Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С. Г. ЗАВАРУХИН

# ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКТОРЫ

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2025

УДК 66.011:539.1(075.8)
З-133

Рецензенты:
*П. М. Елецкий,* канд. хим. наук, ст. науч. сотр. ИК СО РАН
*В. И. Жуков*, канд. техн. наук, доцент

Работа подготовлена на кафедре химии и химической технологии

**Заварухин С. Г.**
З-133 Химические реакторы : учебное пособие / С. Г. Заварухин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2025. – 130 с.

ISBN 978-5-7782-5479-4

Настоящее пособие содержит лекции, примеры задач практических занятий и контрольные задания (компьютерные лабораторные работы). В лекциях изложены математические модели реакторов и протекающих в них процессов, а также методы расчета контрольных заданий с использованием прикладной математической программы Mathcad. По тематике задания включают расчет процессов в реакторах с продольным перемешиванием, с движущимся слоем катализатора, с кипящим и стационарным слоями катализатора.

Предназначено для студентов третьего курса, обучающихся по направлениям 18.03.01 и 18.04.01.

**УДК 66.011:539.1(075.8)**

**ISBN 978-5-7782-5479-4**

© Заварухин С. Г., 2025
© Новосибирский государственный технический университет, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение ..... 5

Л е к ц и я 1. Классификация химических процессов и реакторов ..... 6

Л е к ц и я 2. Гидродинамические режимы в химических реакторах (РИП, РИВ, реактор с частичным перемешиванием) ..... 14

Задание 1. Расчет профилей безразмерной концентрации реагента в реакторе с частичным перемешиванием ..... 25

Л е к ц и я 3. Гидродинамические режимы в химических реакторах (реактор с распределенным временем контакта) ..... 27

Л е к ц и я 4. Реакторы с движущимся слоем катализатора ..... 36

Задание 2. Расчет процесса получения нановолокнистого углерода из метана на катализаторе $Ni/AL_2O_3$ в реакторе с движущимся слоем катализатора при прямоточном и противоточном движении газа и катализатора ..... 44

Л е к ц и я 5. Реактор со стационарным слоем катализатора ..... 45

Л е к ц и я 6. Реактор с кипящим слоем частиц ..... 55

Задание 3. Расчет процесса в реакторе с кипящим слоем катализатора ..... 63

Л е к ц и я 7. Газожидкостные реакторы ..... 64

Л е к ц и я 8. Гидродинамика центробежно-барботажного реактора ..... 74

Задание 4. Расчет гидродинамических характеристик центробежно-барботажного реактора ..... 81

Л е к ц и я 9. Модель сжимающегося ядра для расчета процессов между газом и твердым реагентом в химических реакторах ..... 82

Л е к ц и я 10. Реакция нулевого порядка в химических реакторах и зернах катализатора ..... 92

Л е к ц и я 11. Трубчатый реактор ..... 103

Задание 5. Расчет процесса окисления $SO_2$ на ванадиевом катализаторе при атмосферном давлении в трубчатом реакторе..... 108

Л е к ц и я 12. Реакторы с рециркуляцией газового потока..... 111

Л е к ц и я 13. Дезактивация катализатора в химических реакторах..... 117

Библиографический список ..... 129

# Лекция 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И РЕАКТОРОВ

Цель лекции – показать разнообразие химических реакторов на практике, причиной которого является многообразие химических реакций и условий их проведения.

Химический реактор (ХР) – это аппарат, предназначенный для проведения химических реакций с целью получения целевых продуктов из используемых реагентов.

Критериев классификации реакторов очень много. Это связано со свойствами химических реакций, условиями их проведения и конструктивным оформлением процесса.

Перечислим признаки, по которым можно классифицировать химические процессы и реакторы, и покажем это на примерах.

**По количеству реагентов**

Их может быть 1, 2 и более. Пример с одним реагентом – пиролиз метана с получением водорода и углерода; пример с двумя реагентами – синтез аммиака из водорода и азота.

**По фазовому состоянию реагентов**

Реагент может быть газообразным, жидким или твердым.

Примеры: пиролиз метана (газообразный реагент), крекинг гексадекана (жидкий), пиролиз растительной массы (твердый).

При количестве реагентов, равном двум, возникают комбинации состояний реагентов: г–г, г–ж, г–т, ж–ж, ж–т, т–т.

Примеры: г–г (синтез аммиака), г–ж (гидрирование растительных жиров), г–т (паровая газификация угля), ж–ж (получение биодизеля из растительного масла и метанола), ж–т (химическое извлечение золота из руды путем цианирования), т–т (механохимические реакции).

Эту классификацию можно применить и к реакторам с гетерогенным катализатором, хотя катализатор не является реагентом. При одном реагенте система двухфазная: г–т(к), ж–т(к). При двух реагентах появляются комбинации: г–г–т(к), г–ж–т(к), ж–ж–т(к). Примеры могут быть те же, только с использованием гетерогенного катализатора г–г–т(к) (синтез аммиака), г–ж–т(к) (гидрирование растительных жиров), ж–ж–т(к) (получение биодизеля).

**По характеру подачи реагентов во времени**

Процесс может быть периодическим или непрерывным.

В периодическом процессе в реактор загружаются реагенты и после протекания реакции выгружаются продукты. В непрерывном процессе подача реагентов и выход продуктов осуществляются постоянно.

Если реагентов два, то возможен полунепрерывный процесс, в котором один реагент поступает постоянно, а второй – периодически.

Для каталитического процесса гетерогенный катализатор может находиться постоянно в реакторе, а может двигаться через реактор в составе реакционной смеси. Второй вариант встречается при использовании нанодисперсного катализатора (с размером частиц десятки нанометров). Частицы катализатора подаются в реактор вместе с сырьем, выходят вместе с продуктом и в дальнейшем отделяются от продукта.

**По характеру протекания процесса во времени**

Процесс может быть стационарным (концентрация компонентов не меняется во времени) или нестационарным (концентрация меняется во времени). Например, в проточных реакторах процесс, как правило, является стационарным, а в непроточных – нестационарным.

**По наличию или отсутствию катализатора**

Процесс может быть каталитическим или некаталитическим**.**

Можно отметить, что большинство промышленных химических процессов (около 90 %) являются каталитическими.

**По типу катализатора**

Гетерогенный, гомогенный.

Гетерогенный катализатор. может быть выполнен в виде отдельных частиц, сеток, блоков с каналами.

**По стабильности катализатора**

Здесь имеется в виду продолжительность дезактивации катализатора. Катализатор может дезактивироваться за несколько минут, а может работать годами, сохраняя активность.

**По гидродинамическому режиму**

Движение реакционной смеси в реакторе может рассматриваться как идеальное перемешивание, идеальное вытеснение с частичным перемешиванием и другое. Реальные режимы могут не вписываться в идеальные модели, поэтому добавлен режим «другое». Например, в каталитическом реакторе может происходить проскок реагента и в модели реактора нужно вводить байпас, при этом часть потока будет проходить мимо реактора и соединяться с выходящим из него потоком.

Если число реагентов равно двум, то возможны комбинации этих признаков: перемешивание или вытеснение по обоим реагентам, перемешивание по одному реагенту и вытеснение по другому.

Потоки должны входить в реактор с равномерным профилем, поэтому реакторы в своей конструкции содержат элементы, выравнивающие входящие потоки (например, сетки, пластины с отверстиями, слои инертного материала).

**По направлению движения**

Для одного реагента имеет смысл говорить о направлении потока в пространстве: горизонтальное, вертикальное вверх или вертикальное вниз.

Для двух реагентов возможна различная ориентация потоков относительно друг друга: прямоток, противоток или перекрестный ток.

**По свойствам химической реакции**

Химическая реакция может быть экзотермическая, эндотермическая или без теплового эффекта.

По характеру реакции – гомогенная или топохимическая. Гомогенная реакция протекает во всём реакционном объеме, топохимическая – на границе раздела фаз (например, горение углерода).

**По тепловому режиму в реакторе**

Режим может быть изотермический, адиабатический или другой.

Для обеспечения теплового режима в реакторе возникает необходимость использования теплообменников.

**По конструкции теплообменников**

Теплообменник может быть встроенным (например, змеевик внутри реакционной зоны) или рубашечным (охлаждающий или нагревающий корпус реактора).

Возможен подвод тепла путем ввода в реактор горячего инертного теплоносителя.

**По производительности реактора**

Различают промышленные реакторы и лабораторные реакторы. Промышленные реакторы характеризуются высокой производительностью, имеют отлаженную конструкцию. Их размеры могут составлять несколько десятков метров. Лабораторные реакторы предназначены для исследования химических процессов (например, кинетики) и отладки конструкции реактора и имеют значительно меньшие размеры. Как правило, лабораторные реакторы конструктивно проще, чем промышленные реакторы, но в целом их конструкции схожи. Например, лабораторный реактор для исследования процесса со стационарным слоем представляет собой стеклянную трубку с двумя ватными тампонами, между которыми засыпают катализатор. Для исследования газожидкостных процессов используют стеклянную трубку, в нижней части которой устанавливают вставку из пористого стекла, служащую распределителем газа. Для изучения газожидкостных процессов в периодическом режиме используют так называемую «утку» – замкнутую емкость с несколькими патрубками, которая интенсивно встряхивается.

Выделяют экспериментальный и опытный образцы реактора. Экспериментальный образец по производительности занимает промежуточное положение между лабораторным и промышленным реакторами. Он используется для масштабирования реактора. Опытный образец по конструкции совпадает с промышленным реактором и служит для отладки процесса изготовления реактора.

Несмотря на разнообразие химических реакций и условий их проведения, разработаны некоторые универсальные конструкции реакторов, которые можно использовать для проведения различных процессов, хотя существует мнение, что для каждого процесса лучше проектировать свой реактор.

Наиболее известные конструкции реакторов следующие.

**Автоклав**

Это реактор периодического действия, в котором процесс может быть изотермическим, адиабатическим или изобарическим. Автоклав может быть снабжен мешалкой.

Автоклавы могут использоваться и в полунепрерывном режиме (например, периодическая загрузка по жидкости и непрерывная подача газа).

**Реактор со стационарным слоем катализатора**

Движение среды в нем может быть снизу вверх или сверху вниз.

Катализатор может располагаться в виде одного слоя или в виде нескольких слоев. Между слоями или в самих слоях могут находиться теплообменники.

Распространенной конструкцией реактора со стационарным слоем катализатора является трубчатый реактор. Это реактор с множеством трубок, заполненных катализатором и расположенных параллельно друг другу. Межтрубное пространство при этом используется для движения теплоносителя с целью обеспечения теплового режима.

Существуют реакторы с радиальным движением реакционной среды через катализатор. Катализатор при этом находится между двумя цилиндрическими сетками в виде цилиндрического слоя.

Важным фактором работы реактора является равномерная засыпка катализатора.

**Реактор с кипящим слоем**

Кипящим слоем может быть гетерогенный катализатор или твердый реагент. Примером может служить сжигание топлива в кипящем слое катализатора или сжигание твердого топлива без катализатора.

**Реактор с движущимся слоем**

Такой реактор используется, если необходимо перемещение твердого реагента или если требуется непрерывная замена катализатора из-за его дезактивации (например, реактор с вращающимся наклонным трубчатым корпусом). При вращении корпуса твердый материал перемешивается и движется вдоль трубы. Так устроены печи обжига, например, в производстве цемента. Похожая конструкция используется для получения нановолокнистого углерода из метана. Перемешивание катализатора за счет вращения корпуса предотвращает его спекание.

Есть реакторы, в которых катализатор движется в режиме пневмотранспорта. К этому типу можно отнести реакторы с дисперсным слоем катализатора. Размер частиц дисперсного катализатора составляет десятки и сотни нанометров, частицы катализатора движутся вместе с реакционной средой. После прохождения реактора продукты отделяются от катализатора каким-либо способом (например, выпариванием).

Существует ряд реакторов для проведения газожидкостных процессов.

**Пленочный реактор**

Жидкость в таком реакторе движется в виде пленки по плоским или цилиндрическим поверхностям. Движение жидкости может быть под действием силы тяжести или газового потока.

**Барботажный реактор**

В этих реакторах газ проходит через слой жидкости в виде пузырей, которые всплывают под действием силы Архимеда. Пузырьковый режим наблюдается, если среднерасходная скорость газа меньше 1 м/с (для системы «вода – воздух»).

**Пенный реактор**

При среднерасходной скорости газа больше 1 м/с барботажный режим сменяется на пенный, в котором структура газожидкостного слоя представляет пену и нельзя выделить отдельные пузыри.

При скорости выше 2 м/с начинается интенсивный унос жидкости из аппарата. Рабочую скорость газа в аппарате можно увеличить до 3–4 м/с, если расположить в слое жидкости специальные насадки.

**Центробежно-барботажный реактор**

В таком аппарате барботаж осуществляется в центробежном поле, за счет этого можно увеличить рабочую скорость газа в аппарате. Центробежно-барботажные реакторы могут быть с вращающимся корпусом и с неподвижным корпусом. Последние представляют собой вихревые камеры, в которых вертикальный вращающийся слой жидкости создается за счет закрутки газового потока.

Отдельный вид реакторов составляют развиваемые в последнее время **микрореакторы**. В них диаметр каналов составляет доли миллиметра. Коэффициенты теплообмена в таких реакторах на порядок выше по сравнению с трубчатыми реакторами. Недостаток: необходимо очищать газ от пыли, иначе каналы могут забиться.

В конце лекции вспомним некоторые понятия и уравнения, которые понадобятся на первой практике.

**Конверсия** ($x$) – доля реагента, вступившего в реакцию.

**Селективность** ($S_A$) – доля реагента, вступившего в реакцию и перешедшего в продукт $A$.

**Выход** ($R_A$) – доля реагента, перешедшая в продукт $A$. Для $R_A$ выполняется соотношение $R_A = S_A x$.

**Уравнения для идеализированных моделей реакторов при проведении реакции $A \rightarrow B$.**

Принятые обозначения:

РИП – реактор идеального перемешивания,

РИВ – реактор идеального вытеснения,

$Q$ – объемный расход реакционной смеси,

$c_0$ – концентрация реагента на входе в реактор,

$c$ – концентрация реагента внутри реактора,

$c_1$ – концентрация реагента на выходе реактора,

$V_0$ – объем реактора,

$V$ – продольная координата реактора, объем между входным и текущим сечениями реактора,

$r(c)$ – удельная скорость реакции,

$m_0$ – масса катализатора в реакторе,

$m$ – продольная координата реактора, масса катализатора между входным и текущим сечениями реактора,

$t$ – время.

Для гомогенного процесса справедливы следующие уравнения.

Проточный РИП:

$$Q(c_0 - c_1) = V_0 r(c_1);$$

РИВ:

$$Q\frac{dc}{dV} = -r(c),\ c(0) = c_0;$$

непроточный РИП:

$$\frac{dc}{dt} = -r(c),\ c(0) = c_0.$$

Для каталитического процесса уравнения имеют следующий вид.
Проточный РИП:

$$Q(c_0 - c_1) = m_0 r(c_1);$$

РИВ:

$$Q\frac{dc}{dm} = -r(c),\ c(0) = c_0;$$

непроточный РИП:

$$V\frac{dc}{dt} = -m_0 r(c),\ c(0) = c_0.$$

**Контрольные вопросы**

1. Что такое химический реактор?
2. Какие известные конструкции химических реакторов используются для проведения химических процессов с применением гетерогенного катализатора?
3. Какие известные конструкции химических реакторов используются для проведения химических процессов между жидкостью и газом?

**Задачи**

1. В проточном реакторе проводят необратимую реакцию первого порядка $A \rightarrow B$.

Дано: концентрация реагента $A$ на входе $c_0$, время контакта τ, константа скорости реакции $k$. Найти концентрацию реагента $A$ на выходе и его конверсию для РИП и РИВ.

2. В проточном РИП проводят необратимую реакцию второго порядка $A \rightarrow B$ с использованием гетерогенного катализатора.

Дано: концентрация реагента $A$ на входе $c_0$, объемный расход реакционной смеси $Q$, константа скорости реакции $k$, требуемая конверсия реагента $A$ $x$. Найти массу катализатора в реакторе.

3. В непроточном РИП проводят две параллельные необратимые реакции первого порядка $A \rightarrow B$ и $A \rightarrow C$.

Дано: концентрации компонент в начальный момент $c_A(0) = c_0$, $c_B(0) = c_C(0) = 0$, константы скорости реакции $k_1$ и $k_2$. Найти зависимость концентрации компонент от времени.

# Лекция 2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ В ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ (РИП, РИВ, РЕАКТОР С ЧАСТИЧНЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ)

От того, как организован гидродинамический режим в реакторе, зависит и эффективность реактора. Например, неравномерность газового потока, наличие застойных зон в реакторе, неравномерность загрузки катализатора могут отрицательно сказываться на эффективности работы реактора.

С некоторыми моделями реакторов с различным гидродинамическим режимом мы уже знакомы. Это реактор идеального перемешивания (РИП) и реактор идеального вытеснения (РИВ). Напомню основные свойства проточных реакторов РИП и РИВ.

РИП – это реактор, в котором реакционная смесь хорошо перемешивается. Поэтому схематично его изображают в виде емкости с мешалкой (рис. 1).

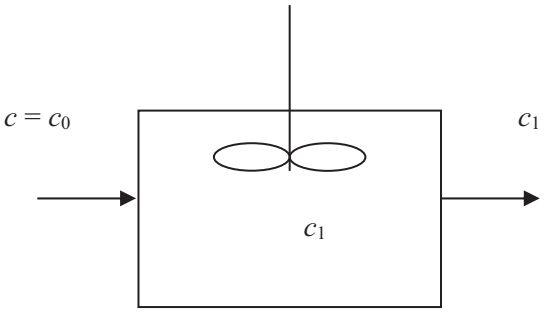



*Рис. 1.* Схема реактора идеального перемешивания