

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ЛЕСА»

Ю.Н. Жилин, А.Н.Иванкин

**ПРОЦЕССЫ МАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМАХ  
С УЧАСТИЕМ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ.  
Ч. I. ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ**

Москва  
Издательство Московского государственного университета леса  
2016

УДК 62  
Ж18

*Разработано в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки «Химическая технология», профиль подготовки «Химическая технология переработки древесины» для бакалавров и магистров.*

Рецензент: профессор кафедры химической технологии древесины и полимеров Винославский В.А.

Работа подготовлена на кафедре химии и химических технологий лесного комплекса

**Жилин Ю.Н.**

Ж18        Процессы массопереноса в системах с участием твердой фазы: Ч. I. Химические реакторы. Изд. 2, испр. и перераб.: учеб.-методич. пособие / Ю.Н. Жилин, А.Н. Иванкин. – М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2016. – 24 с.

В учебно-методическом пособии представлены описания устройств и принцип действия основных химических и биохимических реакторов, используемых в технологических процессах. Предназначено для бакалавров и магистров направления «Химическая технология», профиля подготовки «Химическая технология переработки древесины» при изучении курсов « Процессы массопереноса в системах с участием твердой фазы», «Химические реакторы».

УДК 62

© Ю.Н. Жилин, А.Н.Иванкин, 2016

## **Предисловие**

Программы по учебным дисциплинам: «Химические реакторы», «Основы биотехнологии» для бакалавров, а также «Процессы массопереноса в системах с участием твердой фазы» для магистров предполагает практическое обучение студентов конструктивным особенностям и условиям работы аппаратов, в которых происходит массоперенос в химических реакциях.

В пособии представлены основные варианты конструкций применяемых реакторов, базовые принципы их проектирования и использования в технологиях. Материал позволяет закрепить практические навыки выполнения аппаратурно-технологического оформления химико-технологических процессов для студентов, обучающихся по направлению «Химическая технология» профиля «Химическая технология переработки древесины».

## 1. Реакторы

Химический реактор – агрегат для проведения химических реакций в объёме от нескольких миллилитров до десятков кубических метров (крупнотоннажное производство). В химическом реакторе преобразуются химические вещества, в биореакторах имеют дело с живыми системами.

### 2. Основные типы химических реакторов

Реактор является основным элементом технологической схемы, от совершенства которого зависит качество выпускаемой продукции. Для всех реакторов существуют общие принципы, на основе которых можно найти связь между конструкцией аппарата и закономерностями протекающего в нем процесса.

Критериями, по которым классифицируют реакционную аппаратуру, являются *периодичность* или *непрерывность* процесса, его *гидродинамический* и *тепловой режимы*, *физические свойства* взаимодействующих веществ.

По *принципу организации процесса* химическая реакционная аппаратура может быть разделена на три группы:

- реактор непрерывного действия;
- реактор периодического действия;
- реактор полунепрерывного (полупериодического) действия.

По *гидродинамическому режиму* различают следующие типы:

- реактор вытеснения непрерывного действия (РВНД);
- реактор смешения непрерывного действия (РСНД);
- реактор промежуточного типа (с промежуточным гидродинамическим режимом).

По *тепловому режиму* работы реакторы делят на следующие типы:

- изотермический реактор;
- адиабатический реактор;
- политропический реактор.

В *зависимости от условий протекания реакций* и технологических требований реакторы делятся также:

- реакторы для гомогенных и гетерогенных систем;
- реакторы низкого, среднего и высокого давления;
- реакторы низкотемпературные и высокотемпературные.

Основная задача работы реактора – получение конечного продукта из исходных компонентов с максимальной эффективностью процесса.

При этом должно быть обеспечено создание устойчивого и

стабильного режима проведения реакции;  
 высокие энергетические показатели;  
 минимальная стоимость реактора;  
 простота работы и ремонта.

Существует две основные модели ведения реакций в реакторах:

- реактор идеального смешения;
- реактор идеального вытеснения.

Химические реакторы внутренним объемом до 10 литров применяются в основном в лабораториях в исследовательских целях и в пилотных установках.

Реакторы объемом от 100 литров и более работают в химической, фармацевтической, целлюлозной, парфюмерной промышленности и других. Химические реакторы используются для ведения различных химических реакций, испарения, кристаллизации, плавления и гомогенизации исходных компонентов или продуктов реакции.

**Реакторы идеального вытеснения** (рис. 1). Реактор идеального вытеснения характеризуется переменной концентрацией реагирующих веществ по длине аппарата, наибольшей разницей концентраций на входе и выходе из реактора и, следовательно, наибольшей средней движущей силой процесса.

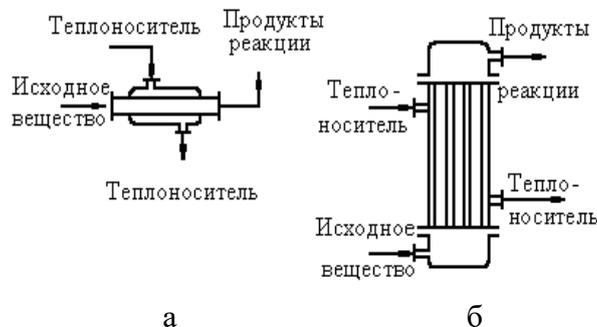


Рис. 1. Реакторы идеального вытеснения. а – однотрубный реактор; б – многотрубный реактор

Изменение концентрации в реакционном объеме (рис. 2) носит плавный характер, так как последующие реакционные объемы реагирующих веществ не смешиваются с предыдущим, а полностью вытесняются.

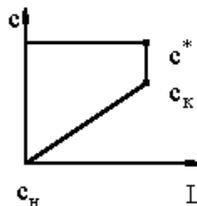


Рис. 2. Изменение начальной концентрации превращаемого вещества  $C_n$  по длине реактора  $L$  в конечную концентрацию  $C_k$ . Суммарная

концентрация веществ по материальному балансу постоянна:  
 $C_n = C = C_k + C^*$

Практически к режиму идеального вытеснения можно приблизиться в трубчатом реакторе с малым диаметром и большой длиной при относительно высоких скоростях движения реагирующих веществ. Реакторы идеального вытеснения находят широкое применение для проведения как гомогенных, так и гетерогенных каталитических процессов (например, окисления NO в NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> в SO<sub>3</sub>, синтеза аммиака и метилового спирта и т.д.).

**Реакторы идеального смешения** (рис. 3). 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.

Поэтому изменение концентрации реагирующих веществ на входе в реактор носит скачкообразный характер. Средняя движущая сила процесса в таком аппарате будет меньше, чем в аппарате полного вытеснения.

Реакторы этого типа наиболее широко применяются для проведения таких процессов, как нитрование, сульфирование, полимеризация и т.д.

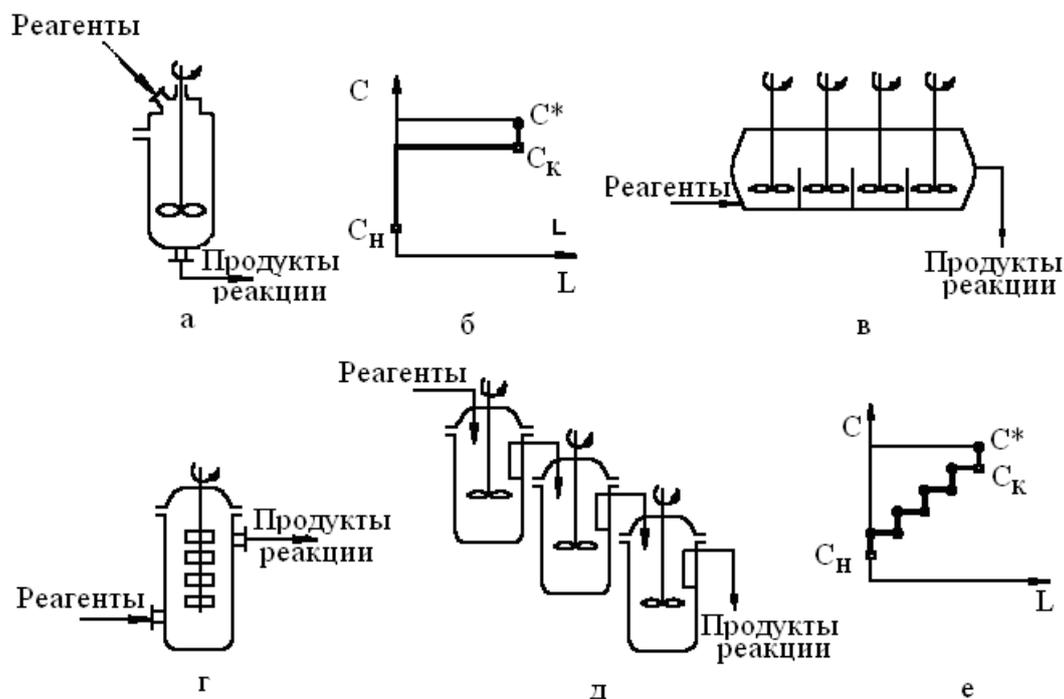


Рис. 3. Реакторы идеального смешения. а – одноступенчатый аппарат; б – характер изменения концентрации в одноступенчатом аппарате от начальной концентрации исходных реагентов  $C_n$  до конечной концентрации продуктов  $C_k$ ; в – вертикальный многоступенчатый аппарат; г – многосекционный горизонтальный аппарат; д – батарея аппаратов смешения; е – характер изменения концентрации в многоступенчатом аппарате

В некоторых случаях процесс химического превращения вещества проводится не в одном аппарате смешения, а в нескольких таких аппаратах, соединенных последовательно. Такая система, состоящая иногда из 20 и более аппаратов, получила название каскада реакторов (рис. 3 д). В каскаде реакторов изменение концентрации реагирующих веществ носит ступенчатый характер, так как продукт реакции предыдущего аппарата является исходным реагирующим веществом в последующем аппарате.

Гидродинамический режим работы каскада реакторов является промежуточным и зависит от числа аппаратов; с увеличением числа реакторов в каскаде он приближается к режиму вытеснения, а при уменьшении – к режиму смешения.

В каскаде увеличивается время пребывания реагирующих веществ по сравнению с одним реактором смешения, а также возрастает выход продукта реакции по сравнению с реактором вытеснения.

**Реактор промежуточного типа.** В реакторе промежуточного типа нельзя осуществлять полностью ни один из перечисленных выше гидродинамических режимов движения реагирующих веществ. Средняя движущая сила процесса в таком аппарате больше, чем в аппарате полного смешения, но меньше, чем в аппарате полного вытеснения. Следует отметить, что значительная часть реакционной химической аппаратуры работает именно в этом гидродинамическом режиме.

Реакторы промежуточного типа применяют в тех случаях, когда процесс химического превращения вещества сопровождается большим тепловым эффектом или протекает при высоких концентрациях реагирующих веществ, а также в случае, когда одно из реагирующих веществ имеет низкую скорость растворения в реакционной смеси.

На рис. 4 представлен реактор непрерывного действия в составе установки.

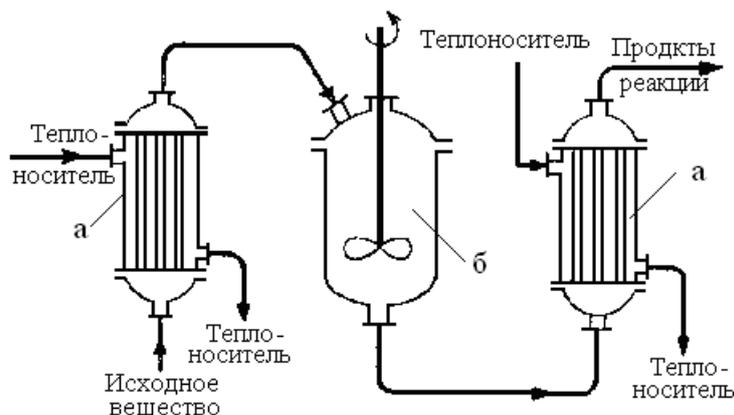


Рис. 4. Установка для непрерывного процесса:  
а – теплообменные аппараты; б – реактор

Здесь все отдельные стадии процесса химического превращения вещества (подача реагирующих веществ, химическая реакция, вывод готового продукта) осуществляются параллельно и одновременно. Характер изменения концентраций реагирующих веществ в реакционном объеме различен в разных точках объема аппарата, но постоянен во времени для одной и той же точки объема.

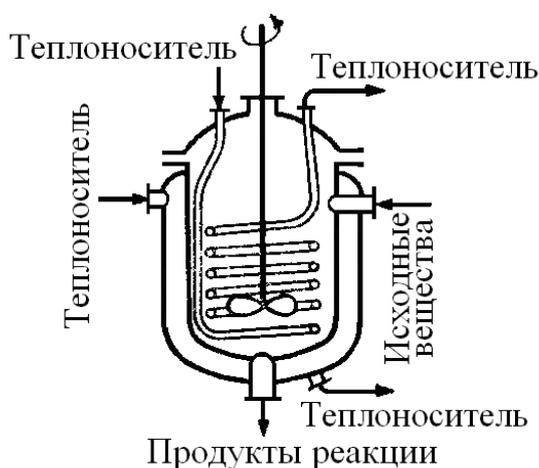


Рис. 5. Аппарат периодического действия

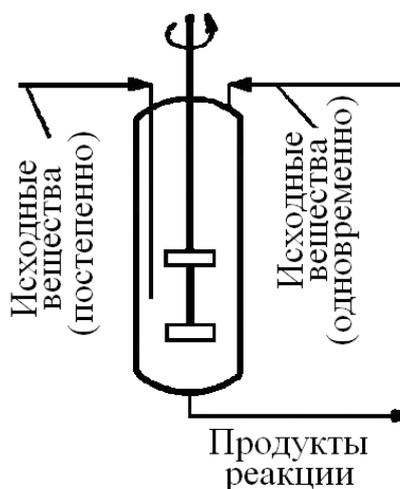


Рис. 6. Аппарат промежуточного типа

**В реакторе периодического действия** (рис. 5) все отдельные стадии процесса протекают последовательно в разное время. Характер изменения концентраций реагирующих веществ одинаков во всех точках реакционного объема, но различен во времени для одной и той же точки объема.

**Реактор полунепрерывного действия** (рис. 6) работает в неустановившихся условиях. Такой реактор можно рассматривать как непрерывно действующий аппарат, в котором потоки входящего и выходящего из реактора вещества не равны (вследствие чего изменяется общая масса реагирующих веществ в объеме), и, кроме того, как периодически действующий аппарат, в котором ввод одного из реагирующих веществ или вывод продукта реакции осуществляется периодически.

### 3. Принципы проектирования химических реакторов

В технологической схеме химический реактор самостоятельно не используется. Он сопряжен с аппаратами подготовки сырья и аппаратами разделения реакционной смеси и очистки целевого продукта. Конструкция и режим работы химического реактора определяет эффективность и экономичность всего процесса.

Выбор конструкции и размеров химического реактора определяется скоростями протекающих в них процессов массо- и теплообмена и химических реакций. В современных условиях выбор реактора осуществляют по каталогам фирм производителей. При этом задаются производительность установки, основным элементом которой является реактор, и степень превращения сырья.

Основным показателем работы реактора, свидетельствующим о его совершенстве и соответствии заданной цели, является интенсивность.

Расчет химического реактора состоит из следующих операций:

- по законам термодинамики и гидродинамики определяется направление химического процесса; выявляются условия равновесия, по которым устанавливаются начальные и конечные значения параметров процесса;

- составляют материальный и тепловой балансы реактора;

- по значениям рабочих и равновесных параметров определяют движущую силу процесса и на основе законов кинетики находят коэффициенты скорости процесса;

- по полученным данным определяют основные размеры реактора: высоту (длину), диаметр, площадь поперечного сечения, поверхность нагрева (охлаждения), поверхность фазового контакта и другие характеристики.

Некоторые конструкционные принципы эффективного устройства реакторов приведены на рис. 7 – 9.

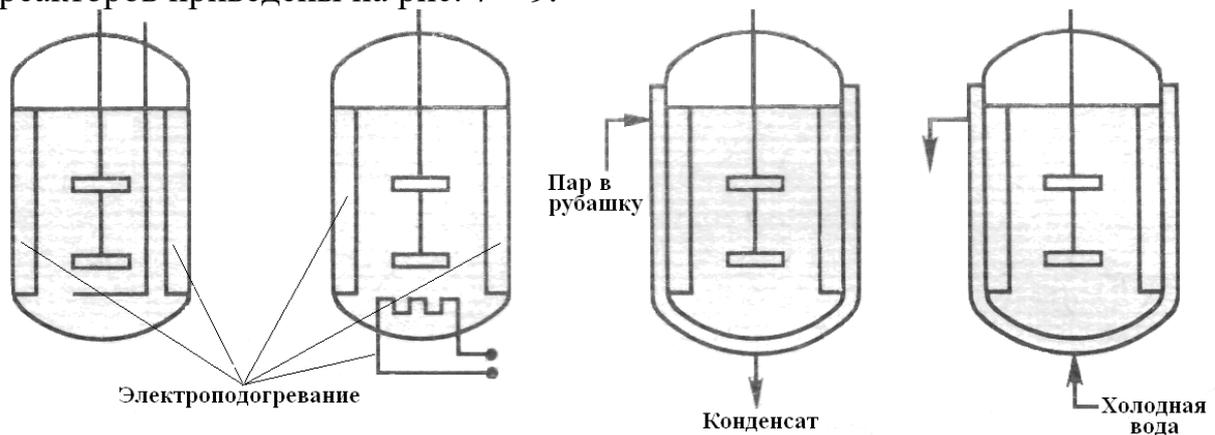


Рис. 7. Методы нагрева и охлаждения содержимого реакторов

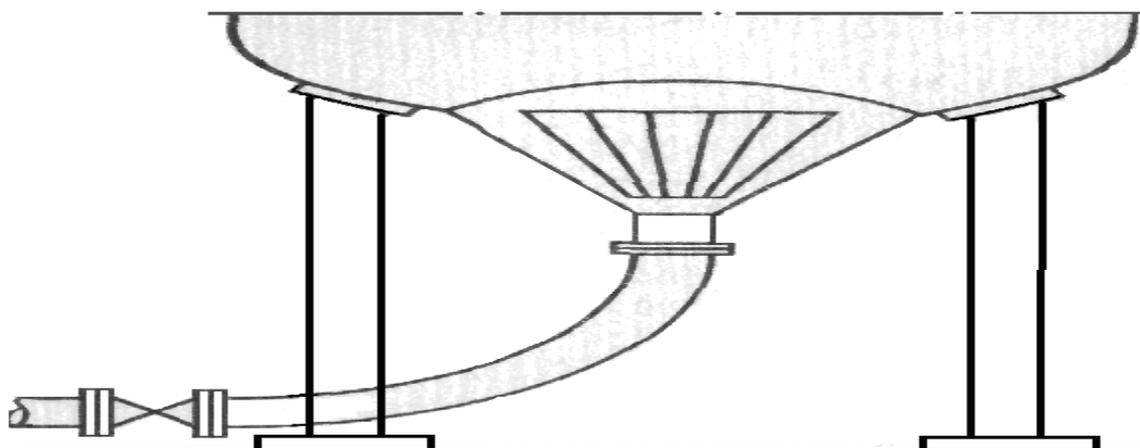


Рис. 8. Внешнее устройство для равномерного распределения потока с низу по сечению реактора

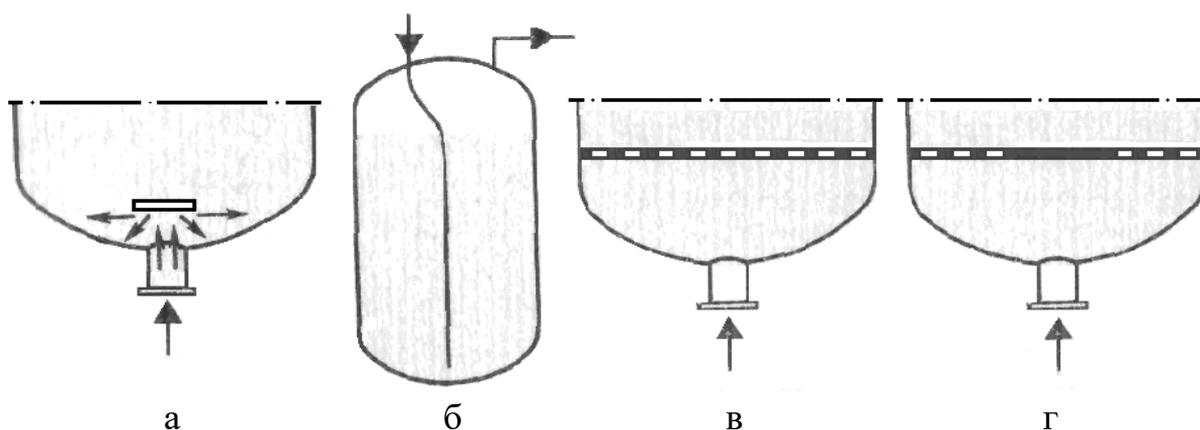


Рис. 9. Внутренние устройства для равномерного распределения потока с низу по сечению реактора: а – отсекающий экран; б – дно реактора в роли экрана потока; в – рассекающая поток решетка; г – решетка с закрытым участком в зоне входа

#### 4. Расчет основных параметров реакторов

Реактор – это устройство, в котором проводят химическую реакцию, часто сопровождая это нагреванием или охлаждением реакционной смеси.

Например, необходимо *рассчитать время нагревания* воды в реакторе объемом  $1 \text{ м}^3$  от комнатной температуры до  $100^\circ\text{C}$ . Примем условно, что обогрев осуществляется обогревателем мощностью в  $1 \text{ кВт}$  (такой мощностью обладает бытовая электроплитка).

Объем реактора не заполняется полностью. Примем коэффициент заполнения  $0,8$  (т.е. в  $1 \text{ м}^3$  реакторе будет находиться  $800 \text{ кг}$  воды).

По уравнению теплового баланса  $Q = c \cdot m(\Delta t)$ , где  $c$  – теплоемкость воды, равная  $4,19 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ,  $m$  – масса нагреваемой среды,  $\Delta t$  – разность

температур, получаем  $Q = 800 \text{ кг} \times 4,19 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К} \times (100^\circ - 20^\circ) = 268800 \text{ кДж}$ .

1 кВт мощности ( $Q_N$ ) нагревателя означает, что нагрев осуществляется с передачей тепла 1 кДж ( $Q$ ) в секунду ( $\tau$ ).  $Q_N = Q / \tau$ . Отсюда время нагревания составит около  $268800/3600 \sim 75$  часов.

Таким образом, для обогрева реактора целесообразно использовать во много раз более мощный нагреватель. Если этот реактор необходимо нагревать до указанной температуры за 1 ч, то тогда надо установить другой обогреватель мощностью в 75 кВт.

Можно выполнить *расчет толщины тепловой изоляции* реактора. Обогреваем реактор обычно применяемым теплоносителем – водяным паром давлением 2 ат. Для расчета можно использовать эмпирическое уравнение Линчевского вида:  $\alpha_2 = 9,74 + 0,07 \cdot (t_{ст1} - t_2)$  или его более простую форму:  $\alpha_2 = 9,3 + 0,06 \cdot t_{ст1}$ , где  $t_1$  – температура пара  $119,6^\circ\text{C}$ ,  $t_{ст1}$  – температура стенки рубашки со стороны греющего пара, условно принимается на три градуса меньше температуры теплоносителя  $117^\circ\text{C}$ ,  $t_{ст2}$  – безопасная по правилам техники безопасности наружная температура стенки оборудования  $40^\circ\text{C}$ ,  $t_2$  – комнатная температура  $20^\circ\text{C}$ .

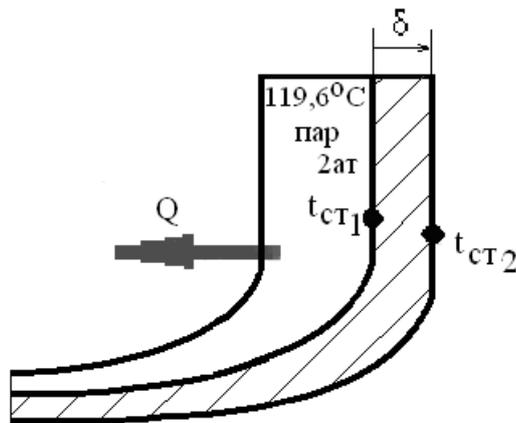


Рис. 10. Обогрев реактора, в который поступает теплота  $Q$ , паром с температурой  $119,6^\circ\text{C}$ . На паровую рубашку нанесен слой теплоизоляции (базальтовая вата) толщиной  $\delta$

В качестве теплоизоляции рубашки реактора выбираем распространенный базальт в виде ваты с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,06 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  (рис.10).

$Q_{\text{потерь}} = \lambda / \delta \cdot F(t_{ст1} - t_{ст2})$  или  $Q_{\text{потерь}} = \alpha_2 \cdot F(t_{ст2} - t_2)$ . Отсюда получаем:  $\delta = \lambda (t_{ст1} - t_{ст2}) / \alpha_2 (t_{ст2} - t_2) = 0,06 \text{ Вт/м}\cdot\text{град} (117^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}) / 12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К} (40^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 0,016 \text{ м} \approx 2 \text{ см}$ .

Где  $\alpha_2 = 9,3 + 0,06 \cdot 40 = 12 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ .

Расчетная величина защитного слоя рубашки толщиной в 2 см обычно увеличивается и осуществляется с запасом. Поэтому для

теплоизоляции реактора целесообразно использовать маты из базальтовой ваты толщиной 5 см.

При проектировании реакторов выполняется предварительный расчет мощности двигателя для эффективного перемешивания. Предположим, что необходимо определить мощность, затрачиваемую на перемешивание жидкой среды условной вязкостью  $1 \text{ сПз}$  и плотностью  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Аппарат диаметром  $d_{\text{ам}} = 2,4 \text{ м}$  с 4 внутренними отражательными перегородками шириной  $B = 24 \text{ см}$ . Привод двигателя с числом оборотов  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  через редуктор с передаточным числом  $J = 25$ .

Рассмотрим три конструкции мешалок: а) – открытая турбинная 6-лопастная мешалка диаметром  $d = 800 \text{ мм}$ , длиной лопаток  $l = 200 \text{ мм}$  и шириной  $b = 160 \text{ мм}$ ; б) – 8-лопастная мешалка диаметром  $d = 800 \text{ мм}$  с наклоненными под  $45^\circ$  лопастями шириной  $200 \text{ мм}$ ; в) – 2-лопастная мешалка диаметром  $d = 80 \text{ см}$  с прямыми вертикальными лопастями шириной  $200 \text{ мм}$ . Принимаем, что коэффициент передачи  $\eta_{\text{пер}} = 0,9$ , а коэффициент запаса мощности  $\beta = 2$ .

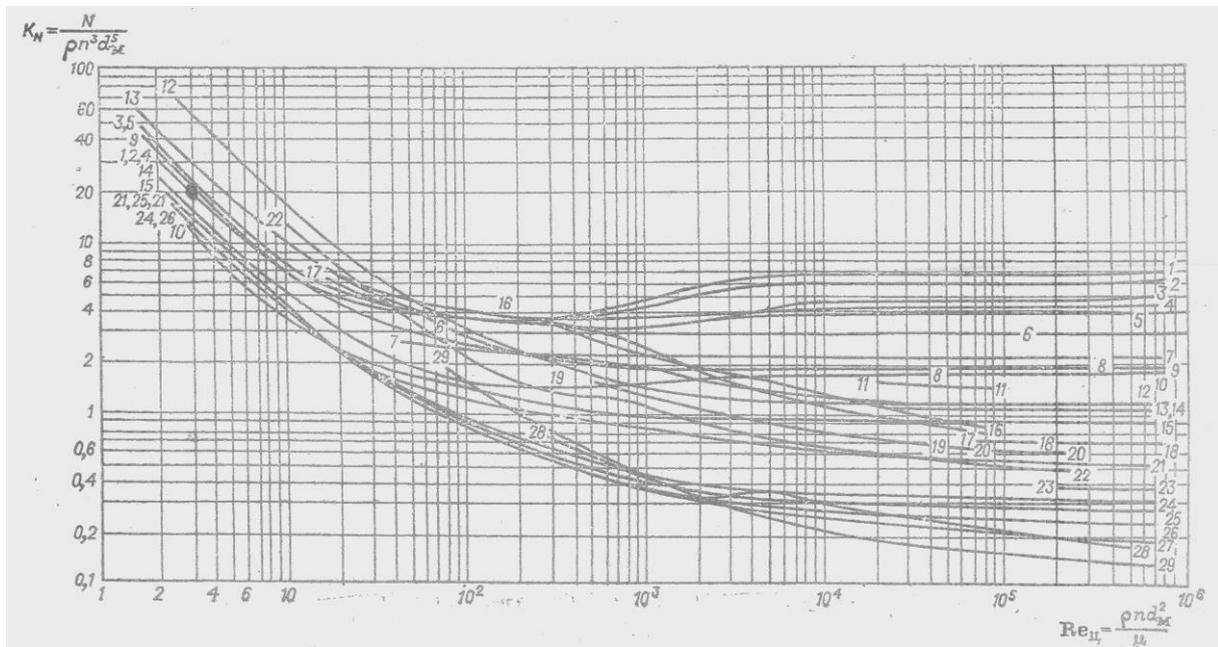


Рис. 11. Зависимость критерия мощности  $K_N$  от критерия Рейнольдса  $Re$

Рассмотрим вариант а – расчет привода для турбинной мешалки.

Эффективное перемешивание реализуется в турбулентном режиме. Проверим условия турбулентности, вычислив модифицированный критерий Рейнольдса,  $Re_m$ , значение которого должно быть больше 100:

$Re_m = \rho n d^2 / \mu = 1000 \cdot 1500 \cdot 0,8^2 / 25 \cdot 60 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 640000 > 100$ , то есть перемешивание осуществляется в турбулентном режиме. По геометрическим характеристикам рассчитываемой турбинной мешалки ( $d_{\text{ам}} / d = 2,4 / 0,8 = 3$ ,  $l / d = 200 / 800 = 0,25$ ;  $b / d = 160 / 800 = 0,2$ ;  $B$

/  $d_{am} = 0,24 / 2,4 = 0,1$ ) выбираем на рис. 11 кривую № 2, По найденному  $Re_m = 640000$  фактор мощности  $K_N = 6,1$ . Для расчета полезной мощности используем выражение:

$$N = K_N \rho n^3 \cdot d^5 = 6,1 \cdot 1000 \cdot 1^3 \cdot 0,8^5 = 2000 \text{ Вт}$$

Для перехода на реально требуемую мощность  $N_{уст}$  учтем коэффициент запаса мощности и коэффициент передачи:

$$N_{уст} = \beta N / \eta_{пер} = 2 \cdot 2 / 0,9 \approx 4,5 \text{ кВт.}$$

Аналогичным образом рассчитывается мощность привода мешалок по вариантам б) кривая 9:  $K_N = 1,9$   $N = 622 \text{ Вт}$   $N_{уст} \approx 1,4 \text{ кВт}$ ; в) кривая 10  $K_N = 1,9$   $N = 622 \text{ Вт}$   $N_{уст} \approx 1,4 \text{ кВт}$ .

Таким образом, расчет показывает, что необходима мощность двигателя 1,4 – 4,5 кВт. При проектировании реального производства, будут устанавливаться реакторы с многократным запасом мощности (более 5 кВт), несмотря на удорожание таких реакторов, для последующего возможного варьирования технологическим процессом. Современные производства в промышленно развитых странах используют гибкие технологические линии, позволяющие легко перенастраивать оборудование для выпуска разнообразных продуктов по заказам потребителей.

## 5. Устройство контактных аппаратов

Химические реакторы для проведения гетерогенно–каталитических процессов называются контактными аппаратами. В зависимости от состояния катализатора и режима его движения в аппарате, они делятся на: контактные аппараты с неподвижным слоем катализатора, контактные аппараты с движущимся слоем и контактные аппараты с псевдооживленным слоем.

Кроме того, контактные аппараты различаются структурой материальных потоков компонентов, способом подвода или отвода тепла и рядом других конструктивных особенностей.

1. Контактные аппараты с неподвижным слоем катализатора выполняются в виде реактора типа аппарата идеального перемешивания. Контактная масса в них размещается в несколько слоев на полках (полочные аппараты) или в трубах (трубчатые аппараты).

Многополочные контактные аппараты, содержащие несколько слоев катализатора, применяются в процессах с высоким положительным или отрицательным тепловым эффектом. Для поддержания оптимального теплового режима процесса реакционная смесь после прохождения каждого слоя катализатора подогревается или охлаждается путем подачи в пространство между слоями холодного газа, или в выносных и встроенных теплообменниках. Комбинация контактного аппарата с устройствами для отвода или подвода тепла называется контактным узлом.

Для процессов, протекающих с очень высокими скоростями, применяют конструкции, в которых контактные массы размещены в сетках, что обеспечивает лучший их контакт с реагентами. Недостатки данных аппаратов: низкая производительность катализатора вследствие затруднений использования внутренней поверхности его зерен, сложность конструкции, трудность поддержания оптимального теплового режима.

2. Контактные аппараты с движущимся слоем катализатора работают в основном в режиме реакторов идеального смешения. В них катализатор распыляется в движущемся потоке газа или жидкости и переносится вместе с ним. При этом для обеспечения противотока газ поступает в аппарат снизу, а катализатор сверху.

3. Контактные аппараты с псевдооживленным слоем катализатора работают в режиме реакторов идеального смешения и применяются, главным образом, в производствах органического синтеза, в которых катализатор быстро теряет активность и требует непрерывной регенерации. Поэтому, в этих установках, как и в установках с движущимся слоем катализатора, контактный аппарат сопряжен с регенератором катализатора. Преимущество данных аппаратов: легкость регенерации и замена катализатора, возможность подачи реагентов с температурой ниже температуры зажигания катализаторов, оптимальный температурный режим работы аппарата и т.п. Недостатки: быстрое истирания зерен катализатора и загрязнение продуктов реакции катализаторной пылью.

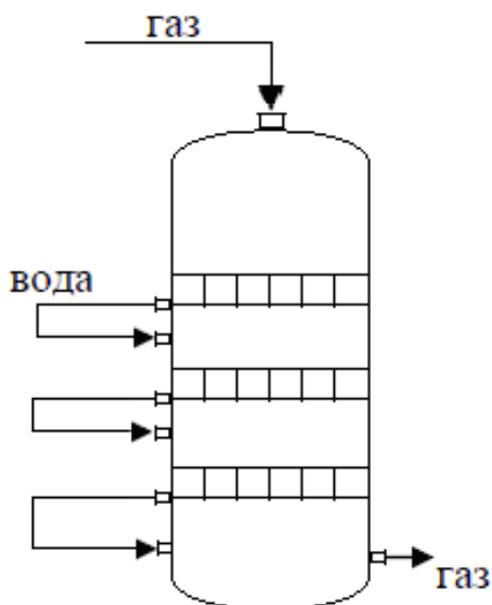


Рис.12. Контактный аппарат с неподвижным слоем катализатора

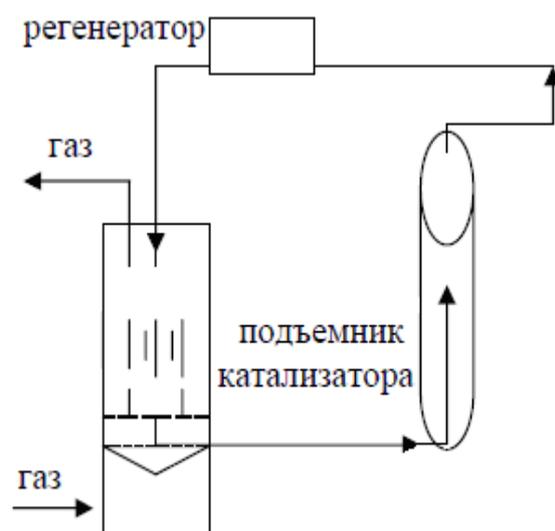


Рис.13. Контактный аппарат с движущимся катализатором

Режим работы и производительность контактного аппарата зависит от таких параметров его как время контакта, объемная скорость газа (жидкости) и удельная производительность катализатора

1. Время контакта – время соприкосновения реагентов с катализатором определяется как:  $\tau_K = V_{кат} / V_{Г}$ , где:  $V_{Г}$  – объем газообразной (жидкой) реакционной смеси, проходящей через катализатор в единицу времени,  $V_{кат}$  – объем катализатора,  $\tau_K$  – время контакта в секундах.

2. Объемная скорость – объем реакционной смеси, проходящей через единицу объема катализатора в единицу.

3. Удельная производительность (интенсивность) катализатора – масса продукта, получаемая с единицы объема катализатора в единицу времени. Производительность катализатора, от которой зависит эффективность работы контактного аппарата, связана с объемной скоростью реакционной массы и содержанием в ней целевого продукта. Для процессов необратимых, проводимых по открытой технологической схеме, учитывается содержание целевого продукта только на выходе из контактного аппарата. Для обратимых процессов проводимых по циклической схеме, следует учитывать как содержание продукта на выходе из аппарата, так и на входе в него.

Реальные реакторы отличаются от идеальных моделей. Так, в реакторах смешения существуют застойные зоны, в которых время пребывания, температура и концентрации веществ отличаются от средних значений. В трубчатых реакторах вытеснения профиль скоростей может быть неплоским, распределение по временам пребывания расширяется и т.д.

## **6. Реакторы переработки и синтеза высоковязких веществ**

Для высоковязких, например полимерных, систем наиболее часто применяются трубчатые реакторы. При ламинарном течении жидкости и постоянной температуре в гладкой трубе устанавливается параболический профиль скоростей – в центре на оси реактора самая высокая скорость течения. Это обстоятельство приводит к расширению распределения по временам пребывания (при турбулентном течении фронт течения становится более плоским).

Ситуация усугубляется при попытке провести в таком реакторе химическую реакцию получения высокомолекулярного продукта. В реакциях полимеризации выделяется большое количество тепла, которое в трубчатом реакторе должно отводиться через внешнюю стенку. Из-за высокой вязкости и низкой теплопроводности реакционной системы температура в реакторе повышается, причем в центре температура выше, у

стенок ниже. Поскольку с ростом температуры молекулярная масса образующегося полимера практически всегда уменьшается (это общее свойство большинства процессов синтеза полимеров), вязкость реакционной массы в центре снижается и профиль скоростей течения еще более вытягивается, так что при определенных условиях наблюдается проскок почти непрореагировавшего вещества по центральной части реактора. Для решения этой проблемы обеспечивают перемешивание вязкой реакционной массы поперек потока, то есть приближаются к модели реактора идеального вытеснения. Хорошее перемешивание вязких полимерных систем реализуется в процессах их переработки в экструдерах. В этом случае удается получать однородное распределение компонентов и их высокую дисперсность при смешении. Исходные реагенты в экструдер можно вводить в любой точке по длине экструдера, тем самым контролируя время их пребывания в реакторе и предотвращая протекание возможных побочных реакций.

Экструдеры изготавливают двух типов: одно- и двухшнековые. Одношнековый экструдер (рис. 14 а) состоит из шнека, вращающегося внутри обогреваемого цилиндрического корпуса. Материал в виде гранул или порошка поступает через бункер загрузки в цилиндр машины. Вращающийся шнек захватывает материал, поступающий из бункера, продвигает его вдоль экструдера, плавит и равномерно нагнетает гомогенный расплав в головку.

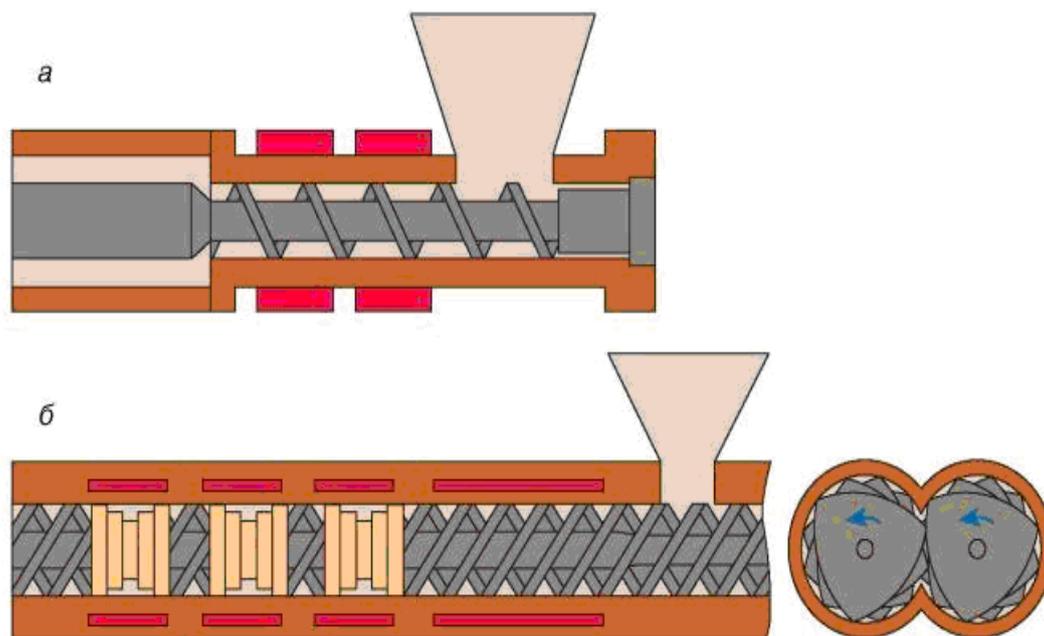


Рис. 14. Экструдеры. а – одношнековый; б двухшнековый

Аналогично сконструирован двухшнековый экструдер, в котором два шнека установлены параллельно в одном общем корпусе (рис. 14 б). При этом шнеки могут вращаться либо в одном, либо в противоположных

направлениях. Двухшнековые экструдеры обладают преимуществами по сравнению с одношнековыми. Одношнековые экструдеры не обеспечивают однородного смешения из-за низкого уровня сдвиговых напряжений и наличия застойных зон. Двухшнековые экструдеры дают превосходное однородное смешение и позволяют контролировать времена пребывания компонентов и реакционной смеси в экструдере. Поэтому одношнековые экструдеры удобно использовать для простых операций, таких как плавление, получение пленок, труб. Двухшнековые экструдеры должны применяться для более сложных операций, таких, как гомогенизация, диспергирование различных добавок, реакционного смешения, полимеризации и осуществления полимераналогичных превращений.

## 7. Ферментеры

Ферментеры являются основными аппаратами микробиологической промышленности, осуществляющей производство какого-либо продукта при помощи микроорганизмов. Процесс, осуществляемый микроорганизмами, называют ферментацией, а емкость, в которой он протекает – ферментером (или биореактором).

Ферментация, реализующая биосинтетические способности микроорганизмов, занимает центральное место в современной биотехнологии. С ее помощью получают разнообразные вещества высокой степени чистоты, лекарственные препараты, изготавливают пищевые продукты. Ферментацию можно разделить на шесть основных этапов.

*Создание питательной среды.* Прежде всего, необходимо выбрать соответствующую культуральную среду. Микроорганизмы для своего роста нуждаются в органических источниках углерода, подходящем источнике азота и различных минеральных веществах. Вода и питательные добавки составляют ростовую среду.

Среды для получения химических веществ и лекарственных препаратов намного сложнее. Чаще всего в качестве источника углерода используют сахара и другие углеводы, но нередко масла и жиры, а иногда углеводороды. Источником азота обычно служат аммиак и соли аммония, а также различные продукты растительного или животного происхождения: соевая мука, соевые бобы, мука из семян хлопчатника, мука из арахиса, побочные продукты производства кукурузного крахмала, отходы скотобоен, рыбная мука, дрожжевой экстракт. Составление и оптимизация питательной среды – сложный процесс. Рецепты промышленных сред являются технологическими ноу-хау.

*Стерилизация.* Среду необходимо стерилизовать, чтобы уничтожить все загрязняющие её микроорганизмы. Ферментер и вспомогательное оборудование тоже стерилизуют. Существует два способа стерилизации:

прямая инжекция перегретого пара и нагревание с помощью теплообменника. Желаемая степень стерильности зависит от характера процесса ферментации. Она должна быть максимальной при получении лекарственных препаратов и химических веществ. Обычно полную стерилизацию обеспечивает прогревание 2 ч при температуре 120°C.

*Получение культуры.* Прежде чем начать процесс ферментации, необходимо получить чистую высокопродуктивную культуру – штамм-продуцент. Чистые культуры микроорганизмов хранят в очень небольших объемах и в лабораторных условиях, обеспечивающих ее жизнеспособность и продуктивность. Обычно это достигается хранением при низкой температуре. Например, пробирка с культурой, закрытая стерильным ватным тампоном, сохраняется при –50°C. Ферментер может вмещать несколько сотен тысяч литров культуральной среды, и процесс начинают, вводя в нее культуру (инокулят), составляющей 1–10% объема, в котором будет идти ферментация. Таким образом, исходную культуру следует поэтапно (с пересеваниями) растить до достижения уровня микробной биомассы, достаточного для протекания микробиологического процесса с требуемой продуктивностью. Это обычно достигается в каскаде ферментеров 1 – 10 – 100 – 1000 л и т.д.

Совершенно необходимо все это время поддерживать чистоту культуры, не допуская ее заражения посторонними микроорганизмами. Сохранение асептических условий возможно лишь при тщательном микробиологическом контроле.

*Рост в промышленном ферментере* (ферментация или культивирование микроорганизмов). Промышленные микроорганизмы должны расти в ферментере при оптимальных для образования требуемого продукта условиях. Эти условия строго контролируют, следя за тем, чтобы они обеспечивали рост микроорганизмов и синтез продукта. Конструкция ферментера должна позволять регулировать условия роста – постоянную температуру (обычно в пределах 25 – 40°C), рН (часто значения рН близки к нейтральному 7,0) и концентрацию растворенного в среде кислорода (например, аэрация потоком стерильного воздуха 100 л/ч с концентрацией кислорода, условно соответствующей  $pO_2 = 1$ ).

Обычный ферментер представляет собой закрытый цилиндрический резервуар, в котором механически перемешиваются среда и микроорганизмы. Через среду прокачивают воздух, иногда насыщенный кислородом. Температура регулируется с помощью воды или пара, пропускаемых по трубкам теплообменника. Такой ферментер с перемешиванием используется в тех случаях, когда ферментативный процесс требует много кислорода (рис. 15). Некоторые продукты, напротив, образуются в бескислородных условиях, и в этих случаях используются ферментеры другой конструкции без аэрации (рис. 16).



Рис. 15. Лабораторный 10 л химический реактор из нержавеющей стали. Расположение перемешивающего устройства – вертикальное; установленная мощность 3,0–45 кВт; скорость вращения мешалки, 0–18000 об/мин; основной материал сталь 12Х18Н10Т или AISI 316; рабочее давление пара в рубашке 0,2–0,4 МПа; рабочее разрежение пара в корпусе аппарата – до 0,03 МПа

Промышленный биореактор представляет собой трехстенный аппарат из нержавеющей стали, в конструкции которого предусмотрены штуцеры для циркуляции хладагента и теплоносителя. Для охлаждения или равномерного нагрева в резервуаре установлена мешалка. Вращение лопастей мешалки осуществляет привод, установленный над крышкой резервуара. Максимальная скорость вращения лопастей может достигать 18 тысяч оборотов в минуту. Датчик температуры обычно расположен в нижней части аппарата. Аппараты могут использоваться для работы под давлением от 0,2 до 0,4 МПа в диапазоне температур от  $-80^{\circ}\text{C}$  до  $+350^{\circ}\text{C}$ . Рабочая вместимость бака составляет от 10 до 2000 л, или несколько десятков кубических метров. В ферментаторе есть моющие головки для обеспечения качественной мойки реактора и смотровые люки для визуального контроля перемешивания.

Основное отличие биореактора от химического аппарата – наличие устройств, позволяющих проводить полную стерилизацию самого аппарата, а также всех подаваемых в него реагентов. Эффективное перемешивание живых систем осуществляют сложными конструкциями мешалок (рис. 17).



Рис. 16. Опытно-промышленный 1 м<sup>3</sup> реактор из нержавеющей стали

Таблица 1. Типовое оснащение биореактора

	Стандартная	Для сложных биосистем
1. Емкость	нержавеющая сталь	специальные сплавы, зеркальная полировка
2. Контур нагрева	замкнутый контур, гальванизированная сталь, теплообменник для пара	нержавеющая сталь, электрический нагреватель, теплообменник для системы охлаждения
3. Перемешивание	нижний привод, двойная механическая герметизация	магнитное соединение, верхний привод
4. Механическая герметизация	карбид кремния, смазка глицерином	смазка конденсатом пара
5. Перемешивание	лопастные мешалки отбойники	эрлифт, отводная труба
6. Подача воздуха	фильтр, керамический фильтр	разделяющий фильтр, двойные фильтры, установка для смешивания газов

7. Аэрация	внутрижидкостная аэрация	поверхностная аэрация, аэрация "свободная от пузырьков"
8. Порты	стандартные боковые и расположенные на крышке порты	локализация специальных портов
9.Смотровые окна	продольное окно, а также расположенное в крышке смотровое окно с подсветкой	количество и локализация по необходимости
10.Выход воздуха	керамический фильтр	абсолютный фильтр, обратный холодильник, пеногашение
11.Засев	порт для внесения посевного материала	фиксированная подводка или линии переноса
12.Отбор образцов	клапан для отбора вручную	пневматический клапан, автономный клапан, клапан со стальными мехами, система отбора образцов без клеток
13.Слив	клапан для слива вручную со стальными мехами	пневматический клапан для слива, фиксированная подводка или системы переноса
14.Залив среды	ниппельное соединение в крышке	дозировующий клапан, муфта, фиксированная подводка или системы переноса
15.Стерилизация	стерилизация вводного фильтра и фильтра на выходе воздуха вручную	автоматическая стерилизация

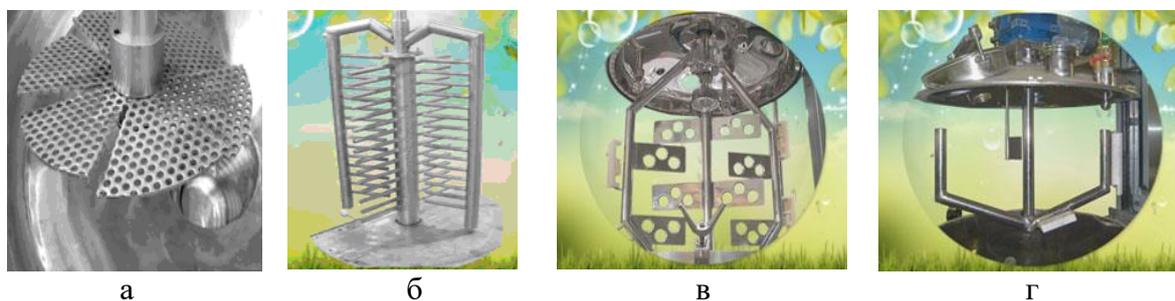


Рис. 17. Варианты мешалок для реакторов: а – пропеллерная с перфорацией; б – рамно-решетчатая; в – рамно-якорная с перфорацией; г – якорная

*Выделение и очистка продуктов.* По завершении ферментации в бульоне присутствуют микроорганизмы, неиспользованные питательные компоненты среды, различные продукты жизнедеятельности микроорганизмов и тот продукт, который желали получить в промышленном масштабе. Поэтому данный продукт очищают от других составляющих бульона. При получении алкогольных напитков (вина и пива) достаточно просто отделить дрожжи фильтрованием и довести до

кондиции фильтрат. Однако индивидуальные химические вещества, получаемые путем ферментации, экстрагируют из сложного по составу бульона. Хотя промышленные микроорганизмы специально отбираются по своим генетическим свойствам так, чтобы выход желаемого продукта их метаболизма был максимален (в биологическом смысле), концентрация его все же мала – доли процента, по сравнению с той, которая достигается при производстве на основе химического синтеза. Поэтому приходится прибегать к сложным методам выделения – экстрагированию, хроматографии и ультрафильтрации.

*Переработка и ликвидация отходов ферментации.* При любых промышленных микробиологических процессах образуются отходы: бульон (жидкость, оставшаяся после экстракции продукта производства); клетки использованных микроорганизмов; грязная вода, которой промывали установку; вода, применявшаяся для охлаждения; вода, содержащая в следовых количествах органические растворители, кислоты и щелочи. Жидкие отходы содержат много органических соединений; если их сбрасывать в реки, они будут стимулировать интенсивный рост естественной микробной флоры, что приведет к обеднению речных вод кислородом и созданию анаэробных условий. Поэтому отходы перед удалением подвергают биологической обработке, чтобы уменьшить содержание органического углерода.

*Микробная биомасса.* Микробные клетки сами по себе могут служить конечным продуктом производственного процесса. В промышленном масштабе получают два основных типа микроорганизмов: дрожжи, необходимые для хлебопечения, и одноклеточные микроорганизмы, используемые как источник белков, которые можно добавлять в пищу человека и животных.

### Библиографический список

1. Бесков, В.С. Общая химическая технология: Учебник для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 452 с.
2. Кутепов, А.М. Общая химическая технология / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 528 с.
3. Игнатенков, В.И. Примеры и задачи по общей химической технологии: учеб. пособие для вузов/В.И.Игнатенков, В.С.Бесков.– М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 198 с.
4. Вяткин, Ю.Л. Математические модели неизотермических химических реакторов. Метод. Пособие / Ю.Л. Вяткин, В.Н. Грунский, Г.М. Семёнов, Н.З. Павлова. – М.: РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2011. – 68 с.
5. Красавин, А.В. Общая химическая технология. Часть 1. Химические процессы и реакторы. Текст лекций: Учеб. пособие / А.В. Красавин, Т.А. Тарасенко, В.С. Бесков. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2010. – 124 с.
6. Лабораторный практикум по общей химической технологии : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям и специальностям в области

- химической технологии / Под ред. В.С. Бескова. – М.: Бином. Лаб. знаний, 2010. – 278 с.
7. Бесков, В.С. Лабораторный практикум по общей химической технологии. Компьютерное моделирование: Учеб. пособие / В.С. Бесков, В.И. Ванчурин, Ю.Л. Вяткин, Е.В. Сучкова, А.П. Федосеев. – М.: РХТУ. Издат. центр, 2005. – 154 с.
  8. Бесков, В.С. Автоматизированная система расчетных работ в общеинженерных курсах по химической технологии: Учеб. пособие / В.С. Бесков, М.Г. Давидханова, В.И.Царев. - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. – 104 с.
  9. Курсовые работы в химической технологии: Метод. пособие / Сост.: В.С. Бесков, В.И. Ванчурин, М.Г. Давидханова, В.И. Игнатенков, Ю.Л. Вяткин – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. – 40 с.
  10. Материальный баланс химико-технологической системы: Метод. пособие /Сост.: В.С. Бесков, В.И. Ванчурин, М.Г. Давидханова, В.И. Игнатенков, Ю.Л. Вяткин, Е.В. Сучкова; М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. – 64 с.
  11. Общая химическая технология. Тестовые задания /Сост.: В.С. Бесков, В.И. Ванчурин, Ю.Л. Вяткин, Н.З. Павлова, В.Б. Сажин, А.П. Федосеев. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2006. – 75 с.
  12. Общая химическая технология в вопросах и ответах.Ч.1.: Методическое пособие/ Сост.: В.С. Бесков, В.И. Ванчурин, В.И. Игнатенков: – М. РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011. – 83 с.
  13. Химическая технология. Курс лекций. – Великий Новгород: Новгородский ГУ им. Ярослава Мудрого, 2007. – 201 с. <http://window.edu.ru/resource/078/48078/files/povsu113.pdf>.
  14. <http://ru.wikipedia.org/> – электронная энциклопедия.
  15. <http://www.chem.msu.su/> – основной химический портал, содержит пособия, программы, справочные величины периодические издания МГУ. Поддерживается Химфаком МГУ им. М.В. Ломоносова.
  16. <http://www.yandex.ru> – поисковая система информации по ключевым словам.
  17. <http://www.chemport.ru/?cid=34> – банк многостраничных электронных отечественных и зарубежных книг по химии.
  18. <http://elibrary.ru/> – научная электронная библиотека.

## Содержание

Предисловие .....	3
1.Реакторы.....	4
2. Основные типы химических реакторов.....	4
3. Принципы проектирования химических реакторов.....	8
4. Расчет основных параметров реакторов.....	10
5. Устройство контактных аппаратов.....	13
6. Реакторы переработки и синтеза высоковязких веществ.....	15
7. Ферментеры.....	16
Библиографический список.....	22
Содержание.....	23

*Учебное издание*

**Жилин** Юрий Николаевич  
**Иванкин** Андрей Николаевич

**ПРОЦЕССЫ МАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМАХ  
С УЧАСТИЕМ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ.  
Ч. I. ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ**

*В авторской редакции  
Компьютерный набор и верстка авторов*

По тематическому плану внутривузовских изданий учебной литературы на 2016 год, поз. доп.

Подписано в печать 14.01.2016. Формат 60x90/16 Бумага 80 г/м<sup>2</sup>  
Гарнитура "Таймс". Ризография. Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 50 экз. Заказ N

Издательство Московского государственного университета леса. 141005,  
Мытищи – 5, Московская обл., 1-я Институтская, 1, МГУЛ.  
E-mail: izdat@mgul.ac.ru