



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

С.А. Крылова
Р.Н. Абдрахманов
И.В. Понурко

ОБЩАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета в
качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2017

УДК 66.0(075)
ББК 35

Рецензенты:

*Заведующий кафедрой математики и естествознания
Новотроицкого филиала ФГАОУ ВПО «НИТУ «МИСиС»»,
кандидат педагогических наук*

А.В. Швалева

*Начальник отдела КХП ЦЛК ОАО «ММК»,
кандидат технических наук*

Е.Н. Степанов

*Заместитель главного инженера по науке и инновациям
ЗАО "Урал-Омега",
доктор технических наук*

М.С. Гаркави

Крылова С.А.

Общая химическая технология [Электронный ресурс] : учебное пособие / Светлана Александровна Крылова, Роберт Назымович Абдрахманов, Ирина Витальевна Понурко ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Изд. 2-е, подгот. по печ. изд. 2016 г. – Электрон. текстовые дан. (1,45 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования : IBMPC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

Учебное пособие составлено в соответствии с программой обучения в высших учебных заведениях по дисциплинам «Общая химическая технология» (направление 18.03.01 «Химическая технология»), «Основы технологии химического производства» (направление 27.03.01 «Стандартизация и метрология») и предназначено для студентов очной и заочной форм обучения. Пособие включает в себя краткие теоретические введения к разделам, многовариантные контрольные задания по выполнению химико-технологических расчетов, примеры и приложение со справочными таблицами.

УДК 66.0(075)
ББК 35

© Крылова С.А., Понурко И.В., Абдрахманов Р.Н., 2016
© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВОДА В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	5
1.1. Технологические показатели качества воды.....	6
1.2. Методы умягчения воды	10
1.3. Задачи для самостоятельного решения	20
2 . РАСЧЕТ РАСХОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ	24
2.1. Задачи для самостоятельного решения	29
3. РАСЧЕТ ШИХТЫ	37
3.1. Задачи для самостоятельного решения	40
4. БАЛАНСОВЫЕ РАСЧЕТЫ.....	42
4.1. Материальный баланс	42
4.2. Тепловые расчеты. Энергетический (тепловой) баланс.....	48
4.3. Задачи для самостоятельного решения	61
ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ ПО ПРОИЗВОДСТВАМ ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ.....	65
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	66
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ.....	69
Таблица П1	69
Свойства серной кислоты.....	69
Таблица П2	72
Плотность растворов азотной кислоты (20 ⁰ С)	72
Таблица П3	74
Факторы пересчета (аналитические множители).....	74
Таблица П4	77
Давление насыщенного водяного пара при различных температурах	77
Таблица П5	78
Теплоёмкость водных растворов азотной кислоты	78
Таблица П6	79
Свойства водных растворов фосфорной кислоты.....	79
Таблица П7	79
Удельная теплоемкость некоторых твердых веществ	79
Таблица П8	80
Удельная теплоемкость жидких веществ.....	80
Таблица П9	81
Средняя молярная теплоемкость газов от 0 до t ⁰ С при нормальном давлении	81
Таблица П10	83
Теплоты сгорания органических соединений	83
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ	85

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Общая химическая технология» входит в базовую часть учебного плана для направления подготовки бакалавров 18.03.01 «Химическая технология».

Целями освоения дисциплины являются: развитие у будущих специалистов способности проникать в сущность химико-технологических процессов, рассматривать их во взаимосвязи; умение грамотно оценивать роль и последствия развития химической индустрии для общества, принимать обоснованные эколого-технологические решения.

К объектам профессиональной деятельности бакалавров по направлениям подготовки 18.03.01 «Химическая технология» и 27.03.01 (профиль - Стандартизация и сертификация (в химической промышленности)) относятся химические вещества и материалы, оборудование, технологические процессы и промышленные системы получения веществ, материалов, изделий, а также системы регулирования и управления ими.

Для решения своих профессиональных задач бакалавр должен знать основные принципы организации химического производства, его иерархической структуры, методы оценки эффективности производства, общие закономерности химических процессов; основные химические производства; уметь рассчитывать основные характеристики химического процесса, выбирать рациональную схему производства заданного продукта, оценивать технологическую эффективность производства; владеть методами анализа эффективности работы химических производств, определения технологических показателей процесса.

Чтобы знать свойства химико-технологической системы (ХТС) и показатели ее функционирования, оценить эффективность управления процессами в ней, необходимо уметь определить состояние ХТС (элемента ХТС), выполнить его расчет и провести анализ полученных результатов.

В основу любого теххимического расчета положены два основных закона: закон сохранения массы вещества и закон сохранения энергии. На первом из них базируется материальный, на втором – энергетический, и в частности, тепловой, балансы.

Материальные расчеты являются основой технологических расчетов. Они включают в себя определение выхода основного и побочного продуктов, расходных коэффициентов. Тепловые расчеты

позволяют определить расход топлива или другого вида энергии для производства заданного количества продукта. Только определив материальные и тепловые потоки, можно произвести конструктивные расчеты производственного оборудования и коммуникаций, оценить экономическую эффективность и целесообразность процесса. Материальные и тепловые балансы рассчитываются также и на действующем производстве с целью его контроля и регулирования (особенно после ремонтов и при изменении технологических режимов).

В данном пособии представлены расчетные многовариантные задания по некоторым вопросам водоподготовки, расходным коэффициентам сырья, составлению шихты, составлению материального и теплового балансов отдельных технологических операций. При выполнении расчетных заданий можно воспользоваться справочными данными таблиц Приложения 1, а также источниками [1-11].

Пособие служит для закрепления теоретических знаний по дисциплине и предусматривает самостоятельную подготовку студентов к выполнению контрольных заданий с учетом рассмотренных примеров и рекомендаций, написанию реферата с использованием рекомендуемой литературы [12-23] и рубежному контролю по вопросам, представленным в Приложении 2.

1. ВОДА В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На химических предприятиях вода используется в качестве теплоносителя, растворителя, реагента и поэтому требования к ней различны. Однако ряд показателей, определяющих качество воды, являются доминирующими. К ним относятся: рН, содержание сухого остатка и взвешенных примесей, жесткость и окисляемость, наличие растворенного кислорода и др.

Показатели качества воды обычно подразделяют на физические, химические и бактериологические. К *физическим* относятся температура, а также цветность, мутность, привкусы и запахи воды. Последние называют также органолептическими показателями; они важны при оценке питьевых качеств воды, но имеют определенное значение и для вод тепловых сетей.

К *химическим* показателям относятся наличие катионов и анионов, содержащихся в воде; растворенных газов, а также водородный показатель воды рН.

Группируя по определенному признаку отдельные химические показатели, получают *технологические* показатели качества воды. К ним

относятся: активная реакция (рН), жесткость; щелочность; окисляемость; сухой остаток, прокаленный остаток, общее солесодержание (минерализация) и др.

Бактериологические показатели воды характеризуют эпидемиологическую безопасность ее, которая определяется степенью общего бактериального загрязнения и содержанием бактерий группы кишечной палочки.

Единичные анализы недостаточно надежно характеризуют качество воды источника водоснабжения, поэтому необходимо изучить его гидрохимический режим, т.е. получить данные о сезонном изменении состава воды за ряд лет, а также информацию о периодических сбросах в водоем промышленных сточных вод. Как минимум нужно иметь результаты анализов воды во время весеннего и осеннего паводков, летом и в середине зимы, а также располагать данными о количестве и составе сточных вод, если сброс таковых происходит. Из напорных подземных водоисточников, для вод которых характерно постоянство состава можно ограничиться анализами двух проб, взятых в разное (любое) время года. Если используются грунтовые воды из безнапорных источников (инфильтрационные, подрусловые и др.), рекомендуется анализировать не менее четырех проб.

1.1. Технологические показатели качества воды

Активная реакция (рН)

Процесс самоионизации воды $2H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + OH^-$
формально можно рассматривать как диссоциацию $H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$, которой отвечает константа равновесия

$$K = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]}$$

Поскольку степень диссоциации воды очень мала, то равновесная концентрация недиссоциированных молекул воды - $[H_2O]$ - величина постоянная, равная 55,6 моль/дм³. Следовательно, произведение концентраций ионов водорода и гидроксид-ионов является постоянной величиной при постоянной температуре и называется **ионным**

произведением воды - K_w и при 25°C составляет $1 \cdot 10^{-14}$. Соответственно в чистой воде и нейтральных растворах

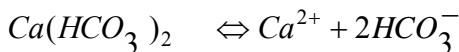
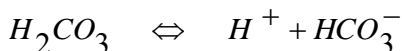
$$[H^+] = [OH^-] = \sqrt{K_w} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ моль/дм}^3 \text{ при } 25^\circ\text{C}.$$

Для удобства выражения кислотности или щелочности растворов введен **водородный показатель** – десятичный логарифм концентрации водородных ионов - $[H^+]$, взятый с обратным знаком:

$$-\lg [H^+] = pH$$

В нейтральной среде $pH=7$, в кислой $[H^+]$ больше 10^{-7} моль/дм³ и, следовательно, $pH < 7$; в щелочной $pH > 7$.

pH большинства природных вод колеблется в пределах 6,8-7,3. Постоянство pH воды имеет большое значение для нормального протекания в ней различных биологических и физико-химических процессов и обеспечивается присутствием в воде буферной системы, состоящей из угольной кислоты и гидрокарбонатов.



Концентрация водородных ионов в буферных системах определяется соотношением концентраций кислоты и соли и константой диссоциации слабого электролита

$$[H^+] = K_d(H_2CO_3) \frac{[H_2CO_3]}{[HCO_3^-]}$$

Прибавление некоторых количеств кислоты или щелочи мало изменяет pH воды. Объясняется это тем, что при прибавлении к воде некоторого количества щелочи часть ионов H^+ , образовавшихся при диссоциации угольной кислоты, связывается в малодиссоциированные молекулы воды, это вызывает диссоциацию новых количеств кислоты и восстановление первоначальной концентрации ионов H^+ .

При прибавлении к воде кислоты избыточные ионы водорода связываются ионами HCO_3^- в малодиссоциированные молекулы угольной кислоты и концентрация ионов H^+ остается неизменной.

Емкость углекислотной буферной смеси в природной воде не особенно велика, но все же дает возможность сохранить рН воды почти неизменным при различных процессах ее обработки; хлорирования, коагуляции, известковании и т.д.

Сохранение рН воды близким к нейтральному необходимо для нормального протекания некоторых процессов ее очистки и для использования ее в быту и промышленности.

Изменение рН воды свидетельствует о загрязнении ее продуктами распада органических соединений и стоками предприятий.

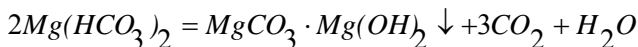
Жесткость

Жесткость воды – один из важнейших показателей ее качества и обусловлена присутствием в воде растворимых кальциевых и магниевых солей различных кислот (угольной, серной, соляной, азотной, фосфорной, кремниевой).

Количественно жесткость воды выражают числом ммоль эквивалентов (ммоль-экв) ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , содержащихся в 1 дм^3 воды.

Различают три вида жесткости: карбонатную ($J_{\text{к}}$), некарбонатную ($J_{\text{н}}$) и общую ($J_{\text{общ}}$).

Карбонатная (временная) жесткость обусловлена присутствием в воде гидрокарбонатов кальция и магния $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, которые при кипячении переходят в нерастворимые соли и выпадают в виде плотного осадка (накипи):



Некарбонатная (постоянная) жесткость обусловлена присутствием в воде кальциевых и магниевых солей серной, соляной, азотной, фосфорной и кремниевой кислот, которые при кипячении остаются в растворе.

Сумма карбонатной и некарбонатной жесткости называется **общей жесткостью**.

По степени общей жесткости природные воды подразделяют на очень мягкие (от 0 до 1,5 моль-экв/ м^3), мягкие (от 1,5 до 3 моль-экв/ м^3),

средней жесткости (3 – 8 моль-эк/м³), жесткие (8 – 11 моль-эк/м³), очень жесткие (свыше 11 моль-эк/м³). Для хозяйственно-питьевого водоснабжения допустимой считается жесткость не более 7 моль-эк/м³.

Присутствие в воде больших количеств солей, обуславливающих жесткость, нежелательно, так как они делают воду непригодной для хозяйственно-бытовых нужд. В жесткой воде плохо развариваются овощи, мыло мылится плохо при стирке белья, сокращается срок службы тканей, выпадают осадки в водопроводных трубах. Такая вода непригодна для питания паровых котлов из-за образования накипи, приводящей к перегреву котла и способствующей его быстрому разрушению. Поэтому воду перед употреблением подвергают умягчению¹.

Щелочность

Щелочность воды - суммарная концентрация содержащихся в воде анионов слабых кислот и гидроксильных ионов (выражена в ммоль/л), вступающих в реакцию с соляной или серной кислотами с образованием хлористых или сернокислых солей щелочных и щелочноземельных металлов. Виды щелочности: общая и отдельные ее формы, например бикарбонатная, карбонатная, фосфатная, силикатная, гидратная, гуматная.

Щелочность природных вод, рН которых обычно < 8,35, зависит от присутствия в воде бикарбонатов, карбонатов, иногда и гуматов. Щелочность других форм появляется в процессах обработки воды. Так как в природных водах почти всегда щелочность определяется бикарбонатами, то для таких вод общую щелочность принимают равной карбонатной жесткости.

Окисляемость

Окисляемость - величина, характеризующая содержание в воде органических и минеральных веществ, окисляемых одним из сильных химических окислителей при определенных условиях.

Виды окисляемости воды: перманганатная, бихроматная, иодатная, цериевая.

Окисляемость выражается в миллиграммах кислорода, эквивалентного количеству реагента, пошедшего на окисление органических веществ, содержащихся в 1 л воды.

¹ Для уменьшения солеотложений из воды (без изменения жесткости) может быть также применена обработка воды ингибиторами, например [24-27], обладающими одновременно и антикоррозионными свойствами.

Для природных малозагрязненных вод рекомендовано определять перманганатную окисляемость (перманганатный индекс).

Сухой остаток

Сухой остаток характеризует суммарное количество минеральных и органических примесей, содержащихся в воде в истинно-растворенном и коллоидном состояниях.

Числовое значение его определяется взвешиванием остатка после выпаривания определенного объема предварительно профильтрованной воды и выражается в мг/л.

Часть сухого остатка, которая удаляется при последующем прокаливании его, дает ориентировочное представление о содержании в воде органических веществ.

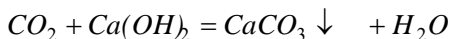
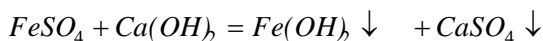
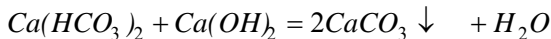
Общее солесодержание

Общее солесодержание (минерализация) – суммарное содержание всех найденных при химическом анализе воды минеральных веществ. Минерализация природных вод, определяющая их удельную электропроводность, изменяется в широких пределах. Большинство рек имеет минерализацию от нескольких десятков миллиграммов в литре до нескольких сотен. Их удельная электропроводимость варьирует от 30 до 1500 мкСм/см.

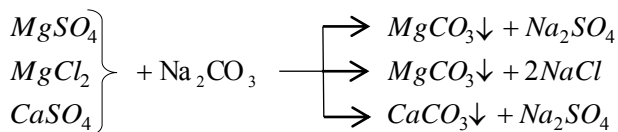
1.2. Методы умягчения воды

Умягчением воды называется ее очистка от соединений кальция и магния, обуславливающих жесткость воды. Одним из наиболее эффективных методов умягчения воды является известково-содовый в сочетании с фосфатным. Процесс умягчения основывается на следующих реакциях:

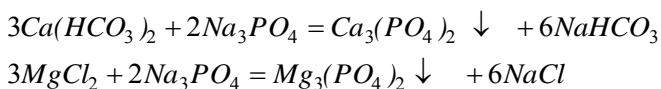
1) обработка гашеной известью для устранения временной жесткости, удаления ионов железа и связывания CO_2 :



2) обработка кальцинированной содой для устранения постоянной жесткости:



3) обработка фосфатом натрия для более полного осаждения катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} :



Растворимость фосфатов кальция и магния ничтожно мала, что обеспечивает высокую эффективность фосфатного метода.

В настоящее время для умягчения, обессоливания и обескремнивания воды широко применяется метод **ионного обмена**.

Умягчение воды методом ионного обмена

Методы, рассмотренные выше, позволяют в значительной степени снизить жесткость воды, однако, в некоторых отраслях промышленности требования к содержанию солей в воде высокие. Традиционные методы умягчения связаны со значительным расходом реагентов в связи с чем в последние десятилетия получает все более широкое распространение метод ионного обмена или ионообменная адсорбция.

Ионообменная адсорбция - это явление, при котором твердый адсорбент обменивает свои ионы на ионы такого же знака из раствора.

Особенности ионообменной адсорбции:

1. Обменная адсорбция специфична, т.е. к обмену способны только определенные ионы, по своей природе этот процесс приближается к химическим явлениям.

2. Практически необратима.

3. Протекает более медленно, чем молекулярная адсорбция.

4. Может приводить к изменению pH - среды.

Вещества, которые проявляют способность к ионному обмену, называются ионитами. Иониты имеют структуру в виде каркаса,

“сшитого” обычно ковалентными связями. Каркас имеет положительный или отрицательный заряд, который скомпенсирован противоположным зарядом подвижных ионов (противоионов). Эти противоионы могут легко заменяться на другие ионы с зарядом того же знака. Каркас выступает в роли полииона и обуславливает нерастворимость ионита в растворителях.

Иониты обычно классифицируют на следующим признакам:

- а) по происхождению: природные и синтетические
- б) по составу: неорганические и органические
- в) по знаку заряда обменивающихся ионов: катиониты, аниониты, амфолиты.

К природным неорганическим ионитам, обменивающихся катионами, относятся кристаллические силикаты, например, цеолиты: шабазит, глауконит и др.; к природным анионитам - некоторые минералы, например, апатит. Природными ионитами органического происхождения являются, например, содержащиеся в почве гуминовые кислоты - высокомолекулярные соединения с различными функциональными группами, способными к ионообмену. Они обладают амфотерными свойствами и поэтому могут обменивать как катионы, так и анионы. Природные иониты не нашли широкого практического применения, т.к. имеют ряд недостатков, в частности, они химически нестойки и не обладают достаточной механической прочностью.

Одним из простейших ионообменных материалов является сульфоголь, получаемый обработкой бурых углей концентрированной H_2SO_4 при нагревании. Неорганические иониты – пермутиты. Это искусственно приготовленные зернистые материалы, по своей природе являющиеся алюмосиликатами. Их получают сплавлением кварца (SiO_2) с каолином (Al_2O_3) и содой (Na_2CO_3). Состав может быть условно обозначен $[Na_2II]$.

В настоящее время наибольшее значение приобрели различные ионообменные смолы. В зависимости от того, какие ионы в этих смолах обмениваются – катионы или анионы, различают катиониты и аниониты.

Широкое распространение получили иониты на основе высокомолекулярных органических полимерных соединений - ионообменные смолы.

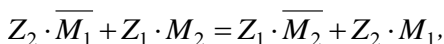
Преимущество ионообменных смол:

- высокая механическая прочность;
- высокая химическая стойкость;
- большая сорбционная емкость: часто обмен ионами идет по всему объему смолы поскольку структура решетки смолы проницаема для растворенных ионов. Размеры зерен ионитов в пределах от 250 мкм

до 2,0 мм. Смолы, способные обменивать катионы, называют катионитами, в их составе находятся активные группы: $-\text{SO}_3\text{H}$; $-\text{COOH}$; $-\text{OH}$ (фенольные). Например, фенолформальдегидные смолы.

Смолы, способные обмениваться анионами называют анионитами, они содержат активные группы: $-\text{NH}_2$, $=\text{NH}$, $\equiv\text{N}$, $-\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$.

Если ионит привести в контакт с раствором электролита, то через определенное время установится равновесие между концентрациями ионов в ионите и в растворе. Это равновесие называется ионообменным равновесием. Ионообменную реакцию с участием ионов разных по величине зарядов можно представить следующим уравнением:



где Z_1 и Z_2 - заряды обменивающихся ионов M_1 и M_2 соответственно.

Константа равновесия этой реакции, называемая константой ионного обмена, равна:

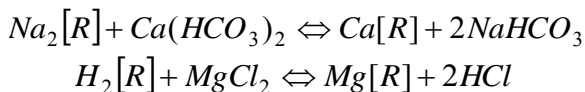
$$K = \frac{\left(\overline{C_{M_2}}\right)^{Z_1} \cdot \left(C_{M_1}\right)^{Z_2}}{\left(\overline{C_{M_1}}\right)^{Z_2} \cdot \left(C_{M_2}\right)^{Z_1}}$$

где $\overline{C_{M_1}}$, $\overline{C_{M_2}}$ - концентрация ионов в ионите;

C_{M_1} , C_{M_2} - концентрация ионов в растворе.

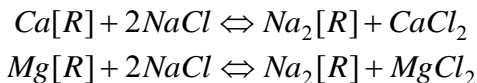
Методы ионного обмена применяются как для умягчения воды, так и для ее обессоливания. По виду обмениваемых ионов катиониты подразделяют на катиониты в натриевой форме $-\text{Na}_2[\text{R}]$ (для умягчения воды), катиониты в водородной форме (для обессоливания воды).

При пропускании воды через колонку, заполненную Na – катионитом, происходят обменные реакции:

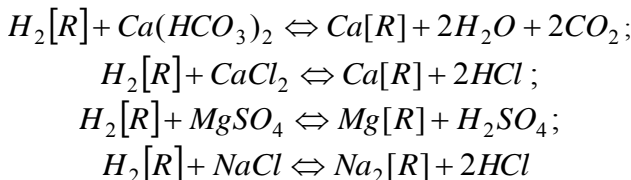


где $[R]$ – практически нерастворимый анион ионита. Вода полностью освобождается от катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} .

Когда все ионы Na^+ в катионите заменятся на Ca^{2+} и Mg^{2+} , катион утрачивает способность смягчать воду, но он может быть легко восстановлен – регенерирован концентрированным раствором $NaCl$:

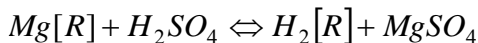


Сущность H – катионирования состоит в реакции обмена протона H^+ из катиона на ионы Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} в воде.

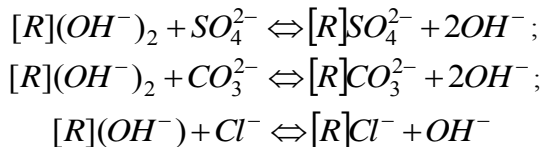


В результате обработки в воде вместо солей появляется эквивалентное количество кислоты. Происходит обессоливание воды.

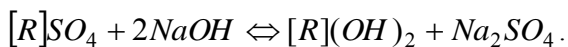
Регенерация H^+ – катионов осуществляется раствором кислоты:



Аниониты способны к обмену ионов только в кислой среде. С помощью анионитов осуществляется обмен всех кислотных анионов, содержащихся в воде, на ионы OH^- :



Аниониты регенерируются раствором $NaOH$:



Количественными показателями, позволяющими оценить емкость ионитов, являются полная и динамическая обменные емкости.

Полная обменная емкость (ПОЕ) показывает максимальное количество ионов, которое может быть поглощено ионитом при его насыщении. Это постоянная величина для данного ионита, которая определяется как в статических, так и в динамических условиях. Данный показатель рассчитывается по формуле (1):

$$ПОЕ = \frac{C \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где ПОЕ – полная обменная емкость, моль-экв/кг, С – молярная концентрация эквивалентов ионов в вытесненном растворе, моль-экв/л; V – суммарный объем раствора, содержащий вытесненные из смолы ионы, л; m – масса ионообменной смолы в колонке, кг.

В динамических условиях, в процессе фильтрации раствора через определенное количество ионита определяют динамическую обменную емкость (ДОЕ) – количество ионов, поглощенных ионитом до проскока сорбируемых ионов. Емкость до проскока (рабочая емкость), определяется несколькими факторами: свойствами ионита, составом исходного раствора, скорости его пропускания через слой ионита, высоты (длины) слоя ионита, степени его регенерации и размера зерен.

Кроме перечисленных методов на практике применяются еще магнитные, ультразвуковые, электрохимические и другие методы обработки воды.

Частичное удаление солей из воды может быть осуществлено путем вымораживания. Этот способ применяется для опреснения морской воды. При замерзании воды основная масса солей остается в незамерзшей воде, а лед сравнительно мало содержит солей.

Вода, используемая для питьевых нужд, подвергается очистке от взвесей (коагуляцией, осветлением) и обеззараживанию с помощью жидкого хлора, хлорной извести, озона.

Пример 1. Какую массу соды нужно добавить к 100 л воды, чтобы устранить ее жесткость, равную 5 ммоль-эк/дм³?

Решение.

Сода (Na_2CO_3) используется для устранения солей некарбонатной (постоянной) жесткости. Согласно закону эквивалентов

$$n_{\text{эк}}(\text{Na}_2\text{CO}_3) = n_{\text{эк}}(\text{соли}).$$

Определим количество моль эквивалентов солей, которое необходимо устранить

$$n_{\text{эк}}(\text{соли}) = \frac{J_n \cdot 100}{1000} = 5/10 = 0,50 \text{ моль} - \text{эк}.$$

Затем найдем массу соды для устранения жесткости воды:

$$m(\text{Na}_2\text{CO}_3) = n_{\text{эк}}(\text{соли}) \cdot M_{\text{эк}}(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 0,5 \cdot 106 \cdot 1/2 = 26,5 \text{ г}$$

Ответ: 26,5 г.

Пример 2. Вычислите временную жесткость воды, зная, что в 250 л ее содержится 202,5 г $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

Решение. Временная (карбонатная) жесткость воды обусловлена наличием соли гидрокарбоната кальция и вычисляется:

$$J_k = \frac{n_{\text{эк}}(\text{соли})}{V_{\text{воды}}} = \frac{m(\text{соли})}{M_{\text{эк}}(\text{соли}) \cdot V_{\text{воды}}} = \\ = \frac{202,5}{81 \cdot 250} 1000 = 10 \text{ ммоль} - \text{эк} / \text{дм}^3$$

Молярная масса эквивалента $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ равна:

$$M_{\text{эк}}(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2) = 162 \cdot 1/2 = 81 \text{ г} / \text{моль} - \text{эк}$$

Ответ: 10 ммоль-эк/дм³.

Пример 3. Определите массу CaSO_4 , содержащегося в 1 м³ воды, если жесткость, обусловленная присутствием этой соли, равна 4 ммоль/дм³?

Решение: Воспользуемся формулой для определения жесткости

$$J = \frac{n_{\text{эк}}(\text{соли})}{V_{\text{воды}}} = \frac{m(\text{соли})}{M_{\text{эк}}(\text{соли}) \cdot V_{\text{воды}}}$$

Откуда определим массу CaSO_4 :

$$m(\text{CaSO}_4) = \mathcal{K} \cdot M_{\text{эк}}(\text{CaSO}_4) \cdot V_{\text{воды}} = \frac{4}{1000} \cdot 68 \cdot 1000 = 272 \text{ г}$$

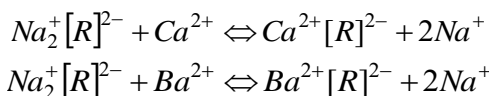
Молярная масса эквивалента CaSO_4 равна:

$$M_{\text{эк}}(\text{CaSO}_4) = 136 \cdot 1/2 = 68 \text{ г/моль} - \text{эк}$$

Ответ: 272 г.

Пример 4. Полная обменная емкость (ПОЕ) сухого сульфокатионита массой 500 г в натриевой форме составляет 4,2 моль-экв/кг. Определите предельно возможное количество (в граммах) ионов кальция и ионов бария, которое может сорбировать из соответствующих растворов данный ионит. Составьте уравнения процессов катионирования.

Решение: при Na-катионировании вода, содержащая катионы кальция или ионы бария пропускается через слой Na-катионита. При этом ионы Ca^{2+} и Ba^{2+} из соответствующих растворов обмениваются на ионы Na^+ из катионита:



Обмен происходит по закону эквивалентов, т.е.

$$\begin{aligned} n_{\text{эк}}(\text{Ca}^{2+}) &= n_{\text{эк}}(\text{Na}^+); \\ n_{\text{эк}}(\text{Ba}^{2+}) &= n_{\text{эк}}(\text{Na}^+). \end{aligned}$$

Молярные массы эквивалентов катионов кальция и бария, находящихся в растворе и катиона натрия:

$$\begin{aligned} M_{\text{эк}}(\text{Ca}^{2+}) &= \frac{M(\text{Ca}^{2+})}{2} = \frac{40}{2} = 20 \text{ г/моль}; \\ M_{\text{эк}}(\text{Ba}^{2+}) &= \frac{M(\text{Ba}^{2+})}{2} = \frac{137,3}{2} = 68,65 \text{ г/моль}; \\ M_{\text{эк}}(\text{Na}^+) &= M(\text{Na}^+) = 23 \text{ г/моль}; \end{aligned}$$

ПОЕ катионита составляет 4,2 моль-экв/кг, следовательно, катионит массой 500 граммов будет способен обменять 2,1 моль-экв катионов натрия (или ионов бария) на другие катионы.

Масса сорбируемых ионов составит:

$$m(\text{Ca}^{2+}) = M_{\text{эк}}(\text{Ca}^{2+}) \cdot \text{ПОЕ} = 20 \cdot 2,1 = 42\text{г};$$

$$m(\text{Ba}^{2+}) = M_{\text{эк}}(\text{Ba}^{2+}) \cdot \text{ПОЕ} = 68,65 \cdot 2,1 = 144,165\text{г}.$$

Ответ: 42 г ионов кальция или 144,165 г ионов бария.

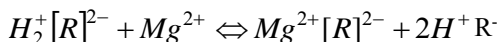
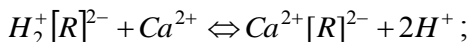
Пример 5. Рассчитайте количество катионита в водородной форме и анионита в гидроксильной форме, необходимого для очистки воды содержащей хлорид натрия, сульфат магния, гидрокарбонат кальция. Полная обменная емкость (ПОЕ) катионита и анионита приведены в таблице 1. Составьте уравнения процессов обессоливания.

Таблица 1

Данные для примера 5

Объем воды, л	Содержание солей, г/л			ПОЕ, моль-экв/кг	
	NaCl	MgSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Катионит	Анионит
500	0,020	0,050	0,100	5,0	5,0

Решение: при Н-катионировании вода, содержащая катионы натрия, магния, кальция пропускается через слой Н-катионита. При этом ионы Na⁺, Ca²⁺ и Mg²⁺ из раствора обмениваются на ионы Na⁺ из катионита:



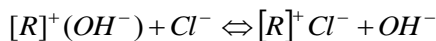
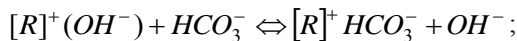
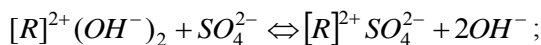
Обмен происходит по закону эквивалентов, т.е.

$$n_{\text{эк}}(Na^+) = n_{\text{эк}}(H^+);$$

$$n_{\text{эк}}(Ca^{2+}) = n_{\text{эк}}(H^+);$$

$$n_{\text{эк}}(Mg^{2+}) = n_{\text{эк}}(H^+).$$

При ОН-анионировании вода, содержащая анионы хлора, сульфата, гидрокарбоната пропускается через слой ОН-анионита. При этом ионы Cl^- , SO_4^{2-} и HCO_3^- из раствора обмениваются на ионы OH^- из анионита:



Обмен происходит по закону эквивалентов, т.е.

$$n_{\text{эк}}(HCO_3^-) = n_{\text{эк}}(OH^-);$$

$$n_{\text{эк}}(Cl^-) = n_{\text{эк}}(OH^-);$$

$$n_{\text{эк}}(SO_4^{2-}) = n_{\text{эк}}(OH^-).$$

Рассчитаем молярные массы эквивалентов хлорида натрия, сульфата магния, гидрокарбоната кальция:

$$M_{\text{эк}}(NaCl) = M(NaCl) = 58,5 \text{ г / моль};$$

$$M_{\text{эк}}(MgSO_4) = \frac{M(MgSO_4)}{2} = 60 \text{ г / моль};$$

$$M_{\text{эк}}(Ca(HCO_3)_2) = \frac{M(Ca(HCO_3)_2)}{2} = 81 \text{ г / моль};$$

Рассчитаем массу каждой соли в 500 л воды:

$$m(NaCl) = m_{\text{уд}}(NaCl) \cdot V_{\text{воды}} = 0,020 \cdot 500 = 10 \text{ г};$$

$$m(MgSO_4) = m_{\text{уд}}(MgSO_4) \cdot V_{\text{воды}} = 0,050 \cdot 500 = 25 \text{ г};$$

$$m(Ca(HCO_3)_2) = m_{\text{уд}}(Ca(HCO_3)_2) \cdot V_{\text{воды}} = 0,100 \cdot 500 = 50 \text{ г};$$

Рассчитаем количество эквивалентов солей кальция, магния, натрия:

$$n_{\text{эк}}(NaCl) = \frac{m(NaCl)}{M_{\text{эк}}(NaCl)} = \frac{10}{58,5} = 0,171 \text{ моль-эк};$$

$$n_{\text{эк}}(\text{MgSO}_4) = \frac{m(\text{MgSO}_4)}{M_{\text{эк}}(\text{MgSO}_4)} = \frac{25}{60} = 0,417 \text{ моль-эк};$$

$$n_{\text{эк}}(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2) = \frac{m(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2)}{M_{\text{эк}}(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2)} = \frac{50}{81} = 0,617 \text{ моль-эк};$$

Количество эквивалентов катионов будет равно количеству эквивалентов их солей:

$$n_{\text{эк}}(\text{Na}^+) = n_{\text{эк}}(\text{NaCl}) = 0,171 \text{ моль-эк};$$

$$n_{\text{эк}}(\text{Mg}^{2+}) = n_{\text{эк}}(\text{MgSO}_4) = 0,417 \text{ моль-эк};$$

$$n_{\text{эк}}(\text{Ca}^{2+}) = n_{\text{эк}}(\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2) = 0,617 \text{ моль-эк}.$$

Общее количество эквивалентов катионов составит 1,21 моль-экв. Следовательно, масса катионита с полной обменной емкостью 5 моль-экв на 1 кг, которая потребуется для обмена 1,21 моль-экв составит 0,242 кг.

Общее количество эквивалентов анионов равно общему количеству эквивалентов катионов составит 1,21 моль-экв. Следовательно, масса анионита с полной обменной емкостью 5 моль-экв на 1 кг, которая потребуется для обмена 1,21 моль-экв составит 0,242 кг.

Ответ: Количество катионита в водородной форме и анионита в гидроксильной форме, необходимого для очистки воды содержащей хлорид натрия, сульфат магния, гидрокарбонат кальция составит в обоих случаях 0,242 кг.

1.3. Задачи для самостоятельного решения

Перед подстановкой численных значений величин в формулы проверьте соответствие единиц измерения!

Задача 1.1

1.1.1. Умягчение воды проводится известково-содовым методом. Составьте уравнения реакций и рассчитайте массы извести и соды, требующиеся для устранения жесткости. Данные для расчета см табл.2.

Таблица 2

Данные к задаче 1.1.1

Исходные данные	Вариант				
	1	2	3	4	5
Общая жесткость воды, ммоль·эк/дм ³	10,0	9,5	12,2	7,4	6,5
Карбонатная жесткость воды, ммоль·эк/дм ³	7,0	2,0	4,5	4,5	5,5
Содержание СаО в технической извести, %	75,0	80,0	82,0	86,0	89,0
Содержание Na ₂ CO ₃ в технической соде, %	98,0	97,5	97,2	98,5	97,0
Объем обрабатываемой воды, дм ³	3,0	30	100	5,0	12,0

1.1.2. Определить карбонатную, некарбонатную и общую жесткость воды заданного состава.

Какая масса гидроксида кальция потребуется для устранения карбонатной жесткости воды? Данные для расчета см табл.3.

Таблица 3

Данные к задаче 1.1.2

Исходные данные	Вариант				
	6	7	8	9	10
Содержание солей в воде, г/ дм ³					
CaSO ₄	0,20	0,22	0,13	0,25	0,30
CaCl ₂	0,15	0,30	0,09	0,10	0,05
MgSO ₄	0,05	0,10	0,11	0,08	0,10
MgCl ₂	0,07	0,10	0,15	0,09	0,05
Ca(HCO ₃) ₂	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Объем обрабатываемой воды, дм ³	1	100	50	10	25

1.1.3. Определить карбонатную, некарбонатную и общую жесткость воды заданного состава.

Какая масса солей выпадет в виде накипи, если кипятить воду в одной и той же емкости до полного устранения карбонатной жесткости? Данные для расчета см табл.4.

Таблица 4

Данные к задаче 1.1.3

Исходные данные	Вариант				
	11	12	13	14	15
Содержание солей в воде, г/ дм ³					
CaSO ₄	0,24	0,33	0,45	0,32	0,50
MgSO ₄	0,12	0,18	0,28	0,30	0,10
Ca(HCO ₃) ₂	0,24	0,30	0,35	0,35	0,15
Mg (HCO ₃) ₂	0,10	0,05	0,15	0,20	0,07
Объем обрабатываемой воды, дм ³	1	100	50	10	20

1.1.4. Определить расход реагента Na₃PO₄ · 12 H₂O для умягчения воды в 2 раза, если жесткость обусловлена только гидрокарбонатами и хлоридами кальция. Данные для расчета см табл.5.

Таблица 5

Данные к задаче 1.1.4.

Исходные данные	Вариант				
	16	17	18	19	20
Общая жесткость воды, ммоль·эк/дм ³	6,0	7,5	8,2	8,8	7,5
Карбонатная жесткость воды, ммоль·эк/дм ³	4,0	6,0	3,2	5,5	2,5
Объем обрабатываемой воды, дм ³	0,5	1,0	2,0	3,0	1,0

Задача 1.2

1.2.1. Определите предельно возможное количество (в граммах) ионов, которое может сорбировать из соответствующих растворов сульфокатионит. Составьте уравнения процессов катионирования. Данные для расчета см табл.6.

Таблица 6

Данные к задаче 1.2.1.

Вариант	Масса ионита, кг	Сорбируемые ионы			ПОЕ, моль-экв/кг
					Катионит
1	1	Mg ²⁺	Ni ²⁺	Mn ²⁺	4,2
2	1,3	Ag ⁺	Ba ²⁺	Al ³⁺	4,5
3	0,9	Mn ²⁺	Cu ²⁺	Mg ²⁺	4,9
4	1,2	Mg ²⁺	Ag ⁺	Ba ²⁺	5,3
5	1,5	Ni ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	6,8
6	1,7	Mg ²⁺	Ag ⁺	Cu ²⁺	5,0
7	1,9	Cu ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	6,0

1.2.2. Рассчитайте количество сульфокатионита в водородной форме и анионита в гидроксильной форме, необходимого для очистки воды содержащей хлорид натрия, сульфат магния, гидрокарбонат кальция. Составьте уравнения процессов обессоливания. Данные для расчета см табл.7.

Таблица 7

Данные к задаче 1.2.2.

Вариант	Объем воды, м ³	Содержание солей, г/л			ПОЕ, моль-экв/кг	
		NaCl	MgSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Катионит	Анионит
8	1000	0,025	0,040	0,120	4,2	3,5
9	950	0,028	0,037	0,134	4,5	3,7
10	1250	0,034	0,033	0,143	4,9	4,1
11	1310	0,037	0,023	0,151	5,3	4,3
12	1050	0,041	0,015	0,161	6,8	4,7
13	1850	0,044	0,013	0,173	7,9	5,1
14	1710	0,047	0,003	0,181	8,3	6,3

1.2.3. Определите, какое количество (в кг) морской воды можно обессолить с помощью хроматографических колонок, содержащих катионит и анионит с заданной динамической обменной емкостью (ДОЕ). Соли, содержащиеся в морской воде, представлены в основном хлоридом натрия, магния, а также сульфатом магния. Составьте уравнения процессов обессоливания. Данные для расчета см табл.8.

Таблица 8

Данные к задаче 1.2.3.

Вариант	Объем воды, м ³	Содержание солей, масс%			ДОЕ, моль-экв/кг	
		NaCl	MgSO ₄	MgCl ₂	Катионит	Анионит
15	1000	2,74	0,40	0,32	4,3	3,4
16	950	0,028	0,37	0,34	4,6	3,8
17	1250	0,034	0,33	0,43	4,8	4,0
18	1310	0,037	0,23	0,51	5,2	4,4
19	1050	0,041	0,45	0,31	6,6	4,6
20	1210	0,028	0,40	0,43	4,6	4,4

2. РАСЧЕТ РАСХОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Расходные коэффициенты – величины, характеризующие расход различных видов сырья, воды, топлива, электроэнергии, пара на единицу вырабатываемой продукции.

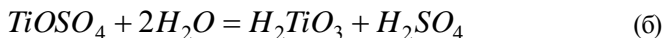
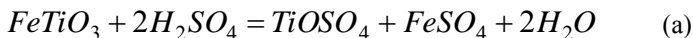
$$F_p = \frac{G_{\text{сырья}}}{G_{\text{продукта}}}$$

Теоретические расходные коэффициенты учитывают стехиометрические соотношения, по которым происходят химические превращения.

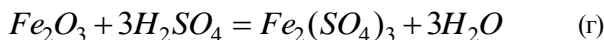
Практические расходные коэффициенты учитывают не только стехиометрические соотношения, но и производственные потери на всех стадиях процесса, а также возможные побочные реакции.

Пример 6. Рассчитать расходные коэффициенты ильменитовой руды и 80 % серной кислоты (с 50% избытком от теоретического количества) для получения 1т TiO₂, если содержание титана в руде составляет 24,3% (масс.), а степень

разложения $FeTiO_3$ 89%. В состав ильменитовой руды входят $FeTiO_3$ и Fe_2O_3 .
Получение TiO_2 идет по следующим реакциям:



Fe_2O_3 также реагирует с H_2SO_4 (побочная реакция):



Решение.

1. Определим состав руды, т.е. содержание в ней $FeTiO_3$ и Fe_2O_3 . Для этого сначала найдем содержание Ti в чистом ильмените:

по стехиометрическому соотношению:

1 кмоль $FeTiO_3$ содержит 1 кмоль Ti

или 152 кг $FeTiO_3$ - 48 кг Ti

Молярные массы, кг/кмоль: $FeTiO_3$ -152, Ti - 48.

Массовое содержание титана $\omega(Ti) = \frac{48}{152} 100 = 31,5\%$.

По условию содержание Ti в руде составляет 24,3% из-за содержания примеси в виде Fe_2O_3 .

Найдем содержание $FeTiO_3$ в руде:

$$31,5 - 100\%$$

$$24,3 - x, \quad x = 78\%$$

Значит, Fe_2O_3 в руде содержится $100 - 78 = 22\%$.

2. Определим расход $FeTiO_3$ для получения 1 т TiO_2 по реакциям (а) - (в):

1 кмоль $FeTiO_3$ - 1 кмоль TiO_2

или 152 кг $FeTiO_3$ - 80 кг TiO_2

x кг - 1000 кг, $x = 1900$ кг,

3. С учетом степени разложения $FeTiO_3$ его расход увеличится и составит: $1900 : 0,89 = 2130$ кг,

4. Расход руды с учетом содержания в ней $FeTiO_3$ составит :

$$2130 : 0,78 = 2731 \text{ кг.}$$

5. Определим расход H_2SO_4 :

- по реакции (а): 1 кмоль FeTiO_3 - 2 кмоль H_2SO_4
 или 152 кг - 2·196 кг
 по условию задачи 1900 кг - x , $x = 2450$ кг

- по реакции (б): 1 кмоль Fe_2O_3 - 3 кмоль H_2SO_4
 160 кг - 294 кг
 (2731·0,22) кг - x , $x = 1104$ кг

Всего $2450 + 1104 = 3554$ кг.

С учетом 50%-го избытка от теоретического: $3554 \cdot 1,5 = 5331$ кг.

С учетом 80%-ой концентрации: $5331 : 0,8 = 6664$ кг

Ответ: руды 2731 кг, кислоты 6664 кг.

Пример 7. Определить теоретический расход бурого угля (содержащего 70%(масс) углерода), водяного пара и воздуха для получения 1000 м³ генераторного газа состава, %(об): H_2 -18; CO - 40, N_2 - 42. Состав воздуха принять, %(об): O_2 -21, N_2 -79. Процесс газификации протекает по реакциям:



Решение.

1). В составе генераторного газа кислород отсутствует. Значит, поступивший с воздухом кислород полностью израсходовался на реакцию (б). Определим расход кислорода на реакцию (б) по содержанию азота (42%) в генераторном газе.

В 1000 м³ газа содержится N_2 : $1000 \cdot 0,42 = 420$ м³.

420 м³ - 79 %(об) N_2 в составе воздуха,

x - 21 %(об) O_2 в составе воздуха

Следовательно, расход кислорода по реакции (б) составит

$$x = \frac{420 \cdot 21}{79} = 112 \text{ м}^3 \text{ или}$$

Расход воздуха: $420 + 112 = 532$ м³.

2). Определим расход водяного пара.

В 1000 м^3 генераторного газа содержится H_2 : $1000 \cdot 0,18 = 180 \text{ м}^3$.

По реакции (а) :
1 кмоль H_2 - 1 кмоль H_2O
 180 м^3 - $x \text{ м}^3$
 $x = 180 \text{ м}^3$

3). Определим расход углерода.

По реакции (а) :
1 кмоль C - 1 кмоль H_2
12 кг - $22,4 \text{ м}^3$
 x - 180 м^3
 $x = \frac{180 \cdot 12}{22,4} = 96,5 \text{ кг}$

По реакции (б) :
2 кмоль C - 1 кмоль O_2
 $2 \cdot 12 \text{ кг}$ - $22,4 \text{ м}^3$
 x - 112 м^3
 $x = \frac{112 \cdot 2 \cdot 12}{22,4} = 120 \text{ кг}$

Всего углерода $96,5 + 120 = 216,5 \text{ кг}$.

Расход угля, содержащего 70 % C : $216,5 : 0,7 = 310 \text{ кг}$.

Ответ: 310 кг угля, 532 м^3 воздуха, 180 м^3 водяного пара.

Пример 8. Определить объемы растворов соляной кислоты с концентрациями $\omega_1 = 34\%$ (плотность $1,17 \text{ г/см}^3$) и $\omega_2 = 15,5\%$ (плотность $1,07 \text{ г/см}^3$) , которые необходимо взять для приготовления примерно 1 дм^3 раствора этой кислоты с концентрацией $\omega_{см} = 20,4\%$ (плотность $1,10 \text{ г/см}^3$) .

Решение.

Определим массу HCl , которая должна содержаться в 1 дм^3 20%-ного раствора HCl из формулы

$$\omega_{см} = \frac{m^{см}(HCl) \cdot 100}{m_p^{см}} .$$

Для этого сначала определим массу 1 дм^3 приготовленного раствора

$$m_p^{cm} = V_p^{cm} \cdot \rho_p^{cm} = 1000 \cdot 1,10 = 1100 \text{ г}$$

Затем массу HCl :

$$m^{cm}(HCl) = \omega_{cm} \cdot m_p^{cm} / 100 = 20,4 \cdot 1100 / 100 = 224,4 \text{ г}$$

Эта масса складывается из суммы масс HCl , поступивших из первого и второго исходных растворов

$$m^{cm}(HCl) = m_1(HCl) + m_2(HCl) = 1100 \text{ г} \quad (\text{а})$$

Выразим их из уравнений

$$\omega_1 = \frac{m_1(HCl) \cdot 100}{m_{p1}} \quad \text{и} \quad \omega_2 = \frac{m_2(HCl) \cdot 100}{m_{p2}}$$

получим выражения

$$m_1(HCl) = \omega_1 \cdot m_{p1} / 100 = 34,0 \cdot m_{p1} / 100 = 0,34m_{p1}, \text{ г} \quad (\text{б})$$

и

$$m_2(HCl) = \omega_2 \cdot m_{p2} / 100 = 15,5 \cdot m_{p2} / 100 = 0,155m_{p2}, \text{ г} \quad (\text{в})$$

Три уравнения (а)-(в) содержат четыре неизвестных, поэтому для решения необходимо еще одно уравнение, которое получим из аддитивности масс растворов:

$$m_p^{cm} = m_{p1} + m_{p2} = 1100 \text{ г} \quad (\text{г})$$

Решая систему уравнений (а)-(г) получим

$$m_{p2} = 808,64 \text{ г}; \quad m_{p1} = 291,35 \text{ г}$$

Пересчитаем полученные массы на объем растворов

$$V_{p2} = m_{p2} / \rho_{p2} = 808,64 / 1,07 = 755,7 \text{ см}^3$$

$$V_{p1} = m_{p1} / \rho_{p2} = 291,35 / 1,17 = 249,0 \text{ см}^3.$$

Ответ: 755,7 см³; 249,0 см³.

2.1. Задачи для самостоятельного решения

Задача 2.1.

2.1.1. Рассчитать расход алунитовой руды, содержащей ... % Al₂O₃, для получения ... т алюминия, если потери алюминия на всех стадиях производства составляют ... % (масс.)

Алунит $3Al_2O_3 \cdot K_2O \cdot 4SO_3 \cdot 6H_2O$ (M=828 г/моль). Данные для расчета приведены в табл.9.

Таблица 9

Данные к задаче 2.1.1

Исходные данные	Вариант				
	1 (16)	2 (17)	3 (18)	4(19)	5(20)
Масса готового продукта (Al), т	1,0	0,5	0,8	1,2	0,7
Содержание Al ₂ O ₃ в алунитовой руде, %	21,0	25,0	23,5	24,0	22,5
Потери Al, % (масс)	8,0	9,0	10,0	9,5	8,5

2.1.2. Определить расход сырья (известь, кокс) для производства ... т карбида кальция (техн.) указанного состава. Данные для расчета приведены в табл.10. Уравнение реакции $CaO + 3C = CaC_2 + CO$

Таблица 10

Данные к задаче 2.1.2

Исходные данные	Вариант				
	6 (21)	7(22)	8(23)	9(24)	10(25)
Масса продукта - карбида кальция (техн.), т	1,0	1,5	5,0	10,0	2,0
Состав техн. продукта, % (масс)					
CaC_2	78	80	82	81	79
CaO	14,5	9,0	8,0	12,0	13,0
C	4,0	5,0	4,5	3,0	3,5
прочие примеси	3,5	6,0	5,5	4,0	4,5
Содержание CaO в извести, % (масс)	97,0	97,5	96,0	95,0	94,0
Содержание в коксе, % (масс)					
зола	4,0	5,0	4,5	3,0	3,5
летучие	3,0	3,5	2,0	1,0	1,5
влага	2,8	3,6	3,0	2,5	3,2

2.1.3. Определить расход сырья (поваренная соль, купоросное масло) для производства ... т сульфата натрия (в расчете на чистый Na_2SO_4). Данные для расчета приведены в табл.11.

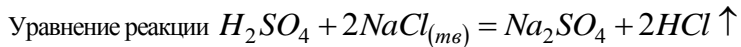


Таблица 11

Данные к задаче 2.1.3

Исходные данные	Вариант				
	11	12	13	14	15
Масса продукта (Na_2SO_4), т	1,0	0,5	0,7	1,2	2,0
Содержание основных компонентов в сырье, % (масс)					
$NaCl$	96,0	95,5	97,0	96,5	97,5
H_2SO_4	93,0	92,0	95,0	94,0	93,5
Степень разложения $NaCl$ (масс доли)	0,9	0,93	0,95	0,96	0,94

Задача 2.2.

2.2.1. Рассчитать расход сырья (технического сульфата натрия и электролитического водорода) для производства ... т технического сульфида натрия. На побочные реакции расходуется 2% сульфата натрия и водорода от теоретически необходимого количества. Данные для расчета указаны в табл. 12. Уравнение реакции $Na_2SO_4 + 4H_2 = Na_2S + 4H_2O$

Таблица 12

Данные к задаче 2.2.1

Исходные данные	Вариант				
	1 (16)	2 (17)	3 (18)	4(19)	5(20)
Масса продукта (сульфид натрия техн.), т	1,0	0,5	0,7	1,2	2,0
Содержание Na_2S в продукте, % (масс)	95,0	95,5	97,0	96,5	97,5
Содержание основных компонентов в сырье, % (масс)					
Na_2SO_4	96,0	95,5	97,0	96,5	97,5
H_2	97,0	98,0	95,0	94,0	93,0

2.2.2. Рассчитать объем воздуха, необходимого для полного сгорания сухого газа указанного состава и состав продуктов сгорания, если коэффициент избытка воздуха α равен 1,2. Данные для расчета приведены в табл.13.

Таблица 13

Данные к задаче 2.2.2

Исходные данные	Вариант				
	6 (21)	7(22)	8(23)	9(24)	10(25)
Состав сухого газа, % (об)					
H_2	54,5	55,9	56,1	58,6	56,8
CH_4	28,5	27,5	26,5	25,5	27,0
C_2H_4	3,0	2,5	2,7	2,8	2,9
CO	7,0	6,5	6,8	5,6	6,7
CO_2	2,0	2,3	2,5	1,8	2,1
O_2	0,5	4,5	4,7	4,9	3,9
N_2	5,0	4,5	4,7	4,9	3,9

2.2.3. Определить теоретический расход бурого угля, водяного пара и воздуха для получения генераторного газа по реакциям:



Данные для расчета в табл.14.

Таблица 14

Данные к задаче 2.2.3

Исходные данные	Вариант				
	11	12	13	14	15
Содержание углерода в буром угле, % (масс)	76	73	72	68	70
Объем генераторного газа, м ³	100	500	700	2000	1500
Состав генераторного газа, % (об)					
H_2	10	20	50	16	21
CO	35	30	36	30	24
N_2	55	50	14	54	55

Задача 2.3.

2.3.1. Определить объемы растворов серной кислоты с концентрациями ω_1 и ω_2 , которые необходимо взять для приготовления ... кг раствора серной кислоты с концентрацией $\omega_{см}$. Плотности растворов H_2SO_4 приведены в табл. П1 Приложения. Данные для расчета табл.15.

Таблица 15

Данные к задаче 2.3.1

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Концентрации исходных растворов, %										
ω_1	80	92	90	75	65	55	95	83	68	73
ω_2	35	70	68	50	35	35	72	68	30	45
Концентрация приготовленного раствора $\omega_{см}$, %	60	83	85	67	40	48	80	75	40	66
Масса приготовленного раствора, кг	50	10	1	3	9	10	100	20	25	50

2.3.2. Определить объемы растворов азотной кислоты с концентрациями ω_1 и ω_2 , которые необходимо взять для приготовления ... кг раствора с концентрацией $\omega_{см}$. Плотности растворов HNO_3 приведены в табл. П2 Приложения. Данные для расчета приведены в табл.16.

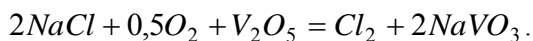
Таблица 16

Данные к задаче 2.3.2

Исходные данные	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Концентрации исходных растворов, %										
ω_1	16,0	11,0	12,6	15,0	30,0	55	95	83	65	75
ω_2	80,8	74,3	89,0	72,9	45,0	35	72	58	30	45
Концентрация приготовленного раствора $\omega_{см}$, %	60,0	22,0	45,5	67	40	45	80	75	40	65
Масса приготовленного раствора, кг	5	10	1	3	7	10	100	20	25	50

Задача 2.4.

2.4.1. Определить расходные коэффициенты сырья для производства ванадата натрия ($NaVO_3 - 1$ т) по суммарной реакции



Сырье: ванадиевый шлак (основной компонент V_2O_5); хлорид натрия; воздух (% (об): $O_2 - 21$, $N_2 - 79$). Данные для расчета приведены в табл.17.

Таблица 17

Данные к задаче 2.4.1

Исходные данные	Вариант				
	1 (16)	2 (17)	3 (18)	4(19)	5(20)
Содержание V_2O_5 в шлаке, % (масс)	15,0	12,0	14,0	13,0	16,0
Содержание NaCl в сырье, % (масс)	100	98	100	96	97
Расход NaCl –содержащего сырья, % от массы ванадиевого шлака	11	10	9	11	12

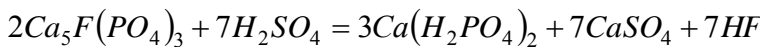
2.4.2. Определить расход технического карбида кальция, для получения ацетилена, по реакции $CaC + H_2O = CaO + H_2C_2$. Данные для расчета в табл.18.

Таблица 18

Данные к задаче 2.4.2

Исходные данные	Вариант				
	6 (21)	7(22)	8(23)	9(24)	10(25)
Содержание CaC_2 в техн.карбиде, % (масс)	82	79	85	77	92
Степень разложения CaC_2 , %	95	98	97	96	98
Объем ацетилена (н.у.), л	200	500	100	10	1000

2.4.3. Рассчитайте объем серной кислоты (с 10% избытком от теоретического), требуемый для разложения апатитового концентрата по реакции:



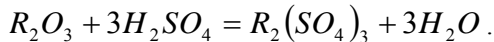
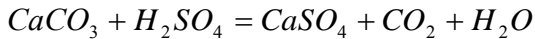
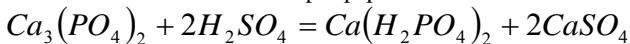
Данные для расчета в табл. 19.

Данные к задаче 2.4.3

Исходные данные	Вариант				
	11	12	13	14	15
Концентрация H_2SO_4 , % (масс)	65	70	68	72	75
Масса апатитового концентрата, кг	100	150	200	250	300
Содержание P_2O_5 в апатитовом концентрате, % (масс)	42	45	38	40	40

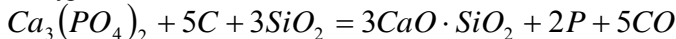
2.5. Рассчитать расход серной кислоты на 1 кг фосфорита для получения суперфосфата, содержащего 25,5% P_2O_5 , 4,1% CO_2 и 5,9% R_2O_3 .

При разложении фосфоритов серной кислотой протекают следующие реакции с основными составными частями фосфоритов:



2.6. При обжиге 1т известняка образуется 170 м³ диоксида углерода. Содержание $CaCO_3$ в известняке 95 %. Определить степень разложения известняка и его расход на 1000 м³ CO_2 при данных условиях и при полном разложении $CaCO_3$.

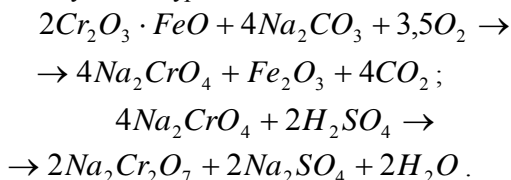
2.7. Рассчитать расход реагентов для получения 1т фосфора путем восстановления его из фосфоритного концентрата, если процесс описывается следующим уравнением:



Содержание P_2O_5 в концентрате 28%. Кокс содержит 94% углерода. Степень восстановления фосфора 0,85.

2.8. Сухой конвертированный газ состава (об.%): CO_2 - 28,0; CO - 3,0; H_2 - 51,4; N_2 - 16,8; $(O_2 + CH_4)$ - 0,5; H_2S - 0,3 подвергается полной очистке от CO_2 , H_2S и CO . Рассчитать: а) состав газа после очистки; б) количество элементарной серы, получающейся из 1000 м³ сухого газа, если очистку его от H_2S вести с утилизацией серы.

2.9. Рассчитать массу дихромата натрия, которую можно теоретически получить из 1 кг хромистого железняка, содержащего 70% $Cr_2O_3 \cdot FeO$, если процесс выражается следующими уравнениями:



2.10. Анализ нефелино-апатитовой руды показал, что она содержит 20,6% P_2O_5 и 8,0% Al_2O_3 . Рассчитать содержание в руде апатита и нефелина, если их химические формулы выражаются соответственно: $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaCl_2 \cdot 2CaF_2$ и $Na_2O \cdot K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ и если весь P_2O_5 в руде связан в виде апатита, а Al_2O_3 - в виде нефелина.

3. РАСЧЕТ ШИХТЫ

Шихта — смесь исходных материалов в определённой пропорции, подлежащая переработке в металлургических, химических и других агрегатах.

Для составления шихты необходимо, как минимум, знать химический состав продукта, который надо получить в процессе переработки шихты и состав исходных материалов, из которых будет состояться шихта. Технологические расчеты, связанные с шихтоподготовкой, являются важной практической составляющей профессиональной деятельности химика-технолога различных производств.

При производстве, например, стекла, шихта составляется из сырьевых материалов, содержащих стеклообразующие оксиды. Наибольшее значение в технике и в строительстве имеют оксидные

стекла, которые различают по виду стеклообразующего оксида (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , GeO_2): силикатные, боратные, фосфатные, германатные.

Главной стадией производства стекла является высокотемпературная обработка шихты при которой происходит синтез минералов и образование стекловидной фазы. Охлаждение расплава в определенных условиях дает не кристаллическое, а аморфное вещество – стекло. Один из способов приготовления фосфатного стекла, предназначенного для защиты элементов водонагревательных систем от коррозии и солеотложений, описан в [28].

Для расчетов шихты по заданному химическому составу готового продукта удобно пользоваться гравиметрическими факторами пересчета (аналитическими множителями).

Фактором пересчета называют отношение эквивалента определяемой составной части к эквиваленту ее весовой формы. В общем случае фактор пересчета F вычисляют по формуле

$$F_{A/B} = \frac{x \cdot M(A)}{y \cdot M(B)},$$

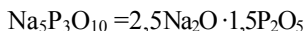
где $M(A)$ и $M(B)$ – молярные массы определяемого вещества A и его гравиметрической формы B ;

x и y – стехиометрические коэффициенты в химических формулах определяемого вещества и гравиметрической формы, на которые умножают молярные массы, чтобы число моль определяемого компонента в числителе и знаменателе было одинаковым.

Например, массу триполифосфата натрия $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (ТПФNa), эквивалентную известной массе оксида Na_2O , определяют по формуле:

$$m(\text{ТПФNa}) = F_{\text{ТПФNa}/\text{Na}_2\text{O}} \cdot m(\text{Na}_2\text{O}),$$

предварительно рассчитав фактор пересчета ТПФNa по Na_2O . Для этого представим химическую формулу $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ в виде оксидов, чтобы определить стехиометрические коэффициенты:



Молярные массы, г/моль: $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 368; Na_2O =62; P_2O_5 -142.

$$F_{ТПФNa/Na_2O} = \frac{M(Na_5P_3O_{10})}{2,5M(Na_2O)} = \frac{368}{2,5 \cdot 62} = 2,374$$

На практике обычно пользуются готовыми значениями F , которые для многих веществ сведены в специальные таблицы. Для решения предложенных ниже задач рекомендуется использовать значения факторов пересчета, указанные в табл. ПЗ Приложения.

Пример 9. Рассчитать состав шихты для получения фосфатного стекла по исходным компонентам: дигидрофосфат кальция $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ (ДФФСa), триполифосфат натрия $Na_5P_3O_{10}$ (ТПФNa), если массовое отношение оксидов $Na_2O:CaO$ равно 2,0, а масса Na_2O - 250 г. Определить массовые доли оксидов Na_2O , CaO , P_2O_5 в готовом продукте.

Решение.

1. Определим массу ТПФNa по известной массе Na_2O , воспользовавшись фактором пересчета $F(ТПФNa / Na_2O)$ (см.табл.ПЗ Приложения):

$$m(ТПФNa) = F_{ТПФNa/Na_2O} \cdot m(Na_2O) = 2,374 \cdot 250 = 593,5 \text{ г.}$$

2. Определим массу ДФСa по массе CaO .

Масса CaO по условию задачи должна быть в 2 раза меньше массы Na_2O , т.е.

$$m(CaO) = 250 : 2 = 125,0 \text{ г.}$$

Масса ДФСa

$$m(ДФФСa) = F_{ДФФСa/CaO} \cdot m(CaO) = 4,500 \cdot 125 = 562,5 \text{ г.}$$

3. Определим содержание P_2O_5

– в ТПФNa

$$m(P_2O_5) = F_{P_2O_5/ТПФNa} \cdot m(ТПФNa) = 0,579 \cdot 593,5 = 343,6 \text{ г.}$$

– в ДФСa

$$m(P_2O_5) = F_{P_2O_5/ДФФСa} \cdot m(ДФФСa) = 0,560 \cdot 562,5 = 315,0 \text{ г.}$$

Суммарное содержание P_2O_5

$$\sum m(P_2O_5) = 343,6 + 315 = 658,6 \text{ г.}$$

4. Масса готового продукта (сумма оксидов)

$$m_{\text{прод}} = 658,6 + 250 + 125 = 1033,6 \text{ г.}$$

5. Массовые доли оксидов в готовом продукте

$$\%(P_2O_5) = \frac{m(P_2O_5)100}{m_{\text{прод}}} = \frac{658,6 \cdot 100}{1033,6} = 63,7.$$

$$\%(CaO) = \frac{m(CaO)100}{m_{\text{прод}}} = \frac{125 \cdot 100}{1033,6} = 12,1.$$

$$\%(Na_2O) = \frac{m(Na_2O)100}{m_{\text{прод}}} = \frac{250 \cdot 100}{1033,6} = 24,2.$$

Ответ: 24,2 (Na₂O); 12,1 (CaO); 63,7% (P₂O₅).

3.1. Задачи для самостоятельного решения

Задача 3.1.

3.1.1. Рассчитать состав шихты для получения фосфатного стекла по указанным исходным компонентам (√). Известно, что масса Na₂O должна быть ... г, а отношение Na₂O:CaO в готовом продукте - ... (по массе). Определить массовые доли оксидов Na₂O, CaO, P₂O₅ в готовом продукте. При расчете воспользуйтесь значениями факторов пересчета, указанными в табл. ПЗ Приложения. Данные для расчета приведены в табл.20.

3.1.2. Рассчитать состав шихты для получения фосфатного стекла по указанным исходным компонентам, если известно содержание оксидов в готовом продукте в готовом продукте и масса продукта .

Данные для расчета приведены в табл.21.

Таблица 20

Данные к задаче 3.1.1

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Компоненты шихты:										
Дигидрофосфат кальция $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ДФСа)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Дигидрофосфат натрия $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ДФНа)	√			√			√			√
Триполифосфат натрия $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (ТПФНа)		√			√			√		
Гексаметафосфат натрия NaPO_3 (ГМФНа)			√			√			√	
Масса Na_2O , кг	0,5	0,2	0,1	0,4	1,0	0,7	0,25	0,15	0,3	0,1
Соотношение оксидов $\text{Na}_2\text{O}:\text{CaO}$	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	2,0	1,7	2,0	2,0

Таблица 21

Данные к задаче 3.1.2.

Исходные данные	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Содержание оксидов в готовом продукте, %										
CaO	7,0	9,0	-	10,0	-	12,0	-	17,0	-	20,0
P_2O_5	65,0	62,0	64,0	60,0	63,0	61,0	62,5	62,0	63,5	60,0
Na_2O	-	-	15	-	20	-	24	-	22	-
Масса готового продукта, кг	0,10	0,20	0,25	0,50	1,00	0,60	0,80	1,20	1,50	2,00

4. БАЛАНСОВЫЕ РАСЧЕТЫ

Балансовые расчеты являются основой расчетов ХТС. Они необходимы для планирования и анализа результатов экспериментальных исследований, для оптимизации технологических параметров процессов и технических показателей оборудования, определения расходных норм сырья и энергии для проектируемых производств, для решения экологических задач.

Исходными данными для проведения балансовых расчетов являются: эскизная технологическая схема химического производства с указанием основных и побочных реакций; степень превращения (выход); состав исходных веществ и состав реакционной массы; данные регламента (завода- аналога) о соотношении реагирующих веществ для стадий, связанных с химическими превращениями и состав получаемых потоков для стадий фильтрации, сушки, ректификации и т.п.

Балансовые расчеты начинают с декомпозиции технологического процесса на отдельные стадии и разработки блок-схемы материальных потоков. Затем определяют составы всех материальных потоков с учетом закономерностей протекания гидромеханических, химических и массообменных процессов. Полученные результаты используют далее для выполнения энергетических расчетов.

При выполнении расчетов следует обратить внимание на единицы измерения используемых величин, проверить их на «совместимость», т.к. информация может быть получена из разных источников с данными различной размерности.

4.1. Материальный баланс

Основой технологических расчетов являются расчеты материальных потоков при протекании химико-технологических процессов.

Материальный баланс отражает закон сохранения массы вещества. Применительно к материальному балансу любого технологического процесса, это означает, что масса веществ, поступивших на технологическую операцию (в аппарат) – **приход**, равна массе всех веществ, получившихся в ее результате (вышедших из аппарата) – **расходу**.

Материальный баланс процессов с участием химических реакций составляется на основе уравнения основной суммарной реакции с учетом побочных реакций.

Предположим, что технологический процесс основан на химической реакции, которая протекает по схеме:



где: A, B – исходное сырье;
 R – основной продукт;
 L – побочный продукт;
 a, b, r, l – стехиометрические коэффициенты.

Для получения m_R кг основного продукта необходимо израсходовать m_A и m_B кг сырья. При этом неизбежно получается m_L кг побочного продукта. Также необходимо учесть непроизводительные затраты сырья и готового продукта, которые обусловлены неполнотой химических превращений, а также механическими потерями при транспортировке и хранении сырья и готового продукта - $m_{пот}$. Уравнение материального баланса будет иметь следующий вид:

$$m_A + m_B = m_R + m_L + m_{ном}.$$

Материальный баланс, чаще всего, представляют в виде таблиц (табл. 22), которые включают приходную и расходную части:

Таблица 22

Материальный баланс

Приход					Расход				
Статья	кг	м ³	кмоль	%	Статья	кг	м ³	кмоль	%
A	m_A				R	m_R			
B	m_B				L	m_L			
					потери	$m_{пот}$			
Итого:					Итого:				

При несовпадении приходной и расходной части МБ рассчитывается **относительная погрешность (невязка баланса)** как отношение разности между приходной и расходной частями материального баланса к абсолютной величине приходной части (в %):

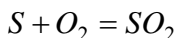
В зависимости от мощности производства величина относительной погрешности расчетов должна быть в пределах 0,01-0,05%.

На основании материального баланса рассчитывают:

- потребность предприятия в сырье и вспомогательных материалах;
- производственные потери;
- состав и количество отходов;
- количество единиц и объем оборудования;
- технологические и экономические показатели эффективности функционирования системы;
- тепловой и эксергетический балансы.

Пример 10. Составить материальный баланс печи для сжигания серы (в расчете на 1 т серы). Степень превращения S в SO₂ 0,95. Коэффициент избытка воздуха α=1,5 (об.). Состав воздуха принять, % (об): O₂ -21, N₂ -79.

Решение. Горение серы идет по реакции



Молярные массы, кг/кмоль: S -32; SO₂ - 64; O₂ - 32, N₂ - 28.

Статьи прихода: сера (S), воздух, в т.ч. O₂, N₂.

Статьи расхода: S (потери), SO₂, O₂ (избыток), N₂.

S. Масса серы, окисленной до SO₂ : 1000·0,95= 950 кг.

Потери: 1000 - 950=50 кг.

O₂. Израсходовано:

по уравнению реакции 32 кг S - 22,4 м³ O₂

по условию 950 кг - x, x =665 м³.

С учетом коэффициента избытка α поступило : 665·1,5= 997,5 м³ (1425 кг).

Осталось неизрасходованным: 997,5 - 665 = 332,5 м³ (475 кг).

N₂. Поступило с воздухом:

997,5 м³ O₂ - 21 % (об)

x - 79 % (об), x =3752,5 м³ (4690,6 кг).

SO₂. Образовалось:

по уравнению реакции $32 \text{ кг S} - 64 \text{ кг SO}_2$
 по условию $950 \text{ кг} - x, x = 1900 \text{ кг}.$

Составим таблицу материального баланса (табл. 23).

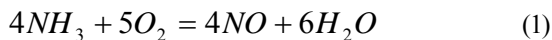
Таблица 23

Материальный баланс печи для сжигания серы (на 1 т)

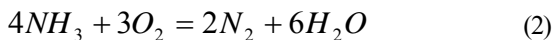
Приход		Расход	
Статья	кг	Статья	кг
S	1000,0	S (потери)	50,0
O_2	1425,0	SO_2	1900,0
N_2	4690,6	O_2	475,0
		N_2	4690,6
Итого	7115,6	Итого	7115,6

Пример 11. Составить материальный баланс окисления аммиака (на 1 т азотной кислоты). Степень окисления NH_3 до NO - 0,97; до N_2 - 0,03; NO до NO_2 - 1,00. Степень абсорбции 0,92. Содержание аммиака в сухой аммиачно – воздушной смеси 7,13% (масс.). Воздух насыщен парами воды при 30°C . Относительная влажность 80%.

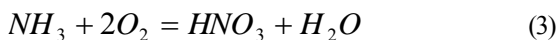
Решение. Окисление аммиака идет по основной реакции:



и по побочной:

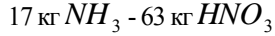
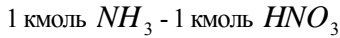


Балансовое уравнение производства HNO_3 из NH_3 :



Определим расход аммиака на 1т HNO_3 :

в соответствии с уравнением (3)



$$x \quad - 1000 \text{ кг}, \quad x = 269,8 \text{ кг}$$

с учетом потерь на стадиях окисления и абсорбции:

$$m(NH_3) = \frac{269,8}{0,97 \cdot 0,92} = 302,3 \text{ кг.}$$

Расход сухого воздуха на 1т HNO_3 :

$$302,3 \text{ кг } NH_3 - 7,13\%$$

$$x \text{ кг воздуха} - (100-7,13), \quad x = 3937,5 \text{ кг}$$

$$V_{\text{сух}} = \frac{3937,5}{29} \cdot 22,4 = 3041,7 \text{ м}^3$$

в том числе :

$$O_2 : 3041,7 \cdot 0,21 = 638,7 \text{ м}^3 \text{ (912,4кг)}$$

$$N_2 : 3041,7 \cdot 0,79 = 2402,7 \text{ м}^3 \text{ (3003,4кг)}$$

С воздухом поступает вода:

$$V(H_2O) = \frac{V_{\text{сух}} \cdot p_{H_2O}}{(P - p_{\text{нас}})},$$

где P - атмосферное давление, Па; $p_{\text{нас}}$ - давление насыщенного водяного пара при температуре t (табл.П5 Приложения 1), Па; p_{H_2O} - парциальное давление паров воды (при температуре t и относит. влажности h), Па.

$$p_{H_2O} = p_{\text{нас}} \cdot h = 4,22 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 3,37 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$V(H_2O) = \frac{3041,4 \cdot 3,37 \cdot 10^3}{(101,3 - 4,22) \cdot 10^3} = 105,6 \text{ м}^3 (84,8 \text{ кг})$$

По реакции (1) определим :

- образуется NO :

$$m(NO) = \frac{302,3 \cdot 0,97 \cdot 30}{17} = 517,5 \text{ кг}$$

- образуется H_2O :

$$m(H_2O) = \frac{(302,3 \cdot 0,97) \cdot 6 \cdot 18}{17 \cdot 4} = 465,7 \text{ кг}$$

- расходуется O_2 :

$$m(O_2) = \frac{(302,3 \cdot 0,97) \cdot 5 \cdot 32}{17 \cdot 4} = 690 \text{ кг}$$

по реакции (2):

- образуется N_2 :

$$m(N_2) = \frac{(302,3 \cdot 0,03) \cdot 2 \cdot 28}{17 \cdot 4} = 7,5 \text{ кг}$$

- образуется H_2O :

$$m(H_2O) = \frac{(302,3 \cdot 0,03) \cdot 6 \cdot 18}{17 \cdot 4} = 14,4 \text{ кг}$$

- расходуется O_2 :

$$m(O_2) = \frac{(302,3 \cdot 0,03) \cdot 3 \cdot 32}{17 \cdot 4} = 12,8 \text{ кг.}$$

Результаты расчетов представим в виде таблицы (табл.24).

Материальный баланс процесса окисления аммиака

Приход		Расход	
Статья	кг	Статья	кг
NH_3	302,3	NO	517,5
O_2	912,4	O_2	$912,4 - 690 - 12,8 = 209,6$
N_2	3003,4	N_2	$3003,4 + 7,5 = 3010,9$
H_2O	84,8	H_2O	$84,8 + 465,7 + 14,4 = 564,9$
Итого	4303	Итого	4303

4.2. Тепловые расчеты. Энергетический (тепловой) баланс

Энергетический баланс основан на законе сохранения энергии, согласно которому энергия в природе не возникает из ничего и не исчезает, она может только переходить из одной формы в другую. Таким образом, сумма всех видов энергии в замкнутой системе постоянна.

В соответствии с различной природой процессов, различают энергию механическую, тепловую, электромагнитную, гравитационную, ядерную, световую и т. д. Для химико-технологических расчетов чаще всего ограничиваются расчетом тепловой энергии. Поэтому составление энергетического баланса сводится к составлению теплового баланса, в соответствии с которым **приход теплоты** в данном процессе (аппарате) должен быть **равен ее расходу** : $\Sigma Q_{пр} = \Sigma Q_{расх}$.

Приход теплоты определяется по уравнению:

$$Q_{прих} = Q_f + Q_p + Q_{ф.н.} + Q_{подв}, \quad (4.2)$$

где: Q_f – физическая теплота материалов, поступающих в процесс или в аппарат;

Q_p – теплота, выделяющаяся в результате экзотермических реакций;

$Q_{ф.п.}$ – теплота, выделяющаяся в результате физического превращения вещества (абсорбции, конденсации, кристаллизации и т.п.);

$Q_{подв}$ – теплота, подводимая извне, например, обогрев.

Расход теплоты определяется по уравнению:

$$Q_{расх} = Q'_{ф} + Q'_p + Q'_{ф.п.} + Q_n + Q_{отв}, \quad (4.3)$$

где: $Q'_{ф}$ – физическая теплота продуктов, выходящих из аппарата;

Q'_p – теплота, затраченная на эндотермическую реакцию;

$Q'_{ф.п.}$ – теплота, поглощенная в результате физического превращения вещества (плавление, испарение, десорбция и т.п.);

Q_n – потери теплоты в окружающее пространство;

$Q_{отв}$ – теплота, отводимая из процесса.

Если в задании нет данных о $Q_{подв}$ и $Q_{отв}$, то эти слагаемые при расчете $Q_{пр}$ и $Q_{расх}$ не учитываются, а их значения определяются при сравнении полученных сумм других статей прихода и расхода.

Например, если получили, что $Q_{пр} > Q_{расх}$, то избыточное количество теплоты необходимо отвести из процесса и $Q_{отв} = Q_{пр} - Q_{расх}$.

Если $Q_{пр} < Q_{расх}$, то для осуществления процесса при заданных условиях теплоты недостаточно и необходим дополнительный подвод теплоты в количестве $Q_{подв} = Q_{расх} - Q_{пр}$.

Расчет $Q_{ф}$ и $Q'_{ф}$

Физическую теплоту $Q_{ф}$ и $Q'_{ф}$ рассчитывают для каждого i -го вещества, поступающего в процесс и выходящего из него по формуле:

$$Q_{ф}(Q'_{ф}) = m_i \cdot c_i \cdot t, \quad (4.4)$$

где: m_i – масса (объем, количество) вещества (кг, м³, кмоль);

c_i – средняя удельная теплоемкость вещества при температуре t (кДж/(кг·К), кДж/(м³·К), кДж/(кмоль·К));

t – температура, отсчитанная от какой-либо точки (обычно от 0°C (273К)).

Теплоемкости кристаллических веществ и жидкостей при разных температурах отличаются незначительно, поэтому в техно-химических расчетах обычно используют их средние значения. В данном пособии

значения теплоемкостей для некоторых веществ представлены в табл. П7-П8 Приложения 1.

Зависимость молярной теплоемкости газов от температуры описывают уравнениями вида

$$c_p = a + bT + cT^2 + \dots, \quad (4.5)$$

где: a, b, c – коэффициенты, которые приводятся в соответствующей справочной литературе (например, [11]).

Значения теплоемкостей для некоторых газов при разных температурах представлены в табл. П9 Приложения 1.

На практике чаще всего приходится иметь дело со смесями веществ. Теплоемкость смеси может быть рассчитана по закону аддитивности:

$$c_{см} = \frac{G_1 c_1 + G_2 c_2 + \dots + G_i c_i}{G_1 + G_2 + \dots + G_i}, \quad (4.6)$$

где c_1, c_2, \dots, c_i – теплоемкость отдельных компонентов;

G_1, G_2, \dots, G_i – количество отдельных компонентов (в единицах измерения, соответствующих единицам теплоемкости).

Расчет Q_p и Q'_p

Тепловой эффект реакции при стандартных условиях² можно определить по закону Гесса как разность между энтальпиями образования всех продуктов реакции и энтальпиями образования всех исходных веществ ($\Delta H_{f,i}^0$ приводятся в справочных таблицах термодинамических величин, например, [11]):

$$(\Delta H_p^0)_{298} = \sum_{i=1}^m (n_i \Delta H_{f,i}^0)_{\text{прод}} - \sum_{i=1}^m (n_i \Delta H_{f,i}^0)_{\text{исх}} \quad (4.7)$$

где: n_i – стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции.

² В качестве стандартных условий приняты: температура 25°C (298 К), давление 0,101 МПа; для растворенных веществ концентрация 1 моль/кг растворителя. Газы и растворы предполагаются идеальными.

Для определения теплового эффекта реакции при заданной температуре T можно использовать уравнение Кирхгоффа:

$$(\Delta H_p)_T = (\Delta H_p^0)_{298} + \int_{298}^T \Delta c_p(T) dT, \quad (4.8)$$

где - $\Delta c_p(T)$ - разность изобарных теплоёмкостей продуктов реакции и исходных веществ с учетом стехиометрических коэффициентов в уравнении реакции.

Если разница $(T-298)$ невелика, то можно принять $\Delta c_p(T) = const$, соответственно интегральная форма уравнения примет следующий вид:

$$(\Delta H_p)_T = (\Delta H_p^0)_{298} + \Delta c_p(T - 298). \quad (4.9)$$

При большой разнице температур необходимо учитывать температурную зависимость теплоёмкости типа (4.5).

Изменение теплоемкости в химической реакции $\Delta c_p(T)$ будет описываться следующим выражением:

$$\Delta c_p(T) = \Delta a + \Delta bT + \Delta cT^2 + \dots \quad (4.10)$$

где - $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ - разность соответствующих табличных значений коэффициентов a, b, c продуктов реакции и исходных веществ с учетом стехиометрических коэффициентов в уравнении реакции, например,

$$\Delta a = \sum_{i=1}^m (n_i a_i)_{\text{прод}} - \sum_{i=1}^m (n_i a_i)_{\text{исх}} \quad (4.11)$$

Подставляя выражение (4.10) в уравнение (4.8) и интегрируя от 298 до T , получаем выражение для теплового эффекта $(\Delta H_p)_T$

$$(\Delta H_p^0)_T = (\Delta H_p^0)_{298} + \Delta a(T - 298) + \Delta b(T^2 - 298^2) + \dots \quad (4.12)$$

Если тепловой баланс составляется на массу m основного продукта реакции E , то:

$$Q_p(Q'_p) = \frac{(\Delta H_p)_T}{r} \cdot \frac{m}{M_R} \quad (4.13)$$

где: M_R – молярная масса вещества R;
 r – стехиометрический коэффициент в уравнении реакции перед формулой вещества R.

Расчет $Q_{ф.п}$ и $Q'_{ф.п}$

Теплота физического превращения вещества $Q_{ф.п}$ и $Q'_{ф.п}$ определяется по формуле:

$$Q_{ф.п}(Q'_{ф.п}) = G \cdot q \quad (4.14)$$

где: G – масса (объем, количество) вещества, участвующего в фазовом переходе, кг (m^3 , кмоль);
 q – удельная теплота фазового перехода вещества, кДж/кг (кДж/ m^3 , кДж/кмоль) (справочная величина).

Из физических процессов наиболее энергоемкими являются процессы испарения и конденсации. В этом случае используют значения удельной теплоты парообразования ($q_{исп}$ или $\Delta H_{исп}$).

Физические процессы растворения, кристаллизации, гидратации, адсорбции также сопровождаются тепловыми эффектами, которые описывают соответствующими параметрами.

Теплота растворения

В научно-технической литературе различают три вида теплоты растворения:

- *интегральную*, когда 1 моль вещества растворяется в бесконечно большом количестве молей ($n \rightarrow \infty$) растворителя;

- *дифференциальную*, когда 1 моль вещества растворяется в бесконечно большом количестве уже готового раствора концентрации 1 : n ;

- *полную теплоту растворения*, когда 1 моль вещества растворяется в n моль растворителя, причем величина n отвечает насыщенному раствору.

В технологических расчетах чаще всего используется интегральная теплота растворения, для вычисления которой пользуются следующими эмпирическими формулами:

а) для соляной кислоты: $1 HCl + (n+1)H_2O$:

$$q_p = \left(\frac{50,1 \cdot n}{n+1} + 22,5 \right) \text{кДж/моль}; \quad (4.15)$$

б) для серной кислоты: $1 H_2SO_4 + nH_2O$

$$q_p = \left(\frac{74,8 \cdot n}{n+1,7983} \right) \text{кДж/моль}; \quad (4.16)$$

в) для азотной кислоты: $1 HNO_3 + nH_2O$

$$q_p = \left(\frac{37,6 \cdot n}{n+1,737} \right) \text{кДж/моль}; \quad (4.17)$$

Пример 12. Рассчитайте, сколько теплоты выделится при растворении 100г моногидрата H_2SO_4 в 200 см^3 воды?

Решение. Рассчитаем, сколько моль воды приходится на 1 моль H_2SO_4 :

$$n(H_2SO_4) = \frac{m}{M} = \frac{100}{98} = 1,02 \text{ моль}$$

$$n(H_2O) = \frac{m}{M} = \frac{200}{18} = 11,11 \text{ моль}$$

$$n(H_2O) : n(H_2SO_4) = 11,11 : 1,02 = 10,89 : 1$$

Подставим это значение в формулу (4.16), получим:

$$q_p = \frac{74,8 \cdot 10,89}{10,89 + 1,7983} = 64,3 \text{ кДж/моль}.$$

Пример 13. Определить теплоту растворения H_2SO_4 в готовом растворе, содержащем 1 моль H_2SO_4 в 12 моль воды.

Решение. В данном случае нужно определить дифференциальную теплоту растворения. Продифференцируем уравнение (4.16), получим:

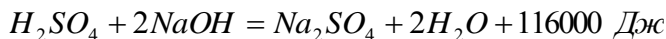
$$q_{\text{диф}} = \frac{dq_p}{dn} = \frac{74,8 \cdot 1,7983}{(n + 1,7983)^2} = \frac{134,5128}{(n + 1,7983)^2}; \quad (4.18)$$

при $n = 12$ имеем:

$$q_{\text{диф}} = \frac{dq_p}{dn} = \frac{134,5128}{(12 + 1,7983)^2} = 0,71 \text{ кДж/моль.}$$

Пример 14. Смешали 2 кг 20%-го раствора серной кислоты и 3 кг 12%-го раствора $NaOH$. Определить температуру раствора после смешения, если первоначальная температура кислоты и щелочи $20^\circ C$, потери тепла в окружающую среду 1%.

Решение. Между кислотой и щелочью протекает экзотермическая реакция нейтрализации:



В 2 кг 20%-го раствора H_2SO_4 содержится:

$$2 \cdot 0,2 = 0,4 \text{ кг} = 400 \text{ г или } 400 : 98 = 4,08 \text{ моль } H_2SO_4;$$

а в 3 кг 12%-го раствора $NaOH$ -

$$3 \cdot 0,12 = 0,36 \text{ кг} = 360 \text{ г или } 360 : 40 = 9,00 \text{ моль } NaOH.$$

По уравнению 1 моль H_2SO_4 реагирует с 2 моль $NaOH$, тогда 4,08 моль H_2SO_4 будут реагировать с 8,16 моль $NaOH$. Т.е. $NaOH$ будет избыток в количестве $9 - 8,16 = 0,84$ моль или 33,6 г.

В результате реакции образовалось 4,08 моль или 579,4 г Na_2SO_4 .

Общая масса раствора 5000 г, тогда концентрация Na_2SO_4 составит

$$\frac{579,4}{5000} \cdot 100 = 11,6\%$$

Теплоемкость этого раствора рассчитаем по закону аддитивности:

$$c = c_{\text{в}} \cdot W_{\text{в}} + c_{H_2O} \cdot W_{H_2O}$$

где $c_{\text{в}}, c_{H_2O}$ - теплоемкости вещества и воды;

$W_{\text{в}}, W_{H_2O}$ - массовые доли вещества и воды в растворе.

$$C = 0,97 \cdot 0,116 + 4,2 \cdot 0,884 = 3,82 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot \text{град})$$

Температуру раствора $t_{\text{к}}$ после реакции определим из уравнения:

$$Q = m_p \cdot c(t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad (4.19)$$

где Q - количество тепла, выделяющегося в результате реакции (с учетом теплопотерь), Дж; m_p - масса раствора, г; c - удельная теплоемкость раствора, Дж / (г · град); $t_{\text{н}}$ - температура раствора до реакции, °С.

Количество тепла, выделившееся в результате реакции в расчете на 4,08 моль прореагировавшей кислоты, составит:

$$Q' = 116 \cdot 4,08 = 473,3 \text{ кДж},$$

а с учетом теплопотерь (1%): $Q = 473,3 \cdot 0,99 = 468,5 \text{ кДж}$.

Выразим из уравнения (4.19) $t_{\text{к}}$ и подставим полученные значения:

$$t_{\text{к}} = \frac{Q}{m_p \cdot C} + t_{\text{н}} = \frac{468500}{5000 \cdot 3,82} + 20 = 44,5 \text{ °С}$$

Тепловой баланс так же, как и материальный, представляют в виде таблиц, включающих приходную и расходную части.

Энергетический баланс химико-технологических процессов составляют для определения:

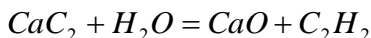
– расходных норм энергетических ресурсов (электрической энергии, средств нагревания или охлаждения, сжатых газов) на производство единицы целевой продукции;

– энергетических потоков, необходимых для создания и поддержания требуемого температурного режима процесса.

По результатам расчета теплового баланса разрабатывают системы подвода или отвода тепловой энергии в процесс и системы автоматического управления процессом.

Пример 15. Рассчитать количество теплоты, выделяющегося при образовании 100 л ацетилена из карбида кальция.

Решение. Уравнение реакции



Определим тепловой эффект реакции по закону Гесса, пользуясь справочными значениями теплоты образования веществ:

$$\Delta H_r = \Delta H_f^0(CaO) + \Delta H_f^0(C_2H_2) - \Delta H_f^0(CaC_2) - \Delta H_f^0(H_2O) = \\ = -635100 + 226750 + 62700 + 241840 = -103810 \text{ кДж.}$$

$$1 \text{ кмоль } 22,4 \text{ м}^3 - 103810 \text{ кДж}$$

$$(100 \cdot 10^{-3}) \text{ м}^3 - x, \quad x = 463 \text{ кДж}$$

Ответ: выделится 463 кДж.

Пример 16. При обжиге шихты, содержащей 10т известняка и кокс определить: а) расход кокса состава (мас.%): С - 91; зола - 7; влага - 2;

б) состав обжиговых газов (об.%); в) тепловой эффект реакции обжига. Степень разложения при обжиге известняка 95%. Воздух подается с 40% избытком.

Решение. Термическое разложение известняка идет по следующей реакции:



Тепловой эффект реакции рассчитаем по следующей формуле:

$$\Delta H_r = \Delta H_f^0(CaO) + \Delta H_f^0(CO_2) - \Delta H_f^0(CaCO_3) = \\ = -635100 - 393510 + 1206000 = 177390 \text{ кДж.}$$

С учетом степени разложения

$$\Delta H_r = 177390 \cdot 0,95 = 168520 \text{ кДж.}$$

Для разложения 10т $CaCO_3$ требуется

$$\frac{168520 \cdot 10000}{100} = 16852 \cdot 10^3 \text{ кДж.}$$

Для обеспечения такого количества тепла требуется сжечь чистого

$$\text{углерода: } \frac{16852 \cdot 10^3}{32784} = 514 \text{ кг,}$$

где 32784 – теплота сгорания углерода, кДж/кг.

Так как кокс содержит 91% C , то кокса потребуется: $514:0,91=565$ кг.

Отходящие газы будут содержать CO_2 , O_2 , N_2 .

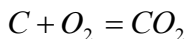
- CO_2 : а) образовалось при разложении 10т $CaCO_3$:

$$100 \text{ кг (1 кмоль) } CaCO_3 - 22,4 \text{ м}^3 CO_2$$

$$10000 \text{ кг} \quad -x, \quad x = 2240 \text{ м}^3.$$

С учетом степени разложения $CaCO_3$: $2240 \cdot 0,95 = 2128 \text{ м}^3$;

б) в результате сгорания кокса в печи по реакции:



$$12 \text{ кг } C - 22,4 \text{ м}^3$$

$$514 \text{ кг } -x, \quad x = 959 \text{ м}^3$$

Всего $2128 + 959 = 3087 \text{ м}^3$

- O_2 : - для сгорания C требуется O_2 :

$$12 \text{ кг } C - 22,4 \text{ м}^3$$

$$514 \text{ кг } -x, \quad x = 959 \text{ м}^3$$

- всего поступает O_2 с учетом избытка воздуха:

$$959 \cdot 1,4 = 1342,6 \text{ м}^3$$

$$\text{- осталось } O_2 : 1342,6 - 959 = 383,6 \text{ м}^3$$

- N_2 : - поступает с воздухом:

$$1342,6 \text{ м}^3 O_2 - 21 \text{ об. \% } O_2$$

$$x \quad - 79 \text{ об. \% } N_2, \quad x = 5051 \text{ м}^3.$$

Состав обжиговых газов сведем в таблицу (табл.25)

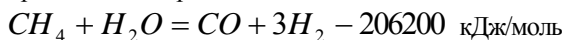
Таблица 25

Состав обжиговых газов

Компонент	м ³	% (об.)
CO_2	959	15,0
O_2	383,6	6,0
N_2	5051	79,0
ИТОГО	6393,6	100

Пример 17. Составить материальный и тепловой баланс процесса получения водорода каталитической конверсией метана. Состав исходной газовой смеси (м³): CH_4 - 100,0; H_2O - 250,0. Потери теплоты составляют 4% от прихода. Температура смеси на входе в реактор - 380°С, на выходе 800°С.

Процесс идет по реакции:



Решение.

По стехиометрии реакции, вещества CH_4 и H_2O реагируют в объемном отношении 1:1. Из условия задачи следует, что водяной пар взят с избытком. Поэтому расчет выхода продуктов ведем по метану: объем CO равен объему CH_4 (100 м³), а объем H_2 - в 3 раза больше (300 м³). Объем пара, не вступившего в реакцию 250 - 100 = 150 м³. Внесем эти значения в табл. 26 и определим массы газообразных веществ приходной и расходной части по формуле:

$$m_2 = \frac{V_2}{22,4} M_2$$

Молярные массы, кг/кмоль: CH_4 - 16; H_2O - 18; CO - 28, H_2 - 2.

Материальный баланс процесса для получения водорода

Приход			Расход		
Статья	кг	м ³	Статья	кг	м ³
CH_4	71,4	100	CO	125,0	100
H_2O	200,9	250	H_2	26,8	300
Итого	272,3	350	H_2O	120,5	150
			Итого	272,3	550

По данным материального баланса рассчитаем тепловой баланс.

Приход теплоты:

- физическая теплота парогазовой смеси Q_{ϕ}^{cM} :

$$Q_{\phi}^{cM} = V_{CH_4} \cdot c_{CH_4} \cdot t^H + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot t^H;$$

где c_{CH_4}, c_{H_2O} - средние теплоемкости метана и водяного пара при температуре t^H , кДж / (м³ · К):

$$Q_{\phi}^{cM} = 100 \cdot 1,965 \cdot 380 + 250 \cdot 1,555 \cdot 380 = 223000 \text{ кДж}$$

Расход теплоты:

- теплота, поглощенная в результате эндотермической реакции Q_p :

$$1 \text{ кмоль } CH_4 - 206200 \text{ кДж}$$

$$100 / 22,4 \text{ кмоль} - x, \quad x = 920536 \text{ кДж}$$

- теплота конвертированного газа Q_{ϕ}^K :

с CO :

$$Q_{CO} = V_{CO} \cdot C_{CO} \cdot t^K = 100 \cdot 31,20 / 22,4 \cdot 800 = 111429 \text{ кДж}$$

$$\text{с } H_2: \quad Q_{H_2} = \frac{300}{22,4} \cdot 29,6 \cdot 800 = 317143 \text{ кДж}$$

$$\text{с } H_2O: \quad Q_{H_2O} = \frac{150}{22,4} \cdot 37,5 \cdot 800 = 200893 \text{ кДж}$$

$$Q'_\phi = 629465 \text{ кДж.}$$

$$\text{- теплопотери: } Q_{\text{пот}} = 223000 \cdot 0,04 = 9820 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{расх}} = Q_p + Q_\phi^k + Q_{\text{пот}} = 1559821 \text{ кДж}$$

$$\Delta Q = Q_{\text{расх}} - Q_\phi^{\text{см}} = 1559821 - 223000 = 1336821 \text{ кДж}$$

Таким образом, дефицит теплоты составил 1336821 кДж, то есть необходим дополнительный подвод теплоты в зону реакции.

Предположим, что подвод теплоты осуществляется путем сжигания части метана природного газа (98% CH_4 и 2% N_2) по реакции:



Для покрытия образовавшегося дефицита теплоты необходимо сжечь $\frac{1336821}{890950} = 1,5$ кмоль метана или $\frac{1,5}{0,98} = 1,53$ кмоль ($34,3 \text{ м}^3$) природного газа.

Результаты расчетов представим в виде таблицы (табл. 27).

Таблица 27

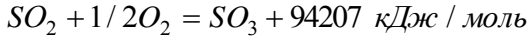
Тепловой баланс процесса получения водорода каталитической конверсией метана

Приход			Расход		
Статья	МДж	%	Статья	МДж	%
1. Физическая теплота парогазовой смеси $Q_\phi^{\text{см}}$	223,0	14,3	1. Теплота эндо-термической реакции Q_p	920,5	59,0
			2. Теплота конвертированного газа Q_ϕ^k	629,5	40,4
2. Дополнительный подвод теплоты	1336,8	85,7	3. Теплопотери	9,8	0,6
Итого	1559,8	100	Итого	1559,8	100

4.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 4.1.

4.1.1. Составить материальный и тепловой баланс процесса каталитического окисления SO_2 (1000 м^3) в SO_3 по реакции



Данные для расчета приведены в табл.28.

Таблица 28

Данные к задаче 4.1.1.

Исходные данные	Вариант					
	1 (16)	2 (17)	3 (18)	4(19)	5(20)	
Состав исходной газовой смеси, % (об) SO_2	9,0	8,0	7,5	7,8	8,5	
	O_2	11,0	9,0	11,5	10,0	10,2
	N_2	80,0	83,0	81,0	82,2	81,3
Степень превращения SO_2 в SO_3 , %	98	97,5	96,0	97,8	97,0	
Температура входящего газа, °C	460	470	480	490	465	
Температура выходящего газа, °C	500	550	570	540	560	
Потери тепла в окружающую среду, % от прихода	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	

4.1.2. Составить материальный и тепловой баланс реактора для получения водорода каталитической конверсией метана. Процесс идет по реакции:

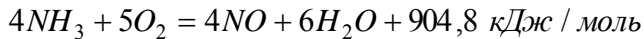
$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2 - 206,2 \text{ кДж / моль}$$

Данные для расчета приведены в табл.29.

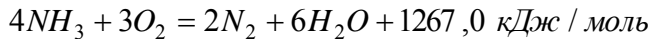
Данные к задаче 4.1.2.

Исходные данные	Вариант				
	6	7	8	9	10
Состав исходной газовой смеси, м ³ , H_2O CH_4	200	300	320	330	340
	100	100	100	100	100
Степень конверсии x , %	56	60	61	62	63
Температура газовой смеси на входе в реактор, °С	350	360	370	380	390
Температура газов на выходе из реактора, °С	790	800	820	830	850
Потери тепла в окружающую среду, % от прихода	8	10	12	14	15

4.1.3. Составить материальный и тепловой баланс окисления аммиака (в расчете на 1т 60 % азотной кислоты), протекающего по реакции



с учетом побочной реакции



Тепловым расчетом определить температуру, до которой необходимо нагреть аммиачно-воздушную смесь, чтобы процесс окисления аммиака протекал автотермично. Данные для расчета приведены в табл.30.

Таблица 30

Данные к задаче 4.1.3.

Исходные данные	Вариант				
	11	12	13	14	15
Степень превращения NH_3 в NO , %	96,0	96,5	97,0	97,0	97,5
Степень абсорбции, %	96,5	97,0	97,5	98,0	98,5
Содержание аммиака в сухой аммиачно – воздушной смеси, % (масс.).	10,0	11,0	12,0	8,0	9,0
Температура конверсии, °C:	800	820	830	850	840
Теплопотери в окружающую среду, % от прихода теплоты	5	4,5	6,0	5,5	6,5

Задача 4.2.

4.2.1. Составить материальный и тепловой баланс процесса нейтрализации, протекающего по уравнению: $H_2SO_4 + 2NH_3 = (NH_4)_2SO_4 + q$. Какую массу воды может испарить выделившаяся теплота? Данные для расчета приведены в табл.31. Температура выгружаемого продукта 110 °C.

Таблица 31

Данные к задаче 4.2.1.

Исходные данные	Вариант				
	1 (16)	2 (17)	3 (18)	4(19)	5(20)
Концентрация раствора H_2SO_4 , %	25	30	35	40	45
Масса раствора H_2SO_4 , кг	10	15	15	20	25
Начальная температура реагентов, °C	13	15	15	20	25
Потери тепла в окружающую среду, % от прихода	10	11	12	13	15

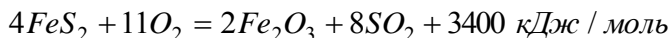
4.2.2. Составить материальный и тепловой баланс процесса нейтрализации, протекающего по уравнению: $HNO_3 + NH_3 = NH_4NO_3 + q$. Достаточно ли будет теплоты реакции, чтобы испарить всю имеющуюся в реакторе воду, если принять, что вся теплота реакции расходуется на испарение воды? Данные для расчета приведены в табл.32. Температура выгружаемого продукта 105 °С.

Таблица 32

Данные к задаче 4.2.2.

Исходные данные	Вариант				
	6	7	8	9	10
Концентрация раствора HNO_3 , %	25	30	35	40	45
Масса раствора HNO_3 , кг	10	20	10	15	20
Начальная температура реагентов, °С	13	15	15	20	25
Потери тепла в окружающую среду, % от прихода	10	11	12	13	15

4.2.3. Составить материальный и тепловой баланс процесса обжига 1 т железного колчедана, протекающего по реакции



Данные для расчета приведены в табл.33.

Таблица 33

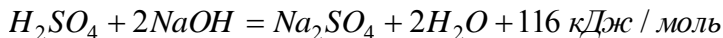
Данные к задаче 4.2.3.

Исходные данные	Вариант				
	11	12	13	14	15
Содержание FeS_2 в колчедане, % (масс)	81	80	82	79	83
Содержание влаги в колчедане, % (масс)	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Степень выгорания серы, %	98	96,5	97,0	97,5	96
Коэффициент избытка воздуха	1,6	1,5	1,6	1,5	1,6
Начальная температура реагентов, °С	20	20	20	20	20
Температура в зоне обжига, °С	770	780	790	800	810
Потери тепла в окружающую среду, % от прихода	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0

Теплоемкость, кДж/(кг·К): колчедана - 0,538; огарка - 0,883.

Задача 4.3.

Смешали раствор серной кислоты и раствор гидроксида натрия. Составить материальный и тепловой баланс процесса. Тепловым расчетом определить температуру раствора после смешения, учитывая, что между кислотой и щелочью протекает экзотермическая реакция нейтрализации:



Процесс протекает адиабатически. Данные для расчета приведены в табл.34.

Таблица 34

Данные к задаче 4.3.

Исходные данные	Варианты				
	1(6,11)	2(7,12)	3(8,13)	4(9,14)	5(10,15)
Концентрация раствора H_2SO_4 , %	15	20	25	30	28
Масса раствора H_2SO_4 , кг	3	2,5	5	4	10
Концентрация раствора $NaOH$, %	15	14	20	20	15
Масса раствора $NaOH$, кг	3	3,5	6	5	10
Начальная температура кислоты и щелочи, °С	20	25	15	10	17
Потери тепла в окружающую среду, % от прихода	1	0,8	1,2	0,9	1

ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ ПО ПРОИЗВОДСТВАМ ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ

Ниже приводятся примерные темы рефератов по важнейшим производствам химических продуктов.

1. Производство водорода
2. Синтез аммиака из азота и водорода.
3. Производство разбавленной азотной кислоты.
4. Производство концентрированной азотной кислоты.
5. Производство серной кислоты.
6. Производство соляной кислоты
7. Производство фосфорной кислоты (термический метод).
8. Производство фосфорной кислоты (экстракционный метод).

9. Производство минеральных солей, удобрений
 - a. карбонат натрия
 - b. сульфат калия
 - c. нитрат аммония
 - d. сульфат аммония
 - e. аммофос
 - f. суперфосфат
 - g. карбамид
10. Производство метанола
11. Производство формальдегида

В реферате по производствам химических продуктов должны быть освещены следующие вопросы:

- свойства получаемого продукта;
- характеристика перерабатываемого сырья;
- существующие методы получения заданного продукта;
- физико-химические основы производства, основные параметры промышленного производства;
- существующие технологии производства продукта; обоснование выбора технологической схемы и ее подробное описание;
- применение продукта;
- отходы производства, возможности их использования или утилизации;
- сведения о мировом и российском производстве и потреблении (экспорт, импорт);
- перспективы развития производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бесков, С. Д.** Технохимические расчеты [Текст] : учеб. пособие для хим.- технол. вузов / С. Д. Бесков. - М.: Книга по Требованию, 2012. – 467 с. ISBN 978-5-458-42192-8.
2. Краткий справочник физико-химических величин. Издание девятое/Под ред. А.А. Равделя и А. М. Пономаревой.— СПб.: Специальная Литература, 1998.—232 с: ISBN 5-86457-116-4
3. **Савельев, Н.И.** Балансовые расчеты химико-технологических процессов[Текст]: учеб. пособие. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – 136 с. ISBN 978-57677-1917-4.
4. Расчеты химико-технологических процессов [Текст]: / Под ред. И.П. Мухленова. Л.:Химия, 1982.-248с.

5. Расчеты по технологии неорганических веществ[Текст]: / Под ред. М.Е. Позина. Л.:Химия, 1977.-496с.

6. Практикум по коллоидной химии: [Электронный ресурс] Учебное пособие для вузов / В.Д. Должикова, Н.М. Задьмова, Л.И. Лопатина; Под ред. В.Г. Куличихина. - М.: Вузовский учебник: НИЦ Инфра-М, 2012. - 288 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog.php?bookinfo=253361> ISBN 978-5-9558-0217-6.

7. **Крылова, С.А.** Расчет состояния элементов химико-технологических систем [Электронный ресурс]: учеб. пособие/ С.А. Крылова, З.И. Костина, И.В. Понурко, А.В. Горохов - Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2014. (2,93 Мб).- 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с титул.экрана.

8. **Крылова, С.А.** Материальные и тепловые расчеты химико-технологических процессов [Текст]: учеб. пособие/ З.И. Костина, И.В. Понурко, А.В. Горохов.- Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. Техн.ун-та им.Г.И. Носова, 2011. 50 с.

9. **Крылова С.А.** Производство метанола[Текст]: Метод. указ. к курс. работе,ч.1/ С.А. Крылова, З.И. Костина, А.И. Волков. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007.19с.

10. **Туболкин А.Ф.** Расчеты химико-технологических процессов [Текст]: Учебное пособие для вузов./ Туболкин А.Ф., Тумаркина Е.С., Тарат Э.Я. и др.; под ред. И.П. Мухленова - Л.: Химия , 1982.- 248с. ил.

11. **Брянкин, К.В.** Общая химическая технология [Текст]: 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. – Ч. 2. – 172 с. – 150 экз. – ISBN 5-8265-0521-4.

12. **Бесков В.С.** Общая химическая технология [Текст]: Учебник для вузов./В.С. Бесков .- М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.-452с. 6 ил., табл.- ISBN 5-94628-150-Х.

13. **Кутепов А.М.** Общая химическая технология [Текст]:Учебник для техн. вузов / А.М. Кутепов, Т.И.Бондарева, М.Г. Беренгартен. М.: Академкнига, 2004.-528с.: ил. — ISBN 5-94628-079-1.

14. Основы химической технологии [Текст]: учебник для студентов хим.-технол. спец. вузов / под ред. И.П. Мухленова. – Москва : Высшая школа, 1991 . – 463 с. : ил. : (в пер.):02-20.

15. Основы проектирования химических производств [Электронный ресурс]: учебник / С. И. Дворецкий, Д. С. Дворецкий, Г. С. Кормильцин, А. А. Пахомов. – Москва: Издательский дом «Спектр», 2014. – 356 с. – ISBN 978-5-4442-0069. Режим доступа: <http://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2014/dvorecky2.pdf>

16. Под ред И.П.Мухленова. Основы химической технологии[Текст]: учебник для студентов хим.-технол. спец. вузов / ред. И.П. Мухленова под. . – Москва : Высшая школа, 1991 . – 463 с. : ил. : (в пер.):02-20 .

17. **Порфитьева, Р.** Химическая технология неорганических веществ [Текст]: учебное пособие: в 2-х кн.Кн.1/ Порфитьева Р., Бушлакова Т. П., Ахметов Н. С., Ахметова Т. Г., Ахметова Т.Г. Под ред. Ахметова Т.Г.- М.:Высшая школа, 2002.-688 с.- ISBN: 5-06-004244-8.

18. **Тимофеев, В.С.** Принципы технологии основного органического и нефтехимического синтеза : учебное пособие / В. С. Тимофеев, Л. А. Серафимов . – 2-е изд., перераб . – М. : Высшая школа, 2003 . – 536 с. - ISBN 5-06-004267-7 .

19. **Игнатенков В.И.** Примеры и задачи по общей химической технологии [Текст]: Учебное пособие для вузов./ Игнатенков В.И., Бесков В.С.- М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.- 198 с. : ил.- ISBN 5-94628-130-5.

20. **Кандауров Б.П.** Общая химическая технология [Текст]: учеб. пособие для студ.высш.учеб.заведений/ Кандауров Б.П., Александров В.И., Артемов А.В.- М.: Издат.центр "Академия", 2005.- 336 с. — ISBN 5-7695-1792-1.

21. **Швалёв Ю.Б.** Общая химическая технология. Химические процессы и реакторы [Текст]: учебное пособие./ Швалёв Ю. Б., Коробочкин В. В. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 180 с.

22. **Фридрихсберг, Д.А.** Курс коллоидной химии [Текст] / Д.А. Фридрихсберг. – М.: Лань, 2010 – 416 с. ISBN: 978-5-8114-1070-5.

23. **Гельфман, М.И.** Коллоидная химия [Текст] : М.И. Гельфман. – М.: "Лань", 2010 – 416 с. ISBN 978-5-8114-1070-5

24. **Пат. РФ №2303084.** Композиция для защиты от коррозии и солеотложений систем водоснабжения и водоотведения [Текст]:/ Б.А. Никифоров, З.И. Костина, Г.С. Слободжанкин, С.А. Крылова, В.Ф. Костин, И.В. Понурко - 2006123610/02; заявл. 03.07. 2006; опуб. 20.07.2007 Бюл. № 20.

25. **Пат. РФ №2535891.** Композиция для защиты систем водоснабжения и водоотведения [Текст]: / Костина З.И., Костин В.Ф., Крылова С.А., Понурко И.В. – 2013146323/02; заявл.16.10.2013; опуб.20.12.2014 Бюл.№35.

26. **Костина, З.И.** Защита металлических поверхностей водоохлаждающих систем от коррозии и солеотложений /З.И. Костина, С.А. Крылова, И.В. Понурко //Теория и технология металлургического производства.- №1 (14) 2014.- С. 90-92.

27. **Костина, З.И.** Защита водонагревательных элементов бытовых приборов от коррозии и солеотложений / З.И. Костина, С.А. Крылова, И.В. Понурко//Энергосбережение и водоподготовка. - № 4 (90). – 2014.-С. 28-32.

28. **Костина, З.И.** Получение и свойства стекловидной метафосфатной композиции для защиты элементов водонагревательных систем от коррозии / З.И. Костина, С.А.Крылова, И.В. Понурко// Стекло и керамика. – № 2. - 2016. – С. 39-42.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Справочные таблицы

Таблица III

Свойства серной кислоты

Содержание, % масс.		Плотность (при 20 °C), кг/м ³	Теплоём- кость (при 20 °C), кДж/(кг·К)	Температура, °C	
H ₂ SO ₄	SO ₃ общ			Кристал- лизации	Кипения
1	0,816	1004,9	4,14	- 0,2	100,2
2	1,633	1011,6	4,10	- 0,5	100,4
3	2,45	1018,3	4,06	- 0,8	100,6
4	3,265	1025,0	4,02	- 1,2	100,8
5	4,08	1034,7	3,98	- 1,75	101,0
6	4,90	1038,5	3,94	- 2,3	101,2
7	5,71	1045,3	3,90	- 3,0	101,4
8	6,53	1052,2	3,86	- 3,7	101,6
9	7,35	1059,1	3,83	- 4,6	101,8
10	8,16	1066,1	3,79	- 5,5	102,0
11	8,98	1073,1	3,75	- 6,5	102,2
12	9,80	1080,2	3,71	- 7,6	102,4
13	10,61	1087,4	3,67	- 8,7	102,7
14	11,43	1094,7	3,64	- 9,9	102,9
15	12,25	1102,0	3,60	- 11,25	103,1
16	13,06	1109,4	3,57	- 12,6	103,4
17	13,88	1116,8	3,53	- 14,1	103,6
18	14,69	1124,3	3,49	- 15,7	103,8
19	15,51	1131,8	3,46	- 17,3	104,1
20	16,33	1139,4	3,43	- 19,0	104,4
21	17,14	1147,1	3,39	- 20,8	104,6
22	17,96	1154,8	3,36	- 22,7	104,9
23	18,78	1162,6	3,33	- 24,6	105,2
24	19,59	1170,4	3,30	- 26,7	105,5
25	20,41	1178,3	3,26	- 28,8	105,9
26	21,22	1186,2	3,23-	- 31,1	106,3
27	22,04	1194,2	3,20	- 33,4	106,6
28	22,86	1202,3	3,17	- 35,85	107,0
29	23,67	1210,4	3,14	- 38,4	107,4
30	24,49	1218,5	3,10	- 41,2	107,9
31	25,31	1226,7	3,07	- 44,1	108,3
32	26,12	1234,9	3,04	- 47,2	108,8
33	26,94	1243,2	3,01	- 50,6	109,0

Продолжение приложения I
Продолжение таблицы III

Содержание, % масс.		Плотность (при 20 °C), кг/м ³	Теплоём- кость (при 20 °C), кДж/(кг·K)	Температура, °C	
H ₂ SO ₄	SO ₃ общ			Кристал- лизации	Кипения
35	28,57	1259,9	2,95	- 58,5	110,5
36	29,39	1268,4	2,92	- 63,3	111,1
37	30,20	1276,9	2,89	- 68,5	111,7
38	31,02	1285,5	2,86	- 74,5	112,4
39	31,84	1294,1	2,83	- 69,6	113,1
40	32,65	1302,8	2,80	- 65,2	113,9
41	33,47	1311,6	2,78	- 61,0	114,7
42	34,28	1320,5	2,75	- 57,1	115,6
43	35,10	1329,4	2,73	- 53,4	116,5
44	35,92	1338,4	2,70	- 50,0	117,4
45	36,73	1347,6	2,67	- 46,8	118,4
46	37,55	1356,9	2,64	- 43,8	119,5
47	38,37	1366,3	2,61	- 41,0	120,6
48	39,18	1375,8	2,59	- 38,5	121,8
49	40,00	1385,4	2,56	- 36,2	123,1
50	40,82	1395,1	2,53	- 34,2	124,4
51	41,63	1404,9	2,51	- 32,3	125,8
52	42,45	1414,8	2,48	- 30,9	127,2
53	43,26	1424,8	4,45	- 29,6	128,7
54	44,08	1435,0	2,43	- 28,3	130,4
55	44,90	1445,3	2,40	- 27,1	132,0
56	45,71	1455,7	2,38	- 25,9	133,8
57	46,53	1466,2	2,35	- 24,8	135,7
58	47,35	1476,8	2,33	- 24,5	137,6
59	48,16	1487,5	2,31	- 24,85	139,6
60	48,98	1498,3	2,28	- 25,8	141,8
61	49,79	1509,1	2,26	- 27,15	144,0
62	50,61	1520,0	2,23	- 28,85	146,4
63	51,43	1531,0	2,21	- 30,8	148,8
64	52,24	1542,1	2,18	- 33,0	151,4
65	53,06	1553,3	2,16	- 35,3	154,1
66	53,88	1564,6	2,14	- 37,75	156,8
67	54,69	1576,0	2,12	- 40,3	159,7
68	55,51	1587,4	2,09	--	162,8

Продолжение приложения I
Окончание таблицы П1

Содержание, % масс.		Плотность (при 20 °C), кг/м ³	Теплоём- кость (при 20 °C), кДж/(кг·K)	Температура, °C	
H ₂ SO ₄	SO ₃ общ			Кристал- лизации	Кипения
69	56,53	1598,9	2,07	- 44,0	165,9
70	57,14	1610,5	2,05	- 42,0	169,2
71	57,96	1622,1	2,03	- 40,6	172,6
72	58,78	1633,8	2,00	- 39,8	176,2
73	59,79	1645,6	1,98	- 39,6	179,9
74	60,41	1657,4	1,96	- 40,0	183,8
75	61,22	1669,2	1,94	- 51,0	187,8
76	62,04	1681,0	1,92	- 28,1	191,2
77	62,86	1692,7	1,89	- 19,4	196,2
78	63,67	1704,3	1,87	- 13,6	200,7
79	64,49	1715,8	1,85	- 8,2	205,4
80	65,3	1727,2	1,83	- 3,0	210,2
81	66,12	1738,3	1,81	1,5	215,2
82	66,94	1749,1	1,79	4,8	220,4
83	67,75	1759,4	1,77	7,0	225,7
84	68,57	1769,3	1,74	8,0	231,3
85	69,39	1778,6	1,72	7,9	237,1
86	70,20	1787,2	1,70	6,6	243,0
87	71,02	1795,1	1,68	4,1	249,2
88	71,84	1802,2	1,66	0,5	255,5
89	72,65	1808,7	1,64	- 4,2	262,1
90	73,47	1814,4	1,62	- 10,2	268,9
91	74,28	1819,5	1,60	- 17,3	275,9
92	75,10	1824,0	1,58	- 25,6	283,2
93	75,92	1827,9	1,56	- 35,0	290,6
94	76,73	1831,2	1,54	- 30,8	298,4
95	77,55	1833,7	1,52	- 21,8	306,3
96	78,36	1835,5	1,50	- 13,6	314,5
97	79,18	1836,3	1,48	- 6,3	323,0
98	80,00	1836,5	1,45	0,1	332,4
99	80,81	1834,2	1,43	5,7	318,0
100	81,63	1830,5	1,41	10,45	296,2

Продолжение приложения 1
Таблица П2

Плотность растворов азотной кислоты (20°С)

Плотность, г/см ³	Концентрация		Плотность, г/см ³	Концентрация	
	%	г/ дм ³		%	г/ дм ³
1, 000	0, 3296	3, 295	1, 285	46, 06	591, 9
1, 005	1, 255	12, 61	1, 290	46, 85	604, 3
1, 010	2, 164	21, 85	1, 295	47, 63	616, 8
1, 015	3, 073	31, 19	1, 300	48, 42	629, 5
1, 020	3, 982	40, 61	1, 305	49, 21	642, 1
1, 025	4, 883	50, 05	1, 310	50, 00	644, 7
1, 030	5, 784	59, 57	1, 315	50, 85	668, 5
1, 035	6, 661	68, 93	1, 320	51, 71	682, 4
1, 040	7, 530	78, 32	1, 325	52, 56	696, 3
1, 045	8, 398	87, 77	1, 330	53, 41	710, 1
1, 050	9, 259	97, 22	1, 335	54, 27	724, 0
1, 055	10, 12	106, 7	1, 340	55, 13	738, 5
1, 060	10, 97	116, 3	1, 345	56, 04	753, 6
1, 065	11, 81	125, 8	1, 350	56, 95	768, 7
1, 070	12, 65	135, 3	1, 355	57, 87	783, 8
1, 075	13, 48	145, 0	1, 360	58, 78	799, 0
1, 080	14, 31	154, 6	1, 365	59, 69	814, 7
1, 085	15, 13	164, 1	1, 370	60, 67	831, 1
1, 090	15, 95	173, 8	1, 375	61, 69	848, 1
1, 095	16, 76	183, 5	1, 380	62, 70	865, 1
1, 100	17, 58	193, 3	1, 385	63, 72	882, 8
1, 105	18, 39	203, 1	1, 390	64, 74	900, 4
1, 110	19, 19	213, 0	1, 395	65, 84	918, 1
1, 115	20, 00	223, 0	1, 400	66, 97	937, 6
1, 120	20, 79	232, 9	1, 405	68, 10	956, 6
1, 125	21, 59	242, 8	1, 410	69, 23	976, 0
1, 130	22, 38	252, 8	1, 415	70, 34	996, 2

Продолжение приложения 1
Окончание таблицы П2

Плотность, г/см ³	Концентрация		Плотность, г/см ³	Концентрация	
	%	г/ дм ³		%	г/ дм ³
1, 135	23, 16	262, 8	1, 420	71, 63	1017
1, 140	23, 94	272, 8	1, 425	72, 86	1038
1, 145	24, 71	282, 9	1, 430	74, 09	1059
1, 150	25, 48	292, 9	1, 435	74, 35	1081
1, 155	26, 24	303, 1	1, 440	76, 71	1105
1, 160	27, 00	313, 2	1, 445	78, 07	1128
1, 165	27, 26	323, 4	1, 450	79, 43	1152
1, 170	28, 51	333, 5	1, 455	80, 88	1177
1, 175	29, 25	343, 7	1, 460	82, 39	1203
1, 180	30, 00	354, 0	1, 465	83, 91	1229
1, 185	30, 74	364, 2	1, 470	85, 50	1257
1, 190	31, 47	374, 5	1, 475	87, 29	1287
1, 195	32, 21	385, 0	1, 480	89, 07	1318
1, 200	32, 94	395, 3	1, 485	91, 13	1353
1, 205	33, 68	405, 8	1, 490	93, 19	1393
1, 210	34, 41	416, 3	1, 495	95, 46	1427
1, 215	35, 16	427, 1	1, 500	96, 73	1450
1, 220	35, 93	438, 3	1, 501	96, 98	1456
1, 225	36, 70	449, 6	1, 502	97, 23	1461
1, 230	37, 48	460, 9	1, 503	97, 49	1465
1, 235	38, 25	472, 4	1, 504	97, 74	1470
1, 240	39, 02	483, 8	1, 505	97, 99	1474
1, 245	39, 80	495, 5	1, 506	98, 25	1479
1, 250	40, 58	505, 2	1, 507	98, 50	1485
1, 255	41, 36	519, 0	1, 508	98, 76	1490
1, 260	42, 14	530, 9	1, 509	99, 01	1494
1, 265	42, 92	542, 9	1, 510	99, 26	1499
1, 270	43, 70	555, 0	1, 511	99, 52	1503
1, 275	44, 48	567, 2	1, 512	99, 74	1508
1, 280	45, 27	579, 4	1, 513	100, 00	1513

Факторы пересчета (аналитические множители)

Наименование вещества	Химическая формула	Молярная масса, г/моль	Фактор пересчета
Триполи-фосфат натрия (ТПФ Na)	$\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10} = 2,5 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot 1,5 \text{P}_2\text{O}_5$	$M(\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}) = 2,5 \cdot 62 + 1,5 \cdot 142 = 368$ $M(\text{Na}_2\text{O}) = 23 \cdot 2 + 16 = 62$ $M(\text{P}_2\text{O}_5) = 31 \cdot 2 + 16 \cdot 5 = 142$	$F(\text{ТПФ Na} / \text{Na}_2\text{O}) = F \frac{\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}}{2,5\text{Na}_2\text{O}} = \frac{368}{155} = 2,374$ $F(\text{P}_2\text{O}_5 / \text{ТПФ Na}) = F \frac{1,5\text{P}_2\text{O}_5}{\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}} = \frac{213}{368} = 0,579$ $F(\text{Na}_2\text{O} / \text{ТПФ Na}) = F \frac{2,5\text{Na}_2\text{O}}{\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}} = \frac{155}{368} = 0,421$
Гексамета-фосфат натрия (ГМФ Na)	$2\text{NaPO}_3 = \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$	$M(\text{NaPO}_3) = 142 + 62 = 204$ $M(\text{Na}_2\text{O}) = 23 \cdot 2 + 16 = 62$ $M(\text{P}_2\text{O}_5) = 31 \cdot 2 + 16 \cdot 5 = 142$	$F(\text{ГМФ Na} / \text{Na}_2\text{O}) = F \frac{2\text{NaPO}_3}{\text{Na}_2\text{O}} = \frac{204}{62} = 3,290$ $F(\text{P}_2\text{O}_5 / \text{ГМФ Na}) = F \frac{\text{P}_2\text{O}_5}{2\text{NaPO}_3} = \frac{142}{204} = 0,696$

Наименование вещества	Химическая формула	Молярная масса, г/моль	Фактор пересчета
Дигидрофосфат натрия (ДФ Na)	$2\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$M(\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) = 62 + 142 + 6 \cdot 18 = 312$ $M(\text{Na}_2\text{O}) = 23 \cdot 2 + 16 = 62$ $M(\text{P}_2\text{O}_5) = 1 \cdot 2 + 16 \cdot 5 = 142$ $M(\text{H}_2\text{O}) = 1 \cdot 2 + 16 = 18$	$F(\text{ДФ Na} / \text{Na}_2\text{O}) = F \frac{2\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}{\text{Na}_2\text{O}} = \frac{312}{62} = 5,032$ $F(\text{P}_2\text{O}_5 / \text{ДФ Na}) = F \frac{\text{P}_2\text{O}_5}{2\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} = \frac{142}{312} = 0,455$
Фосфорная кислота	$2\text{H}_3\text{PO}_4 = \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$M(\text{H}_3\text{PO}_4) = 142 + 3 \cdot 18 = 196$ $M(\text{P}_2\text{O}_5) = 31 \cdot 2 + 16 \cdot 5 = 142$ $M(\text{H}_2\text{O}) = 1 \cdot 2 + 16 = 18$	$F(\text{P}_2\text{O}_5 / \text{H}_3\text{PO}_4) = \frac{142}{2 \cdot 196} = 0,362$
Карбонат натрия	$\text{Na}_2\text{CO}_3 = \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CO}_2$	$M = 62 + 44 = 106$ $M(\text{Na}_2\text{O}) = 3 \cdot 2 + 16 = 62$ $M(\text{CO}_2) = 12 + 16 \cdot 2 = 44$	$F(\text{Na}_2\text{CO}_3 / \text{Na}_2\text{O}) = \frac{106}{44} = 2,409$

Продолжение приложения 1
Окончание таблицы ПЗ

Наименование вещества	Химическая формула	Молярная масса, г/моль	Фактор пересчета
Дигидрофосфат кальция (ДФ Ca)	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} =$ $= \text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$M(\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}) =$ $= 56 + 142 + 3 \cdot 18 = 246$ $M(\text{CaO}) = 40 + 16 = 56$ $M(\text{P}_2\text{O}_5) = 1 \cdot 2 + 16 \cdot 5 = 142$ $M(\text{H}_2\text{O}) = 1 \cdot 2 + 16 = 18$	$F(\text{ДФ Ca} / \text{CaO}) = F \frac{\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}}{\text{CaO}} =$ $= \frac{246}{56} = 4,393$ $F(\text{P}_2\text{O}_5 / \text{ДФ Ca}) = F \frac{\text{P}_2\text{O}_5}{\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}} =$ $= \frac{142}{246} = 0,577$
Метафосфат кальция	$\text{Ca}(\text{PO}_3)_2 = \text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$	$M = 56 + 142 = 198$ $M(\text{CaO}) = 40 + 16 = 56$ $M(\text{P}_2\text{O}_5) =$ $31 \cdot 2 + 16 \cdot 5 = 142$	$F(\text{P}_2\text{O}_5 / \text{Ca}(\text{PO}_3)_2) = \frac{142}{198} = 0,717$
Нитрат цинка	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} =$ $= \text{ZnO} \cdot \text{N}_2\text{O}_5 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$M = 81 + 108 + 6 \cdot 18 = 297$ $M(\text{ZnO}) = 65,4 + 16 = 81$ $M(\text{N}_2\text{O}_5) = 14 \cdot 2 + 16 \cdot 5 =$ $= 108$	$F \frac{\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}}{\text{ZnO}} = \frac{297}{81} = 3,666$

Продолжение приложения 1
Таблица П4

Давление насыщенного водяного пара при различных температурах

Температура, °С	Па	Температура, °С	Па	Темпера- тура, °С	Па
-60	1,333	6	935	30	4250
-50	5,332	8	1065	31	4460
-40	16,00	10	1225	32	4720
-30	40,00	12	1400	33	5000
-20	120	14	1600	34	5270
-10	254	15	1710	36	5900
-9	274	16	1816	38	6670
-8	307	17	1940	40	7330
-7	334	18	2070	42	8150
-6	360	19	2100	44	9060
-5	400	20	2340	46	$10 \cdot 10^3$
-4	440	21	2430	48	$11,1 \cdot 10^3$
-3	480	22	2640	50	$12,3 \cdot 10^3$
-2	520	23	2830	60	$19,9 \cdot 10^3$
-1	560	24	2990	70	$31,4 \cdot 10^3$
0	615	25	3180	80	$47,2 \cdot 10^3$
2	706	26	3380	100	$101,3 \cdot 10^3$

Теплоёмкость водных растворов азотной кислоты
(кДж/(кг·К))

HNO ₃ , % масс.	Температура, °С			
	2	20	40	60
1	4,157	4,157	4,123	4,144
2	4,094	4,102	4,073	4,102
4	3,989	3,977	3,956	4,019
6	3,880	3,893	3,889	4,935
10	3,700	3,725	3,730	3,767
15	3,517	3,516	3,562	3,600
20	3,345	3,349	3,412	3,474
25	3,211	3,265	3,290	3,349
30	3,093	3,181	3,198	3,265
35	2,977	3,098	3,114	3,223
40	2,922	3,014	3,039	3,139
45	2,855	2,930	2,968	3,056
50	2,792	2,763	2,826	2,888
55	2,717	2,721	2,738	2,847
60	2,637	2,679	2,685	2,805
65	2,541	2,295	2,633	2,679
70	2,440	2,470	2,524	2,553
75	2,336	2,386	2,403	2,428
80	2,244	2,260	2,294	2,299
85	2,156	2,177	2,181	2,219
90	2,051	2,051	2,064	2,093
95	1,909	1,926	1,930	1,926
100	1,748	1,758	1,768	1,800

Продолжение приложения 1

Таблица П6

Свойства водных растворов фосфорной кислоты

Содержание, % (масс.)		Температура затвердевания, °С	Температура кипения, °С	Теплоёмкость C_p^0 , кДж/(кг·К)	η Па·с (25°С)	Удельная электрическая проводимость, Ом/м (25°С)	Давление пара, Па (25°С)
H ₃ PO ₄	P ₂ O ₅						
5	3.62	0.8	100,10	4,0737	0,0010	10,0	3129,1
10	7.24	-2.10	100,20	3,9314	0,0011	18,5	3087,7
20	14.49	-6.00	100,80	3,6467	0.0016	18,3	2986,4
30	21,73	-11.80	101,80	3,3411	0,0023	14,3	2835,7
40	28,96	-21.90	103,90	3,0271	0,0035	11,0	2553,1
50	36,22	-41.90	104,00	2,7465	0,0051	8,0	2223,8
60	43,47	-76.90	114,90	2,4995	0,0092	7,2	1737,1
70	50.72	-43.00	127,10	2,3278	0,0154	6,3	1122,6
75	54.32	-17.55	135,00	2,2692	0,0200	5,8	805,2

Продолжение приложения 1

Таблица П7

Удельная теплоемкость некоторых твердых веществ

Вещество	C_p^0 (298К) Дж/(моль·К)	Средняя удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Температурные границы, °С
Al ₂ O ₃	79,0	$0.872+3.68 \cdot 10^{-4} \cdot t$ (приблизленно)	0 ÷ 1000
Al(OH) ₃	93,1	-	-
Na ₂ SO ₄	128,0	-	-
NH ₄ NO ₃	139,3	-	-
(NH ₄) ₂ SO ₄	187	-	-
FeS ₂	62,2	-	-

Продолжение приложения 1
Окончание таблицы П7

Вещество	C_p° (298K) Дж/(моль·K)	Средняя удельная теплоемкость, кДж/(кг·K)	Температурные границы, °C
Fe ₂ O ₃	103,8	$0,611+5,34 \cdot 10^{-4} \cdot t+0,242 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0 ÷ 700
С графит	8,54	$0,796+9,5 \cdot 10^{-4} \cdot t+0,21 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$ 1,80 – 1,95	0 ÷ 1300 600 ÷ 1200
NaOH	59,5	-	-

Продолжение приложения 1
Таблица П8

Удельная теплоемкость жидких веществ

Вещество	Химическая формула	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·K)	Температурные границы, °C
Аммиак (жидкий)	NH ₃	4.41	- 40
		4.60	0
		5.10	60
Ацетон	(CH ₃) ₂ CO	2,12+0,0032t	-30 ÷ +56
Бензол	C ₆ H ₆	1,58	0
		1,63	5
		1,70	20
		1,98	90
Вода	H ₂ O	4,190	0
		4,187	4
		4,188	100
Кислота серная (конц)	H ₂ SO ₄	1.42+0.00159t	10 ÷ 45
Спирт метиловый	CH ₃ OH	2,374	0
		2,580	40
Спирт этиловый	C ₂ H ₅ OH	1,980	-50
		2,240	0
		2,430	25
		3,450	100

Продолжение приложения 1
Таблица П9

Средняя молярная теплоемкость газов от 0 до t °С при нормальном давлении

Температура, °С	Значение средней молярной теплоёмкости c , кДж/(кмоль·град)							
	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O, H ₂ S	CH ₄	NH ₃
0	28,8	29,3	28,4	28,42	37,7	32,5	33,4	34,7
100	29,0	29,6	28,7	28,9	39,2	33,2	36,6	36,2
200	29,1	30,1	29,0	29,2	440,6	33,8	39,8	37,8
300	29,15	30,5	29,4	29,6	41,9	34,5	42,0	39,4
400	29,2	30,9	29,6	29,9	43,2	35,1	45,5	40,8
500	29,3	31,3	30,0	30,2	44,4	35,6	48,3	42,3
600	29,4	31,8	30,3	30,5	45,5	36,0	50,9	43,7
700	29,5	32,0	30,6	30,8	46,5	36,6	53,5	45,1
800	29,6	32,3	30,8	31,2	47,5	37,5	55,8	46,4
900	29,7	32,7	31,1	31,5	48,5	38,0	58,1	47,6
1000	29,8	33,0	31,4	31,7	49,3	38,6	60,2	48,8
1100	29,9	33,4	31,6	31,9	50,1	39,1	62,4	-
1200	30,0	33,8	31,8	32,2	50,9	39,6	64,4	-
1300	30,2	34,0	32,0	32,4	51,4	40,2	66,1	-
1400	30,4	34,1	32,2	32,6	52,0	40,7	67,8	-
1500	30,6	34,3	32,4	32,9	52,6	41,2	69,2	-
1600	30,8	34,5	32,7	33,1	53,1	41,8	-	-
1700	31,0	34,7	32,9	33,3	53,5	42,3	-	-
1800	31,2	34,9	33,1	33,4	53,9	42,8	-	-
1900	31,4	35,1	33,2	33,6	54,2	43,2	-	-
2000	31,6	35,3	33,4	33,8	54,5	43,6	-	-

Продолжение приложения 1
Окончание таблицы П9

Температура, °С	Значение средней молярной теплоёмкости c , кДж/(кмоль·град)								
	NO	C ₂ H ₄	SO ₂	C ₂ H ₂	Воздух	Формальдегид	Метиловый спирт	Этиловый спирт	Уксусная кислота
0	28,5	39,4	41,2	46,2	28,6	35,2	49,0	74,6	54,0
100	29,0	42,1	42,4	47,8	29,0	37,4	53,7	80,5	57,8
200	29,5	48,6	43,5	49,6	29,3	39,6	57,0	86,6	61,6
300	29,9	53,3	44,7	51,3	29,7	41,1	62,8	92,2	64,7
400	30,3	57,9	45,8	53,0	30,0	43,8	65,8	97,2	66,2
500	30,6	62,5	46,6	54,4	30,3	45,9	70,0	101,4	68,3
600	31,0	67,0	47,5	56,0	30,6	47,8	74,2	105,2	70,7
700	31,3	71,7	48,5	57,4	30,9	49,5	-	108,2	-
800	31,6	76,3	49,3	58,7	31,2	51,1	-	110,2	-
900	31,9	82,0	50,0	60,0	31,4	52,8	-	112,0	-
1000	32,2	84,0	50,6	61,2	31,7	54,0	-	112,3	-
1100	32,5	90,1	50,9	62,3	31,9	55,4	-	112,6	-
1200	32,7	94,7	51,3	63,4	32,2	57,0	-	112,9	-
1300	-	-	51,7	64,3	32,4	-	-	-	-
1400	-	-	52,0	65,2	32,6	-	-	-	-
1500	-	-	52,3	66,0	32,9	-	-	-	-
1600	-	-	52,6	-	33,1	-	-	-	-
1700	-	-	52,9	-	33,2	-	-	-	-
1800	-	-	53,1	-	33,4	-	-	-	-
1900	-	-	53,3	-	33,5	-	-	-	-
2000	-	-	53,5	-	33,7	-	-	-	-

Теплоты сгорания органических соединений
(при 18 °С и нормальном давлении)

Конечные продукты: CO₂ (газ), H₂O (жидк.), SO₂ (газ), N₂ (газ)
г-газ, ж-жидкость, тв.- твердое вещество

Соединение	Состояние	Формула	Теплота сгорания <i>кДж/кмоль</i>
Углерод	Графит	C	395 000
-	Кокс	C	406 000
Окись углерода	г	CO	285 500
Водород	-	H ₂	286 000
Сероводород	-	H ₂ S	580 000
<i>Углеводороды</i>			
Метан	г	CH ₄	894 000
Этан	-	C ₂ H ₆	1 562 000
Пропан	-	C ₃ H ₈	2 223 000
Бутан	-	C ₄ H ₁₀	2 884 000
<i>изо</i> -Бутан	-	C ₄ H ₁₀	2 879 000
Пентан	-	C ₅ H ₁₂	3 542 000
<i>изо</i> -Пентан	-	C ₅ H ₁₂	3 516 000
	ж		3 540 000
Гексан	-	C ₆ H ₁₄	4 150 000
Гептан	-	C ₇ H ₁₆	4 810 000

Продолжение приложения 1
Окончание таблицы П10

Соединение	Состояние	Формула	Теплота сгорания <i>кДж/кмоль</i>
Октан	-	C_8H_{18}	5 476 000
Этилен	г	$CH_2=CH_2$	1 390 000
Пропилен	-	$C_2H_4=CH_2$	2 056 000
<i>изо</i> -Бутилен	-	$C_3H_6=CH_2$	3 710 000
Амилен	ж	$C_4H_8=CH_2$	3 364 000
Гексилен	-	$C_5H_{10}=CH_2$	3 996 000
Ацетилен	г	$CH \equiv CH$	1 308 000
Аллилен	-	$CH_3 - C \equiv CH$	1 946 000
Триметилен (циклопропан)	-		2 080 000

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Перечень вопросов для подготовки к экзамену

1. Химическое производство. Иерархическая организация процессов в химическом производстве: молекулярный уровень, уровень малого объема, уровень потока, уровень реактора, уровень системы. Материальные объекты в химическом производстве: сырье, промежуточный продукт, побочный продукт, отходы хим. Производства.
2. Классификация основных процессов химической технологии. Гидро-механические, массообменные (диффузионные), тепловые, химические и механические процессы.
3. Химико-технологический процесс. Классификация ХТП . Лимитирующие стадии. Процессы, протекающие в кинетической, диффузионной и переходной областях.
4. Критерии эффективности хим.производства и ХТП: технические, экономические; социальные. Современные требования к химическому производству.
5. Сырьевая база химической промышленности. Классификация сырья. Обогащение сырья. Принципы обогащения твердого сырья. Вторичные материальные ресурсы.
6. Вода в химической промышленности. Классификация природных вод. Показатели качества воды. Промышленная водоподготовка. Основные операции по очистке воды. Методы очистки сточных вод. Водооборотные циклы
7. Энергетическая база химической промышленности. Возобновляемые и невозобновляемые энергетические ресурсы. Энергия в химическом производстве. Химическое топливо. Состав. Энергетические характеристики: теплота сгорания, жаропроизводительность. Энерготехнология. Энерготехнологические схемы производства.
8. Направление химических реакций. Изменение энергии Гиббса в ходе реакции. Уравнение изотермы Вант- Гоффа. Основные задачи технологических расчетов на основании термодинамических закономерностей химических превращений.
9. Общие закономерности химических процессов. Равновесие в технологических процессах. Принцип Ле-Шателье. Способы смещения равновесия. Степень превращения сырья. выход продуктов.
10. Скорость химико-технологических процессов. Кинетическая и диффузионная области технологических процессов. Способы увеличения скорости процесса.

11. Факторы, определяющие скорость химико-технических процессов, протекающих в гомо- и гетерогенных средах. Роль концентрации реагентов, температуры, давления и обновления поверхности реагирующих фаз на скорость протекания технологических процессов.
12. Зависимость скорости реакции от концентрации реагентов. Кинетика элементарных (одностадийных) и неэлементарных (сложных) химических реакций. Кинетическое уравнение. Константа (коэффициент) скорости. Частный и общий порядок реакции (для элементарных и формально простых реакций). Дифференциальная селективность.
13. Зависимость скорости реакции от температуры. Энергия активации. Уравнение Аррениуса. Катализаторы. Промышленный катализ. Основные стадии гетерогенно-каталитических процессов. Контактные массы. Их состав.
14. Технологические приемы ускорения (замедления) реакций. Экономические и технологические факторы, ограничивающие применение высоких температур и давлений как средств регулирования скорости ХТП.
15. Основные технологические характеристики твердых катализаторов: активность, температура зажигания, селективность, пористость, устойчивость к контактному ядам.
16. Особенности аппаратного оформления каталитических процессов. Контактные аппараты (КА). Классификация их по состоянию катализатора и режиму его движения. Показатели работы КА: время контакта, объемная скорость, удельная производительность.
17. Промышленные химические реакторы. Классификация химических реакторов: по способу организации процесса; по характеру теплового режима; по характеру движения компонентов. Сравнение эффективности работы реакторов идеального вытеснения и идеального смешения.
18. Химико-технологические системы (ХТС). Структура ХТС. Классификация моделей ХТС. Описательные: химические, операционные, математические. Графические: функциональные, структурные, операторные, технологические.
19. Типы технологических связей между элементами химико-технологической системы, их назначение, привести примеры для конкретных производств.
20. Анализ, синтез и оптимизация ХТС.
21. Материальный баланс. Принципы составления материального баланса химико-технологического процесса. Энергетический (тепловой) баланс. Принцип его составления.

22. Производство водорода каталитической конверсией метана природного газа с водяным паром. Какими соображениями руководствуются при выборе схемы и условий процесса конверсии(давление, температура, состав реакционной смеси)?
23. Очистка природного газа от сернистых соединений. Приведите схему сероочистки.
24. Синтез аммиака из азота и водорода. Условия синтеза. Функциональная схема синтеза.
25. Очистка от CO и CO₂ после конверсии природного газа. Почему возникает ее необходимость? Способы и режимы очистки.
26. Производство разбавленной азотной кислоты. Условия синтеза. Химическая и функциональная схема производства.
27. Производство концентрированной азотной кислоты. Прямой (нитроолеумный) метод производства концентрированной азотной кислоты.
28. Производство серной кислоты контактным методом. Основные стадии процесса и условия их проведения. Преимущество печей КС (кипящего слоя) при осуществлении процесса обжига колчедана перед процессом в полочной печи.
29. Абсорбция триоксида серы в производстве серной кислоты . Анализ диаграммы температура кипения – состав H₂O-H₂SO₄-SO₃. Схема абсорбции.
30. Производство серной кислоты нитрозным методом.
31. Электротермическое получение элементарного фосфора и термической фосфорной кислоты. Химическая и функциональная схема производства.
32. Производство экстракционной фосфорной кислоты. Дегидратный, полигидратный и ангидритный способы разложения. Химическая и функциональная схема производства.
33. Производство аммиачной селитры. Физико-химические основы и технологическая схема производства . Использование теплоты нейтрализации.
34. Производство карбамида. Сырье. Химическая и функциональная схема производства. Условия синтеза.
35. Производство аммофоса. Сырье. Химическая и функциональная схема производства. Условия синтеза.

Учебное текстовое электронное издание

**Крылова Светлана Александровна
Абрахманов Роберт Назымович
Понурко Ирина Витальевна**

ОБЩАЯ ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Учебное пособие

1,45 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2017 год
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра физической химии и химической технологии
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru