

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«Санкт-Петербургский государственный университет**  
**промышленных технологий и дизайна»**  
**Высшая школа технологии и энергетики**  
**Кафедра технологии целлюлозы и композиционных материалов**

# **ОБЩАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ**

## **Практические занятия**

Методические указания для студентов всех форм обучения  
по направлениям подготовки:

18.03.01 — Химическая технология  
29.03.03 — Технология полиграфического  
и упаковочного производства

Составители:  
Е. А. Павлова  
В. Н. Селезнёв  
М. А. Мидукова

Санкт-Петербург  
2025

Утверждено  
на заседании кафедры ТЦКМ  
16.04.2025 г., протокол № 9  
Рецензент Е. Г. Смирнова

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Общая химическая технология» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология» всех форм обучения и направлению подготовки 29.03.03 «Технология полиграфического и упаковочного производства» очной формы обучения.

В методических указаниях изложены основные понятия и научные принципы химической технологии. Приведены примеры решения типовых задач, задачи для самостоятельного решения, необходимые справочные материалы. Представлены вопросы и задания для выполнения контрольной работы.

Данное методическое указание способствует закреплению теоретических знаний и дает возможность студентам ориентироваться в вопросах общей химической технологии.

Методические указания предназначены для бакалавров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве  
методических указаний

Режим доступа: [http://publish.sutd.ru/tp\\_get\\_file.php?id=202016](http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016), по паролю.  
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 01.09.2025 г. Рег. № 5014/25

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД  
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СЫРЬЕ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ .....	5
1.1. Степень извлечения.....	5
1.2. Определение концентрации компонентов в смеси.....	6
1.3. Жесткость воды.....	7
2. ПОКАЗАТЕЛИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	9
2.1. Выход продукта.....	9
2.2. Избирательность (селективность).....	10
2.3. Степень превращения.....	11
2.4. Производительность, мощность и интенсивность аппарата.....	12
2.5. Расходные коэффициенты.....	13
2.6. Скорость ХТП и ее виды.....	14
3. РАВНОВЕСИЕ В ХТП.....	16
3.1. Константа равновесия (K) и равновесный выход продукта (Xp).....	16
4. КАТАЛИЗ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	18
4.1. Скорость каталитических ХТП.....	20
5. БАЛАНСЫ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	21
5.1. Материальный баланс ХТП.....	21
5.2. Тепловой баланс ХТП.....	23
КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА .....	25
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	30

## **ВВЕДЕНИЕ**

В методических указаниях изложены основные понятия и научные принципы химической технологии, приведены способы подготовки химического сырья к переработке, значение воды в химической промышленности и народном хозяйстве, технико-экономические показатели химических производств.

В методические указания включены вопросы для повторения, примеры решения типовых задач, задачи для самостоятельного решения, необходимые справочные материалы.

Данные методические указания способствуют закреплению теоретических знаний и дает возможность студентам ориентироваться в вопросах химической технологии.

При решении задач и выполнении расчетных упражнений студенту необходимо обращаться к учебнику и справочной литературе, что способствует развитию навыков самостоятельной работы с литературой.

Технологические расчеты предполагают четкое понимание студентами основных понятий и единиц измерения, принятых в химической технологии.

В основу расчетов положены уравнения химических реакций с учетом условий и закономерностей их протекания в данном технологическом процессе. Результаты расчетов выражаются в Международной системе единиц СИ.

# 1. СЫРЬЕ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

**Сырье в химической технологии** – это природные материалы, которые используются в производстве различных продуктов и еще не прошли промышленную переработку.

**Некоторые виды сырья в химической промышленности:**

**Минеральное.** Руды, из которых получают металлы, и нерудные полезные ископаемые: сера, фосфориты, калийные соли, поваренная соль, песок, глины, слюда.

**Органическое.** Ископаемые виды топлива: торф, уголь, нефть, горючие сланцы, природные и попутные нефтяные газы.

**Растительное и животное.** Подсолнечник, картофель, сахарная свекла, древесина, хлопок, лен, конопля, каучуконосы, стержни початков кукурузы, подсолнечная, рисовая, хлопковая лузга и т. п.

**Вода.** Ключевой сырьевой материал, который расходуется для нагревания или охлаждения продуктов и аппаратов, для создания вакуума и производства пара, для приготовления растворителей, реакционной среды, экстрагента или абсорбента, транспортирующего средства, для промывки продуктов, при перегонке веществ.

**Воздух** – используется в химической технологии, как источник азота и кислорода.

Вода и воздух являются дешевым сырьем для химической промышленности и, соответственно, широко применяется.

**Сырье классифицируют по различным признакам:**

**По происхождению** – минеральное, растительное, животное.

**По запасам** – невозобновляемое (руды, минералы, горючие ископаемые) и возобновляемое (вода, воздух, растительное и животное сырье).

**По химическому составу** – неорганическое (руды, минералы) и органическое (нефть, уголь, природный газ).

**По агрегатному состоянию** – твердое (руды, минералы, уголь, сланцы, торф), жидкое (вода, рассолы, нефть) и газообразное (воздух, природный газ).

Также сырье можно подразделить на **первичное** (минеральное, растительное и животное, горючие ископаемые, вода и воздух) и **вторичное** (промышленные и потребительские отходы).

## 1.1. Степень извлечения

Степень извлечения – технологический показатель, который показывает, какая часть полезного компонента от его общего количества в руде переходит в концентрат.

Выход концентрата, в свою очередь, определяется как отношение массы концентрата к массе исходной руды, выраженное в процентах или долях единиц.

Степень извлечения целевого компонента:

$$\xi = \frac{\eta_k \cdot \omega_k}{\omega_p} \cdot 100 \, \%.$$

Если известны массы целевого компонента в сырье и в концентрате, то степень извлечения определяется как отношение массы целевого компонента в сырье (руде) к массе целевого компонента в концентрате:

$$\xi = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100 \, \%,$$

$m_1$  – масса полезного компонента в концентрате.

$m_2$  – масса полезного компонента в руде.

Выход концентрата:  $\gamma = m_3 / m_4 \cdot 100 \, \%$ ,

$m_3$  – масса концентрата.

$m_4$  – масса переработанной руды.

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* При обогащении 6 т руды, содержащей 2 % цинка, получено 350 кг концентрата, содержащего 25 % цинка. Определить выход концентрата, степень извлечения цинка и степень концентрации.

Обогащение природной руды является чисто физическим процессом разделения природной смеси за счет разных плотностей ее компонентов.

*Решение:*

1. Найдем выход цинкосоодержащего концентрата, зная количество концентрата, количество руды:

$$350/6000 \cdot 100 = 5,83 \, \%.$$

Для определения степени извлечения:

2. Найдем содержание цинка в исходной руде

$$6000 \cdot 0,02 = 120 \text{ кг цинка}$$

3. Найдем содержание цинка в концентрате

$$350 \cdot 0,25 = 87,5 \text{ кг цинка}$$

4. Степень извлечения цинка в концентрате составит:

$$87,5/120 \cdot 100 = 72,9 \, \%$$

5. Степень концентрации цинка при обогащении руды составит:

$$25/2 = 12,5 \text{ раз.}$$

### 1.2. Определение концентрации компонентов в смеси

**Концентрация компонента смеси** – величина, которая количественно характеризует содержание компонента относительно всей смеси.

**Некоторые способы определения концентрации:**

**Массовая доля.** Это отношение массы данного компонента к сумме масс всех компонентов. Массовую долю, выраженную в процентах, называют

процентной концентрацией. Чтобы перевести массовую долю в процентную концентрацию, нужно ее значение умножить на 100 %.

**Молярная концентрация** (молярность). Это количество вещества (число молей) компонента в единице объема смеси. В системе СИ единица измерения молярной концентрации – моль/м<sup>3</sup>, на практике чаще используют моль/л или ммоль/л.

**Объемная доля.** Этот способ чаще применяют при работе с газовыми смесями, так как объем газовой смеси складывается из объемов компонентов. В жидких и твердых растворах объем раствора не равен сумме объемов компонентов, поэтому использование объемной доли редко оправдано.

**Нормальная концентрация** (молярная концентрация эквивалента). Это отношение количества моль-эквивалентов растворенного вещества к объему раствора. Измеряется в моль/л или моль-экв/л.

**Титр.** Это отношение массы растворенного вещества к объему раствора. Измеряется в г/мл.

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* вычислить процентное содержание железа в руде, количество пустой руды, содержащей 85,63 % закиси-окиси железа Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (FeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

*Решение:*

1. Записать полную формулу веществ или уравнения с коэффициентами.

2. Определим массовую долю железа в Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

3. В связи с известной концентрацией закиси-окиси железа установим, что количество руды будет 100 кг, в которой содержится 85,63 кг закиси-окиси железа, а количество пустой породы будет равно:

$$100 - 85,63 = 14,37 \text{ кг}$$

4. Найдем содержание железа в Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в 85,63 кг магнитном железняке: в этом соединении содержится 3 атома железа.

Зная молекулярные массы соединений и веществ в магнитном железняке по пропорции, найдем содержание железа в 85,63 кг магнитного железняка:

В 232 кг Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (молекулярная масса) содержится 168 кг железа (молекулярная масса железа в железняке-магнетите).

А в 85,63 кг магнетита содержится x кг железа.

Тогда:  $(85,63 \cdot 168) / 232 = 62$  кг, т. е. в руде железа содержится 62 %.

### 1.3. Жесткость воды

**Жесткость воды** – это характеристика, которая зависит от содержания в ней растворенных минералов, в первую очередь солей кальция (Ca<sup>2+</sup>) и магния (Mg<sup>2+</sup>). Чем выше концентрация этих солей, тем жестче вода.

Различают также временную и постоянную жесткость.

Временная обусловлена наличием в воде растворенных бикарбонатов кальция и магния, которые легко разлагаются при нагревании.

Постоянная связана с присутствием в воде растворенных сульфатов и хлоридов кальция и магния, которые не разлагаются при нагревании.

Общая жесткость – суммарный показатель временной и постоянной жесткости.

Основной единицей измерения жесткости воды является миллиграмм-эквивалент на литр (мг-экв/л). Эта величина отражает суммарное количество ионов кальция и магния, выраженное в их химических эквивалентах.

В зависимости от общего содержания ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  природные воды делят на группы:

Очень мягкая вода (до 1,5 ммоль-экв/л).

Мягкая вода (1,5–3 ммоль-экв/л).

Средняя вода (3,0–5 ммоль-экв/л).

Жесткая вода (6–10 ммоль-экв/л).

Очень жесткая вода (более 10 ммоль-экв/л).

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* В 5 м<sup>3</sup> воды содержится 250 г ионов кальция и 135 г ионов магния. Нужно определить общую жесткость воды.

*Решение:*

1. Найдем содержание ионов кальция и магния (в мг/л) в воде:

$$250 \cdot 1000 / 5 \cdot 1000 = 50 \text{ (мг/л) ионов } \text{Ca}^{2+}$$

$$135 \cdot 1000 / 5 \cdot 1000 = 27 \text{ (мг/л) ионов } \text{Mg}^{2+}.$$

2. 1 мэкв жесткости отвечает содержанию 20,04 мг/л ионов  $\text{Ca}^{2+}$  или 12,16 мг/л ионов  $\text{Mg}^{2+}$ .

3. Общая жесткость воды равна:

$$Ж = 50 / 20,04 + 27 / 12,16 = 4,715 \text{ (мэкв/л)}.$$

*Ответ:* Вода умеренно жесткая.

*Условие задачи:* Определить общую, карбонатную и некарбонатную жесткость воды, если на титрование ее 100 мл потребовалось 8 мл 0,1 н. раствора трилона Б и 5 мл 0,1 н. раствора соляной кислоты.

*Решение:*

1. Расчет ведется по закону эквивалентов:

$$Ж = V_{\text{т}} \cdot \text{СНТ} \cdot 1000 / V_{\text{воды}},$$

где  $V_{\text{воды}}$  – объем анализируемой пробы воды, мл;

$V_{\text{т}}$  – объем титрующего раствора, мл;

СНТ – нормальность титрующего раствора, моль/л.

2. После подстановки заданных значений получим:

$$Ж_{\text{общ}} = 8 \cdot 0,1 \cdot 1000 / 100 = 8 \text{ ммоль/л},$$

$$Ж_{\text{вр}} = 5 \cdot 0,1 \cdot 1000 / 100 = 5 \text{ ммоль/л},$$

$$Ж_{\text{пост}} = Ж_{\text{общ}} - Ж_{\text{вр}} = 8 - 5 = 3 \text{ ммоль/л}.$$

*Ответ:* Общая жесткость воды – 8 ммоль/л, карбонатная – 5 ммоль/л, некарбонатная – 3 ммоль/л.



## 2. ПОКАЗАТЕЛИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

**Показатели химико-технологического процесса (ХТП)** включают производственные, эксплуатационные и технологические характеристики. Они используются для оценки эффективности процесса и принятия решений на производстве.

ХТП отражают физико-химическую сущность явлений, происходящих в процессе.

Некоторые технологические показатели ХТП:

Степень превращения (конверсия) – отношение количества реагента, вступившего в реакцию, к его исходному количеству.

Выход продукта – отношение количества полученного целевого продукта к максимально возможному его количеству при данных условиях реакции.

Селективность – отношение массы целевого продукта к общей массе продуктов, полученных в процессе.

Производительность – количество продукта, производимого в единицу времени аппаратом или установкой.

Интенсивность – производительность, отнесенная к какому-либо размеру аппарата (объему, площади поперечного сечения).

### 2.1. Выход продукта

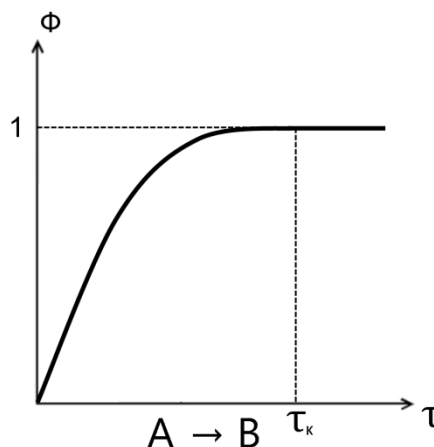
Это отношение массы продукта, полученного фактически, к максимально возможной массе продукта.

Для необратимых процессов  $aA + bB \rightarrow dD$  выход продукта может высчитываться через массу либо концентрацию:

$$\Phi = \frac{m_D}{m_D^{max}} = \frac{C_D}{C_D^{max}},$$

где  $m_D^{max}, C_D^{max}$  – максимально возможное количество продукта, которое можно получить, если исходный реагент прореагировал на 100 % (или количество продукта, которое должно получиться по расчетному уравнению химической реакции).

Если  $C_D = C_D^{max}$ , то  $\Phi = 1$ , то есть процесс прошел до конца.



Выход продукта для обратимых процессов  $aA + bB \rightleftharpoons dD$ :

1. Равновесный выход  $\Phi^* = \frac{C_D^*}{C_D^{max}},$

где  $C_D^*$  – количество продукта, полученного в результате обратимой реакции;

$C_D^{max}$  – максимально возможное количество продукта, которое образовалось бы, если исходные реагенты прореагировали на 100 %, т. е. если бы обратимый процесс стал необратимым.

$0 < \Phi^* < 1$ ;  $C_D^* = C_D^{max}$  – предел измерения, реакция стала необратимой.

Таким образом, равновесный выход характеризует степень приближения обратимого процесса к необратимому.

2. Выход от теоретического (от равновесного)

$$\Phi^T = \frac{C_D}{C_D^*},$$

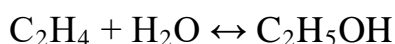
выход от теоретического характеризует степень приближения к моменту равновесия.

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* Рассчитайте выход этилового спирта на пропущенный этилен при многократной циркуляции этилена, если практический расходный коэффициент этилена 0,69 т на 1 т этилового спирта.

*Решение:*

Реакция:



Молярная масса:

$$C_2H_4 = 12,011 \cdot 2 + 1,00794 \cdot 4 = 28,05 \text{ г/моль}$$

$$C_2H_5OH = 12,011 \cdot 2 + 1,00794 \cdot 5 + 15,999 + 1,00794 = 46,07 \text{ г/моль}$$

Теоретический выход этанола из 690 кг этилена:

$$690 \cdot 46,07 / 28,05 = 1133,3 \text{ кг, или } 1,1333 \text{ т}$$

Практическая масса этанола равна 1000 кг.

Находим практический выход этилового спирта:

$$\eta = 1000 / 1133,3 \cdot 100 \% = 88,2 \%$$

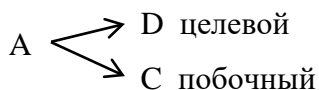
## 2.2. Избирательность (селективность)

### Селективность

**Селективность в химической технологии** – критерий, который позволяет оценить эффективность протекания целевой реакции при наличии побочных процессов.

Этот показатель характеризует только сложные процессы.

От слова Select – избирать.



$$S = \frac{C_D}{C_D + C_C},$$

где  $C_D$  – количество полученного целевого продукта;

$C_C$  – количество полученного побочного продукта;

$C_D + C_C$  – общее количество полученного продукта.

Селективность – это отношение количества целевого продукта к общему количеству образовавшегося продукта.

Если  $S = 1$ , то сложный процесс стал простым, а  $C_C = 0$ .

### **Связь между выходом продукта, степенью превращения исходного реагента и селективностью**

Домножим формулу выхода продукта на единицу, то есть на дробь с одинаковым числителем и знаменателем:

$$\Phi = \frac{C_D}{C_D^{max}} \cdot \frac{C_A^0 - C_A}{C_A^0 - C_A} = \frac{C_D}{C_A^0 - C_A} \cdot \frac{C_A^0 - C_A}{C_D^{max}} = \frac{C_D}{C_D + C_C} \cdot \frac{C_A^0 - C_A}{C_A^0} = S \cdot X,$$

где  $C_D^{max} = C_A^0$ ;

$C_A^0 - C_A = C_D + C_C$ .

Мгновенная селективность  $S_{мгн} = f\left(\frac{C_D}{C_C}\right) = f\left(\frac{U_D}{U_C}\right)$ .

### **2.3. Степень превращения**

Степень превращения вещества – отношение количества превращенного вещества к его первоначальному количеству или количество исходного реагента, которое прореагировало, отнесенное к его начальному количеству.

$$X_A = \frac{C_A^0 - C_A}{C_A^0}; \quad X_A = \frac{\nu_A^0 - \nu_A}{\nu_A^0}; \quad X_A = \frac{n_A^0 - n_A}{n_A^0},$$

где  $C_A$  – количество реагента, в данное время оставшееся в реакторе;

$n_A$ ;  $\nu_A$  – количество частиц, вещества;

$[X_A]$  = [безразмерная величина].

Чем выше степень превращения, тем большая часть исходного сырья вступила в реакцию и полнее прошел процесс химического превращения.

### **Пояснительная задача**

*Условие задачи:* Определить степень превращения  $X_B$  и состав реакционной смеси для реакции:

$A + 2B = 2R + S$ , если  $X_A = 0,6$ ,  $C_{A0} = 1$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $C_{B0} = 1,5$  кмоль/м<sup>3</sup>.

*Решение:*

В реакции  $aA + bB = rR + sS$  коэффициенты уравнения связаны с изменением количества компонентов:

$$\frac{n_A^0 - n_A}{a} = \frac{n_B^0 - n_B}{b} = \frac{n_R^0 - n_R}{r} = \frac{n_S^0 - n_S}{s} \text{ и т. д.}$$

$$X_B = \frac{n_B^0 - n_B}{n_B^0}; X_A = \frac{n_A^0 - n_A}{n_A^0};$$

$$X_B = \frac{n_B^0 - n_B}{n_B^0} = b/a \cdot \frac{n_A^0 - n_A}{n_B^0} = b/a \cdot \frac{n_A^0 \cdot X_A}{n_B^0}; a, b - \text{коэффициенты}$$

$X_B = \frac{b}{a} \cdot \frac{n_A^0 \cdot X_A}{n_B^0}$  – это уравнение позволяет найти степень превращения одного реагента, зная степень превращения другого.

То же работает и с концентрациями:

$$X_B = \frac{b}{a} \cdot \frac{C_A^0 \cdot X_A}{C_B^0}$$

1. Тогда  $X_B = 2/1 \cdot 1/1,5 \cdot 0,6 = 0,8$

2. Состав реакционной смеси:

$$C_A = C_{A0}(1 - X_A) = 1 \cdot (1 - 0,6) = 0,4 \text{ кмоль/м}^3$$

$$C_B = 1,5 \cdot (1 - 0,8) = 0,3$$

Выразим изменение количества продукта R через изменение количества реагента A или B.

Если  $n_{R0} = 0$ , то

$$\frac{n_A^0 - n_A}{a} = \frac{n_R^0 - n_R}{r}$$

$$n_R = |\Delta n_A| \cdot r/a = |\Delta n_A| / \frac{n_A^0 - n_A}{n_A^0} \cdot r/a = n_{A0} \cdot X_A \cdot r/a$$

$$C_R = C_{A0} \cdot X_A \cdot r/a$$

$$C_R = C_{A0} \cdot X_A \cdot r/a = 1 \cdot 0,6 \cdot 2/1 = 1,2$$

$$C_S = C_{A0} \cdot X_A \cdot s/a = 1 \cdot 0,6 \cdot 1/1 = 0,6$$

## 2.4. Производительность, мощность и интенсивность аппарата

Производительностью аппарата (П) называется количество готового продукта ( $G_{пр}$ ), фактически вырабатываемого аппаратом в единицу времени ( $\tau$ ) при данных условиях (режиме) процесса производства.

Возможная производительность аппарата при оптимальных условиях процесса производства называется его мощностью (W).

Мощность аппарата представляет собой максимальную производительность:

$$П = \frac{G_{пр}}{\tau}, \text{ кг/ч (или т/сут и т. д.)}$$

Интенсивностью (J) процесса или аппарата называется его производительность, отнесенная к единице полезного объема (V) или рабочей поверхности аппарата (полезная площадь) (F).

Интенсивность и производительность аппарата – показатели, взаимосвязанные друг с другом:

$$J = \frac{\Pi}{V} = \frac{G_{\text{пр}}}{V \cdot \tau}, \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч, или сутки};$$

$$J = \frac{\Pi}{F} = \frac{G_{\text{пр}}}{F \cdot \tau}, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч, или сутки}.$$

Чем интенсивнее протекает процесс, тем выше производительность аппарата.

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* В контактном аппарате установки по производству серной кислоты в течение 15 ч окисляется 168 т оксида серы 4, степень окисления его 97,8 %. Вычислить производительность аппарата в тоннах в час.

*Решение:*

Зная форму нахождения производительности, найдем производительность установки при 100 % протекании процесса окисления:

$$\Pi = \frac{168}{15} = 11,2 \text{ т/ч.}$$

А процесс окисления проходит до степени окисления – 97,8 %, тогда:

$$11,2 \cdot 0,978 = 10,96 \text{ т/ч.}$$

*Ответ:* Производительность аппарата равна 10,96 т/ч.

## 2.5. Расходные коэффициенты

Экономическая эффективность и практическая целесообразность нефтегазохимического производства определяются технико-экономическими показателями, важнейшими из которых являются расходный коэффициент (РК) сырья и выход продуктов, производительность аппарата, интенсивность процесса (аппарата) и экономическая эффективность химического производства.

Расход каждого вида сырья, отнесенный к единице целевого продукта, называют расходным коэффициентом (РК) и выражают в тоннах (т), килограммах (кг), метрах кубических (м<sup>3</sup>).

Теоретические расходные коэффициенты (РК<sub>т</sub>) рассчитывают на основании стехиометрических соотношений, по которым происходит превращение сырья в целевой продукт.

Расходный коэффициент практически учитывает также побочные реакции и производственные потери:

$$PK_T = \frac{m_1}{m_2},$$

где  $PK_T$  – теоретический расходный коэффициент (в т, кг, м<sup>3</sup>);

$m_1$  – расход сырья, реагента;  $m_2$  – масса целевого продукта.

Расходные коэффициенты:

1. По сырью – количество сырья, затраченное на полученную единицу продукции, к количеству продукции.
2. По электроэнергии.
3. По пару.

$$PK = \frac{\text{количество затраченного сырья}}{\text{количество полученного продукта}} = \frac{C_A}{C_D}, \text{ чем больше } PK, \text{ тем хуже.}$$

Часто является определяющим показателем эффективности процесса.

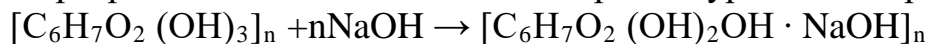
Эффективностью производства может служить отношение теоретического  $PK$  и практического  $PK$ .

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* Рассчитайте теоретический расходный коэффициент 18 %-ного раствора едкого натра для мерсеризации 1 т целлюлозы, содержащей 5 % влаги и 4 % примесей.

*Решение:*

Процесс мерсеризации целлюлозы можно выразить уравнением реакции:



$M$  (целлюлозы) =  $n \cdot (12,011 \cdot 6 + 7 + 15,999 \cdot 2 + (1 + 15,999) \cdot 3 = 162,061$  г/моль;

$M$  (гидроксида натрия) =  $23 + 1 + 16 = 40$  г/моль.

Найдем, сколько чистого гидроксида натрия потребуется на мерсеризацию 0,91 т целлюлозы:

Расход (гидроксида натрия) теоретический:

$$(0,91 \cdot n \cdot 39,988) / n \cdot 162,061 = 0,2245 \text{ т.}$$

Теоретический расходный коэффициент гидроксида натрия равен:

$PK = 0,2245 / 0,18 = 1,247$  т, где 1,247 – количество гидроксида натрия для получения 1 тонны мерсеризованной целлюлозы.

## 2.6. Скорость ХТП и ее виды

Химико-технологический процесс состоит из 3 стадий:

1. Подвод реагирующих компонентов в зону реакции. Совершается молекулярной диффузией или конвекцией двухфазных или многофазных систем.

Подвод реагирующих веществ может совершаться:

- 1) Адсорбцией / десорбцией газов.
- 2) Конденсацией паров.
- 3) Плавлением / растворением твердых веществ в жидкости.
- 4) Испарением жидкостей.

### 5) Возгонкой твердых веществ.

2. Химическая реакция. В ходе химической реакции может происходить несколько последовательных или параллельных химических реакций, в результате которых образуются целевой и побочный продукты производства.

3. Отвод из зоны реакции полученных продуктов. Совершается таким же образом, как и подвод реагирующих веществ.

Суммарная скорость процесса определяется скоростью этих трех стадий. Как правило, 3 стадии протекают с различной скоростью и последовательно, поэтому общая (суммарная) скорость процесса определяется скоростью наиболее медленной стадии. Если самая медленная стадия – химическая реакция, то она лимитирует суммарную скорость, а процесс протекает в так называемой **кинетической области**. Чтобы увеличить скорость стадии, изменяют те факторы, которые влияют на скорость химической реакции: увеличение концентрации реагирующих веществ, температуры, давления, добавление катализатора.

Если общая скорость процесса лимитируется подводом реагентов или отводом продуктов реакции, то такой процесс протекает в **диффузионной области**. Для ускорения этих процессов увеличивают скорость диффузии: перемешивание, гомогенизация системы, увеличение температуры, давления, перевод многофазной системы в однофазную.

Если скорости всех стадий соизмеримы, то процесс протекает в **переходной области**, и, чтобы увеличить скорость такого процесса, воздействуют на факторы, увеличивающие и диффузию, и скорость химической реакции.

Скорость гомогенного процесса:

$$U = k \cdot \Delta C,$$

Скорость гетерогенных процесса:

$$U = k \cdot F \cdot \Delta C,$$

где  $U$  – скорость химико-технологического процесса;  $k$  – коэффициент пропорциональности, или константа скорости процесса;  $F$  – поверхность соприкосновения фаз;  $\Delta C$  – движущая сила процесса.

Зависимость константы скорости реакции от температуры выражается уравнением Аррениуса:

$$k = k_0 \cdot e^{-E/RT},$$

где  $E$  – энергия активации, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель,  $k$  – константа скорости реакции при температуре  $T$ .

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* Объем скрубберной башни для сушки кислорода 85 м<sup>3</sup>, поверхность одного кубического метра керамической насадки, заполняющей

башню, 110 м<sup>2</sup>. Определите скорость поглощения влаги из газа по следующим данным. Коэффициент поглощения  $k = 2,1 \cdot 10^{-4}$  Па, движущая сила процесса  $\Delta p = 773,26$  Па, коэффициент запаса башни  $\alpha = 1,2$ .

*Решение:*

Скорость поглощения находим по формуле:  $U = k \cdot F \cdot \Delta p$

1. Найдем общую поверхность насадки башни и ее полезную поверхность:

$$F = 110 \cdot 85 = 9350 \text{ м}^2;$$

$$F_{\Pi} = 9350 / 1,2 = 7791,66 \text{ м}^2.$$

2. Тогда скорость поглощения влаги из газа:

$$U = k \cdot F \cdot \Delta p = 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 7791,66 \cdot 773,26 = 1265,25 \text{ Па}.$$

### 3. РАВНОВЕСИЕ В ХТП

#### 3.1. Константа равновесия (K) и равновесный выход продукта (Xp)

Большинство реакций в химической технологии обратимы, одной из важнейших характеристик ХТП является константа равновесия реакции ( $K_p$ ), которая позволяет рассчитать равновесный выход продукта при различных параметрах и выбрать оптимальные условия ведения процесса.

Константа равновесия выражает взаимосвязь между равновесными концентрациями.

Принято, что  $k^* = \frac{\overrightarrow{k}}{\overleftarrow{k}} = f(C_A^*; C_B^*; C_D^*)$ .

До момента равновесия пишут кинетическое уравнение:

$$\overrightarrow{k} \cdot (C_A^*)^a (C_B^*)^b = \overleftarrow{k} (C_D^*)^d;$$

$$k^* = \frac{(C_D^*)^d}{(C_A^*)^a (C_B^*)^b} = \text{const}, \text{ но при } T = \text{const}, \text{ т. е. } k^* \text{ зависит только от температуры.}$$

Константу химического равновесия обратимой реакции  $aA + bB = cC + dD$  рассчитывают в соответствии с законом действия масс: произведение концентраций исходных веществ к произведению концентрации продуктов реакции. Константа химического равновесия зависит от  $T$  или  $P$  давления для газов.

В зависимости от единиц выражения концентраций веществ есть три способа выражения константы равновесия:

$$K_c = \frac{[A]^a [B]^b}{[C]^c [D]^d} \text{ (г-моль/л или кг-моль/м}^3\text{)};$$

$$K_p = \frac{[P_A^a] [P_B^b]}{[P_C^c] [P_D^d]} \text{ (концентрация выражена в парциальных давлениях)};$$

$$K_n = \frac{[n_A^a] [n_B^b]}{[n_C^c] [n_D^d]} \text{ (концентрация в молярных или для газов в объемных процентах).}$$

Между  $K_c$  и  $K_p$  существует зависимость:



$K_c = K_p / (RT)^{v_1-v_2} = K_p / (RV)^{v_1-v_2}$ , где  $v_1 = d+c$  (продукты);  $v_2 = a+b$  (исходные вещества) (суммы молей);

$$K_p = K_n \cdot P^{v_1-v_2};$$

$$K_p = K_n (RT/V)^{v_1-v_2};$$

$$K_c = K_n \cdot V^{v_1-v_2}.$$

Связь между константой равновесия  $K_p$  и равновесным выходом продукта  $X_p$  для реакции типа  $A+B=C$ , протекающих в газовой фазе, выражается формулой:

$$A+B=C - K_p = 4X_p/(1-X_p)p$$

Если в химической реакции одновременно участвуют (образуются) твердые вещества, то их концентрация в уравнение константы не входит.

Практически для многих реакций константы равновесия определены экспериментально, и для практических расчетов их берут из справочника.

Равновесный выход – это отношение количества продукта, полученного к моменту равновесия, к максимально возможному количеству продукта, которое можно получить.

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* Образование аммиака протекает по уравнению  $N_2 + 3H_2 \leftrightarrow 2NH_3$ . При некоторых условиях равновесные концентрации веществ таковы:  $[N_2] = 0,1$  моль/л,  $[H_2] = 0,2$  моль/л,  $[NH_3] = 0,8$  моль/л. Вычислить константу равновесия и рассчитать исходные концентрации азота и водорода.

*Решение:*

$$K = [NH_3]^2 / [N_2] \cdot [H_2]^3$$

$$K = 0,8^2 / 0,1 \cdot 0,2^3 = 0,64 / 0,0008 = 800$$

По уравнению 1 моль азота потрачено на образование 2 моль аммиака, тогда на 0,8 моль/л аммиака затрачено  $\frac{1}{2}$  концентрации азота =  $0,8/2 = 0,4$  моль/л.

Зная равновесную, находим исходную.

$$0,4 + 0,1 = 0,5 \text{ моль/л} - \text{исходная концентрация аммиака};$$

$$0,1 + 0,8/2 = 0,5 \text{ моль/л}.$$

3 моля водорода потрачено на 2 моль аммиака, тогда на 0,8 моль/л аммиака затрачено 1,5 концентрации водорода =  $1,5 \cdot 0,8 = 1,2$  моль /л водорода.

$$0,2 + 1,2 = 1,4 \text{ моль/л};$$

$$0,2 + 0,8 \cdot 3/2 = 1,4 \text{ моль/л}.$$

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* Образование аммиака протекает по уравнению  $A+B = 2C$ . Определите равновесные концентрации реагирующих веществ, если исходные концентрации веществ  $A$  и  $B$ , соответственно, равны 0,5 и 0,7 моль/л, а константа равновесия реакции  $K_c = 50$ .

*Решение:*

К моменту равновесия концентрации веществ  $A$  и  $B$  понизятся, а концентрация вещества  $C$  увеличится. На каждый моль веществ  $A$  и  $B$  образуется 2 моль вещества  $C$ , поэтому, если понижение концентрации веществ  $A$  и  $B$

обозначить через  $x$  моль, то увеличение концентрации вещества  $C$  будет равно  $2x$  моль.

Равновесные концентрации реагирующих веществ будут:

$[A] = (0,5-x)$  моль/л;  $[B] = (0,7-x)$  моль/л;  $[C] = 2x$  моль/л.

$$K = \frac{[C]^2}{[A] \cdot [B]} = \frac{2x^2}{(0,5-x)(0,7-x)} = \frac{4x^2}{0,35-0,7x-0,5x+x^2};$$

$$\frac{4x^2}{0,35-0,7x-0,5x+x^2} = 50,$$

$$4x^2 = 50(0,35-0,12x+x^2),$$

$$0 = 17,5-60x+50x^2-4x^2,$$

$$46x^2 - 60x + 17,5 = 0.$$

Решение уравнения дает:

$$x_1 = 0,44$$

$x_2 = 0,86$  – не подходит по условию.

Тогда

$$[A] = (0,5-x) = 0,5 - 0,44 = 0,06 \text{ моль/л.}$$

$$[B] = (0,7-x) = 0,7 - 0,44 = 0,26 \text{ моль/л.}$$

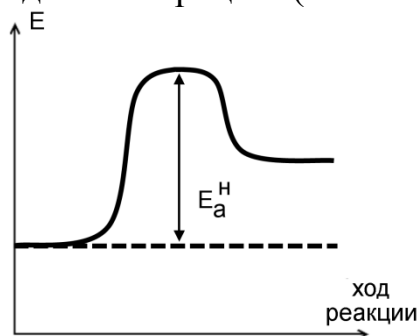
$$[C] = 2x = 2 \cdot 0,44 = 0,88 \text{ моль/л.}$$

#### 4. КАТАЛИЗ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

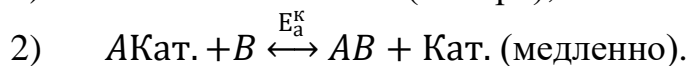
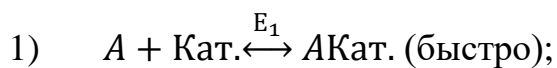
Катализатор – соединение, которое принимает участие в реакции, ускоряет ее, но в конце регенерируется.

Реакция ускоряется, т. к. катализатор меняет механизм реакции, и по новому механизму  $E_{a \text{ каталитическая}} < E_{a \text{ некаталитическая}}$  на величину, равную  $\Delta E_{\text{катализатора}}$

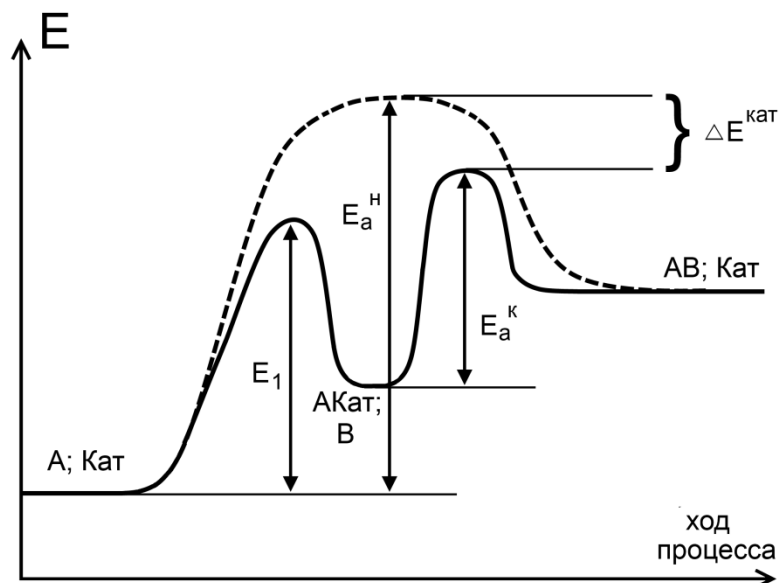
$aA + bB \xrightarrow{E_a^H} dAB$  одностадийный процесс (некаталитический).



$aA + bB \xrightarrow{\text{кат.}} dAB$  многостадийный процесс:



$$\Delta E^{\text{кат}} = E_a^{\text{н}} - E_a^{\text{к}}$$



Пунктирной линией обозначена энергетическая диаграмма некаталитической реакции.

Влияние катализатора на  $X$  и  $\Phi$ : катализатор увеличивает скорость процесса, т. е. увеличивается количество исходного реагента, которое прореагировало, следовательно,  $X \uparrow$  и  $\Phi \uparrow$ .

Катализаторы не ускоряют диффузию, поэтому для каталитических процессов, в которых скорость химических и диффузионных стадий сопоставима, активность катализатора определяется не только скоростью химических реакций, но и коэффициентами диффузии из ядра потока к поверхности катализатора и внутри пор катализатора.

### Гомогенный и гетерогенный катализ

**Гомогенный катализ.** Такой катализ может протекать в газовой или жидкой фазе. Механизм гомогенного катализа состоит в образовании между реагентами и катализаторами нестойких, промежуточных соединений, существующих в той же фазе (газовой или жидкой), после распада которых образуется продукт реакции, а катализатор регенерируется. В отличие от гетерогенно-каталитических реакций при гомогенных состав промежуточных соединений в ряде случаев можно выявить анализом. Процессы гомогенного катализа классифицируются по типу взаимодействия между реагирующими веществами и катализатором на окислительно-восстановительное и кислотное-основное взаимодействие. По фазовому состоянию гомогенные каталитические процессы делят на жидкофазные (в растворах) и газофазные.

**Гетерогенный катализ.** Этот вид катализа широко применяется в промышленности. Подавляющее большинство известных промышленных

гетерогенных каталитических процессов основано на реакциях между газообразными веществами с участием твердых катализаторов, хотя известны и другие сочетания по фазовому состоянию между реагирующими веществами и катализатором.

#### 4.1. Скорость каталитических ХТП

Мерой активности катализатора служит соотношение констант скоростей каталитической и некаталитической реакции в случае, когда  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель уравнения не изменится:

$$A_{\text{кат}} = k_{\text{кат}}/k = e^{\Delta E/RT}, \text{ где } E = E - E_{\text{кат}}$$

Время пребывания в каталитической зоне:

$$\tau = V_{\text{кат}}/V_p = h/V_2;$$

$V_{\text{кат}}$  – полный объем катализатора  $\text{м}^3$ ;

$V_p$  – расход газа  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$h$  – высота слоя катализатора;

$V_2$  – линейная скорость газа, отнесенная к полному сечению реактора,  $\text{м}/\text{ч}$ .

#### Пояснительная задача

*Условие задачи:* Реакция протекает в присутствии катализатора с объемной скоростью  $V_{\text{об}} = 125 \text{ м}^3 (\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ . Диаметр реактора  $d = 1,52 \text{ м}$ , высота  $h = 3,05 \text{ м}$ . Считая, что катализатор занимает 0,75 объема реактора, определить время контакта газа с катализатором и объем газовой смеси, проходящей через реактор в 1 ч.

*Решение:*

Определяем время контакта газа с катализатором:

$$\tau = V_{\text{кат}}/V_p = 1/V_{\text{об}} = 1/125 = 0,008 \text{ ч.}$$

Объем газа, проходящего через 1  $\text{м}^3$  катализатора, известен ( $V_{\text{об}} = 125 \text{ м}^3$ ).

Объем газа, проходящего через весь объем катализатора (расход газа):

$$V = V_{\text{кат}} \cdot V_{\text{об}}.$$

Объем катализатора:

$$V_{\text{кат}} = S_{\text{круга}} \cdot h \cdot 0,75 = (\pi \cdot d^2) / 4 \cdot h \cdot 0,75.$$

Тогда, объем газовой смеси, проходящей через реактор в 1 ч:

$$V = V_{\text{об}} \cdot (\pi \cdot d^2) / 4 \cdot h \cdot 0,75 = 125 \cdot 3,14/4 \cdot 1,52^2 \cdot 3,05 \cdot 0,75 = 518,59 \text{ м}^3.$$

## 5. БАЛАНСЫ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 5.1. Материальный баланс ХТП

Это вещественное выражение закона сохранения массы вещества, согласно которому во всякой замкнутой системе массы веществ, вступивших во взаимодействие, равно массе веществ, образовавшихся в результате этого взаимодействия, т. е. приход вещества равен его расходу.

Основывается на двух объективных законах:

1. Закон сохранения массы.
2. Закон стехиометрического соотношения: если известна масса хотя бы одного участника реакции, то можно определить массы всех оставшихся, предварительно рассчитав молярные массы участников реакции.

Материальный баланс составляется для процесса в целом или для отдельных его стадий. Методика составления материального баланса зависит от организации структуры производства (периодический, непрерывный), от типа технологической схемы, от классификации реакций (простая необратимая/обратимая, сложная обратимая/необратимая, параллельные, последовательные) и от того, как представлены исходные данные (задана производительность по продукту/смеси продуктов или указана пропускная способность по сырью).

Расчет выполняется обычно в единицах массы (кг, т) или молях. Только для газовых реакций, идущих без изменения объема, можно составить баланс в куб. метрах.

Материальный баланс составляют в зависимости от условий и на единицу, 100, 1000 единиц массы основного сырья или продукта. Очень часто баланс составляют на массовый поток в единицу времени (кг/с, т/час).

Если в условии задач нужно составить упрощенный материальный баланс, то в таком случае не нужно учитывать побочные реакции.

Если в реакции участвует воздух и вода, то их берут в избытке относительно стехиометрических коэффициентов, а расчет ведут по основному веществу, более дорогому, которое берут в недостатке.

### Уравнение материального баланса

Материальный баланс (МБ) любого ХТП или его части составляется на основании закона сохранения массы вещества.

В любом технологическом процессе масса веществ, поступивших на технологические операции, равна массе всех веществ, получившихся в результате.

Материальный баланс составляют по основной суммарной реакции с учетом параллельных и побочных реакций.

*Важно!* На практике мы имеем дело не с чистыми веществами, а с сырьем сложного состава, и для составления МБ нужно учитывать массу всех

компонентов. Расчет материального баланса основан на расчете расходных коэффициентов компонентов системы.

Технологический процесс основан на химической реакции, которая протекает по схеме:



где А и В – исходное сырье;

С и D – продукты реакции;

а, в, с, d – стехиометрические коэффициенты;

Q – тепловой эффект реакции.

$$\sum G_{\text{исх}} = \sum G_{\text{кон}},$$

где G – вес.

Если в аппарат поступает  $G_A$  кг А;  $G_B$  кг В, то в результате переработки получается  $G_C$  С и  $G_D$  D. Также, если в конечных продуктах остается часть начальных реагентов  $G'_A$  кг А;  $G'_B$  кг В.

Должно сохраниться равенство:

$$G_A + G_B = G_C + G_D + G_{\text{п}},$$

где  $G_{\text{п}}$  – производственные потери.

При составлении полного баланса обычно решают систему уравнений с несколькими неизвестными. При этом используют формулы для определения равновесного и фактического выхода, скорости и т. д.

*Теоретический материальный баланс* рассчитывается на основе стехиометрического уравнения реакции (предполагается, что нет примесей), т. е. происходит полная конверсия.

*Практический материальный баланс* учитывает состав исходного сырья и готовой продукции, избыток одного из компонентов, степень превращения, потери сырья и готового продукта.

Из данного баланса можно найти расход сырья и вспомогательных материалов на заданную мощность аппарата, себестоимость продукта, выходы, объем реакционной зоны, число реакторов, производственные потери.

На основе материального баланса составляют тепловой баланс, позволяющий определить потребность в топливе, электроэнергии, величину поверхностей, расход теплоты и хладагентов.

Формулы для пересчета объема в массу, и наоборот:

$$V(\text{в-ва}) * M_m = m * 22,4$$

$$V - \text{м}^3;$$

$M_m$  – молекулярная масса вещества;

$m$  – масса в кг;

22,4 – молярный объем газа при нормальных условиях, коэффициент пересчета.

Результаты этих расчетов обычно сводят в таблицу материального баланса.

Типовая таблица материального баланса

Приход			Расход		
Статья прихода	Кол-во, кг	Количество, м <sup>3</sup>	Статья расхода	Кол-во, кг	Кол-во, м <sup>3</sup>
Продукт А Продукт В	G <sub>А</sub> G <sub>В</sub>		Продукт А (остаток) Продукт В (остаток) Продукт С Продукт D	G <sub>А</sub> ' G <sub>В</sub> ' G <sub>С</sub> G <sub>D</sub>	
Итого	G		Потери	ΔG	
			Итого	G	

### Пояснительная задача

*Условие задачи:* На кристаллизацию поступает 5000 кг 96 % раствора аммиачной селитры. Готовый продукт содержит 99,8 % NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>. Составить материальный баланс процесса кристаллизации.

*Решение:*

Количество безводного NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>: 5000 кг · 0,96 = 4800 кг

Влаги: 5000 – 4800 = 200 кг

Готовый NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>: 4800 / 0,998 = 4810 кг

Влаги в продукте после выпарки (пары): 4810 – 4800 = 10 кг

Пары ушедшие: 200 – 10 = 190 кг

Приход		Расход	
Статья	Кол-во, кг	Статья	Кол-во, кг
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> раствор В том числе:	5000	Готовый продукт NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	4810
а) NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> безводный;	4800	В том числе:	
б) влага	200	а) NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> безводный;	4800
		б) влага	10
		Испарённая вода	190
Итого	5000	Итого	5000

### 5.2. Тепловой баланс ХТП

Тепловой (энергетический) баланс процесса составляют на основе закона сохранения энергии, в соответствии с которым в замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна, т. е. приход теплоты должен быть равен расходу его в данном процессе, аппарате, операции.

#### Приход теплоты

1. Q<sub>ф</sub> – физическая теплота материалов, поступающих в процесс или аппарат.

2.  $Q_p$  – теплота, выделившаяся в результате химической реакции.
3.  $Q_{ф.п.}$  – теплота, выделившаяся в результате физических превращений веществ (абсорбция, адсорбция, кристаллизация).
4.  $Q_o$  – теплота, подводимая извне (обогрев).

#### Расход теплоты

1.  $Q'_{ф}$  – физическая теплота продуктов, выходящих из аппарата (процесса).
2.  $Q'_p$  – теплота, которая затрачивается на эндотермическую реакцию.
3.  $Q'_{ф.п.}$  – теплота, поглощаемая в результате физических превращений (плавление, испарение, десорбция и т. д.).
4.  $Q_n$  – потери теплоты в окружающую среду.

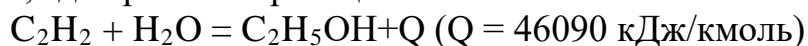
Полное уравнение теплового баланса:

$$Q_{ф} + Q_p + Q_{ф.п.} + Q_o = Q'_{ф} + Q'_p + Q'_{ф.п.} + Q_n$$

Определение каждой величины этого уравнения – главная задача для расчета ХТП и расчета аппаратов.

### **Пояснительная задача**

*Условие задачи:* Составьте тепловой баланс реактора синтеза этилового спирта, где протекает реакция:



Если исходный газ имеет состав 40 % воды и 60 %  $C_2H_2$ , скорость его подачи в реактор-гидратор 2000 м<sup>3</sup>/ч, температура на выходе 563К, а на выходе из реактора 614 К, конверсия за проход этилена 5 %. Теплоемкость продуктов на входе и выходе одинакова и равна 27,1 кДж/кмоль. Побочные процессы в окружающую среду принимаем 3 % от прихода теплоты.

*Решение:*

1. Находим состав исходного газа:

$$V_{C_2H_2} = 2000 \cdot 0,6 = 1200 \text{ м}^3, \quad V_{H_2O} = 2000 \cdot 0,4 = 800 \text{ м}^3.$$

2. Определяем состав газа на выходе из реактора:

$$V_{C_2H_2} = 1200 - 1200 \cdot 0,05 = 1140 \text{ м}^3;$$

$$V_{H_2O} = 800 - 1200 \cdot 0,05 = 740 \text{ м}^3;$$

$$V_{C_2H_5OH} = 1200 \cdot 0,05 = 60 \text{ м}^3.$$

3. Находим суммарный объем газа на выходе:

$$1140 + 740 + 60 = 1940 \text{ м}^3.$$

4. Тепловой баланс:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$$

Рассчитываем приход теплоты.

Физическая теплота газа:  $m \cdot c \cdot t$

$$Q_1 = 2000 / 22,4 \cdot 27,1 \cdot 290 \text{ (градус в цельсии)} = 701696,5 \text{ кДж.}$$

5. Теплота реакции:

$$Q_2 = 2000 / 22,4 \cdot 0,6 \cdot 46090 \cdot 0,05 = 123 \, 460 \text{ кДж.}$$

$$123 \, 460 \text{ кДж} + 701696,5 \text{ кДж} = 825156,5 \text{ кДж.}$$



6. Определяем расход теплоты.

Теплота, уносимая отходящими газами:

$$Q_3 = 1940/22,4 \cdot 27,1 \cdot 341(\text{градус в цельсии}) = 800345,4 \text{ кДж.}$$

$$Q_4 = 825156,5 \cdot 0,03 = 24754,7 \text{ кДж.}$$

$$800345,4 \text{ кДж} + 24754,7 \text{ кДж.} = 825100,1 \text{ кДж.}$$

Процесс идет с небольшим выделением теплоты.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Контрольная работа является самопроверкой степени освоения курса «ОХТ», поэтому выполнять ее надо только после изучения курса.

Контрольная работа состоит из трех частей или разделов:

1. Теоретический вопрос по курсу.
2. Применение теоретических знаний к анализу отдельных производств.
3. Решение задачи на элементы расчетов технологических процессов.

В первой части студенту требуется представить полный и исчерпывающий ответ на вопрос по теории ОХТ.

Во второй части студенту необходимо предоставить полное описание производства вещества по заданию. Написать про сырье, технологию, способ и все условия производства. Представить технологическую схему производства с описанием. На технологической схеме обязательно указать все исходные вещества, целевой продукт, побочные продукты, основную реакцию, условия (температура, давление, наличие катализаторов) и выход целевого продукта в % (не путать с концентрацией полученного продукта!), подписать названия всех аппаратов.

В третьей части контрольной работы студент решает задачу на тему изученных ранее разделов ОХТ. В отчете необходимо прописать условие задачи, что дано, химическую реакцию, решение с комментариями и с указанием всех единиц измерения, ответ пишется полным предложением.

Для выполнения контрольной работы преподавателем выдается по одному заданию из блоков вопросов, представленных ниже.

### Теоретические вопросы по курсу

1. Основные направления развития химической технологии.
2. Классификация химико-технологических процессов.
3. Понятие о химико-технологическом процессе. Показатели химико-технологического процесса: скорость, степень превращения исходного реагента, выход продукта, равновесная степень превращения исходного реагента, равновесный выход, выход от равновесного, селективность, расходные коэффициенты.
4. Сравнительная характеристика реакторов идеального смешения и идеального вытеснения. Интенсивность этих реакторов.

5. Сырье в химической промышленности. Требования к сырью. Классификация сырья. Запасы сырья. Методы обогащения твердого, жидкого и газообразного сырья.

6. Классификация реакторов. Требования, предъявляемые к реакторам. Устойчивость работы реакторов. Параметры устойчивости.

7. Гетерогенные процессы. Стадии гетерогенных процессов. Области протекания, способы определения области протекания. Интенсификация гетерогенного процесса, протекающего во внутридиффузионной области. Скорость гетерогенного процесса.

8. Катализ. Сущность катализа. Требования к катализаторам. Каталитическая активность. Понятие о гомогенном и гетерогенном катализе. Изменение энергии активации под воздействием катализатора.

9. Скорости гомогенного и гетерогенного химико-технологических процессов. Методы их повышения.

10. Гомогенные процессы. Показатели гомогенных процессов. Условия проведения процессов, обеспечивающие оптимальные значения показателей этих процессов. Расчет скоростей необратимых процессов в газовой и жидкой фазе. Закономерности процессов.

11. Области протекания ХТП. Способы повышения скорости в каждой из областей.

12. Воздух и вода как сырье для химической промышленности. Жесткость воды.

13. Технологические расчеты. Материальный баланс. Сущность.

14. Технологические расчеты. Тепловой баланс. Сущность.

15. Проведение ХТП в реальных реакторах. Понятие об идеальных реакторах. Модели идеальных реакторов. Их сравнительная характеристика. Модели реальных реакторов.

16. Качество и себестоимость химической продукции. Понятие о статьях калькуляции. Экономическая эффективность капиталовложений.

17. Экологические проблемы в химической технологии. Основные пути их решения.

18. Гетерогенные некаталитические процессы. Их закономерности. Реакторы для гетерогенных некаталитических процессов. Расчет скорости гетерогенных процессов в системе «газ-жидкость».

19. Гетерогенные некаталитические процессы. Расчет скорости гетерогенных процессов в системе «газ-твердое». Стадии процесса и типы реакторов в системе.

20. Гетерогенные некаталитические процессы. Расчет скорости гетерогенных процессов в системе «жидкость-твердое». Типы реакторов в системе.

21. Гетерогенные некаталитические процессы. Расчет скорости гетерогенных процессов в системе «жидкость-жидкость». Типы реакторов в системе.

22. Плазмохимические процессы. Химико-технологические процессы с использованием ультразвука.
23. Гомогенный катализ. Механизм.
24. Гетерогенный катализ. Теории механизма. Стадии процесса. Расчет скорости катализа протекания в кинетической области.
25. Понятие о контактных массах. Их состав. Способы приготовления. Аппаратура для гетерогенного катализа.
26. Специфические и каталитические ХТП: фотохимические, радиохимические и биохимические процессы.
27. Классификация минеральных удобрений.
28. Методы химической переработки твердого топлива.
29. Способы переработки нефти и нефтепродуктов. Состав нефти.
30. Методы переработки газообразного топлива.

### **Вопросы для анализа отдельных производств**

1. Производство метилового спирта. Физико-химические основы процесса.
2. Контактный способ производства серной кислоты. Физико-химические основы процесса.
3. Производство разбавленной азотной кислоты. Физико-химические основы процесса.
4. Синтез аммиака. Физико-химические основы процесса.
5. Схема производства этилового спирта сернокислотной гидратацией этилена. Физико-химические основы процесса.
6. Производство водорода из метана и воды. Физико-химические основы процесса.
7. Производство азотных удобрений. Физико-химические основы процесса.
8. Производство пластмасс. Физико-химические основы процесса.
9. Производство лимонной кислоты. Физико-химические основы процесса.
10. Производство вискозного волокна. Физико-химические основы процесса.
11. Производство поливинилхлорида суспензионным методом. Физико-химические основы процесса.
12. Производство фенола. Физико-химические основы процесса.
13. Производство анилина. Физико-химические основы процесса.
14. Производство бензола. Физико-химические основы процесса.
15. Производство фенолформальдегидной смолы. Физико-химические основы процесса.
16. Производство таловой канифоли. Физико-химические основы процесса.
17. Производство эпоксидных смол. Физико-химические основы процесса.
18. Производство карбоксиметилцеллюлозы. Физико-химические основы процесса.

19. Производство скипидара. Физико-химические основы процесса.
20. Производство толуола. Физико-химические основы процесса.
21. Производство силикатов. Физико-химические основы процесса.
22. Производство меди. Физико-химические основы процесса.
23. Производство алюминия. Физико-химические основы процесса.
24. Производство соляной кислоты. Физико-химические основы процесса.
25. Производство ацетилена. Физико-химические основы процесса.
26. Производство целлюлозы. Физико-химические основы процесса.
27. Производство каучука и резины. Физико-химические основы процесса.
28. Производство хлора. Физико-химические основы процесса.
29. Производство едкого натра. Физико-химические основы процесса.
30. Производство уксусной кислоты микробиологическим синтезом. Физико-химические основы процесса.

### **Задачи на элементы расчетов технологических процессов**

1. Определите выход серной кислоты, если для ее получения был взят 49 %-ный серный колчедан, из 1 т которого образовалось 0,952 т 76 % серной кислоты.

2. При получении серной кислоты контактным способом на 1 тонну обжигаемого колчедана с содержанием 42 % серы практически получается 1,2 тонны олеума, содержащего 20 % «свободного» серного ангидрида. Определить выход серной кислоты.

3. При обработке 1 т фосфорита, содержащего 62 % теоретического фосфата кальция  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , серной кислотой было получено 727,2 кг суперфосфата:  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 + 2\text{CaSO}_4$ . Определить выход суперфосфата и расходный коэффициент руды.

4. На обогатительной фабрике из 20 т медной сульфидной руды, содержащей 0,015 массовых долей  $\text{Cu}$ , получено 2 т концентрата, в котором обнаружено 14,4 %  $\text{CuS}$  (по массе). Определите выход концентрата, степень извлечения и степень извлечения меди.

5. При флотации свинцовой руды, содержащей 1,3 % свинца, получено 380 кг концентрата, содержащего 18 % свинца. Выход концентрата равен 5,5 %. Определить количество флотируемой руды, степень извлечения, степень концентрации.

6. Определите расходные коэффициенты сырья для производства 1 т фосфата аммония  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ , если исходные продукты: 55 %-ная фосфорная кислота; 98 %-ный аммиак, влаги – 2 %.

7. Негашеная известь содержит 94 %  $\text{CaO}$ , 1,2 %  $\text{CO}_2$  и 4,8 %  $\text{CaCO}_3$ . Получается она обжигом известняка, содержащего 89 %  $\text{CaCO}_3$ . Определить расходный коэффициент известняка на 1 тонну готовой извести указанного состава.

8. Вычислите расходные коэффициенты на 1 т оксида серы (IV), если содержание серы в руде серного колчедана 45 %, влаги – 1,5 %, воздух на обжиг колчедана подают с избытком в 1,5 раза.

9. Рассчитайте расходный коэффициент для 98 %-ного изопентана на 1 т изопрена, если выход изоамиленов 37 % и изопрена 45 % от теоретического.

10. Определите расходный коэффициент технического альдегида (99 %-ной чистоты) для получения 1 т уксусной кислоты:  $\text{CH}_3\text{CHO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CH}_3\text{COOH}$ , если выход кислоты по альдегиду 93,5 %.

11. Сколько потребуется карбида кальция для 0,1 м<sup>3</sup> сухого ацетилена (при н.у.), если коэффициент превращения равен 0,91?

12. Сколько дисульфида железа  $\text{FeS}_2$  содержится в 100 кг природного колчедана, если анализ показал, что серы в нем 0,42 массовой доли.

13. Сколько 78 %-ной серной кислоты требуется для получения сульфата аммония из 102 кг аммиака.

14. Сколько потребуется аммиака для получения 1 тонны азотной кислоты, если производственные потери азота составляют 6 %?

15. Определите массу аммиака и воздуха, необходимую для производства 1000 кг азотной кислоты. Степень превращения аммиака в  $\text{NO}$  – 0,97, степень абсорбции – 0,92. Концентрация аммиака в аммиачно-воздушной смеси 11,5 %.

16. 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 %  $\text{CaO}$ .

17. Составьте материальный баланс процесса упаривания 100 т раствора  $\text{NaOH}$ , если первоначальная концентрация его была 15 %-ной, а упаренного раствора 60 %-ной. Потери при упаривании составляют 0,3 %.

18. Конверсия оксида углерода (II) водяным паром протекает по реакции  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ . Степень конверсии 50 %. Составить материальный баланс процесса конверсии на 500 м<sup>3</sup> оксида углерода (при нормальных условиях). Соотношение исходных реагентов стехиометрическое.

19. Составить материальный баланс получения 1 т соды, если в процессе используется рассол, содержащий 305 г/л  $\text{NaCl}$  плотностью 1143 кг/м<sup>3</sup>. Степень кальцинации составляет 98 %.

20. Составить материальный баланс производства 1 т технического этилового спирта, содержащего 92 %  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , методом прямой гидратации этилена, если степень превращения этилена 4 %. Соотношение исходных реагентов стехиометрическое.

21. Жесткость воды равна 5,4 мг-экв ионов кальция в 1 л воды. Какое количество тринатрийфосфата  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  необходимо взять, чтобы понизить жесткость 1 т воды практически до нуля.

22. Сколько килограммов соды потребуется для устранения жесткости 1000 л воды, насыщенной сульфатом кальция при 20 °С, если растворимость последнего равна 2 г/л.

23. Минеральная вода «Нарзан» в 1 л содержит 0,3894 г ионов кальция и 0,0884 г ионов магния. Какова жесткость этой воды?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошелева, М. К. Общая химическая технология в примерах, лабораторных работах, задачах и тестах: учебное пособие / М. К. Кошелева. – 2-е изд., перераб. – Москва: ИНФРА-М, 2025. – 210 с.
2. Игнатенков, В. И. Общая химическая технология: теория, примеры, задачи: учебник для вузов / В. И. Игнатенков. – 2-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2025. – 195 с.
3. Крутский, Ю. Л. Общая химическая технология: учебное пособие / Ю. Л. Крутский; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 124 с.
4. Общая химическая технология: учебно-методическое пособие / Ф. И. Ахмаров, К. О. Камалов. – Киров: ФГБОУ ВО ВятГУ, 2015. – 25 с.
5. Общая химическая технология: сб. задач для студентов специальности 1-36 07 01 «Машины и аппараты хим. пр-в и предприятий строит. материалов» / Р. А. Андреева, И. А. Ельшина. – Новополюцк: ПГУ, 2015. – 204 с.
6. Общая химическая технология. Методология проектирования химико-технологических процессов: учебник / Под ред. Х. Э. Харлампиди. – 2-е изд., перераб. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 448 с.
7. Общая химическая технология: методические указания / сост. И. А. Степанов, Э. Л. Аким; ГОУВПО СПбТУРП. – СПб., 2008. – 28 с.
8. Общая химическая технология: учебное пособие. В 2 ч. / К. В. Брянкин, Н. П. Утробин, В. С. Орехов, Т. П. Дьячкова. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006.
9. Игнатенков, В. И. Примеры и задачи по общей химической технологии / В. И. Игнатенков, В. С. Бесков. – М.: Академкнига, 2005. – 198 с.
10. Бесков, В. С. Общая химическая технология / В. С. Бесков. – М.: Академкнига, 2005. – 452 с.
11. Основы химической технологии: учеб. для студентов технол. спец. вузов / И. П. Мухленов, А. Е. Горштейн, Е. С. Тумаркина; Под ред. И. П. Мухленова. – 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1991. – 463 с.: ил.
12. Аранская, О. С. Сборник задач и упражнений по химической технологии и биотехнологии: учеб. пособие для пед. ин-тов по спец. «Биология» / О. С. Аранская. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: Университетское, 1989. – 310 с.
13. Учеб. для химико-техн. спец. вузов. В 2-х т. Т. 1: Теоретические основы химической технологии / И. П. Мухленов, А. Я. Авербух, Е. С. Тумаркина и др.; Под ред. И. П. Мухленова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 256 с.
14. Расчёты химико-технологических процессов: учеб. пособие для вузов / под ред И. П. Мухлёнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982. – 248 с.

15. Сборник задач по химической технологии: учеб. пособие / И. И. Беляева, В. А. Трофимов, М. Ю. Тихвинская [и др.]. - М.: Просвещение, 1982. – 143 с.

16. Решетников, П. А. Сборник примеров и задач по основам химической технологии / П. А. Решетников, Н. Я. Логинов. – М.: Просвещение, 1973. – 207 с.