

**ОБЩАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ:  
ТЕОРИЯ, ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ**



**Ижевск  
2025**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»  
Институт математики, информационных технологий и физики  
Кафедра общей физики

**ОБЩАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ:  
ТЕОРИЯ, ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ**

Учебно-методическое пособие



Ижевск  
2025

УДК 66.01(075.8)

ББК 35.10я73

О-28

*Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом УдГУ*

**Рецензенты:** д-р физ.-мат. наук, профессор каф. химии и химической технологии ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» **О.В. Канунникова**, д-р физ.-мат. наук, доцент, зав. каф. теоретической и экспериментальной химии ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» **Е.В. Ветчанин**.

**Составители:** Газизянова А.Р., Писарева Т.А.,  
Решетников С.М.

О-28    Общая химическая технология: теория, вопросы и задачи : учеб.-метод. пособие / сост.: А.Р. Газизянова, Т.А. Писарева, С.М. Решетников. – Ижевск : Удмуртский университет, 2025. – 70 с.

**ISBN 978-5-4312-1317-5**

Учебно-методическое пособие включает теоретические сведения об основных процессах общей химической технологии, характеристику химических реакторов, а также перечень вопросов и задач для закрепления профессиональных компетенций. Пособие предназначено для студентов естественно-научных и технических направлений подготовки 04.03.01 Химия, 04.05.01 Фундаментальная и прикладная химия, 04.03.02 Химия, физика и механика материалов, 04.04.02.01 Химия и физика материалов, осваивающих курс «Химия», «Общая химическая технология», «Технология химического производства».

УДК 66.01(075.8)

ББК 35.10я73

**ISBN 978-5-4312-1317-5**

© Газизянова А.Р., Писарева Т.А.,  
Решетников С.М., сост., 2025

© ФГБОУ ВО «Удмуртский  
государственный университет», 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные предприятия представляют собой высокомеханизированные и в значительной степени автоматизированные производственные комплексы. Их развитие немислимо без внедрения новейших технологий и применения передовых методов переработки сырья. В этих условиях подготовка квалифицированных специалистов требует глубокого изучения профилирующих дисциплин, среди которых важное место занимает курс «**Общая химическая технология**», «**Технология химического производства**».

Термин «технология» происходит от двух греческих слов, означающих «мастерство» и «наука», что подчёркивает её двуединую природу – практическую и теоретическую. Химическая технология рассматривает закономерности протекания производственных химико-технологических процессов, направленных на получение продуктов различного состава, свойств и назначения. Этот курс обеспечивает формирование системного понимания того, как на основе фундаментальных знаний химии, физики и механики создаются и совершенствуются промышленные технологии.

Любое химико-технологическое производство, независимо от конечного продукта, включает в себя три ключевых элемента:

1. **Сырьё** – объект превращения;
2. **Энергия** – средство воздействия на объект;
3. **Аппаратура** – техническая база, в которой осуществляется процесс.

Особое значение в химическом производстве имеет **вода**. Она выполняет множество функций: служит растворителем, теплоносителем и хладоагентом, средой протекания химических реакций, используется для транспортировки веществ, промывки продуктов и оборудования.

Технология в широком понимании является комплексной наукой и делится на **механическую** и **химическую**. В механической технологии изменяются лишь размеры, форма или агрегатное состояние материала, тогда как химическая технология предполагает

изменение внутренней структуры вещества под воздействием химических реагентов, температуры, давления и других факторов.

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для студентов, изучающих основы общей химической технологии. В нём рассматриваются ключевые понятия, а также приведены вопросы и задачи для закрепления теоретических знаний и формирования профессиональных компетенций. Материал может использоваться как для аудиторной работы, так и для самостоятельной подготовки, способствуя формированию у студентов системного представления о закономерностях химико-технологических процессов и практических навыков их анализа.

# 1. ОСНОВЫ ОБЩЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

## 1. Основные понятия химико-технологических процессов

«Химическая технология – естественная прикладная наука о способах и процессах производства продуктов (предметов потребления и средств производства), осуществляемых с участием химических превращений, технологически, экономически и социально целесообразным путем» (Д.И. Менделеев).

Современные формулировки несколько уточняют это понимание. Под **технологией** принято подразумевать научное описание методов и средств производства, применяемых в той или иной отрасли промышленности.

**Химическая технология (ХТ)**, в более узком и современном смысле, – это наука, разрабатывающая и оптимизирующая экономически эффективные и экологически безопасные методы переработки природного и техногенного сырья в целевые продукты – материалы, вещества и изделия, предназначенные для практического использования в различных отраслях.

**Химико-технологический процесс (ХТП)** – это совокупность операций, позволяющих получить целевой продукт из исходного сырья. ХТП состоит из трех основных стадий, представленных на рис. 1.



Рис. 1. Схема химико-технологического процесса

ХТП являются основой промышленного производства химических веществ и материалов. Их реализация требует не только

знания фундаментальных законов химии и физики, но и понимания инженерных подходов, принципов энергосбережения и рационального природопользования.

В отличие от лабораторных химических реакций, протекающих в ограниченном масштабе и в идеальных условиях, промышленные химико-технологические процессы сопровождаются сложными тепло- и массообменными явлениями, требуют специальных аппаратов, учёта побочных реакций и выбора оптимального режима работы оборудования.

### *1.1. Виды производств и продуктов*

**Химическое производство** – это совокупность химико-технологических процессов, операций и стадий, направленных на получение заданных химических продуктов из природного, вторичного или синтетического сырья. Оно включает в себя физические, химические и физико-химические превращения веществ, осуществляемые в специально сконструированных аппаратах с целью получения целевых продуктов заданного качества и в нужном объёме.

#### **Ключевые характеристики химического производства:**

- **Комплексность** – включает основное производство, вспомогательные процессы и систему управления;
- **Последовательность** – строится из технологических стадий: подготовка сырья, реакция, выделение продукта, очистка, упаковка;
- **Специализация** – производство ориентировано на конкретную группу веществ (например, аммиак, кислоты, полимеры);
- **Техническая оснащённость** – реализуется с применением оборудования, соответствующего требованиям безопасности, термодинамики и кинетики процессов;
- **Устойчивость и контроль** – требует систем мониторинга, регулирования и автоматизации.

В таблице 1 приведена классификация химических производств.

Таблица 1

## Классификация химических производств

Признак классификации	Тип производства	Продукты
По типу выпускаемой продукции	Основная химия	Неорганические кислоты, щелочи, аммиак, удобрения, соли
	Органический синтез	Этанол, ацетон, фенол, растворители углеводородов, пластмасс, синтетических волокон, растворителей
	Полимерная промышленность	Полиэтилен, ПВХ, полистирол
	Промышленность бытовой химии и моющих средств	Моющие средства
	Фармацевтическое и косметическое производство	Лекарства, косметика
По назначению продукции	Средства производства	Промежуточные продукты, полуфабрикаты, реагенты, сырьё для других отраслей
	Предметы потребления	Готовые изделия, пригодные для непосредственного использования (косметика, лекарства, пластмассовая упаковка и др.)
По масштабу производства	Крупнотоннажные	Аммиак, удобрения, кислоты (непрерывные процессы)
	Мелкосерийные	Красители, добавки, катализаторы
По виду сырья	Минеральное	Фосфориты, калийные соли, сера
	Органическое	Нефть, газ, древесина
	Возобновляемое и вторичное	Биомасса, отходы переработки, вторсырьё
По агрегатному состоянию сырья и продукта	Газообразные	Производство водорода, синтез-газа
	Жидкие	Производство кислот, растворителей
	Твёрдые	Производство порошков, удобрений, пластмасс

## **1.2. Химико-технологический критерии эффективности химико-технологического процесса**

Оценка эффективности химико-технологического процесса традиционно начинается с анализа экономических показателей – таких как себестоимость продукции, удельные затраты и рентабельность. Эти параметры позволяют судить о целесообразности процесса в целом, отражая его конечный результат. Однако они не раскрывают внутренней структуры и особенностей протекания отдельных стадий.

Для более точного анализа эффективности на уровне отдельных стадий и аппаратов используют специальные технико-технологические критерии. Среди них – **степень превращения, выход целевого продукта, селективность реакции и др.** Эти показатели позволяют количественно оценить полноту протекания химической реакции, эффективность использования сырья и направленность процесса на получение именно желаемого продукта.

**1) Организационные** – критерии, оценивающие насколько эффективно организованы процессы на предприятии.

**2) Экономические** – критерии, связанные с затратами на производство и рентабельностью процесса (себестоимость, капитальные затраты, производительность труба, прибыль и рентабельность, окупаемость инвестиций).

**3) Технические** – критерии, оценивающие уровень применения аппаратов, т. е. техническое совершенство процесса или производства в целом.

**Производительность (П) реактора, аппарата или производства в целом** – количество выработанного продукта или переработанного сырья в единицу времени:

$$П = \frac{m_{цп}}{t} \quad [\text{кг/ч; м}^3/\text{сут; т/год}]$$

где  $m_{цп}$  – масса целевого продукта.

**Мощность (Р)** – максимально возможная производительность агрегата, машины.

**Интенсивность (И)** – производительность, отнесенная к какому-либо параметру (аппарата), характеризующее данное производство:

$$И = \frac{\Pi}{V}; И = \frac{\Pi}{S}; И = \frac{\Pi}{m} \text{ [т/год} \cdot \text{м}^3; \text{т/год} \cdot \text{м}^2; \text{т/кг} \cdot \text{сут}]$$

где

$V$  – объем реактора;

$S$  – площадь катализатора;

$m$  – масса катализатора.

**4) Технологические** – критерии, отражающие эффективность данной технологии по ресурсо- и энергосбережению, по степени переработки сырья.

**Расходные коэффициенты ( $\beta$ )** – определяют расход сырья, воды, энергии, отнесенные к единице целевого продукта:

$$\beta = \frac{m_A}{m_R}; \quad \beta = \frac{m_{H_2O}}{m_{цп}} \quad \text{[кг/т, м}^3\text{/т]}$$

**Степень превращения (конверсия) ( $X_A$ )** – отношение количества реагента  $A$ , вступившего в реакцию, к его исходному количеству (показывает, насколько эффективно протекает химическая реакция и насколько полно расходуется исходное вещество).

$A \rightarrow R$  для простой необратимой реакции

$$X_A = \frac{n_{A_0} - n_A}{n_{A_0}} = \frac{n_A'}{n_{A_0}}, \quad \text{[доли; \%]}$$

$n_{A_0}$  – количество исходного реагента  $A$  в начале реакции;

$n_A$  – количество исходного реагента  $A$ , после реакции (оставшегося вещества);

$n_A'$  – количество вступившегося в реакцию реагента;

$A \leftrightarrow R$  для простой обратимой реакции.

$$X_A^* = \frac{n_{A_0} - n_A^*}{n_{A_0}} \quad \text{[доли; \%]}$$

**Выход продукта ( $\Phi_R$ )** – отношение количества реально полученного целевого продукта  $R$  к максимально возможному по уравнению реакции:

$$\Phi_R = \frac{n_{R(\text{прак})}}{n_{R(\text{теор})}} \quad \text{[доли; \%]}$$

**A → R для простой необратимой реакции**

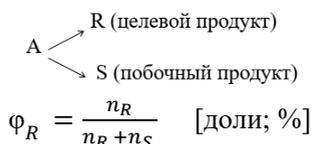
$$\Phi_R = \frac{n_{R(\text{цп})}}{n_{R_{\text{max}}}} = \frac{n_{A_0} - n_A}{n_{A_0}} = X_A$$

**A ↔ R для обратимой реакции**

$$\Phi_R = \frac{n_R}{n_{R^*}}$$

$n_{R^*}$  – количество продукта в состоянии равновесия.

**Селективность процесса ( $\phi_R$ )** – отношение количества полученного целевого продукта R к общему количеству всех полученных продуктов.



### **1.3. Классификация химико-технологических процессов**

Классификация химико-технологических процессов (ХТП) выполняется на основе сочетания ключевых признаков, что позволяет выбрать оптимальную аппаратуру и режимы работы в зависимости от физико-химической природы этапов переработки вещества.

**а) По типу явлений в процессе:**

- **химические процессы** – включают собственно реакции (синтез, разложение, окисление и др.);
- **физические процессы** – операции, сопровождающиеся физическими превращениями (фильтрация, измельчение, сушка);
- **физико-химические процессы** – операции совмещают физико-химические эффекты (адсорбцию, абсорбцию, экстракцию, ионный обмен).

**б) По агрегатному состоянию реагирующих веществ:**

- **гомогенные** (все вещества в одной фазе: газ, жидкость или твёрдое вещество);
- **гетерогенные** (реагенты и продукты находятся в разных фазах: газ-жидкость, жидкость-твёрдое и др.).

**в) По организационно-технической форме:**

- **непрерывные процессы** – сырьё непрерывно поступает, продукт выходит постоянно;
- **периодические процессы** – циклическая загрузка и разгрузка (чаще в мелкосерийных и лабораторных производствах).

**г) По сложности реакции:**

- **простые** (одноэтапные) реакции;
- **сложные** (многоэтапные), включая последовательные, параллельные и каскадные реакции, когда функционируют несколько химических шагов.

## **2. Материальный и тепловой баланс**

Эффективность функционирования любого химико-технологического процесса в значительной степени определяется рациональностью использования сырья и энергии. Для оценки этих аспектов при проектировании и эксплуатации промышленного оборудования используются понятия материального и теплового баланса.

### **2.1. Закон сохранения массы. Расчет материального баланса**

Материальный баланс – это выражение закона сохранения массы для производственных систем: **масса всех поступивших веществ равна массе всех выходящих.**

$$\Sigma m_{\text{приход}} = \Sigma m_{\text{расход}}$$

**Расчёт материального баланса** является одним из ключевых этапов при проектировании химико-технологического процесса. На его основе определяются потребности предприятия в сырьевых и вспомогательных материалах, рассчитываются объёмы необходимого оборудования и составляется тепловой баланс.

Прежде чем приступить к расчёту материального баланса, необходимо иметь чёткое представление о самом процессе, его стадиях, условиях протекания, составе и свойствах исходного сырья. Это обеспечивает корректность расчётов и позволяет точно учесть все возможные потери, побочные продукты и примеси.

В практике расчётов различают **общий баланс**, охватывающий все вещества, участвующие в технологической схеме, и **частный баланс**, составляемый по каждому отдельному компоненту. Основой материального баланса служит фундаментальный физический принцип – **закон сохранения массы**. Согласно этому закону, масса веществ, поступающих в систему (например, в химическую установку, аппарат или реактор), должна быть равна массе веществ, выходящих из неё, с учётом накопления или потребления внутри системы. Это утверждение справедливо как для замкнутых, так и для открытых систем (при условии отсутствия ядерных превращений), что позволяет точно описывать количественные соотношения между всеми компонентами процесса на каждом его этапе.

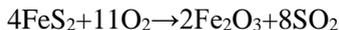
При проведении расчётов учитываются как основные (целевые) компоненты, так и побочные продукты, примеси, а также возможные потери сырья и продуктов. Масса веществ может выражаться в различных единицах измерения – килограммах, тоннах, граммах. При выполнении расчётов в качестве базовой величины часто используют либо производительность установки, либо её пропускную способность по сырью, которая обычно указывается в тоннах в сутки или в год. Дополнительные параметры процесса, такие как степень конверсии, выход продуктов и другие, приводятся в технологическом регламенте конкретного производства. Для повышения точности на промежуточных этапах рекомендуется использовать массовые доли компонентов в расчётной единице (например, 1 кмоль вещества). Желательно выполнять расчёты с точностью как минимум до третьего знака после запятой, что позволяет достигать высокой степени сходимости между приходной и расходной частями баланса.

Материальный баланс может быть представлен в различных форматах:

- в виде **таблиц**, где фиксируются массы всех компонентов;
- в виде **уравнений**, отражающих количественные зависимости между веществами;
- **графически**, через блок-схемы и диаграммы потоков.

## Пример расчёта материального баланса с использованием уравнения реакции

Рассмотрим процесс обжига пирита при производстве серной кислоты. Основная реакция представлена уравнением:



Обобщённое уравнение материального баланса для данного процесса можно записать следующим образом:

$$m_{\text{пирита}} + m_{\text{воздуха}} = m_{\text{огарка}} + m_{\text{SO}_2} + m_{\text{SO}_3} + m_{\text{O}_2} + m_{\text{N}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}}$$

где:

$m_{\text{пирита}}$ ,  $m_{\text{воздуха}}$  – массы поступающих в печь пирита и воздуха, соответственно;

$m_{\text{огарка}}$  – масса твёрдого огарка;

$m_{\text{SO}_2}$ ,  $m_{\text{SO}_3}$ ,  $m_{\text{O}_2}$ ,  $m_{\text{N}_2}$ ,  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  – массы компонентов в составе газов, образующихся в процессе: серный ангидрид, избыток кислорода, азот из воздуха и водяной пар;

$m_{\text{SO}_2}$  – масса целевого продукта.

Важно, чтобы при составлении баланса учитывался полный состав образующегося обжигового газа, а также все потери, примеси и возможные колебания в составе сырья. Пренебрежение этими аспектами может привести к так называемым «невязкам» – несоответствию между приходной и расходной частью баланса.

### Табличный метод расчета материального баланса

Наиболее распространённой, наглядной и удобной формой представления баланса является **таблица**. Он позволяет структурировать входящие и выходящие потоки веществ в виде таблицы, обеспечивая простоту понимания и удобство дальнейших расчётов.

Таблица состоит из двух основных частей (таблица 2):

- **Приход** – записываются все сырьевые компоненты, поступающие в систему);
- **Расход** – записываются все компоненты, покидающие систему или преобразующиеся в процессе.

Таблица 2

**Материальный баланс производства**

<b>Приход</b>	<b>кг</b>	<b>Расход</b>	<b>кг</b>
Компонент 1		Компонент 1	
Компонент 2		Компонент 2	
Компонент 3		Компонент 3	
Компонент 4		Компонент 4	
<b>Итого</b>		<b>Итого</b>	

Каждый компонент, входящий в состав приходной и расходной части материального баланса, называется статьёй баланса. Для обеспечения корректности расчётов суммарная масса всех входящих веществ должна быть строго равна суммарной массе всех выходящих веществ. В случае выявления расхождений между приходом и расходом говорят о наличии **невязки** в балансе. Такие отклонения требуют обязательного анализа и могут быть обусловлены:

- неучтёнными потерями вещества в процессе;
- примесями в сырье;
- недостаточной точностью работы измерительных приборов;
- округлениями при математических операциях;
- техническими погрешностями расчётов и т. д.

**Графический способ представления материального баланса**

Графическая форма представления материального баланса используется для того, чтобы наглядно показать распределение материальных потоков (графики, диаграммы, гистограммы).

Более наглядным способом отображения баланса является **диаграмма**, где каждый материальный поток изображается в виде полос, ширина которой соответствует количеству вещества. Пример – для процесса вида:



можно представить такую схему (рис. 2):

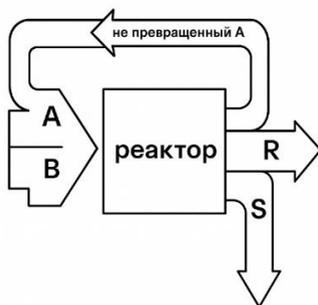


Рис. 2. Графический способ предоставления материального баланса

Также учитываются не переработанные вещества, возвращающиеся в цикл.

## 2.2. Основы теплового расчёта

Тепловой баланс позволяет проанализировать тепловые потоки в технологической системе и определить, сколько тепла требуется для обеспечения химической реакции, фазового перехода, нагрева или охлаждения реагентов.

Основой теплового баланса является **закон сохранения энергии**, согласно которому суммарное количество подведённого тепла должно быть равно суммарному количеству тепла, отведённого из системы, с учётом внутренних преобразований.

Тепловой расчёт включает определение количества тепла, подводимого извне (например, через теплообменники, топку, электронагрев), и тепла, выделяющегося в ходе экзотермических реакций. Также учитываются тепловые потери через стенки аппаратов, испарение, конденсацию и тепло, уносимое продуктами реакции или побочными веществами.

Для корректного составления теплового баланса необходимо иметь данные о теплоёмкостях веществ, теплоте фазовых переходов, теплоте реакций и температурных режимах на каждом участке процесса.

Расчёты ведутся по уравнениям теплового баланса, аналогичным материальному, но с использованием энергетических эквивалентов:

$$\sum Q_{\text{исх}} = \sum Q_{\text{конечн}}$$

**Пример:**  $Q_{\text{исх в-в}} + Q_{\text{экзо}} + Q_{\text{доп}} = Q_{\text{продуктов реакции}} + Q_{\text{потери}} + Q_{\text{эндо}}$ ,  
где

**В приход:**

1. Теплота, вносимая входящими в аппарат веществами  $Q_{\text{исх в-в}}$ .
2. Теплота экзотермических процессов  $Q_{\text{экзо}}$ .
3. Теплота, вносимая за счет подогрева извне (вода, газ)  $Q_{\text{доп}}$ .

**В расход:**

4. теплота, уносимая выходящими из аппарата продуктами  $Q_{\text{продуктов реакции}}$ .
5. потери теплоты в окружающую среду  $Q_{\text{потери}}$ .
6. теплота эндотермических процессов  $Q_{\text{эндо}}$ .

Таким образом, материальный баланс представляет собой основу инженерного анализа технологических процессов и необходим для:

- расчёта сырья и продуктов;
- проектирования оборудования;
- выявления потерь и повышения эффективности производства.

Его точность и форма представления напрямую влияют на достоверность инженерных расчётов и корректность последующего проектирования технологической схемы.

### 3. Физико-химические основы технологических процессов

Перед тем как внедрять химическую реакцию в промышленный процесс, необходимо оценить возможность её самопроизвольного протекания, влияние различных факторов на скорость, выход целевого продукта, образование побочных соединений и степень использования сырья. Эти задачи решаются на основе законов химической термодинамики и химической кинетики, ключевыми аспектами которых являются скорость протекания химических реакций и условия установления химического равновесия.

### 3.1. Химическое равновесие

**Химическое равновесие** – это состояние, при котором скорости прямой и обратной реакций равны, а концентрации веществ остаются постоянными.

Возможность самопроизвольного протекания реакции при постоянных температуре и давлении определяется знаком изобарно-изотермического потенциала  $\Delta G^{\circ}_{298}$ , который связан с энтальпийным эффектом  $\Delta H^{\circ}_{298}$  и энтропийным фактором  $T\Delta S^{\circ}_{298}$ :

$$\Delta G_{298}^{\circ} = \Delta H_{298}^{\circ} - T\Delta S_{298}^{\circ}$$

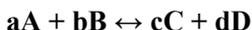
При отрицательном значении  $\Delta G^{\circ}$  реакция термодинамически возможна и может протекать самопроизвольно. Для расчёта при температурах, отличных от стандартных (298 К), используют уравнения Кирхгофа (1) и Максвелла (2), связывающие изменения  $\Delta H$ ,  $\Delta S$  и  $\Delta G$  с температурой.

$$\left(\frac{d\Delta H}{dT}\right)_p = \Delta C_p \quad (1)$$

$$\left(\frac{d\Delta G}{dT}\right)_p = -\Delta S \quad (2)$$

Для обратимых реакций величина и знак  $\Delta G$  позволяют качественно оценить положение равновесия. Если  $\Delta G < 0$ , равновесие существенно смещается в сторону образования продуктов реакции, что обеспечивает высокий выход.

Другим показателем степени протекания обратимых реакций является константа равновесия. Согласно закону действующих масс, для обратимой реакции вида



концентрационная константа равновесия выражается формулой:

$$K_c = \frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b}$$

Константа равновесия  $K_c$  определяется через равновесные концентрации всех жидких или газообразных участников реакции. Её величина не зависит от начальных концентраций реагентов, а определяется исключительно температурой процесса.

В случае газофазных реакций  $K_C$  можно выразить через равновесные парциальные давления газов. Связь между константами  $K_C$  и  $K_p$  описывается уравнением:

$$K_p = K_c(RT)^{\Delta n},$$

где  $\Delta n$  – изменение количества вещества в ходе процесса, определяемое по уравнению реакции.

Варьирование внешних условий (согласно принципу Ле Шателье) способно смещать химическое равновесие в ту или иную сторону.

**Принцип Ле Шателье** внешнее воздействие на систему, находящуюся в состоянии равновесия, приводит к смещению равновесия в направлении, при котором эффект произведенного воздействия ослабляется.

1. **Повышение температуры** смещает равновесие в сторону эндотермической реакции.

2. **Увеличение давления** смещает равновесие в сторону реакций, ведущей к уменьшению объема.

3. **Увеличение концентрации** исходных веществ и удаление продуктов из сферы реакции смещает равновесие в сторону прямой реакции.

4. **Катализаторы** не влияют на положение равновесия.

Таким образом, подбирая оптимальные условия проведения процесса, можно увеличивать полноту использования сырья и добиваться высоких выходов продуктов.

### *3.2. Скорость химических реакций*

Помимо термодинамических расчётов, для успешной реализации любого химического процесса необходимо также выполнить кинетические расчёты.

**Скорость химической реакции** – это величина, характеризующая изменение концентрации реагентов или продуктов за единицу времени.

Выражается кинетическим уравнением реакции

$$v = \frac{dc}{dt} = K \cdot C^n \text{ [моль/(л·с)],}$$

где  $K$  – константа скорости;

$C$  – концентрация реагирующих веществ;

$n$  – порядок реакции, определяемый экспериментально и не всегда совпадающие со стехиометрическими коэффициентами.

### **Факторы, влияющие на скорость реакции:**

#### **1. Природа реагентов**

Различные вещества реагируют с разной скоростью из-за различий в молекулярной структуре и реакционной способности. Например, калий реагирует с водой гораздо быстрее, чем литий или цинк.

#### **2. Концентрация реагентов**

Увеличение концентрации ведёт к возрастанию количества столкновений и тем самым – скорости реакции. Это отражает закон действующих масс Гульдберга-Вааге.

#### **3. Температура**

Повышение температуры ускоряет движение молекул и увеличивает вероятность преодоления энергия активации, что значительно повышает скорость реакции. Зависимость описывается уравнением Аррениуса:

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_A}{RT}},$$

где

$k$  – константа скорости реакции;

$e$  – основание натурального логарифма;

$T$  – температура;

$R$  – газовая постоянная;  $E_A$  – энергия активации;

$A$  – предэкспоненциальный множитель.

Приблизённо, при увеличении температуры на каждые  $10^\circ\text{C}$  скорость может удваиваться – учет эмпирического правила Вант-Гоффа.

#### **4. Площадь поверхности (для гетерогенных систем)**

Реакции между фазами ограничиваются площадью соприкосновения. Более мелкое дробление твёрдой фазы увеличивает поверхность и скорость реакции.

#### **5. Катализаторы**

Катализаторы ускоряют реакции, снижая энергию активации. Они не влияют на конечное равновесие, но значительно повышают скорость достижения продукта.

#### **6. Давление (для газовых реакций)**

Увеличение давления в газовой фазе повышает концентрацию и частоту столкновений, ускоряя реакцию.

Таким образом, скорость протекания химических реакций обусловлена совокупным влиянием физических и химических факторов, включая природу реагентов, их концентрацию, температуру, давление и наличие катализаторов. Закономерности химической кинетики, описывающие эти зависимости, являются фундаментальной основой для анализа, оптимизации и проектирования промышленных химико-технологических процессов, обеспечивая их эффективность и устойчивость.

### **4. Вопросы для повторения и самостоятельной проработки**

1. Из каких основных стадий состоит химико-технологический процесс? В каких стадиях химико-технологического процесса участвуют химические реакции?

2. Какие существуют технологические критерии эффективности химико-технологического процесса?

3. Что называется производительностью, мощностью, интенсивностью?

4. Что представляет собой материальный баланс и как он связан с законом сохранения массы?

5. Какие способы представления материального баланса существуют?

6. В чём разница между изотермическим, изобарным, изохорным и адиабатическим процессами?

7. Как определить направленность химической реакции? Как, сравнивая значения энергии Гиббса  $\Delta G$  для различных реакций, можно определить, какая из них является спонтанной (самопроизвольной)?

8. Что характеризует химическое равновесие?

9. Сформулируйте принцип Ле Шателье. Каким образом он помогает предсказать влияние изменения температуры и давления на состояние равновесия химической реакции?

10. Как влияет температура на скорость реакции согласно уравнению Аррениуса?

## 5. Задачи

### Пример 1.

В колонну для окисления твердого парафина загружают 40 т парафина, который занимает 75 % объема колонны (высота 10 м, диаметр 2,5 м). Процесс окисления длится в среднем 18 ч. Рассчитайте производительность колонны и интенсивность процесса окисления парафина.

*Решение:*

Объем окислительной колонны:

$$V = \frac{\Pi \cdot d^2}{4} \cdot h$$
$$V = \frac{3,14 \cdot 2,5^2}{4} \cdot 10 = 49 \text{ (м}^3\text{)}$$

Полезный объем колонны ( $V_n$ ) составляет:

$$V_n = 49 \cdot 0,75 = 36,75 \text{ (м}^3\text{)}$$

Найдем производительность колонны:

$$\Pi = \frac{m_{\text{цп}}}{t}$$
$$\Pi = \frac{40 \cdot 1000}{18} = 2222,2 \text{ (кг/ч)}$$

Определим интенсивность процесса окисления парафина:

$$И = \frac{\Pi}{V}$$

$$И = \frac{2222,2}{36,75} = 60,46 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{ч} \right)$$

Ответ: П= 2222,2 кг/ч, И= 60,46 кг/м<sup>3</sup>· ч

### Пример 2.

Для параллельных реакций  $2A \rightarrow R$  и  $A \rightarrow 4S$ , протекающих при постоянном объеме, необходимо определить степень превращения реагента А, выход и селективность по целевому продукту R, если по окончании реакции концентрация веществ  $C_A=2$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $C_r=3$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $C_s=4$  кмоль/м<sup>3</sup>.

*Решение:*

Определяем начальную концентрацию  $C_{A_0}$ :

- для расчёта используем стехиометрию реакций:
- для образования 4 кмоль S требуется 1 кмоль A;
- для получения 3 кмоль R требуется 6 кмоль A (так как по реакции  $2A \rightarrow R$ ).

В остатке остаётся 2 кмоль А.

$$C_{A_0} = 6 + 1 + 2 = 9 \text{ кмоль/м}^3$$

Найдем степень превращения  $X_A$ :

$$X_A = \frac{C_{A_0} - C_A}{C_{A_0}}$$

$$X_A = \frac{9 - 2}{9} = 0,78$$

Определим выход продукта  $\Phi_R$ :

$$\Phi_R = \frac{v_A \cdot C_R}{v_R \cdot C_{A_0}}$$

$v_A=2$  – коэффициент перед А в целевой реакции;

$v_R=1$  – коэффициент перед R.

$$\Phi_R = \frac{2 \cdot 3}{1 \cdot 9} = 0,67$$

Найдем селективность продукта  $\Phi_R$ :

$$\Phi_R = \frac{v_A \cdot C_R}{v_A \cdot C_R + v_S \cdot C_S}$$

$v_s=4$  – коэффициент перед S

$$\varphi_R = \frac{2 \cdot 3}{2 \cdot 3 + \frac{1}{4} \cdot 4} = 0,86$$

Ответ:  $C_{A0} = 9$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $X_A = 0,78$ ;  $\Phi_R = 0,67$ ;  $\varphi_R = 0,86$ .

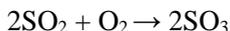
### Пример 3.

Составить таблицу материального баланса контактного отделения производства серной кислоты  $H_2SO_4$  на 1 т обжигаемого колчедана на основании следующих данных:

Компоненты	Состав (в объемных %)	кг
Сернистый ангидрид ( $SO_2$ )	7,1	794,4
Кислород ( $O_2$ )	11,0	579,6
Азот ( $N_2$ )	81,9	3782,0

Степень констатирования – 98 %. Результаты расчетов выразить в кг.

Решение:



При обжиге 1 т колчедана получается серного ангидрида ( $SO_3$ ):

$$m_{SO_3} = m_{SO_2} \cdot \eta \cdot \frac{M_{SO_3}}{M_{SO_2}}$$

$$m_{SO_3} = 794,4 \cdot 0,98 \cdot \frac{80}{64} = 919 \text{ кг}$$

Масса остаточного  $SO_2$ :

$$m_{SO_2, \text{ост}} = m_{SO_2} \cdot (1 - \eta)$$

$$m_{SO_2, \text{ост}} = 794,4 \cdot (1 - 0,98) = 15 \text{ кг}$$

Расход кислорода на реакцию:

Из уравнения реакции на 2 моль  $SO_2$  требуется 1 моль  $O_2$ .

$$m_{O_2} = m_{SO_2} \cdot \eta \cdot \frac{M_{O_2}}{2M_{SO_2}}$$

$$m_{O_2} = 794,4 \cdot 0,98 \cdot \frac{32}{2 \cdot 64} = 183,6 \text{ кг}$$

Масса остаточного  $O_2$ :

$$m_{O_2, \text{ост}} = 579,6 - 183,6 = 396 \text{ кг}$$

Азот  $N_2$  инертен, поэтому без изменений.

Подводим баланс:

Приход		Расход	
Компонент	Кол-во, кг	Компонент	Кол-во, кг
Сернистый ангидрид ( $SO_2$ )	749,4	Сернистый ангидрид ( $SO_2$ )	15,0
Кислород ( $O_2$ )	579,6	Кислород ( $O_2$ )	396,0
Серный ангидрид ( $SO_3$ )	–	Серный ангидрид ( $SO_3$ )	919,0
Азот ( $N_2$ )	3782,0	Азот ( $N_2$ )	3782,0
<b>Итого</b>	<b>5112,0</b>		<b>5112,0</b>

1. Годовая производительность установки по производству уксусной кислоты 20 тыс. т в год. Вычислите производительность в час, если цех работает 365 дней в году, из них 32 дня отводятся на ремонты, потери производства составляют 4 %.

2. Подсчитайте интенсивность полимеризатора сополимеризации дивинила со стиролом, если объем его 20 м<sup>3</sup>, а производительность 2160 кг полимера в сутки.

3. Продукционная башня – денитратор в нитрозном способе производства серной кислоты имеет высоту 16 м и диаметр 5,5 м. Полезный объем башни составляет 85%. Башня подает в сутки 90 т  $H_2SO_4$ . Определите интенсивность процесса.

4. Для жидкофазной реакции:



определить степень превращения  $X_B$  и состав реакционной смеси при:  $X_A = 0,45$ ,  $C_{A0} = 1$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $C_{B0} = 2$  кмоль/м<sup>3</sup>.

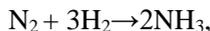
5. Вычислить выход стирола ( $\Phi$ , % на пропущенный и прореагировавший этилбензол), если было получено  $0,07 \text{ м}^3$  стирола. При условии, что через контактный аппарат пропущено  $0,2 \text{ м}^3$  этилбензола, степень превращения  $40 \%$ , селективность процесса –  $95 \%$ .



6. Рассчитать степень превращения метана  $\text{CH}_4$ , выход ацетальдегида  $\text{CH}_3\text{CHO}$  и селективность процесса, если в пиролизную печь поступает  $2000 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$ . Пиролизный газ содержит  $570 \text{ кг CH}_4$  и  $533 \text{ кг CH}_3\text{CHO}$ .



7. Рассчитать степень превращения водорода по реакции



если известно, что после некоторого промежутка времени  $t$  в конечной газовой смеси составляют:

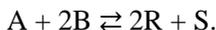
$$N_{\text{H}_2,t} = 80 \text{ моль}, N_{\text{NH}_3,t} = 20 \text{ моль}.$$

8. Протекают последовательные реакции:



Определить степень превращения, выход и селективность по продукту  $\text{R}$ , если известен конечный состав реакционной смеси:  $C_A = 3$  кмоль,  $C_R = 2$  кмоль,  $C_S = 4$  кмоль.

9. Дана обратимая реакция:



Начальные количества  $\text{A}$  и  $\text{B}$  составляли  $10$  и  $25$  кмоль соответственно. В реакционной смеси, выходящей из реактора, содержится  $12$  кмоль продукта  $\text{R}$ . Известно, что в равновесной смеси при данных условиях содержится  $2,5$  кмоль  $\text{A}$ . Найти выход продукта  $\text{R}$ .

10. Определить степень превращения  $X_B$  и состав реакционной смеси для реакции:  $2\text{A} + \text{B} \leftrightarrow 3\text{R}$ , если  $X_A = 0,80$ ,  $C_{A0} = 0,5$  кмоль,  $C_{B0} = 1,5$  кмоль.

**11.** Определить состав реакционной смеси и степень превращения  $X_B$  для реакции:  $A + 2B \leftrightarrow 2R + S$ , если  $X_A = 0,6$ ,  $C_{A_0} = 1,5$  моль,  $C_{B_0} = 2,5$  моль.

**12.** Определить выход продукта  $R$  и степень превращения  $X_A$  реагента  $A$ , если обратимая реакция  $A \leftrightarrow 2R$  протекает при условиях, когда равновесная степень превращения  $X_A^* = 0,75$ , а отношение концентрацией продукта и реагента после окончания реакции  $C_R: C_A = 1$ .

**13.** Производительность печи для обжига серного колчедана составляет 30 т в сутки. Выход сернистого газа – 97,4 % от теоретического. Сколько тонн  $SO_2$  производит печь в сутки, если содержание серы в колчедане 42,4 %?

**14.** Годовая производительность доменной печи составляет 1800 тыс. т чугуна. Определить интенсивность процесса выплавки чугуна, если полезный объем печи составляет 2700 м<sup>3</sup>.

**15.** Объем колонны синтеза аммиака, занятый катализатором, составляет 1,5 м<sup>3</sup>. Производительность колонны – 7500 кг/ч. Рассчитать: а) годовую производительность колонны синтеза аммиака (в т); б) интенсивность процесса синтеза аммиака.

**16.** Сернокислотная установка башенной системы объемом 740 м<sup>3</sup> дает 150 т 75 %-ой серной кислоты в сутки. Определить производительность установки (в кг/ч) по безводной серной кислоте и интенсивность процесса.

**17.** Определить практические расходные коэффициенты песка, мела, карбоната и сульфата натрия для варки простого стекла. Состав шихты для варки стекла: кремнезема – 74 %, оксида кальция – 10 %, оксида натрия – 16 %, из них 15,5 % вводится за счет карбоната натрия и 0,5 % – за счет сульфата натрия. Потери шихты в процессе производства составляют 5 %.

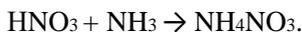
**18.** Согласно материальной отчетности, на производство 1 т 65 %-ной азотной кислоты  $HNO_3$ , полученной окислением аммиака, расходуется 186,2 кг аммиака  $NH_3$ .

Рассчитать:

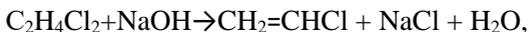
а) выход азотной кислоты;

б) теоретический и практический расходные коэффициенты сырья по аммиаку.

**19.** В производстве аммиачной селитры производительностью 20 т/ч применяют азотную кислоту с массовой долей  $\text{HNO}_3$  47 % и газообразный аммиак с массовой долей  $\text{NH}_3$  100 %. Потери реагентов в производстве составляют 1 %. Составить материальный баланс нейтрализатора, если аммиачная селитра выходит из него в виде водного раствора с массовой долей 0,6 ед.  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ :

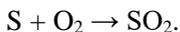


**20.** Рассчитать и составить материальный баланс получения 1000 кг хлорвинила ( $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ ) по реакции дегидрохлорирования дихлорэтана

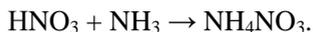


если используется дихлорэтан чистотой 95 % масс., раствор гидроксида натрия с массовой долей 0,42 ед. Выход хлорвинила по дихлорэтану составляет 80 % от теоретического, а гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$ ) берется с избытком 10 % от теоретического.

**21.** Составить материальный баланс процесса сжигания серы в печи производительностью 60 т/сут, если конверсия серы 0,95, коэффициент избытка воздуха 1,5 от теоретического. Расчет выполнить в единицах кг/ч и  $\text{м}^3/\text{ч}$  на производительность печи по сжигаемой сере:

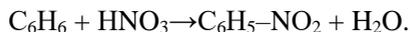


**22.** Рассчитать и составить материальный баланс производства 1 т нитрата аммония (аммиачной селитры), получаемого взаимодействием азотной кислоты с аммиаком. Содержание компонентов в исходной смеси (% масс.): азотной кислоты – 55, газообразного аммиака – 100. Выход нитрата аммония – 85 %. Потери аммиака и азотной кислоты – 1%:



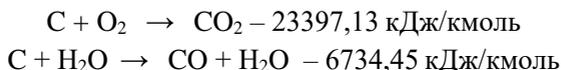
**23.** При производстве 3000 кг нитробензола выход составляет 98 % от теоретического. Составить материальный баланс нитратора, если в него подают 20 % азотной кислоты, 60 % серной кислоты и 20 %

воды по массе. Расход нитрующей смеси составляет 4 кг на 1 кг бензола:



**24.** Составить материальный баланс обжига 1 т пирита, содержащего 42 % серы и 4 % воды. Концентрация сернистого газа и серного ангидрида в обжиговом газе 14,5 % и 0,1 % по объему соответственно. Содержание серы в огарке 1 %.

**25.** Составить материальный баланс газификации угля (массовая доля углерода 90%) в газогенераторе с пропускной способностью 5973 тыс. т/год таким образом, чтобы эндотермический эффект образования синтез газа был скомпенсирован экзотермичностью реакции горения угля в воздухе. суммарный тепловой эффект образования синтез-газа был скомпенсирован экзотермической реакцией горения угля в воздухе. Считать, что в газогенераторе происходит 100 % конверсии протекающих реакций:



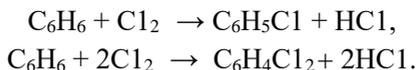
**26.** Составьте материальный баланс процесса упаривания 100 т раствора NaOH, если первоначальная концентрация его была 15 %-ной, а упаренного раствора 60 %-ной. Потери при упаривании составляют 0,3 %.

**27.** Составьте материальный баланс на получение 1 т карбида кальция, содержащего 90 %  $\text{CaC}_2$ , сырье – антрацит марки АК с содержанием 96% углерода, а известь – 85 %  $\text{CaO}$ .

**28.** Составьте материальный баланс производства 1000 м<sup>3</sup> аммиака, если азотно-водородная смесь получается смешением сырого азота ( $\text{N}_2$  – 99,6 %,  $\text{O}_2$  – 0,2 %,  $\text{Ar}$  – 0,2 %) и сырого водорода ( $\text{H}_2$  – 99,6 %,  $\text{CH}_4$  – 0,2 %,  $\text{CO}$  – 0,2 %). Синтез ведут под давлением 30,3 – 106 Па, при температуре 673К. Концентрация аммиака в газах после колонны синтеза 18 %, а в циркуляционном газе 4 %, содержание других газов в циркуляционном газе 3 %.

**29.** Рассчитать и свести материальный баланс производства хлорбензола при условии, что в хлоратор поступает 3500 кг/ч 99 % бензола. Выход хлорбензола по бензолу составляет 24 % масс. Содержание дихлорбензола 1,2 % масс. от теоретического выхода, а хлор берется в избытке 10 % по отношению к техническому бензолу.

Образовавшийся хлорид водорода сорбируется водой с получением 27,5 % соляной кислоты:



**30.** Во сколько раз изменится скорость реакции при увеличении температуры от 30 до 45 °С, если энергия активации равна 100 кДж/моль? За какое время будет протекать реакция при 45 °С, если при 30 °С она протекает за 5 минут?

**31.** Во сколько раз возрастет скорость химической реакции при повышении температуры от 30 до 75 °С, если температурный коэффициент скорости реакции равен 2,7? За какое время закончится реакция при 75 °С, если при 30 °С она протекает за 2 минуты?

**32.** Вычислите энергию активации реакции, если константа скорости реакции при температуре 200 К<sub>равн</sub>  $4 \cdot 10^2$ , а при температуре 400 К<sub>равн</sub>  $1 \cdot 10^5$ . Чему равна константа скорости при температуре 700 К?

## II. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Химико-технологические процессы представляют собой совокупность физических, химических и физико-химических преобразований, направленных на получение целевых продуктов из исходного сырья. Для систематизации их многообразия используется классификация, основанная на характере протекающих явлений.

### 6. Типы химико-технологических процессов

**Классификация процессов по законам, определяющим скорость процесса:**

1) **Гидродинамические**

2) **Тепловые**

3) **Массообменные (диффузионные)**

4) **Механические** – процессы, скорость которых определяется законами механики твердых тел (измельчение, транспортирование, сортировка (классификация) и смешение твердых веществ).

Применяется для подготовки исходных твердых материалов и обработки конечных твердых продуктов, а также для транспортирования кусковых и сыпучих материалов.

5) **Химические (реакционные)** – процессы, скорость которых определяется законами химической кинетики.

#### *6.1. Гидродинамические процессы*

**Гидродинамические процессы** – это операции, в которых ключевую роль играет движение жидкости или газа, а их скорость и характер определяются основными законами гидродинамики.

**Сущность процесса:**

• Включают перемещение жидких и газовых сред в трубопроводах и аппаратах, а также разделение неоднородных систем – таких как суспензии или эмульсии, посредством гидродинамических явлений.

- Основные операции: **фильтрация, осаждение, перемешивание, центрифугирование, отстаивание** и другие формы разделения в потоке.

#### **Классификация процессов:**

- **Фильтрация** – разделение дисперсной системы через пористую перегородку, пропускающую сплошную фазу (газ или жидкость) и задерживающую дисперсную (твёрдую или жидкую) фазу.

- **Осаждение (седиментация)** – оседание взвешенных частиц под действием гравитационных или центробежных сил; частный случай – центрифугирование.

- **Разделение неоднородных систем** – включает методы, такие как отстаивание, использование центробежных сил или фильтрационных процедур для очистки или выделения фаз.

#### **Фундаментальные принципы:**

- Скорость таких процессов определяется **гидродинамическими условиями** – такими как скорость потока, режим движения (ламинарный или турбулентный), гидравлическое сопротивление и распределение фаз в потоке.

- На основании законов гидродинамики рассчитываются параметры потока в аппаратах, учитываются переменные давления, сопротивления и структура потока.

### ***6.2. Теплообменные процессы***

**Теплообменные (тепловые процессы)** – это операции, осуществляющие передачу тепловой энергии между системами и внутренними частями технологических потоков, без изменения химического состава вещества, а их скорость определяется законами теплообмена.

#### **Сущность процесса:**

- обеспечение необходимой температуры для реакций (поддержание режимов);

- контроль агрегатного состояния вещества;

- поддержание технологического баланса энергии;

- интенсификация этапов отделения и превращения (например, сушка, выпаривание).

## **Классификация процессов:**

• **По характеру теплообмена:** нагревание, охлаждение, конденсация, испарение, плавление, кристаллизация.

• **По источнику энергии:** использование топлива, электрической энергии, тепла реакций.

• **По режиму передачи тепла:** теплопроводность, конвекция, излучение.

• **По направлению:** прямой (от источника к продукту) и косвенный (через теплоноситель).

• **По назначению:** подготовительные (сушка, подогрев), основные (реакции с выделением или поглощением тепла), завершающие (охлаждение, закалка).

## **Фундаментальные принципы:**

1. **Законы теплообмена** – описываются тремя типами теплопередачи: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

2. **Тепловой баланс** – базируется на первом законе термодинамики: изменение внутренней энергии термодинамической системы может происходить за счет теплопередачи и совершения работы. В простейшей форме он выражается как:  $Q = \Delta U + A$ , где  $Q$  – количество теплоты, переданное системе,  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии системы,  $A$  – работа, совершенная системой.

3. **Режимы термодинамических процессов** – важны для понимания поведения систем:

- Изотермический (постоянная температура):  $T = \text{const}$ ;
- Адиабатический (без теплообмена с окружающей средой):  $Q = 0$ ;
- Изобарный (постоянное давление):  $P = \text{const}$ ;
- Изохорный (постоянный объем):  $V = \text{const}$ ;
- Политропический (постоянная теплоемкость):  $C = \text{const}$ .

4. **Закон Гесса** – тепловой эффект реакции не зависит от пути её протекания, лишь от начальных и конечных состояний веществ:

$$\Delta H_{\text{общ}} = \sum \Delta H_{\text{путь}}$$

### 6.3. Массообменные процессы

**Массообменные (диффузионные) процессы** – операции, при которых происходит перенос вещества из одной фазы в другую или внутри одной фазы, а их скорость определяется интенсивностью переноса вещества (компонента системы), т. е. законами массопередачи.

#### **Сущность процесса:**

- перенесение вещества из одной фазы в другую или внутри одной фазы за счёт разности концентраций, парциальных давлений или химического потенциала;
- обеспечение эффективного разделения смесей, очистки, концентрирования и получения целевых продуктов при минимальных энергетических затратах.

#### **Классификация процессов:**

- **по характеру фаз:** газ–жидкость (абсорбция, десорбция), жидкость–жидкость (экстракция), жидкость–твёрдое тело (сорбция, ионный обмен), газ–твёрдое тело (адсорбция, каталитические процессы);
- **по целям:** разделение смесей, выделение примесей, получение высокочистых веществ;
- **по направлению протекания:** абсорбционные, десорбционные, экстракционные, ректификационные и др.

#### **Фундаментальные принципы:**

- Перенос вещества происходит из области с большей концентрацией (или парциальным давлением) в область с меньшей.
- Движущая сила – разность концентраций, давлений или химических потенциалов.
- Массообмен описывается законами диффузии (закон Фика) и конвекции.
- Равновесие между фазами определяется термодинамическими законами (изотермы адсорбции, законы Рауля, Генри и др.).
- Интенсивность процесса зависит от коэффициента массоотдачи, площади контакта фаз и времени взаимодействия.

## 7. Каталитические процессы

Химические реакции классифицируют на каталитические и некаталитические в зависимости от наличия или отсутствия катализатора в процессе. Катализ играет фундаментальную роль в химической технологии, поскольку позволяет проводить реакции при более мягких условиях, повышает селективность и выход целевого продукта, снижает энергозатраты. Сущность катализа заключается в том, что катализатор изменяет скорость реакции, не расходуясь в ходе процесса.

### 7.1. Гетерогенный и гомогенный катализ

**Катализатор** – вещество, изменяющее скорость химической реакции и остающееся к концу реакции неизменным. При этом катализатор не ускоряет диффузионных процессов и оказывает влияние только на скорость процессов, протекающих в кинетической области.

**Катализом** называют изменение скорости химической реакции под действием катализаторов – веществ, которые участвуют в реакции, вступая в промежуточное химическое взаимодействие с реагентами, но восстанавливают свой химический состав по окончании химического акта.

В роли катализаторов могут выступать вещества в газообразном, жидком или твёрдом состоянии. По принципу фазового состояния реагентов и катализатора каталитические процессы разделяют на две основные группы: гомогенные и гетерогенные.

**Микрогетерогенный катализ**, протекающие в жидкой фазе с участием катализаторов в коллоидном состоянии.

**Ферментативный катализ**, протекающие в биологических системах под воздействием ферментов.

При **гомогенном катализе** катализатор и реагирующие вещества находятся в одной фазе – (газ или раствор). При **гетерогенном катализе** реагент и катализатор находятся в разных фазах.

Механизм гомогенного катализа состоит в образовании между реагентами и катализаторами нестойких промежуточных соединений, существующих в той же фазе (газ или раствор), после распада которых катализатор регенерируется.

Стадия 1	$A+K \rightarrow AK$
Стадия 2	$AK+B \rightarrow AB+K$
Суммарная реакция	$A+B \rightarrow AB,$

где K – катализатор, АК – промежуточное соединение

**Гомогенные каталитические процессы** подразделяются по характеру взаимодействия катализатора с реагентами на **окислительно-восстановительные** и **кислотно-основные**. В зависимости от агрегатного состояния среды различают жидкофазные (в растворах) и газофазные процессы.

Катализаторами в растворах служат кислоты ( $H^+$ ), основания ( $OH^-$ ), ионы металлов ( $Me^+$ ,  $Me^{2+}$ ), а также вещества, способствующие образованию свободных радикалов.

**Механизм кислотно-основного катализа** основан на обмене протона между катализатором и реагентом: в случае кислотного катализа происходит передача протона реагенту, а в основном катализе – его отрыв. Активность катализатора определяется способностью легко отдавать или принимать протон и, как правило, возрастает с увеличением константы диссоциации. К данному типу процессов относятся реакции гидратации, дегидратации, гидролиза, этерификации и поликонденсации в растворах.

**Газофазный гомогенный катализ** встречается реже, так как требует наличия катализаторов в газообразной форме. Примеры таких процессов включают дегидратацию уксусной кислоты в парах при участии паробразного триэтилфосфата, окисление метана до формальдегида в присутствии оксидов азота, а также окисление угарного газа до диоксида углерода при участии водяных паров. Газофазные процессы могут протекать по молекулярному механизму либо через радикально-цепные реакции, что определяет их кинетические особенности и условия протекания.

**Механизм окислительно-восстановительного катализа** в растворах заключается в том, что катализатор поочередно восстанавливается и окисляется, перенося электроны между реагирующими веществами. При этом он образует промежуточные соединения, но в конце реакции полностью регенерируется.

Гетерогенный катализ находит более широкое промышленное применение по сравнению с гомогенным. При гетерогенном катализе, так же как и при гомогенном, реакция ускоряется в результате реализации нового реакционного пути, требующего меньшей энергии активации. При этом образование промежуточных соединений происходит непосредственно на поверхности катализатора. Элементарные стадии гетерогенного катализа представлены на рисунке 3.

Процесс гетерогенного катализа протекает последовательно через ряд стадий, каждая из которых определяет общую скорость реакции:

I – внешняя диффузия реагентов из ядра газового потока к поверхности раздела фаз;

II – внутренняя диффузия реагентов в порах катализатора;

III – активированная адсорбция с образованием поверхностных непрочных химических соединений – активированных комплексов;

IV – перегруппировка атомов с образованием активированных комплексов продукт–катализатор;

V – десорбция продукта с поверхности;

VI – внутренняя диффузия продукта в порах катализатора;

VII – внешняя диффузия продукта в ядро газовой поверхности.

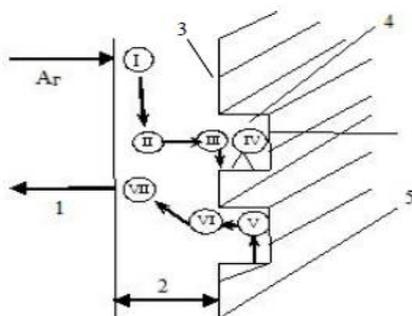


Рис. 3. Элементарные стадии гетерогенного катализа:

- 1 – газовый поток; 2 – пограничный слой; 3 – внешняя поверхность катализатора; 4 – поры катализатора; 5 – внутренняя поверхность пор катализатора

## 7.2. Влияние параметров на каталитическую активность

Практическое поведение и эффективность промышленных катализаторов определяется их ключевыми технологическими характеристиками: активностью, температурой зажигания, селективностью (избирательностью действия), стойкостью к износу и устойчивостью к воздействию ядов (отравляемостью).

**1. Активность (A)** – это мера ускоряющего действия катализатора, которая показывает во сколько раз скорость процесса с катализатором больше, чем скорость процесса без катализатора.

Для каталитических реакций, в которых  $k_0$  не изменяется по сравнению с некаталитическими, ускоряющее действие катализатора определяется соотношением констант скоростей реакции с катализатором  $k_{кат}$  и без него  $k_0$ :

$$A = \frac{k_{кат}}{k} = \frac{a_1 \cdot e^{\frac{-E_k}{RT}}}{a_2 \cdot e^{\frac{-E}{RT}}},$$

где

$E$  – энергия активации реакции без катализатора;

$E_k$  – энергия активации реакции с катализатором;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура;

$a_1$  и  $a_2$  – предэкспоненциальный множитель.

**2. Дезактивация катализатора** – это снижение его каталитической активности и селективности в процессе эксплуатации, что приводит к уменьшению скорости реакции и изменению направленности превращений.

**Основные причины дезактивации катализатора:**

- **Старение катализатора** – постепенное и равномерное снижение активности по всему объёму каталитического слоя в результате длительной работы.

- **Утомление катализатора** – неравномерное снижение активности, возникающая, как правило, вследствие нарушения оптимальных условий эксплуатации (например, локальные перегревы, неоднородное распределение потоков реагентов).

• **Зауглероживание (коксование)** – образование углеродистых отложений при переработке угля, нефтяных и нефтехимических фракций, приводящее к блокировке активных центров поверхности.

• **Спекание** – укрупнение и агрегация частиц катализатора при повышенных температурах, что вызывает уменьшение удельной поверхности и, соответственно, числа активных центров.

• **Минерализация** – осаждение минеральных примесей из исходного сырья на поверхности катализатора, приводящее к его частичной или полной дезактивации.

• **Отравление катализатора** – снижение активности в результате адсорбции специфических соединений («каталитических ядов») на активных центрах. Отравление может быть обратимым (например, парами воды или кислородом) и необратимым (например, соединениями серы, свинца, мышьяка).

**3. Температура зажигания катализатора ( $T_3$ )** – это минимальная температура реакционной смеси, при которой катализатор в достаточной мере увеличивает скорость реакции.

Она зависит от активности твердых катализаторов. Чем выше активность катализатора, тем меньше температура зажигания и выше степень превращения.

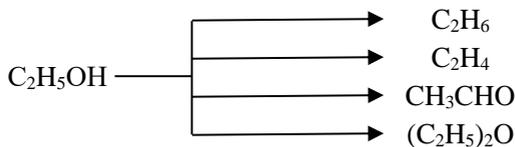
$$T_3 = K/A,$$

где  $K$  – константа, зависящая от природы катализатора.

Чем меньше температура зажигания, тем меньше расходы на нагрев реакционной смеси, и тем больше температурный диапазон для регулировки температуры.

**4. Селективность (избирательность) катализатор** – способность избирательно ускорять целевую реакцию (увеличивать скорость одной из реакций) по сравнению с другими термодинамически возможными реакциями (побочными).

Селективность катализатора имеет большое значение в таких химико-технологических процессах, как окисление аммиака в производстве азотной кислоты, различных процессах органического синтеза. Используя катализаторы, становится возможным получать из общего сырья различные целевые продукты, например:



**5. Время контакта ( $\tau$ )** – время соприкосновения реакционной смеси (реагента) с катализатором.

$$\tau = \frac{v_{св}}{V_{\text{реагента}}},$$

где

$v_{св}$  – свободный объем катализатора, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{реагента}}$  – объем реагирующей смеси, проходящей через катализатор, м<sup>3</sup>/с.

На практике чаще всего пользуются фиктивным временем контактирования:

$$\tau = \frac{v_{\text{кат}}}{V_{\text{реагента}}} = \frac{1}{v_{\text{об}}},$$

где  $v_{\text{кат}}$  – объем катализатор, м<sup>3</sup>.

Время контакта – это величина обратная объемной скорости ( $v_{\text{об}}$ ).

$$v_{\text{об}} = \frac{V_{\text{реагента}}}{v_{\text{кат}}}$$

**Объемная скорость ( $v_{\text{об}}$ )** – это параметр, который показывает, какой объем реакционной смеси (реагента) проходит через единицу объема катализатора за единицу времени. Объемная скорость характеризует интенсивность подачи реагента через катализатор.

## 8. Химические реакторы

**Химический реактор** – это основное технологическое устройство, в котором протекают химические реакции с заданными условиями давления, температуры, концентрации и времени пребывания реагентов. От типа реактора зависит скорость протекания процесса, выход целевого продукта, энергозатраты и эффективность всей технологической схемы.

Классификация реакторов проводится по нескольким признакам:

### **По агрегатному состоянию реагентов:**

1. **Газофазные реакторы** – все компоненты находятся в газообразном состоянии.

Применяются для синтеза аммиака (реакция  $N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$ ), производства метанола, окисления сернистого газа  $SO_2 \rightarrow SO_3$ . Отличаются высокой скоростью процессов, но требуют тщательного контроля температуры и давления.

2. **Жидкофазные реакторы** – реагенты и продукты находятся в жидкой фазе или растворе.

Используются для реакций этерификации, гидролиза, поликонденсации, гидрирования в растворе. Чаще всего это автоклавы с мешалками и теплообменниками.

3. **Парожидкостные реакторы** – одновременно присутствуют пар и жидкость.

Пример: гидрирование жидких углеводородов в присутствии водорода, дистилляционные колонны с реакцией (реактивная ректификация), процессы парового риформинга. Для таких реакторов характерна необходимость эффективного массопереноса между фазами.

4. **Гетерофазные реакторы** – в процессе участвуют вещества в разных агрегатных состояниях (газ–твердое тело, жидкость–твердое тело, газ–жидкость–твердое тело).

Наиболее распространенный случай – **каталитические процессы** на твердых катализаторах (например, контактный аппарат в производстве серной кислоты, процессы гидрокрекинга нефти, каталитический риформинг). Сюда же относятся суспензионные и эмульсионные реакторы, где твердые частицы катализатора диспергированы в жидкости.

### **По способу организации процесса:**

1. **Реакторы периодического действия.** В таких аппаратах реагенты загружаются в реактор одной порцией, затем протекает реакция в течение определённого времени, после чего продукты выгружаются.

Применяются при производстве малых и средних партий продукции, в лабораторной и опытной практике, а также в тонкой и фармацевтической химии, где требуется гибкость и возможность менять рецептуры.

**Особенности:**

- возможность точного контроля условий реакции (температуры, давления, времени выдержки);
- простота конструкции и эксплуатации;
- ограниченная производительность и трудности масштабирования;
- высокие затраты на загрузку/выгрузку.

**Пример:** производство красителей, фармацевтических препаратов, полимеров специального назначения.

**2. Реакторы непрерывного действия.** Реагенты непрерывно подаются в реактор, а продукты одновременно выводятся из него. Это позволяет поддерживать устойчивое состояние процесса в течение длительного времени.

Применяются в крупнотоннажной химии и нефтехимии, где важна высокая производительность и стабильность качества продукции.

**Особенности:**

- высокая производительность и эффективность использования оборудования;
- устойчивое качество продукта;
- возможность автоматизации и интеграции в технологические линии;
- более сложная конструкция и необходимость точного контроля режимов.

**Пример:** производство аммиака (синтез под давлением), серной кислоты (контактный процесс), метанола, этилена.

Существует также **промежуточный вариант – реакторы полунепрерывного действия**, когда часть реагентов загружается в начале, а другие подаются в процессе реакции. Такой режим используется для процессов, где необходимо контролировать концентрацию отдельных компонентов или избежать побочных реакций.

## **По режиму работы:**

**1. Реакторы идеального смешения (РИС).** Внутри реактора предполагается полное и мгновенное перемешивание реагентов, поэтому концентрация и температура по всему объёму считаются одинаковыми. Выходящий поток имеет те же параметры, что и смесь внутри реактора.

### **Особенности:**

- простая конструкция (чаще всего цилиндр с мешалкой);
- легко регулировать температуру (рубашка охлаждения/нагрева);
- подходит для сильно экзотермических реакций;
- эффективность ниже, чем у РИВ, при одинаковом объёме.

**Пример:** нейтрализация кислот и щелочей, ферментационные процессы.

**2. Реакторы идеального вытеснения (РИВ).** В таких аппаратах реагенты движутся вдоль реактора «поршневым» потоком: отсутствует перемешивание вдоль оси потока, но внутри сечения поток считается равномерным. Концентрация реагентов постепенно меняется по длине реактора.

### **Особенности:**

- высокая эффективность при больших объёмах;
- лучше подходит для реакций с высоким выходом при низкой концентрации побочных продуктов;
- сложнее контролировать температуру (особенно для экзотермических реакций).

**Пример:** трубчатые печи для пиролиза углеводородов, синтез метанола, каталитический риформинг.

**3. Реакторы с возвратом (рециркуляцией) реагентов.** Часть продукта или непрореагировавших веществ возвращается в реактор для повторного прохождения процесса. Это позволяет увеличить глубину превращения и стабилизировать условия реакции.

### **Особенности:**

- повышается селективность и степень конверсии;
- уменьшается риск перегрева или взрывоопасных ситуаций;
- сложнее по конструкции (наличие системы возврата).

**Пример:** производство азотной кислоты (каталитическое окисление аммиака), процессы газификации.

**4. Каскадные реакторы (последовательное соединение нескольких аппаратов).** Представляют собой комбинацию нескольких РИВ или РИС, соединённых последовательно. Такой подход позволяет приблизить процесс к идеальному вытеснению и регулировать условия на каждой стадии.

**Особенности:**

- гибкость в управлении технологическим процессом;
- возможность повышения выхода целевого продукта;
- применяется для сложных многостадийных реакций.

**Пример:** синтез этанола, гидролиз крахмала, ферментационные каскады.

**По источнику энергии:**

**1. Изотермические реакторы.** В таких аппаратах поддерживается постоянная температура на всём протяжении процесса. Это достигается за счёт эффективного теплообмена (водяные или масляные рубашки, встроенные теплообменные элементы).

**Особенности:**

- обеспечивают стабильные условия реакции;
- позволяют точно контролировать кинетику процесса;
- особенно важны для реакций, чувствительных к перегреву или переохлаждению.

**Пример:** ферментационные аппараты, реакторы нейтрализации.

**2. Адиабатические реакторы.** Работают без подвода или отвода тепла: температура смеси изменяется только за счёт теплового эффекта реакции (экзо- или эндотермического).

**Особенности:**

- простая конструкция (нет теплообменных элементов);
- высокие температурные колебания могут снижать селективность или приводить к побочным реакциям;
- требуют точного выбора режима и часто применяются для быстрых реакций.

**Пример:** каталитическое окисление сернистого газа в производстве серной кислоты, газофазные реакции.

**3. Реакторы с подводом или отводом тепла.** В таких установках предусмотрены специальные устройства для регулирования теплового баланса: рубашки охлаждения/нагрева, змеевики, встроенные теплообменники. Это особенно важно для сильно экзотермических или эндотермических процессов.

**Особенности:**

- предотвращают перегрев и тепловые разгоны;
- позволяют вести реакции при оптимальной температуре, поддерживая высокую селективность;
- применяются как для жидкофазных, так и для газофазных процессов.

**Пример:** реакторы гидрирования, алкилирования, синтеза аммиака.

**По конструкции:**

**1. Трубчатые реакторы.** Представляют собой длинные трубы или пучки труб, через которые протекает реакционная смесь. Обычно работают в режиме идеального вытеснения (РИВ).

**Примеры:** реакторы для крекинга углеводородов, синтеза этиленоксида.

**2. Барботажные реакторы.** Реакторы, в которых газовая фаза диспергируется в жидкость через барботажные устройства (перфорированные тарелки, сетки).

**Примеры:** производство уксусной кислоты, ферментационные процессы.

**3. Колонные реакторы.** Вертикальные аппараты, работающие преимущественно в противотоке фаз (газ–жидкость или жидкость–жидкость).

**Примеры:** колонны для абсорбции, ректификации, окислительные процессы.

**4. Автоклавы.** Герметичные аппараты периодического или непрерывного действия, работающие под высоким давлением и при повышенных температурах.

**Примеры:** гидрирование масел, синтез аммиака, поликонденсация.

**5. Реакторы с псевдооживленным слоем.** В них твёрдая фаза (катализатор в виде гранул или порошка) удерживается во взвешенном состоянии восходящим потоком газа или жидкости.

**Примеры:** каталитический крекинг, сжигание топлива в энергетике.

**6. Капельные и плёночные реакторы.** В таких аппаратах жидкость протекает тонкой плёнкой по поверхности или каплями по газовой среде, обеспечивая большую площадь контакта фаз.

**Примеры:** абсорбция газов жидкостями, реакции хлорирования, окисление органических соединений.

## **9. Вопросы для повторения и самостоятельной проработки**

1. Теплопередача и способы распределения тепла.
2. Какие процессы называют гидродинамическими, теплообменными и массообменными?
3. Каковы области применения катализа?
4. Какие вещества называются катализаторами?
5. В чем заключается природа действия катализаторов?
6. Может ли катализатор сместить равновесие химической реакции?
7. Что называется отравлением катализатора?
8. Как влияет катализатор на энергию активации химической реакции?
9. Перечислите основные технологические характеристики твердых катализаторов и дайте их определения.
10. Особенности гомогенного катализа, его достоинства и недостатки перед гетерогенным катализом.
11. Что такое химический реактор. Классификация реакторов по различным признакам.
12. Проанализируйте основные недостатки и достоинства реакторов периодического действия. В каких производствах чаще встречаются такие реакторы?

## 10. Задачи

### Пример 1.

Объемная скорость подачи гексана в реактор изомеризации равна  $2 \text{ ч}^{-1}$ . Диаметр реактора 2,2 м, высота реакционной зоны 10 м. Определить массовый суточный расход гексана при его плотности  $680 \text{ кг/м}^3$ .

*Решение:*

Объем реактора (цилиндрический):

$$V = \frac{\Pi \cdot d^2}{4} \cdot h$$
$$V = \frac{3,14 \cdot 2,2^2}{4} \cdot 10 = 38(\text{м}^3)$$

Объёмный расход гексана в час:

$$Q = v_{\text{об}} \cdot V$$
$$Q = 2 \cdot 38 = 76 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Массовый расход в час:

$$m_{\text{ч}} = Q \cdot \rho$$
$$m_{\text{ч}} = 76 \cdot 680 = 51680 \text{ кг/ч}$$

Массовый расход в сутки:

$$m_{\text{сут}} = m_{\text{ч}} \cdot 24$$
$$m_{\text{сут}} = 51680 \cdot 24 = 1240320 \text{ кг/ч}$$

*Ответ:*  $m_{\text{сут}} = 1240320 \text{ кг/ч}$ .

### Пример 2.

В отсутствие катализатора энергия активации реакции составляет  $100 \text{ кДж/моль}$ . Один катализатор снижает энергию активации на  $20 \text{ кДж/моль}$ , а другой – на  $40 \text{ кДж/моль}$ . Температура реакции составляет  $300 \text{ К}$ . Какой катализатор эффективнее? Во сколько раз возрастет скорость реакции при использовании того или иного катализатора?

*Решение:*

Сравнение проводится по отношению констант скорости (из уравнения Аррениуса):

$$K = a \cdot e^{\frac{-E}{RT}}$$
$$\frac{K_{\text{кат}}}{K} = \frac{a_1 \cdot e^{\frac{-E_K}{RT}}}{a_2 \cdot e^{\frac{-E}{RT}}} = e^{\frac{\Delta E}{RT}}$$

Расчет увеличения скорости для первого катализатора:

$$\frac{K_{\text{кат1}}}{K} = e^{\frac{100000-80000}{8,314 \cdot 300}} = 3,037 \cdot 10^3$$

Расчет увеличения скорости для второго катализатора:

$$\frac{K_{\text{кат2}}}{K} = e^{\frac{100000-60000}{8,314 \cdot 300}} = 9,1 \cdot 10^6$$

*Ответ:* Второй катализатор эффективнее. Скорость реакции возрастает в  $3,037 \cdot 10^3$  при использовании первого катализатора и  $9,1 \cdot 10^6$  – второго катализатора.

1. Энергия активации реакции в отсутствии катализатора равна 92 кДж/моль, а в присутствии катализатора равна 42 кДж/моль. Во сколько раз возрастет скорость реакции в присутствии катализатора, если реакция протекает при температуре 120 °С?

2. Энергия активации распада метана без катализатора – 331,0 кДж/моль, а с катализатором – 230,0 кДж/моль. Во сколько раз увеличится скорость реакции в присутствии катализатора при  $T=1000$  К?

3. Энергия активации некоторой реакции в отсутствие катализатора равна 32,3 кДж/моль, а в присутствии катализатора она равна 20,9 кДж/моль. Во сколько раз возрастет скорость этой реакции в присутствии катализатора при 25 °С?

4. Определите реакционный объем реактора окисления  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$  на ванадиевом катализаторе по следующим данным: расход газа  $V_p=15500$  м<sup>3</sup>/ч, коэффициент запаса  $\alpha=1,3$ , время контактирования  $\tau=0,12$  с.

5. Температура зажигания катализатора  $T_k = 220$  °С. Объемная скорость подачи газовой смеси (при нормальных условиях) равна  $1\ 000\ 000$  ч<sup>-1</sup>. Определите время контакта  $\tau$ .

6. Определите объемную скорость газа в реакторе окисления  $SO_2$  в  $SO_3$ , если линейная скорость  $v=0,8$  м/с, высота слоя катализатора 300 см.

7. Определите объем катализатора и высоту его слоя однополочного реактора для окисления метанола в формальдегид, если расход газовой смеси  $8960$  м<sup>3</sup>/ч, а время контакта газа с катализатором, по экспериментальным данным,  $\tau=5 \cdot 10$  ч<sup>-1</sup>. Диаметр реактора 2,3 м.

8. Промышленная установка, работающая на ванадиевом катализаторе ( $V_2O_5$ ), производит в сутки 30 000 кг моногидрата  $H_2SO_4$ . Объем катализатора в установке  $0,7$  м<sup>3</sup>. Рассчитать активность катализатора.

9. Определите объем катализатора окисления  $SO_2$  в  $SO_3$ , если время контакта с катализатором  $\tau=0,25$  с. Расход газа  $10280$  м<sup>3</sup>/ч.

10. Один катализатор снижает энергию активации при 300 К на 20 кДж/моль, а другой на 40 кДж/моль. Какой катализатор эффективнее? Во сколько раз возрастет скорость реакции при использовании того или иного катализатора?

11. Рассчитайте время контакта газа на цинк-хромовом катализаторе установки синтеза метанола, если объемная скорость исходной смеси  $20000$  ч<sup>-1</sup>, температура контактирования 653,15 К, давление в системе  $3,03 \cdot 10^6$  Па, объем катализатора  $1,5$  м<sup>3</sup>.

12. Объемная скорость подачи жидкого циклогексана в реактор окисления равна  $1$  ч<sup>-1</sup>. Диаметр реактора 3 м, высота реакционной зоны 6 м. Определить массовый суточный расход циклогексана при его плотности  $780$  кг/м<sup>3</sup>.

13. Найдите объем катализатора для синтеза  $NH_3$ , если производительность установки  $5000$  м<sup>3</sup> аммиака в час. Производительность используемого катализатора  $2000$  кг/(м<sup>3</sup>·г)

14. Рассчитайте время контакта газовой смеси с катализатором в процессе дегидрирования н-бутана в н-бутилен, если температура процесса 847 К, объемная скорость исходного газа  $950$  м<sup>3</sup>/с, давление  $1,5 \cdot 10^5$  Па, объем катализатора  $1$  м<sup>3</sup>.

**15.** Массовый расход этилбензола в реакторе получения стирола равен 12,9 т/ч, а объемная скорость подачи жидкого этилбензола равна 0,5 ч<sup>-1</sup>. Плотность бензола равна 867 кг/м<sup>3</sup>. Определить высоту слоя катализатора в реакторе диаметром 5,5 м.

**16.** Объемный расход метана, подаваемого в реактор газофазного хлорирования, равен 400 м<sup>3</sup>/ч; мольное отношение подаваемых метана и хлора равно 5:1, а объемная скорость подачи газов в реакционное пространство составляет 240 ч<sup>-1</sup>. Определить рабочий объем реактора.

### III. КОМПОНЕНТЫ И РЕСУРСЫ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

#### 11. Сырьё в химической технологии

Эффективное использование сырья и энергии в технологических процессах – одна из ключевых задач химической промышленности. Для её решения применяются различные методы ресурсосбережения, среди которых важнейшими являются: комплексная переработка сырья, рациональное использование топливно-энергетических ресурсов, совершенствование технологических процессов, структурно-функциональное усовершенствование аппаратуры, способ замкнутого водоснабжения. Данные меры позволяют снизить удельные затраты сырья и энергии, а в ряде случаев – достичь их полного сокращения.

##### *11.1. Классификация сырья*

**Сырьё** – это исходный многокомпонентный материал, поступающий на массовую переработку для получения промышленной продукции и имеющий определенную стоимость. Оно является ключевым элементом производства, от которого зависят экономическая эффективность, выбор технологии и оборудования, а также качество конечного продукта.

**Реагент** – полезный компонент сырья, превращающийся в целевой продукт. Реагенты могут быть использованы как непосредственно для проведения реакции, так и для её ускорения или активации. В отличие от сырья, реагенты не всегда используются в больших количествах, но играют важную роль в обеспечении протекания реакции.

В химическом производстве на различных стадиях переработки выделяют несколько видов материальных объектов:

- исходные вещества (собственно сырьё);
- промежуточные продукты (полупродукты);
- побочные продукты;
- целевой продукт.

**Побочный продукт** – это вещество, которое образуется в процессе переработки сырья наряду с целевым продуктом, но не явля-

ящееся целью данного производства. При этом он может использоваться как сырьё для получения других веществ. Побочные продукты, образующиеся при добыче или обогащении сырья, называются **попутными продуктами**.

**Целевой продукт** – основной продукт химико-технологического процесса, для получения которого организуется производство.

**Отходы** – остатки сырья, материалов и полупродуктов, образующихся в производстве и полностью или частично утративших свои качества.

**Отвалы** – остатки сырья, не подлежащие дальнейшей переработке или использованию и направляющиеся в специальные хранилища.

При этом полупродукты, побочные продукты и отходы производства могут после дополнительной обработки или даже без неё использоваться в других технологических процессах в качестве сырья.

Химическое сырьё имеет большое разнообразие, поэтому для его систематизации используется несколько видов классификации, основанных на агрегатном и химическом состоянии, характере запасов и происхождении.

### 1. Классификация по агрегатному состоянию

- **Твёрдое сырьё** – руды, минералы, уголь, древесина.
- **Жидкое сырьё** – нефть, вода, растворы природных солей.
- **Газообразное сырьё** – природный газ, воздух, водяной пар.

### 2. Классификация по химическому состоянию

- **Неорганическое сырьё** – минеральные соли, оксиды, кислоты, вода, воздух.
- **Органическое сырьё** – нефть, природный газ, уголь, растительное и животное сырьё.

### 3. Классификация по видам запасов

- **Возобновляемое сырьё** – биомасса (растительное и животное происхождение), вода, воздух. Их ресурсы могут восстанавливаться естественным образом.
- **Невозобновляемое сырьё** – полезные ископаемые (уголь, нефть, руды). Их запасы ограничены и требуют рационального использования.

#### 4. Классификация по происхождению

##### Природное:

- **Минеральное сырьё**

- рудное – горные породы, из которых экономически выгодно получать металл (железные, медные, алюминиевые руды и др.);
- нерудное – горные породы, используемые в производстве строительных, химических материалов и других неметаллических материалов (известняк, фосфориты, сера, соли);
- горячее (геотермальные источники, вулканические газы).

- **Растительное сырьё** – древесина, крахмал.

- **Животное сырьё** – масла, жиры, белки, кости, шерсть.

**Синтетическое** – полученное в результате промышленной обработки природного сырья (нефтехимические, углехимические, кокс, химические волокна, синтетический каучук, синтетические красители, смолы.)

#### *11.2. Возобновляемое и вторичное сырьё*

В условиях роста мирового производства и ограниченности природных ресурсов особое значение приобретает рациональное использование сырья. В химической технологии всё большее внимание уделяется источникам, которые либо способны восстанавливаться естественным образом, либо могут возвращаться в производственный цикл после переработки. Эти ресурсы называют возобновляемыми и вторичными.

К **возобновляемым ресурсам** относят древесину, сельскохозяйственные культуры, продукты животного происхождения, а также воду и воздух.

Их ценность заключается в возможности относительно быстрого восстановления природными процессами. Однако эксплуатация таких ресурсов должна быть строго регламентирована: чрезмерная вырубка лесов или истощение почв могут привести к утрате способности к восстановлению. В химической промышленности возобновляемое сырьё используют для получения целлюлозы, спиртов, органических кислот, биотоплива и множества других продуктов.

**К вторичному сырью относят** промышленные и бытовые отходы, которые после переработки могут вновь служить источником полезных материалов.

Вторичное сырьё включает металлолом, макулатуру, стеклобой, пластмассы, резину, текстиль и др. Его использование позволяет снижать нагрузку на природные ресурсы, уменьшать объёмы отходов и формировать «замкнутые циклы», в которых отходы одного производства становятся сырьём для другого. Например, переработка макулатуры позволяет существенно сократить вырубку лесов, а переработка пластмасс – уменьшить загрязнение окружающей среды.

### *11.3. Подготовка и очистка*

Сырьё, используемое для переработки в готовую продукцию, должно соответствовать определённым требованиям. Добиться этого позволяют специальные подготовительные процессы, включающие комплекс операций, объединённых в единый этап подготовки сырья к переработке.

**Обогащение сырья** – совокупность физических и физико-химических методов обработки минеральных материалов (руды, угля) с целью удаления пустой породы и увеличения содержания полезного компонента в концентрате.

Выбор методов обогащения сырья определяется его фазовым состоянием, при этом значительная их часть применяется для переработки твёрдых материалов.

**Гравитационный метод** – способ разделения, основанный на различии скорости осаждения частиц разной плотности и крупности в потоке жидкости или газа, а также под действием центробежной силы. Этот метод широко применяется при обогащении сырья в производстве силикатных материалов, минеральных солей и в металлургии.

**Электромагнитный метод** – разделение веществ по их магнитной восприимчивости. Например, с его помощью отделяют магнитный железняк, хромистый железняк, рутил и другие магнитно-чувствительные минералы от пустой породы.

**Электростатический метод** – разделение по электрической проводимости. Так, проводящие руды отделяют от диэлектрических пород, таких как гипс, известняк, силикаты и др.

**Флотационный метод** – разделение взвешенных в жидкости относительно мелких частиц друг от друга или выделение твёрдых частиц из жидкой фазы. Метод основан на способности частиц прилипать к пузырькам газа, введённого в суспензию, и всплывать на поверхность с образованием пены. Для повышения эффективности флотации применяются специальные реагенты, усиливающие избирательность и прочность прилипания частиц к пузырькам воздуха. Флотация считается наиболее универсальный и совершенным методом обогащения: с её помощью из минерального сырья извлекают практически все виды минералов. Данный метод самый распространяемый в мировом масштабе.

**Оптический метод (сортировка)** – разделение по цвету, блеску или отражательной способности с применением оптических сортировочных машин. Этот способ используют, например, при добыче алмазов, сортировке калийных солей и кварца.

**Радиометрическая сепарация** – метод разделения, основанный на различии радиоактивности минералов, что позволяет выделять руды, содержащие уран, торий и другие радиоактивные элементы. Частицы проходят через радиометрические установки, фиксирующие интенсивность излучения и автоматически сортирующие материал. Метод широко применяется в урановой промышленности и при обогащении редкоземельного сырья.

**Акустический метод** – разделение происходит за счёт различий в упругих свойствах частиц под действием звуковых или ультразвуковых волн. Минералы по-разному взаимодействуют с акустическим полем, что приводит к их разделению в суспензии или воздушном потоке. Такие методы применяются реже, но находят использование при выделении ценных минералов из мелкодисперсных смесей.

**Химические способы обогащения** основаны на применении реагентов, которые избирательно растворяют одно из веществ, составляющих смесь, или образуют с одним из веществ соединения, легко

отделяемые от других при плавлении, испарении, осаждении из раствора.

**Жидкие растворы** различных веществ концентрируют путём упаривания растворителя, вымораживания, осаждения примесей или их перехода в газовую фазу.

**Газовые смеси** разделяют на отдельные компоненты последовательной конденсацией газов при их сжатии (компрессии) и понижении температуры.

## **12. Вода и водоподготовка в химической промышленности**

### ***12.1. Вода как технологическая среда***

Химическая промышленность является одним из крупнейших потребителей воды и воздуха.

Вода используется как реагент (источник водорода и кислорода), универсальный растворитель твёрдых, жидких и газообразных веществ, а также как реакционная среда, экстрагент и транспортирующий агент. Она служит для нагрева и охлаждения реакторов и аппаратуры, приготовления пульпы и суспензий, промывки продуктов и очистки оборудования. Кроме того, вода выполняет функцию рабочего тела в гидравлических системах, тепловых и атомных электростанциях.

#### **Классификация природных вод**

Природные воды подразделяются на атмосферные, поверхностные и подземные.

**Атмосферные воды** (дождь, снег) содержат минимальное количество примесей – главным образом растворённые газы ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  и др.), соли и микроорганизмы.

**Поверхностные воды** (реки, озёра, моря, водохранилища) содержат широкий спектр минеральных и органических веществ; морская вода представляет собой концентрированный раствор электролитов ( $NaCl$  до 2,6 %, соли  $Mg^{2+}$  и др.), а также газов воздуха.

**Подземные воды** (артезианские, колодезные, геотермальные) характеризуются высоким содержанием минеральных солей, выще-

лачиваемых из почв и пород, и сравнительно низким содержанием органических веществ.

**По соленосодержанию природные воды классифицируют следующим образом:**

- пресные до 1 г/кг;
- солоноватые 1–10 г/кг;
- солёные более 10 г/кг;
- морская вода в среднем содержит до 35 г/кг растворённых солей.

### *12.2. Методы водоочистки*

В большинстве случаев природная вода перед использованием в промышленности подвергается специальной очистке и деминерализации. Выбор методов водоподготовки определяется составом примесей и требованиями технологического процесса.

В практике применяют механические, физические, химические и физико-химические методы обработки: осветление, умягчение, ионный обмен и дегазацию. Для питьевой воды дополнительно проводят дезинфекцию. На схеме (рис. 4) представлены основные методы подготовки воды к использованию в химико-технологических системах.



Рис. 4. Схема промышленной водоподготовки

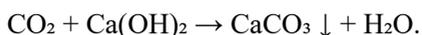
**Осветление воды** осуществляется путём её отстаивания с последующим фильтрованием через зернистые материалы различной дисперсности. Для коагуляции коллоидных примесей и окрашенных

соединений применяют коагулянты – соли алюминия и железа, которые вызывают агрегацию частиц и их осаждение.

**Обеззараживание воды** проводится с использованием хлорсодержащих реагентов (например, хлорной извести  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ) или озона, что обеспечивает уничтожение патогенной микрофлоры.

**Дегазация воды** – удаление растворённых газов.

Химический метод основан на связывании газов реагентами, например:



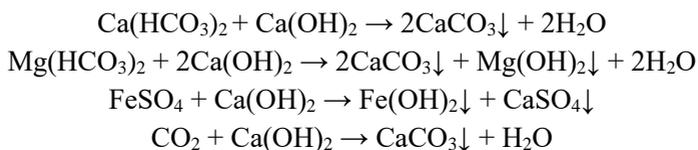
Физические методы включают термическую деаэрацию воды на воздухе или в вакууме.

**Обессоливание воды** применяется в высокотехнологичных процессах, где предъявляются повышенные требования к её чистоте (производство полупроводников, синтез химически чистых реактивов, фармацевтические препараты). Для обессоливания используют ионный обмен, дистилляцию и электродиализ.

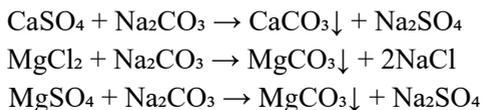
**Умягчение воды** – это процесс удаления ионов кальция и магния, определяющих её жёсткость. Жёсткость подразделяется на временную (карбонатную), обусловленную гидрокарбонатами кальция и магния, и постоянную (некарбонатную), связанную с наличием сульфатов, хлоридов и других солей.

Одним из наиболее эффективных методов умягчения воды является известково-содовый, часто применяемый в сочетании с фосфатным. Процесс умягчения основан на химических реакциях осаждения малорастворимых соединений кальция и магния.

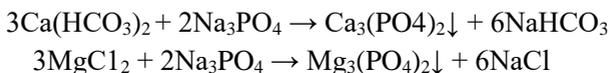
1. **Обработка гашёной известью  $\text{Ca}(\text{OH})_2$**  позволяет устранить временную жёсткость, удалить растворённый углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) и осадить ионы железа:



2. **Обработка кальцинированной содой**  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  устраняет постоянную жёсткость, переводя сульфаты и хлориды кальция и магния в малорастворимые карбонаты:



3. **Фосфатный метод** основан на введении фосфата натрия  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , который связывает катионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в виде труднорастворимых фосфатов:



Растворимость фосфатов кальция и магния ничтожно мала, что обеспечивает высокую эффективность фосфатного метода. Поэтому фосфатная обработка используется как дополнительный этап для более полного удаления ионов жёсткости.

### 13. Энергетические ресурсы и их использование

Энергия является необходимым условием протекания всех технологических процессов: она обеспечивает реализацию физических и химических превращений, создание требуемых параметров среды и работу оборудования. В ряде случаев энергия выступает не только внешним фактором, но и непосредственным реагентом – например, при гальванических процессах, где электрическая энергия включается в саму схему химической реакции.

В промышленности используется широкий спектр энергетических ресурсов. Наиболее универсальной является **электрическая энергия**, применяемая для привода машин и механизмов, осуществления электрохимических и физико-химических процессов, а также преобразования в световую и тепловую энергию. Значительную долю составляют **невозобновляемые источники энергии**: нефть, природный газ, уголь, торф, а также ядерное топливо (урановые руды, плутоний в реакторах-размножителях).

Перспективным направлением является использование **возобновляемых источников энергии (ВИЭ)** – солнечной, ветровой, геотермальной, гидроэнергии, энергии приливов, морских течений, волн и биомассы растительного, животного и бытового происхождения.

Особую группу составляют **вторичные энергетические ресурсы**, возникающие в результате неполного использования первичных источников или выделяющиеся как побочные продукты технологических процессов. По характеру различают горючие вторичные энергетические ресурсы (доменный газ, древесные отходы, органические отходы нефтехимии), тепловые (избыточное тепло дымовых газов, охлаждающих вод), а также вторичные энергетические ресурсы избыточного давления (газы и пары, сбрасываемые из аппаратов и коммуникаций). Их вовлечение в производственные циклы обеспечивает снижение энергопотерь и повышение эффективности химико-технологических производств.

#### **14. Вопросы для повторения и самостоятельной проработки**

1. Сырье в химической промышленности. По каким признакам классифицируют сырье химической промышленности?
2. В чём заключается принцип комплексной переработки сырья?
3. Что такое обогащение сырья и какие методы используются для обогащения твердого и жидкого сырья?
4. В чём заключается принцип гравитационного метода обогащения?
5. Как работает электромагнитный метод разделения веществ?
6. В каких случаях применяется электростатический метод разделения сырья?
7. Объясните принцип флотационного метода и где он используется.
8. Что называется вторичными энергетическими ресурсами?
9. Какие энергетические ресурсы относятся к возобновляемым?
10. Какие энергетические ресурсы относятся к невозобновляемым?

11. В чём значение вторичной переработки сырья для экологии и экономики?

12. Что подразумевается под замкнутыми производственными циклами?

13. Какие показатели качества воды важны в химических производствах?

14. Какие основные методы водоочистки применяются в химической промышленности?

## 15. Задачи

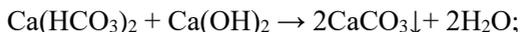
### Пример 1.

Рассчитать массу извести, содержащей 85 % основного вещества (CaO), и соды, содержащей 98 % основного вещества (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), для умягчения 1000 м<sup>3</sup> воды с общей жесткостью 8,5 ммоль·экв/л, в том числе постоянная (некарбонатная) жесткость – 4,0 ммоль·экв/л.

*Решение:*

В процессе умягчения воды известково-содовым методом известь вводится в процесс в виде водного раствора гидроксида кальция, получаемого путем гашения извести водой по реакции  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$ .

В процессе умягчения воды гидроксид кальция реагирует с солями временной жесткости с образованием труднорастворимых соединений по следующим реакциям:



Для определения массы извести необходимо найти временную (карбонатную) жесткость, которая находится как разность между общей и постоянной жесткостью:

$$J_{\text{к}} = J_{\text{о}} - J_{\text{п}} = 8,5 - 4,0 = 4,5 \text{ ммоль} \cdot \text{экв/л}, \text{ или } 4,5 \text{ моль} \cdot \text{экв/м}^3.$$

Масса Ca(OH)<sub>2</sub>, необходимая для устранения временной жесткости в 1 м<sup>3</sup> воды:

$$m_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = M_{1/2\text{Ca}(\text{OH})_2} \cdot J_{\text{к}}$$

$$m_{Ca(OH)_2} = \frac{74}{2} \cdot 4,5 = 167 \text{ г} = 0,167 \text{ кг}$$

Масса  $Ca(OH)_2$ , необходимая для устранения временной жесткости в  $1000 \text{ м}^3$  воды:

$$m_{Ca(OH)_2}' = V \cdot m_{Ca(OH)_2}$$

$$m'_{Ca(OH)_2} = 1000 \cdot 0,167 = 167 \text{ кг}$$

Масса  $CaO$ , необходимого для получения  $167 \text{ кг } Ca(OH)_2$ , рассчитываем в соответствии с уравнением реакции:

$$m_{CaO} = m_{Ca(OH)_2}' \cdot \frac{M_{CaO}}{M_{Ca(OH)_2}}$$

$$m_{CaO} = 167 \cdot \frac{56}{74} = 133 \text{ кг}$$

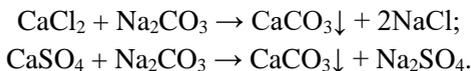
Масса технической извести, необходимой для умягчения  $1000 \text{ м}^3$  воды:

$$m_{\text{извести}} = m_{CaO} \cdot \frac{100}{85},$$

где 85 – массовая доля  $CaO$  в извести, %.

$$m_{\text{извести}} = 133 \cdot \frac{100}{85} = 156,5 \text{ кг}$$

Сода для умягчения воды вводится для устранения солей постоянной жесткости:



Масса  $Na_2CO_3$ , необходимого для устранения постоянной жесткости в  $1 \text{ м}^3$  воды:

$$m_{Na_2CO_3} = M_{1/2Na_2CO_3} \cdot Ж_{\text{п}}$$

$$m_{Na_2CO_3} = \frac{106}{2} \cdot 4 = 212 \text{ г} = 0,212 \text{ кг}$$

Масса  $Na_2CO_3$ , необходимая для устранения постоянной жесткости в  $1000 \text{ м}^3$  воды:

$$m_{Na_2CO_3}' = V \cdot m_{Na_2CO_3}$$

$$m'_{Na_2CO_3} = 1000 \cdot 0,212 = 212 \text{ кг}$$

Масса технической соды, необходимой для умягчения  $1000 \text{ м}^3$  воды:

$$m_{\text{соды}} = m_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \cdot \frac{100}{98},$$

где 98 – массовая доля  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в технической соде, %.

$$m_{\text{соды}} = 212 \cdot \frac{100}{98} = 216,3 \text{ кг}$$

*Ответ:*  $m_{\text{извести}}=156,5 \text{ кг}$ ;  $m_{\text{соды}}=216,3 \text{ кг}$ .

### Пример 2.

При растворении в воде сульфата натрия массой 21,3 г был получен раствор плотностью 1,12 г/мл. Определите молярную концентрацию раствора.

*Решение:*

Количество вещества  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ :

$$n(\text{Na}_2\text{SO}_4) = \frac{m(\text{Na}_2\text{SO}_4)}{M(\text{Na}_2\text{SO}_4)}$$
$$n(\text{Na}_2\text{SO}_4) = \frac{21,3}{142} = 0,15 \text{ моль}$$

Масса раствора:

$$V_{\text{р-ра}} = \frac{m_{\text{р-ра}}}{\rho}$$
$$V_{\text{р-ра}} = \frac{21,3}{1,12} = 19,02 \text{ мл} = 0,01902 \text{ л}$$

Молярная концентрация раствора:

$$C = \frac{n}{V}$$
$$C = \frac{0,15}{0,01902} = 7,89 \text{ моль/л}$$

*Ответ:*  $C=7,89 \text{ моль/л}$ .

1. Раствор хлорида бария используется для осаждения из него сульфата бария. Какая масса хлорида бария требуется для приготовления 50 г 0,5 % раствора?

2. Хлорид кальция широко применяется как кровоостанавливающее средство, повышающее свертываемость крови. Какая масса кристаллогидрата  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  понадобится для приготовления 500 г 10 % раствора  $\text{CaCl}_2$ ?

3. Необходимо рассчитать молярную концентрацию раствора, полученного при растворении  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  массой 53,0 г с 500 г  $\text{H}_2\text{O}$ , если плотность полученного раствора 1,12 г/см<sup>3</sup>.

4. Имеется раствор с концентрацией 2 моль/дм<sup>3</sup> гидроксида бария  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ . Как приготовить из него 2 л с концентрацией раствора 0,1 моль/дм<sup>3</sup>?

5. Какой объем раствора  $\text{NaOH}$  с концентрацией 1 моль/дм<sup>3</sup> необходимо добавить к 1 дм<sup>3</sup> раствора  $\text{NaOH}$  с концентрацией 0,1 моль/дм<sup>3</sup>, чтобы получить раствор с концентрацией 0,25 моль/дм<sup>3</sup>?

6. Определить концентрацию раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , полученного при перемешивании 1500 кг олеума с концентрацией 19 % масс.  $\text{SO}_3$  и 240 кг раствора серной кислоты с концентрацией 20 % масс.

7. Массовая доля  $\text{F}_2\text{O}_3$  в руде 70 %, а Fe в концентрате 70 %. Сколько концентрата может заменить 10 т такой руды?

8. При прокаливании известняка, содержащего 90 %  $\text{CaCO}_3$ , получили негашеную известь следующего состава: 98 %  $\text{CaO}$ , 1,2 % связанного  $\text{CO}_2$  и 0,8 % нелетучих примесей. Вычислить: а) процентное содержание в известняке примесей, улетучивающихся при прокаливании; б) степень обжига известняка.

9. Для перевода немагнитного бурого железняка (лимонита  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) в магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) иногда применяют обжиг руды в смеси доменного и коксового газов при температуре 920–1020К. Определите: 1) объемы вступивших в реакцию газообразных восстановителей при условии равных исходных соотношений; 2) массу магнетита в конечном продукте, полученном из 1080 т исходной руды, в составе которой 30,74 % пустой породы.

**10.** На некоторых обогатительных фабриках страны действуют установки для обогащения угля в тяжелых средах со следующими показателями: производительность установки 250 т/ч сырья и 150 т/ч концентрата; зольность концентрата (в массовых долях) 20 %, а сырья – 40 %. Определите: 1) массу концентрата, полученного за сутки; 2) выход концентрата; 3) степень извлечения угля; 4) массу отходов и массовую долю в них угля.

**11.** Примером комплексного использования сырья является использование продуктов коксования каменного угля. Определите массу сырого бензола, объем коксового газа и массовую концентрацию в нем аммиака по следующим параметрам коксохимического производства: 1) выход сырого бензола составляет 1,2 % от массы коксуемого угля; 2) массовая доля бензола в сыром бензоле 70 %, а степень его извлечения 95 %; 3) при коксовании 1 т угля выделяется 340 м<sup>3</sup> (н.у.) коксового газа; 4) производственные потери аммиака составляют 4 %. Сколько угля подверглось коксованию, если в результате использования полупродуктов получено 2000 т бензола и 3300 т сульфата аммония?

**12.** Сколько было подано на упаривание раствора нитрата натрия и какова масса упаренного раствора, если концентрация исходного раствора 16 мол.%, а упаренного 55 мол.% и масса воды составляет 500 кг.

**13.** Выделение йода из раствора, полученного после выщелачивания золя морских водорослей, производится путем добавления оксида марганца (MnO<sub>2</sub>) и серной кислоты (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Какая масса раствора, содержащего 1,5 % KI и масса MnO<sub>2</sub> потребуется для получения 250 кг йода.

**14.** Концентрация коагулянта в расходных баках станции водоочистки равна 10 % (считая на массу безводного продукта). Определите суточный расход раствора коагулянта, если его доза для данного типа воды 25 мг/дм<sup>3</sup>, производительность станции 30000 м<sup>3</sup>/сут. (Коагулянт – железный купорос 95 %-ной чистоты).

**15.** Обжиговый газ, состоящий из 8 % объемных долей SO<sub>2</sub> и 12 % объемных O<sub>2</sub>, остальное азот, подвергнут окислению на катализаторе.

Степень окисления  $\text{SO}_2$  88 %. Рассчитать состав газа после окисления в процентах.

**16.** Воздух, подводимый к доменной печи, содержит, объемные доли, %:  $\text{O}_2$  21,1;  $\text{N}_2$  77,2; водяных паров 1,6. Сколько потребуется добавить к воздуху кислорода, чтобы его концентрация стала равной 25 % объемных долей.

**17.** Жесткость воды после ее обработки известковым молоком составляет 1,25 ммоль/  $\text{дм}^3$  ионов  $\text{Ca}^{2+}$ . Сколько тринатрийфосфата с массовой долей основного вещества 0,95 потребуется для полного умягчения 3000  $\text{м}^3$  воды с учетом того, что остаточная концентрация реагента в ней не превышает санитарной нормы 2,5 мг/ $\text{дм}^3$ ?

**18.** Жёсткость воды равна 4,35 ммоль-экв/ $\text{дм}^3$ . Сколько соды надо прибавить к 1  $\text{м}^3$  этой воды для устранения жесткости?

**19.** Жесткость природных источников имеют сезонные колебания. Так, в 2  $\text{м}^3$  воды в среднем течении Волги в марте содержится 88 г-ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и 51 г-ионов  $\text{Mg}^{2+}$ , а в мае 11 г-ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и 6,4 г-ионов  $\text{Mg}^{2+}$ . Определите общую жесткость волжской воды в эти месяцы года.

**20.** Анализ 25 мл природной воды показал наличие в ней 42,5 мг  $\text{Ca}^{2+}$ , 6,25 мг  $\text{Mg}^{2+}$  и 60 мг  $\text{HCO}_3$ . Рассчитайте некарбонатную жесткость воды.

**21.** Жесткость воды, в которой содержится только гидрокарбонат кальция, равна 4 ммоль/ $\text{дм}^3$ . Какой объем 0,1 н раствора  $\text{HCl}$  потребуется для реакции с гидрокарбонатом кальция, содержащимся в 75  $\text{см}^3$  этой воды?

**22.** Вода, содержащая только сульфат магния, имеет жесткость 7 ммоль/  $\text{дм}^3$ . Какая масса сульфата магния содержится в 300  $\text{дм}^3$  этой воды?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутепов А.М. Общая химическая технология / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен. – изд. 3-е.– Москва: ИКЦ «АКАДЕМКНИГА, 2007. – 528 с.

2. Соколов Р.С. Химическая технология: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений: В 2 т. / Р.С. Соколов. – Москва: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2000. – Т. 1. – 366 с.

3. Соколов Р.С. Химическая технология: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений: В 2 т. / Р.С. Соколов. – Москва: Гуманит. изд. центр ВЛАДОС, 2000. Т. 2. – 448 с.

4. Ахметова Т.Г. Химическая технология неорганических веществ: в 2 т.: учеб. пособие / Т.Г. Ахметова. – Москва: Высш. шк., 2002. –Т. 1. – 686 с.

5. Ахметова Т.Г. Химическая технология неорганических веществ: в 2 т.: учеб. пособие / Т.Г. Ахметова. – Москва: Высш. шк., 2002. –Т. 2. – 532 с.

6. Амелин А.Г. Общая химическая технология / А.Г. Амелин, А.И. Малахов, И.Е. Зубова, В.Н. Зайцев. – Москва: Химия, 1977. – 400 с.

7. Общая химическая технология. Методология проектирования химико-технологических процессов / И.М. Кузнецова и др.; Под ред. И.М. Агеносов. – Санкт Петербург: Издательство «Лань», 2013.– 448 с.

8. Кузнецова И.М. Общая химическая технология: материальный баланс химико-технологического процесса: учеб. пособие для вузов / И.М. Кузнецова, Х.Э. Харлампики, Н.Н. Батыршин – Москва: Университетская книга, Логос, 2007. – 264 с.

9. Беляева И.И. Сборник задач по химической технологии: учеб. пособие для студентов хим. и хим.-биол. спец. пед. ин-тов / И.И. Беляева, В.А. Трофимов, М. Ю. Тихвинская – Москва: Просвещение, 1982. – 143 с.

10. Игнатенков В.И. Примеры и задачи по общей химической технологии Учеб. пособие для вузов / В.И. Игнатенков, В.С. Бесков – Москва: ИКЦ «АКАДЕМКНИГА», 2005. – 198 с.

11. Андреева Р.А. Общая химическая технология: сб. задач для студентов специальности 1-36 07 01 «Машины и аппараты хим. пр-в и промышленного предприятий строит. материалов» / Р.А. Андреева, И.А. Ельшина. – Новополюцк: ПГУ, 2015. – 204 с.

12. Аتمانских И.Н. Химическая технология: учеб.-метод. пособие / И.Н. Аتمانских, С.С. Нохрин, А.Р. Шарафутдинов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 120 с.

13. Теория химических процессов и расчет реакторов. Сборник примеров и задач: учеб. пособие / Ю.В. Попов и др.; Под ред. Ю.В. Попова. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 128 с.

14. Швалёв Ю.Б. Общая химическая технология. Часть 1. Химические процессы и реакторы: учеб. пособие / Ю.В. Швалёв, Д.А. Горлушко. – Томск: Изд-во ТПУ, 2019. – 187 с.

15. Общая химическая технология и химические реакторы. Сборник задач: учеб. пособие / Н.Ю. Санникова и др.; Под ред. Н.Ю. Санникова. – Воронеж: ВГУИТ, 2021. – 59 с.

16. Шевченко Т.М. Химическая технология неорганических веществ. Основные производства: учеб. пособие / Т.М. Шевченко, А.В. Тихомирова. – Кемерово: КузГТУ, 2012. – 195 с.

17. Бесков В.С. Общая химическая технология в вопросах и ответах: методич. пособие / В.С. Бесков, В.И. Ванчурин, В.И. Игнатенков. – Москва: РТХУ им. Д.И. Менделеева, 2011. – 83 с.

18. Аболонин Б.Е. Основы химических производств: учеб. пособие для вузов/ Б.Е. Аболонин, И.М. Кузнецова, Х.Э. Харлампики. – Москва: Химия, 2001. – 469 с.



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
I. ОСНОВЫ ОБЩЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....	5
1. Основные понятия химико-технологических процессов .....	5
1.1. Виды производств и продуктов.....	6
1.2. Химико-технологический критерии эффективности хи- мико-технологического процесса .....	8
1.3. Классификация химико-технологических процессов .....	10
2. Материальный и тепловой баланс.....	11
2.1. Закон сохранения массы. Расчет материального баланса.....	11
2.2. Основы теплового расчёта .....	15
3. Физико-химические основы технологических процессов .....	16
3.1. Химическое равновесие .....	17
3.2. Скорость химических реакций .....	18
4. Вопросы для повторения и самостоятельной проработки .....	20
5. Задачи.....	21
II. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....	30
6. Типы химико-технологических процессов .....	30
6.1. Гидродинамические процессы .....	30
6.2. Теплообменные процессы.....	31
6.3. Массообменные процессы .....	33
7. Каталитические процессы .....	34
7.1. Гетерогенный и гомогенный катализ .....	34
7.2. Влияние параметров на каталитическую активность .....	37
8. Химические реакторы .....	39
9. Вопросы для повторения и самостоятельной проработки .....	45
10. Задачи.....	46
III. КОМПОНЕНТЫ И РЕСУРСЫ ХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗ- ВОДСТВА .....	50
11. Сырьё в химической технологии.....	50
11.1. Классификация сырья .....	50

11.2. Возобновляемое и вторичное сырьё .....	52
11.3. Подготовка и очистка .....	53
12. Вода и водоподготовка в химической промышленности.....	55
12.1. Вода как технологическая среда .....	55
12.2. Методы водоочистки.....	56
13. Энергетические ресурсы и их использование .....	58
14. Вопросы для повторения и самостоятельной проработки .....	59
15. Задачи.....	60
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	66

*Учебное издание*

**ОБЩАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ:**

**ТЕОРИЯ, ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ**

Учебно-методическое пособие

Составители:

Газизянова Алина Рафасловна  
Писарева Татьяна Александровна  
Решетников Сергей Максимович

*Авторская редакция*

*Компьютерная верстка: Т.В. Опарина*

Подписано в печать 11.12.25. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. печ. л. 4,2. Уч.-изд. л. 3,7.

Тираж 100 экз. Заказ № 1847.

Издательский центр «Удмуртский университет»  
426034, г. Ижевск, ул. Ломоносова, 4Б, каб. 021  
Тел.: + 7 (3412) 916-364, E-mail: editorial@udsu.ru

Типография Издательского центра «Удмуртский университет»  
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.  
Тел.: + 7 (3412) 68-57-18