоя.

Применение целесообразно при обработке полидисперсных, твердых материалов, в агрессивной реакционной среде, когда невозможно использовать металлическую решетку.

Для создания фонтанирующего слоя, диаметр нижней части реактора не должен превышать диаметр трубопровода.



# Реакторы с механическими мешалками



# Реакторы с механическими мешалками

Широко применяются для растворения, экстрагирования, выщелачивания, полимеризации, в органическом синтезе и т.д.

Тип мешалки определяется вязкостью реакционной среды. Для жидкостей с незначительной вязкостью применяют реакторы с пропеллерными мешалками, пневматическими мешалками.

При средней вязкости жидкости применяют лопастные мешалки или мешалки спирального типа.



# Реакторы с якорными мешалками

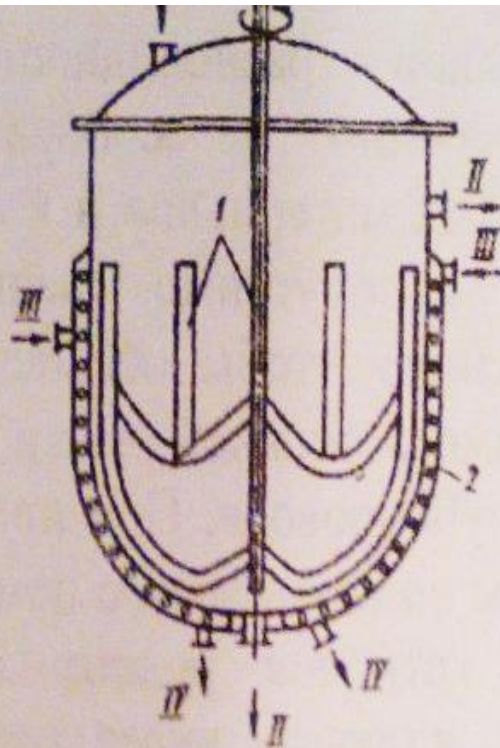


Рис. 26. Реактор с якорной мешалкой: 1 – мешалка; 2 – рубашка для обогрева; I – загрузка реагентов; II – выход продукта; III – выход пара; IV – выход конденсата

# Реакторы с якорными мешалками

Используются при повышенной вязкости реакционной среды. 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.

### 3. По фазовому состоянию реакционной смеси

#### 3.3. Реакторы для гетерогенных каталитических процессов

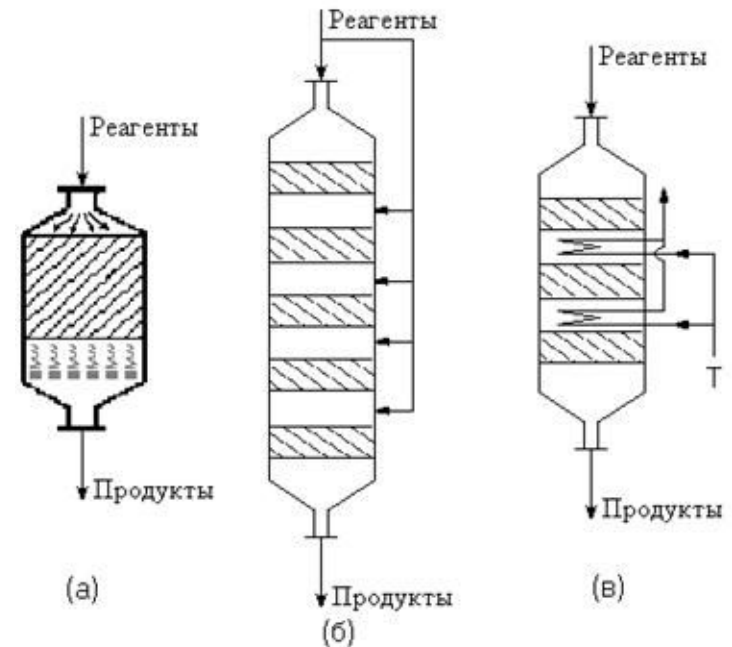


# Реактор с неподвижным слоем катализатора, адиабатический

Катализатор насыпают "в навал", после чего требуется тщательное выравнивание слоя для обеспечения равномерного прохождения через него реакционной смеси.

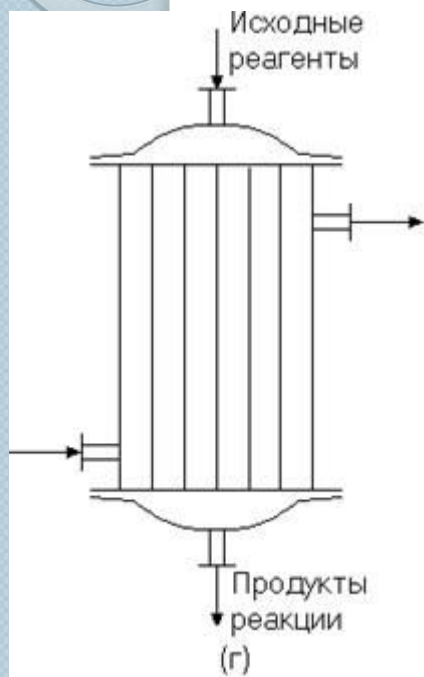
Использование варианта адиабатического реактора часто приводит к большим перепадам температур по высоте каталитического слоя и существенного отклонения средней температуры от ее оптимального значения.

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 (б) или путем подачи между секциями охлажденного или перегретого реагента (компонента) (в).



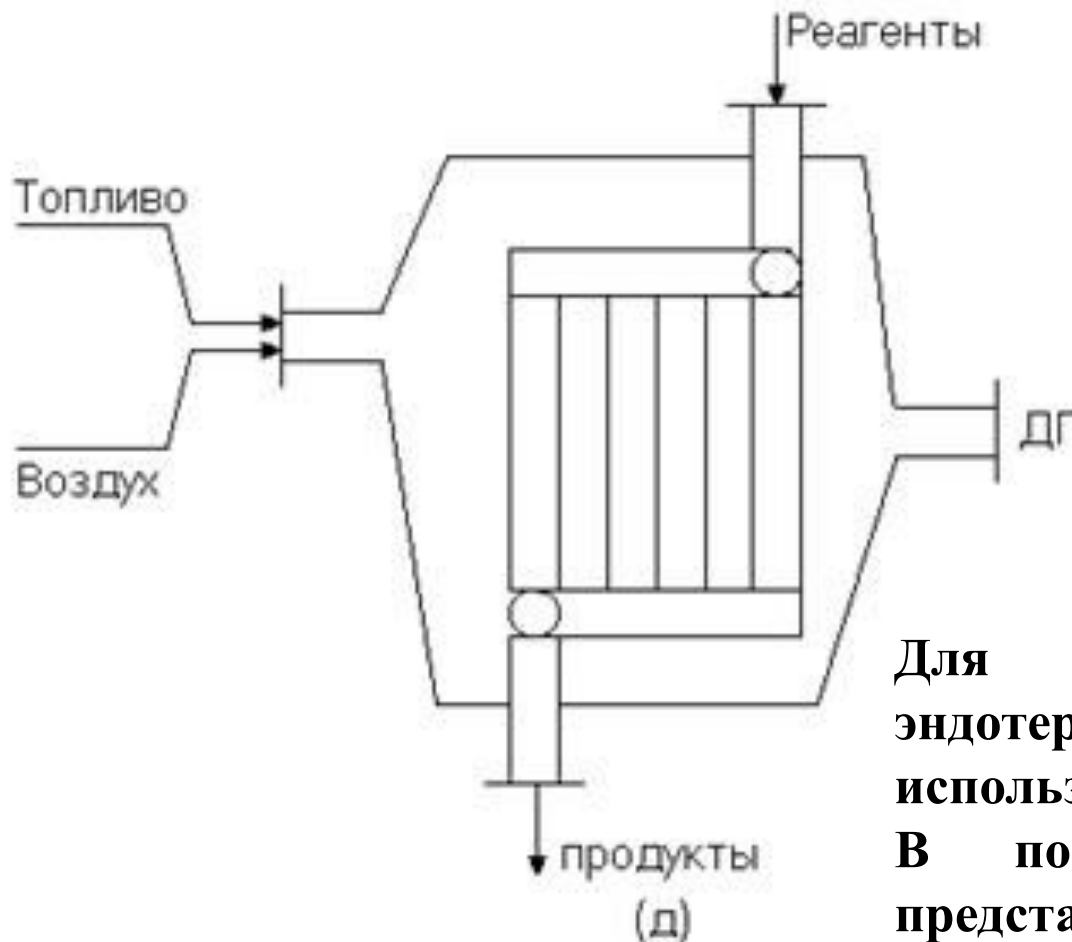


# Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов



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.



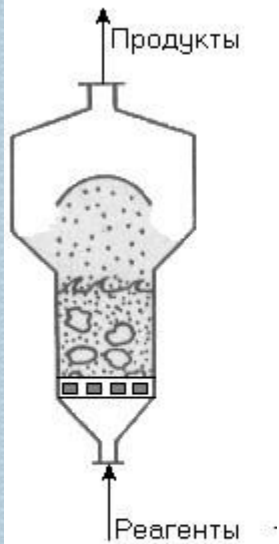
# Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов

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, 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.

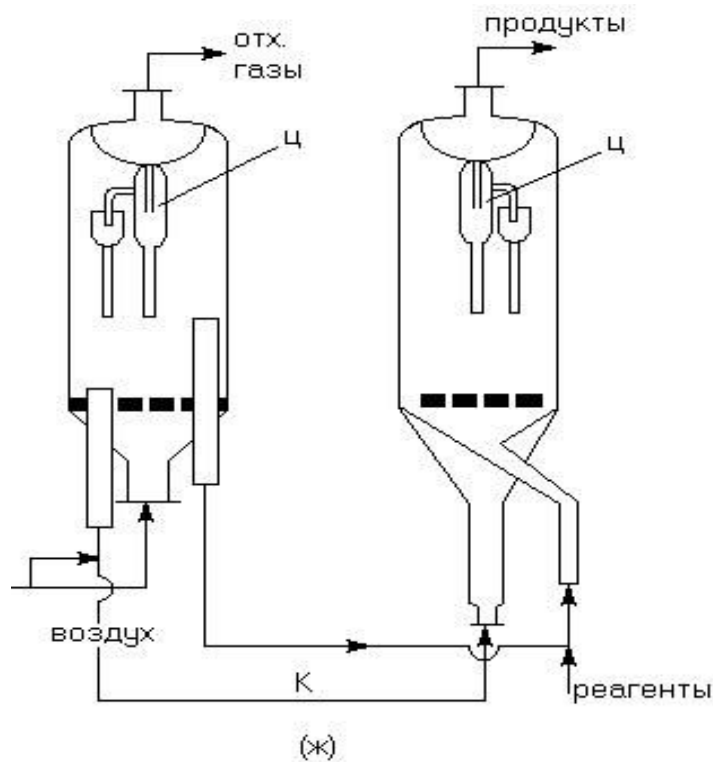
Интенсивное движение частиц обеспечивает хороший теплоотвод – коэффициент теплоотдачи от кипящего слоя более чем на порядок превышает таковой от неподвижного слоя.

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.



(e)

# Реакторы для гетерогенно-каталитических процессов

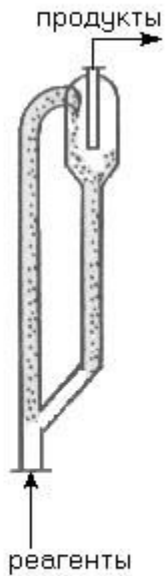


В целом такая система "реактор – регенератор" обеспечивает непрерывность процесса в целом. Такой тип реакционного узла можно организовать в процессе каталитического крекинга нефтепродуктов, в котором катализатор быстро закоксуывается, теряя свою активность. Его непрерывно выводят из реактора в регенератор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



(з)

Если скорость газового потока будет такой, что твердые частицы будут увлекаться им, то реализуется режим пневмотранспорта (з) 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.

## 4. По способу организации процесса

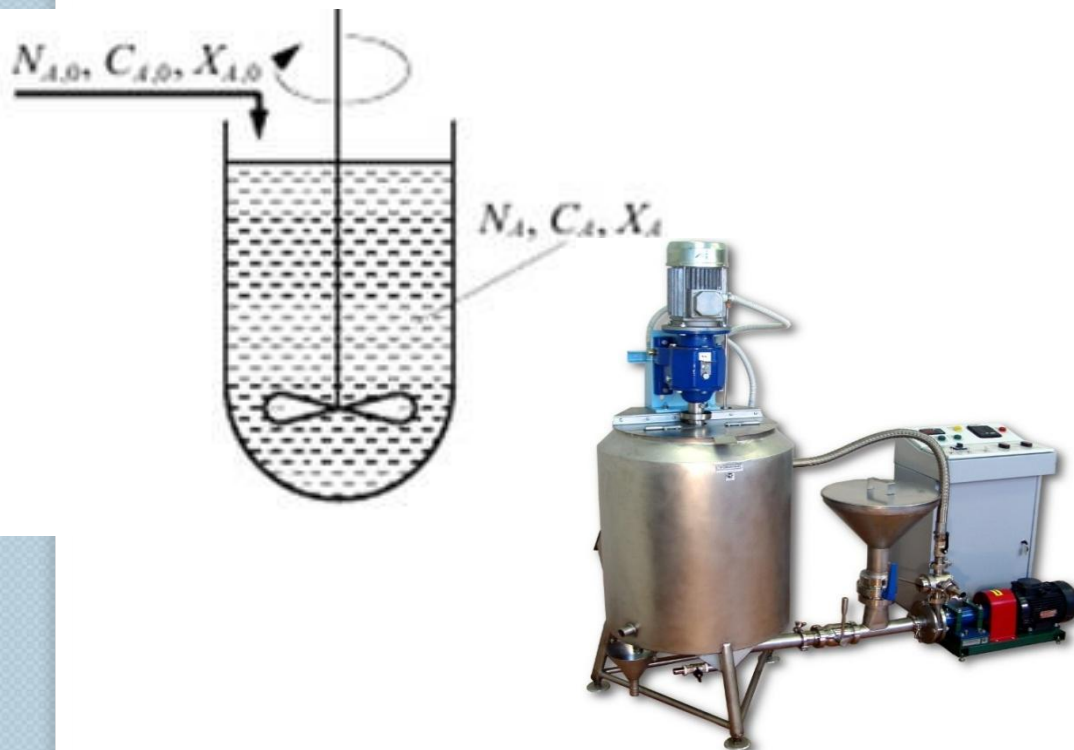
- 4.1. Периодического действия
- 4.2. Непрерывного действия
- 4.3. Полунепрерывного (полупериодического) действия



# 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

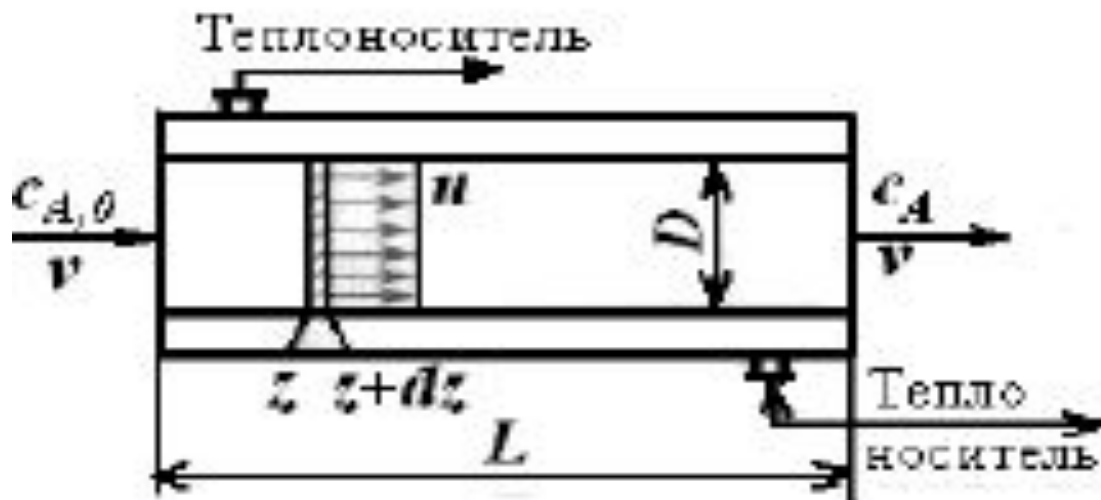
## Реактор идеального вытеснения (РИВ)

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)

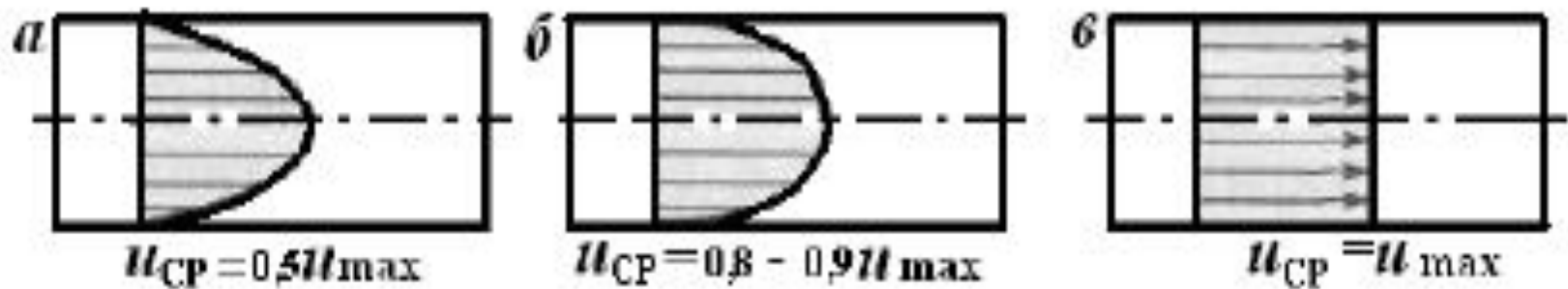


Рис. 5.5. Профили линейных скоростей потока при ламинарном (а), развитом турбулентном (б) и идеальном поршневом (в) режимах течения жидкости

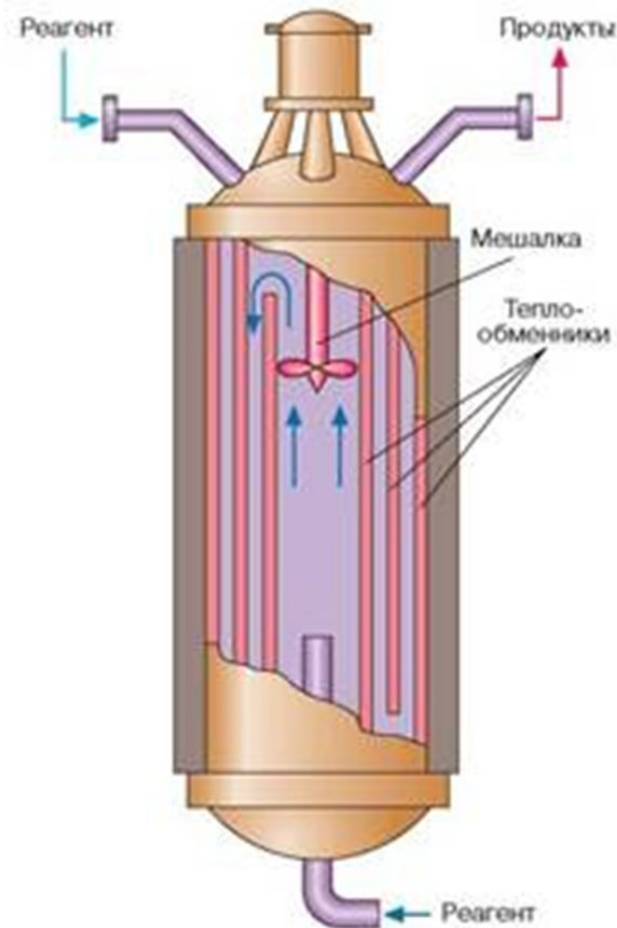
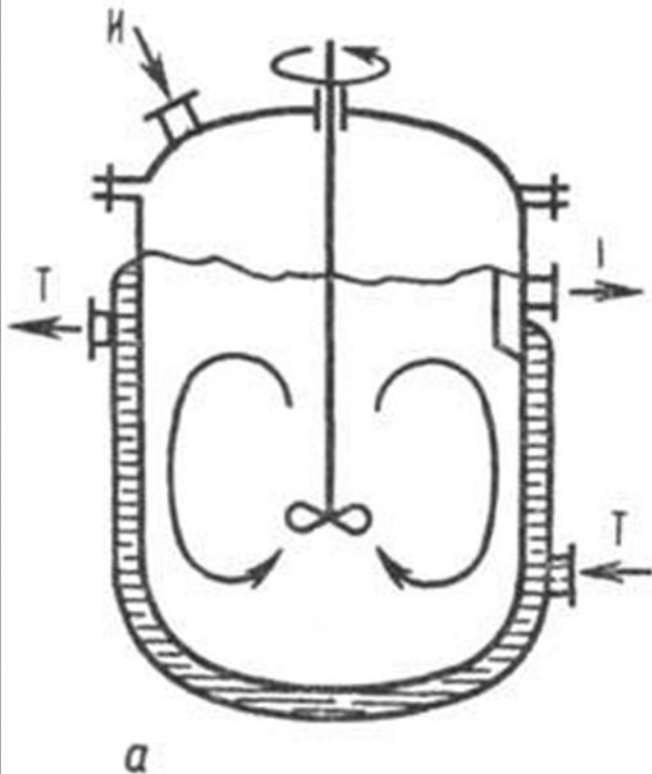
Состав каждого элемента объема последовательно изменяется по длине реактора вследствие протекания химической реакции. Так, например, концентрация исходного реагента А постепенно меняется по длине реактора от начального  $C_{A0}$  до конечного значения  $C_A$ . Следствием такого режима движения реакционной 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

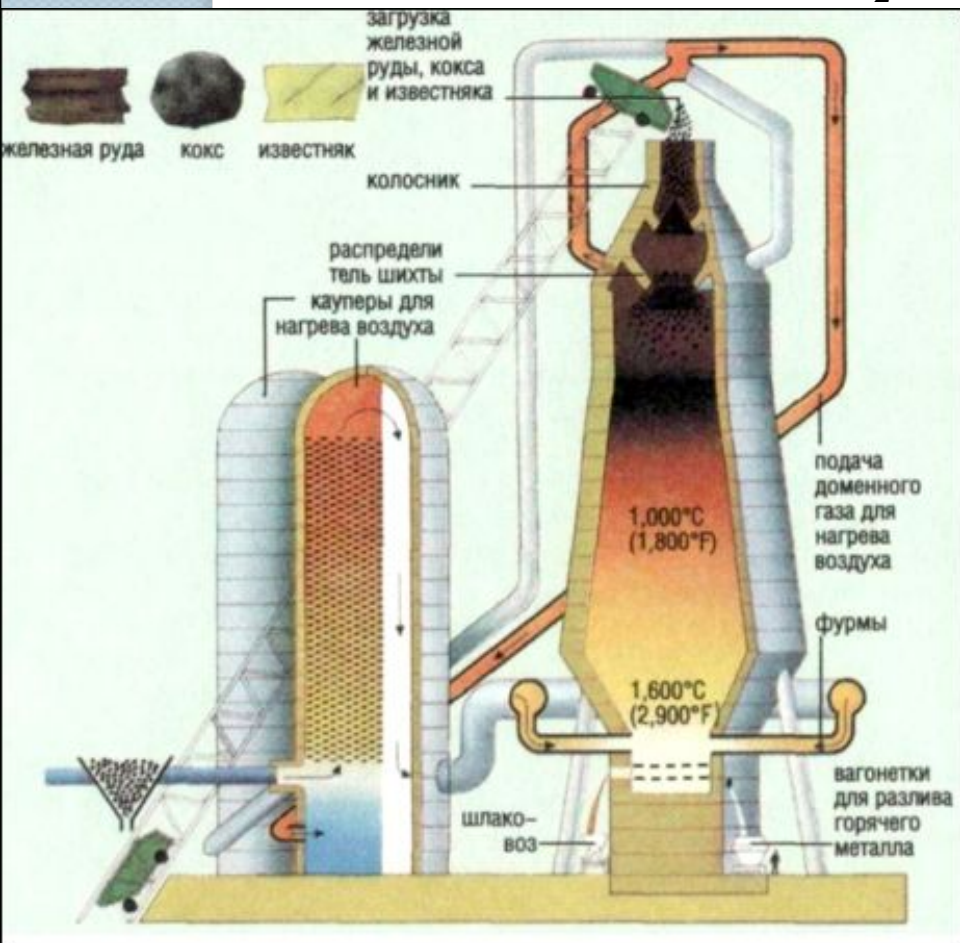
В РИС-Н наблюдается резкое изменение концентрации исходного реагента при входе в реактор в результате мгновенного смешения поступающей смеси с реакционной массой, уже находящейся в реакторе. Где концентрация исходного реагента значительно ниже, чем концентрация исходного реагента в поступающей смеси

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.

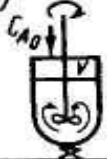
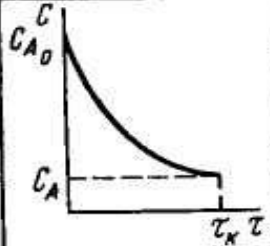
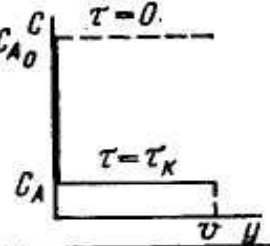
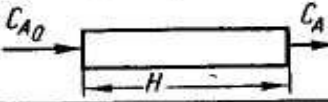
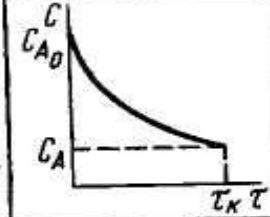
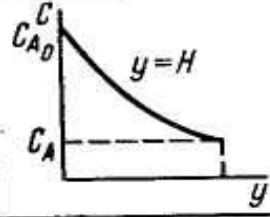

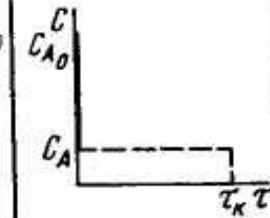
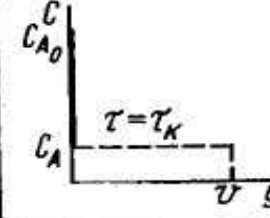
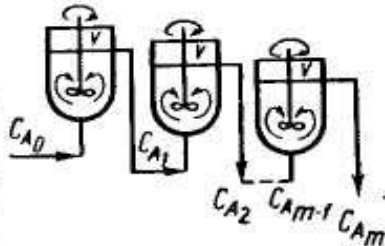
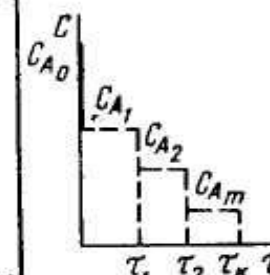
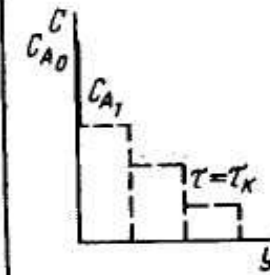
## Реакторы полунепрерывного действия

Примером такого реактора может служить доменная печь, в которую непрерывно загружают твердую шихту. А готовый продукт (чугун) выпускают периодически. В печи разложения  $\text{CaCO}_3$  с получением  $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$ , наоборот, шихта (уголь и  $\text{CaCO}_3$ ) загружаются периодически, а продукты реакции ( $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$ ) 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) 			$\tau = C_{A0} \int_0^{x_A} \frac{dx_A}{-r_A}$
Идеального вытеснения (стационарный) 			$\tau = C_{A0} \int_0^{x_A} \frac{dx_A}{-r_A}$
Полного смешения проточный (стационарный) 			$\tau = \frac{C_{A0} x_A}{-r_A}$
Каскад реакторов полного смешения 			$\tau_m = \frac{C_{A0} - C_{Am}}{-r_{Am}}$



## 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  $\Delta C$  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.

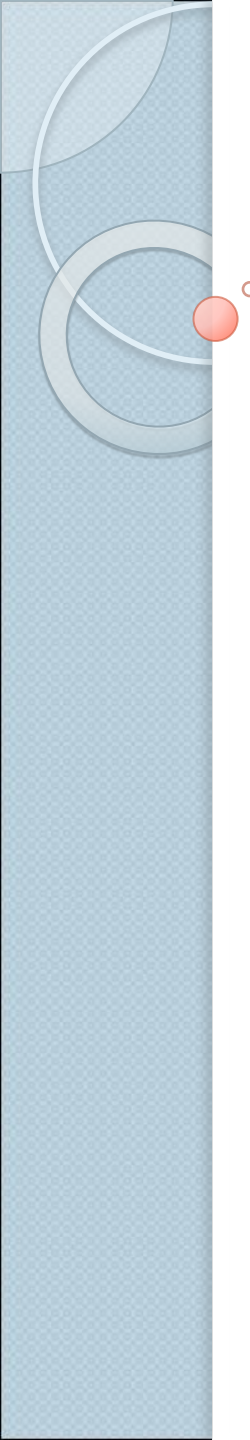
В реакторах смешения, как правило, эффективнее, чем при режиме вытеснения, протекают реакции с высокими концентрациями реагентов и при больших тепловых эффектах реакции.

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.



## 5. По характеру изменения параметров процесса во времени

### **5.1. стационарные**

(протекание химической реакции в произвольно выбранной точке реактора характеризуется постоянством концентраций, скорости и других показателей во времени)

### **5.2. нестационарные**

(происходит изменение параметров химического процесса во времени)

# 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.

## 6. По конструктивным характеристикам

**6.1. емкостные**

**6.2. трубчатые**

**6.3. колонные**

**6.4. реакторы типа теплообменника**

**6.5. реакционные печи и др.**

---

*см. презентацию Реакторы 2*

*см. видео в папке*

*самостоятельно классифицируйте реакторы*