

И. Некрашевич

**ШКОЛЬНЫЙ
РЕПЕТИТОР**

ХИМИЯ

8 – 11 класс

 **ПИТЕР®**

Москва · Санкт-Петербург · Нижний Новгород · Воронеж
Ростов-на-Дону · Екатеринбург · Самара · Новосибирск
Киев · Харьков · Минск

2008

ББК 24я7
УДК 54(075)
Н48

Некрашевич И. В.

Н48 Школьный репетитор. Химия. 8–11 класс (+CD с мультимедийной обучающей системой). — СПб.: Питер, 2008. — 304 с.: ил. — (Серия «Школьный репетитор»).

ISBN 978-5-91180-491-6

Химия кажется вам сложным и непонятным предметом? Вы не знаете, как решать химические задачи, составлять уравнения реакций, строить формулы? Репетитор по химии, который вы держите в руках, поможет решить эти проблемы.

Он состоит из двух частей — книги и диска с мультимедийной обучающей программой. На диске — решения 500 задач из основных школьных учебников за 8–11 классы по общей, органической и неорганической химии. В книге же подробно рассмотрены решения ключевых задач каждого типа с сопутствующими теоретическими пояснениями.

С нашим репетитором ваша учеба станет настоящим удовольствием!

ББК 24я7
УДК 54(075)

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Руководство по использованию диска	5
Установка программы	6
Работа с программой	10
Алгоритм решения задач	18
От издательства	18

Глава 1.

Основы общей химии	19
1.1. Основные понятия и законы химии	19
Масса атомов и молекул	19
Количество вещества, молярная масса	20
Закон постоянства состава	21
Закон сохранения массы	21
Закон Авогадро	22
Решение задач 1, 2, 6, 10, 11	24
Термохимические реакции	33
Решение задач 1, 5, 7, 10	36
1.2. Периодический закон Менделеева и строение атомов	44
Периодический закон	44
Строение атома	44
Электронная конфигурация	46
Решение задач 4, 8, 11, 18, 27, 28	47
1.3. Скорость реакции. Химическое равновесие	54
Скорость химической реакции	54
Химическое равновесие	56
Решение задач 1, 2, 4, 5, 8, 9	60
1.4. Свойства растворов	66
Способы выражения концентраций веществ в растворах	66
Молярная концентрация вещества	67
Массовая доля вещества	68
Мольная и объемная доли	68
Молярная концентрация	69
Решение задач 5, 15, 25, 29, 33, 35, 38, 40, 43, 49	69
Электролитическая диссоциация	96
Решение задач 3, 6, 11, 19	97
1.5. Гидролиз	106
Решение задач 1, 2, 8	108

1.6. Электролиз	112
Решение задач 2, 5, 9, 11, 15, 20	114

Глава 2

Химия неорганических соединений	130
2.1. Водород и галогены	130
Особенности химических свойств водорода	130
Решение задач 3, 5, 9, 12, 16	130
Галогены	139
Решение задач 9, 11, 12, 14, 24	140
2.2. Подгруппа кислорода	153
Сера. Решение задач 2, 5, 7, 9, 10, 14	155
Кислород. Решение задач 1, 6, 9, 13	170
2.3. Подгруппа азота	179
Азот. Решение задач 1, 5, 9, 11, 19	181
Фосфор. Решение задач 5, 10, 13	192
2.4. Подгруппа углерода	199
Углерод. Решение задач 5, 6, 7	200
Кремний. Решение задач 2, 4, 6	207
2.5. Общие свойства металлов	212
Отношение металлов к кислороду воздуха	213
Отношение металлов к воде	213
Отношение металлов к растворам кислот	214
Отношение металлов к растворам щелочей	214
Отношение металлов к растворам солей других металлов	215
Решение задач 4, 5, 13, 15, 21, 27, 31, 40, 48, 50	216

Глава 3

Химия органических соединений	235
3.1. Углеводороды	235
Решение задач 1, 7, 8, 10, 13, 16, 20, 25	237
3.2. Кислородсодержащие соединения	252
Спирты. Решение задач 10, 11, 12, 18	254
Фенолы. Решение задачи 2	263
Карбонильные соединения. Решение задач 5, 6	265
Кислоты. Решение задач 2, 3, 9	270
Эфиры. Решение задач 3, 6, 12	276
Углеводы. Решение задач 3, 6	280
3.3. Азотсодержащие соединения	285
Амины	285
Решение задач 3, 7, 9, 13, 24, 25	286
Аминокислоты	296
Решение задач 5, 10, 11	296

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемый курс состоит из диска и книги. Он является продолжением курса «TeachPro. Химия» и призван помочь вам в постижении основных разделов химии, изучаемых в школе. Диск содержит ровно 500 решенных задач, 120 из них (основные типы) более подробно рассмотрены в книге.

Нумерация задач в книге совпадает с нумерацией задач на диске, что делает вашу работу с диском более удобной.

Задания взяты из следующих источников.

1. Гольдфарб Я. Л. Сборник задач и упражнений по химии. 8–10 класс / Я. Л. Гольдфарб, Ю. В. Ходаков, Ю. Б. Додонов. — М.: Просвещение, 1984.
2. Будруджак П. Задачи по химии / П. Будруджак. — М.: Мир, 1989.
3. Гудкова А. С. 500 задач по химии / А. С. Гудкова, К. М. Ефремова, Н. Н. Магдесиева, Н. В. Мельчакова. — 2-е изд. — М.: Просвещение, 1981.
4. Магдесиева Н. Н. Учись решать задачи по химии / Н. Н. Магдесиева, Н. Е. Кузьменко. — М.: Просвещение, 1986.
5. Кузьменко Н. Е. Задачи по химии для абитуриентов. Курс повышенной сложности / Н. Е. Кузьменко, Н. Н. Магдесиева, В. В. Еремин. — М.: Просвещение, 1992.
6. Серeda И. П. Конкурсные задачи по химии / И. П. Серeda. — М.: Высшая школа, 1984.
7. Хомченко Г. П. Задачи по химии для поступающих в вузы / Г. П. Хомченко. — М.: Высшая школа, 1987.

Результаты экспериментов по подготовке пользователей ПК показали, что данная методика обучения является наиболее эффективным способом освоения прикладных программ.

РУКОВОДСТВО ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ДИСКА

Прежде чем установить прилагаемый к данной книге диск, внимательно прочтите руководство. Это поможет избежать возможных ошибок в работе и в конечном итоге сэкономит ваше драгоценное время.

Установка программы

Чтобы установить программу «TeachPro. Решебник по химии», вставьте прилагаемый диск в дисковод вашего персонального компьютера.

После начала автозагрузки на экране появится следующее изображение (рис. 1).

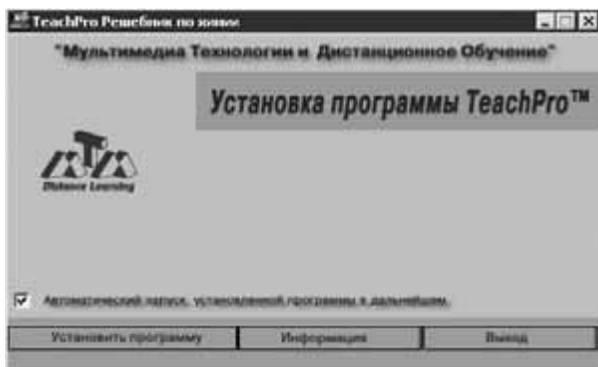


Рис. 1. Диалоговое окно при автозагрузке

Перед установкой вы можете ознакомиться с информацией о программе, нажав кнопку Информация (рис. 2).

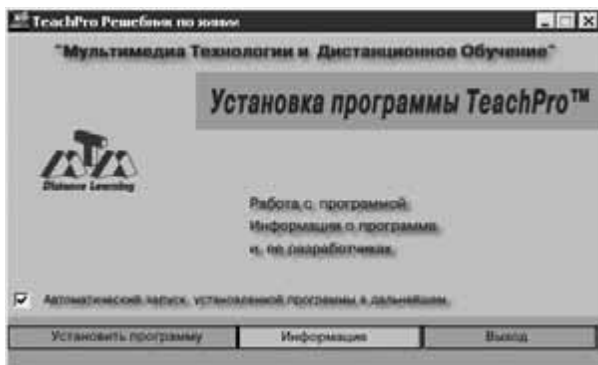


Рис. 2. Вид диалогового окна при подведении указателя мыши к кнопке Информация

При этом откроется HTML-документ, показанный на рис. 3.

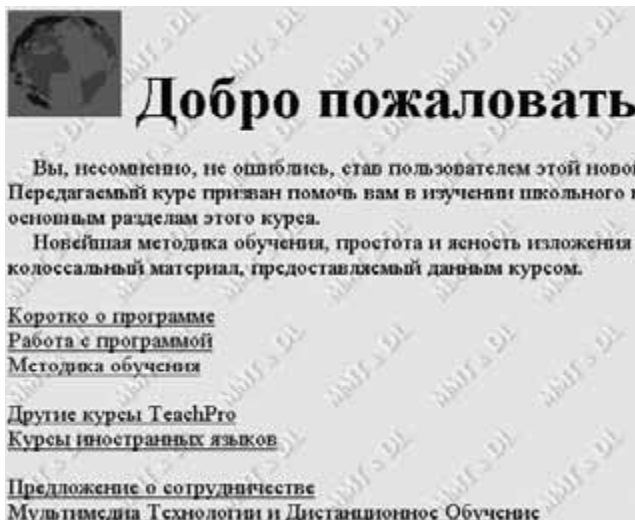


Рис. 3. Документ с информацией о программе «TeachPro. Решebник по химии»

Переходя по ссылкам, вы почерпнете информацию о том, что собой представляет данный курс, а также ознакомитесь с режимами обучения, функциями основных управляющих клавиш, требованиями к вашему персональному компьютеру.

Теперь вы можете установить программу «TeachPro. Решebник по химии» на жесткий диск, используя кнопку Установить программу стартового диалогового окна. При ее нажатии появится окно установки приложения (рис. 4).

Намите кнопку Далее. Перед вами появится окно выбора места установки программы (рис. 5).

В данном случае можно нажать Далее, если место установки приложения вас устраивает (по умолчанию программа будет установлена в папку C:\Program Files\MMT\TeachPro Chemistry Book). Если вы хотите его изменить, нажмите кнопку Обзор и выберите папку для установки. При нажатии кнопки Далее откроется окно выбора папки для программы в папке главного меню (рис. 6).

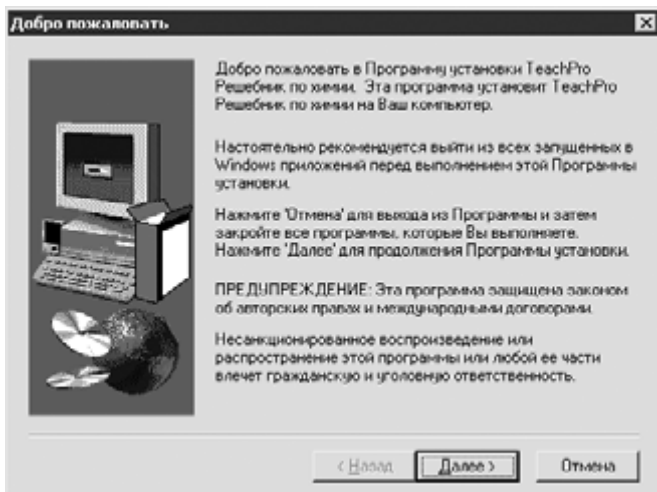


Рис. 4. Окно установки программы «TeachPro. Решebник по химии»



Рис. 5. Выбор папки для установки программы «TeachPro. Решebник по химии»

Вы можете ввести другое имя для обозначения программы «TeachPro. Решebник по химии», но это делать необязательно.



Рис. 6. Окно выбора в главном меню папки для программы «TeachPro. Решебник по химии»

При нажатии кнопки **Далее** откроется конечное окно установки приложения (рис. 7).

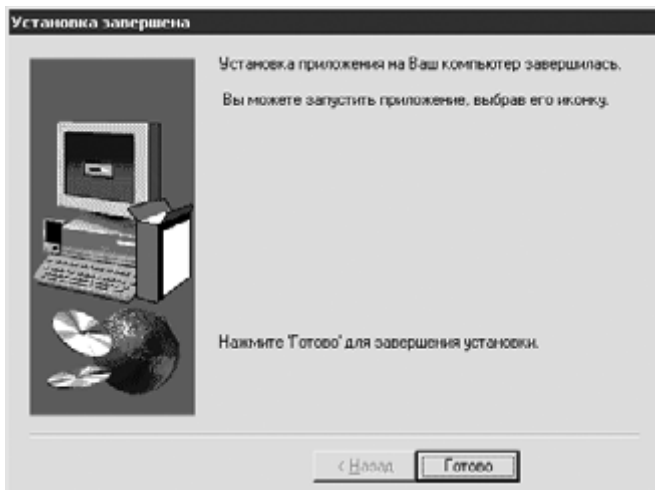


Рис. 7. Конечное окно установки программы «TeachPro. Решебник по химии»

Итак, программа «TeachPro. Решебник по химии» установлена. Нажмите кнопку **Готово**.

Однако следует отметить, что как таковая установка программы на ваш компьютер не производилась. На жесткий диск в папку TeachPro были записаны лишь необходимые для работы с диском служебные файлы (библиотеки `_ISREG32.DLL` и `DEISREG.ISR` и `DeIsL1.isu`). Сюда же впоследствии будет записана история ваших занятий, которая позволит следить за процессом обучения. Все же данные находятся на диске, без которого работа невозможна.

Итак, теперь все готово к работе.

Работа с программой

Программа запускается автоматически, когда вы помещаете диск в дисковод. Однако вы всегда можете запустить ее с помощью главного меню. Кроме того, непосредственно сразу после установки приложение не запустится.

Для старта программы через главное меню выполните следующие действия:

- нажмите кнопку **Пуск** (в левом нижнем углу экрана);
- в появившемся меню наведите указатель мыши на пункт **Программы** (рис. 8);
- в подменю перейдите к пункту **TeachPro**;
- на последнем уровне щелкните кнопкой мыши на пункте **TeachPro Решебник по химии**.

Для удобства можно поместить ярлык программы на Рабочий стол, перетащив его с помощью мыши из главного меню.

При запуске сначала диск проверяется на исправность (рис. 9).

При этом вы услышите характерный легкий шум из дисковода. Подождите, пожалуйста, несколько секунд.

После проверки откроется главное рабочее окно программы «TeachPro. Решебник по химии» (рис. 10).

Для начала создайте свою учетную запись, чтобы следить за процессом обучения (объемом пройденного материала, затраченным вре-

менем на работу с каждым разделом). Для этого нажмите кнопку Регистрация и введите в появившейся для набора строке свое имя или фамилию с клавиатуры.

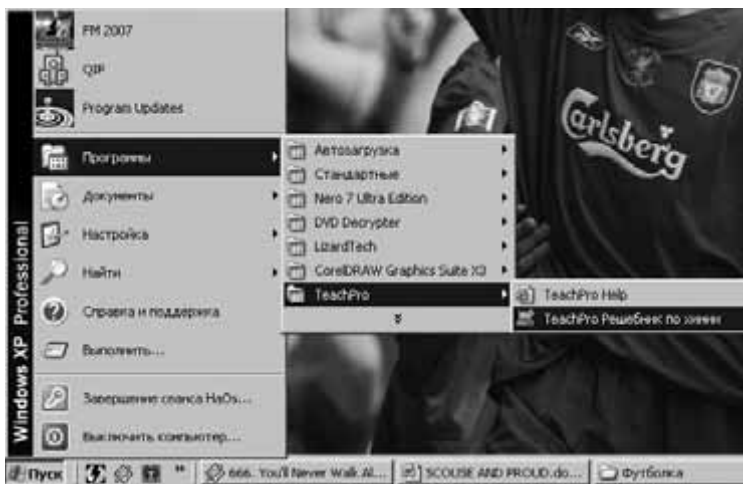


Рис. 8. Запуск программы «TeachPro. Решебник по химии» через главное меню



Рис. 9. Проверка диска на исправность

В данный момент программа создает и сохраняет на жестком диске в папке TeachPro Chemistry Book txt-файл, в котором в дальнейшем будет фиксировать динамику вашего учебного процесса.

Удобство подобной функции заключается в том, что данным диском на одном персональном компьютере может пользоваться несколько

человек и каждый будет иметь свою учетную запись и свою историю работы с программой.



Рис. 10. Рабочее окно программы «TeachPro. Решебник по химии»

Ненужную либо ошибочно созданную учетную запись можно удалить с помощью кнопки Удалить.

Чтобы выйти из программы, нажмите кнопку Выход.

Для перехода к списку тем нажмите Дальше. При этом на экране появится окно, показанное на рис. 11.

Обратите внимание на служебные кнопки Возврат (для возврата на предыдущий уровень), Найти (для поиска необходимой задачи), Статистика (для просмотра статистики работы с материалом), а также на кнопки для навигации, размещенные в верхнем правом углу экрана.

При выборе главы Общая химия появится полный список ее разделов (рис. 12).

Весь учебный курс подразделен на главы (или лекции). Главы состоят из разделов, которые, в свою очередь, содержат подразделы (или уроки). На следующих уровнях можно увидеть названия уроков и списки задач каждого из них (рис. 13).



Рис. 11. Содержание диска

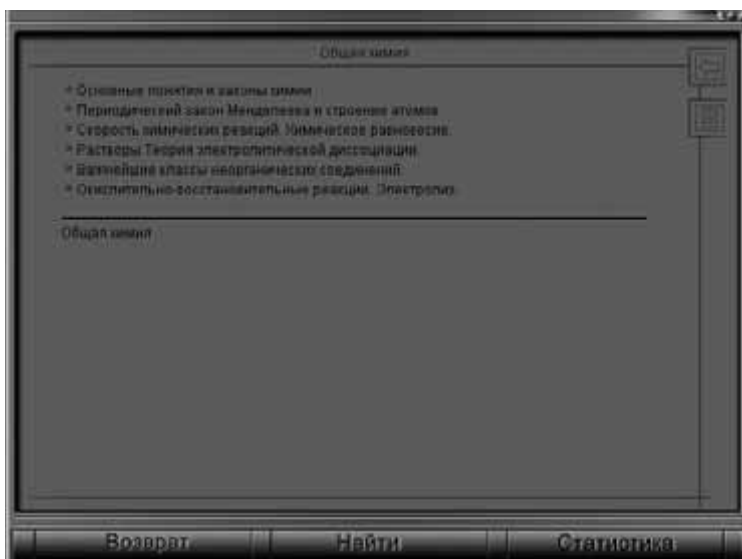


Рис. 12. Содержание главы Общая химия



Рис. 13. Список всех задач подраздела Число Авогадро

При выборе какой-либо из задач (все перемещения совершаются щелчком левой кнопкой мыши после наведения указателя на название необходимого раздела или задачи) появляется совершенно новое окно, напоминающее обыкновенную тетрадь в клеточку (рис. 14), с панелью управления в нижней части экрана. При этом звучит голос диктора, зачитывающего условие задачи. Одновременно с голосом на экране проявляются слова, которые диктор в данный момент произносит.

Непрозвучавшие слова и решение задачи остаются пока полупрозрачными. После того как диктор зачитает все условие и решение, все символы на экране будут видны четко (рис. 15).

Не следует просто слушать диктора. Процессом озвучивания можно и нужно управлять. Для этого создана панель управления (рис. 16).

С ее помощью можно уверенно управлять процессом и не тревожиться о скорости произношения диктора. Удобный интерфейс позволяет любому, даже совсем неопытному пользователю быстро научиться работать с программой. Управление в «TeachPro. Решебник по химии» осуществляется с помощью нажатия клавиш на панели управления.

Задача №1

После смешивания 50 мл смеси монооксида азота и азота с 25 мл воздуха объем газа составил 70 мл. К полученной смеси прибавили 145 мл воздуха, после чего объем смеси составил 200 мл. Определить объемный процентный состав газов в конечной смеси.



Рис. 14. Пример вида окна до рассмотрения решения задачи

Задача №1

После смешивания 50 мл смеси монооксида азота и азота с 25 мл воздуха объем газа составил 70 мл. К полученной смеси прибавили 145 мл воздуха, после чего объем смеси составил 200 мл. Определить объемный процентный состав газов в конечной смеси.

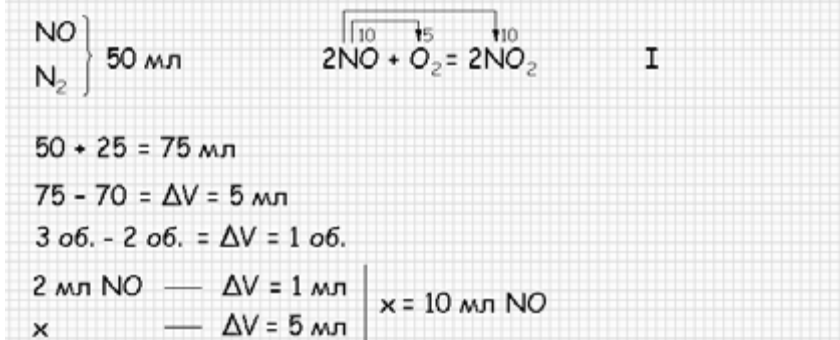


Рис. 15. Пример вида окна после рассмотрения решения задачи



Рис. 16. Панель управления программы «TeachPro. Решебник по химии»

Рассмотрим основные рабочие клавиши и их предназначение:



— остановка трансляции урока;



— продолжение трансляции урока с текущей позиции;



— перемотка урока на следующую точку;



— перемотка урока на предыдущую точку;



— пауза;



— переход к концу урока;



— переход к началу урока;



— повтор текущего вопроса (в контрольном и тестовом режимах);

Подсказка — подсказка;

Закладки — переход к панели управления вкладками;

Далее — переход к следующей задаче;

??? — вызов справочной системы программы;

Оглав — переход к текущей странице оглавления.

Кроме того, на панели есть линейка прокрутки урока, индикатор текущего положения, время работы с системой в течение одного сеанса и регулятор громкости.

Для успешного освоения представленного материала в системе TeachPro предусмотрены различные режимы обучения.

- Фильм — осуществляется непрерывная демонстрация приемов работы с пояснениями лектора.
- Шаг — урок разбивается на определенное количество частей или шагов. Каждый шаг определяет какой-либо фрагмент материала, о ко-

тором говорит лектор. После прослушивания одного шага лекция прерывается, и обучаемый может по выбору начать слушать следующий шаг либо еще раз прослушать предыдущий.

Поскольку данная программа разрабатывалась сразу для многих курсов, на панели есть нерабочие кнопки, отвечающие за режимы Контр и Тест. В данном курсе их нет.

Специальная система поиска позволяет быстро найти любую информацию или нужный урок по введенным символам (рис. 17).



Рис. 17. Диалоговое окно поиска задачи

Минимальные системные требования к вашему персональному компьютеру для комфортной работы с программой «TeachPro. Решебник по химии»: IBM PC; Pentium 100 или выше; 16 Мбайт оперативной памяти (рекомендуется 32 Мбайт); видеографический адаптер, поддерживающий режим $800 \times 600 \times 65536$ цветов (hi-color); 65 Мбайт свободного пространства на жестком диске; 16-битная Windows-совместимая звуковая плата; мышь; колонки или наушники; Microsoft Internet Explorer 4.0 или выше; операционная система Windows 98 или выше.

Как видно, системные требования более чем скромные, что позволяет пользоваться прилагаемым к книге диском практически на любом персональном компьютере.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

- Внимательно изучите условия задачи: определите, с какими величинами предстоит проводить вычисления, обозначьте их буквами, установите единицы измерения, числовые значения, обратите внимание на величину, которая является искомой. Запишите данные задачи в виде краткого условия.
- Если в условии задачи идет речь о взаимодействии веществ, запишите уравнение реакции (реакций) и уравняйте его (их) коэффициентами.
- Выясните количественные соотношения между данными задачи и искомой величиной. Для этого действуйте в несколько этапов, начав с вопроса задачи, выяснения закономерности, с помощью которой можно определить искомую величину на последнем этапе вычислений. Если в исходных данных не хватает каких-либо величин, подумайте, как их можно вычислить, то есть определите предварительные этапы расчета. Их может быть несколько.
- Определите последовательность всех этапов решения задачи, запишите необходимые формулы.
- Подставьте соответствующие числовые значения величин, проверьте их размерности, произведите вычисления.

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Ваши замечания, предложения и вопросы отправляйте по адресу электронной почты dgurski@minsk.piter.com (издательство «Питер», компьютерная редакция).

Мы будем рады узнать ваше мнение!

На сайте издательства <http://www.piter.com> вы найдете подробную информацию о наших книгах.

ОСНОВЫ ОБЩЕЙ ХИМИИ

В данной главе будут рассмотрены ключевые понятия, принципы, правила и законы, знание которых необходимо не только для решения подавляющего большинства задач, но и для успешного освоения теоретического материала.

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ХИМИИ

Масса атомов и молекул

Для измерения масс атомов и молекул принята единая система измерения. Эти величины измеряются в относительных единицах.

Атомная единица массы (а. е. м.) равна $1/12$ массы атома изотопа углерода ^{12}C (масса одного атома ^{12}C равна $1,993 \cdot 10^{-26}$ кг):

$$1 \text{ а. е. м.} = 1/12m (\text{атома } ^{12}\text{C}) = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,661 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Относительная атомная масса элемента (A_r) — это безразмерная величина, равная отношению средней массы атома элемента к $1/12$ массы атома ^{12}C . При расчете относительной атомной массы учитывается изотопный состав элемента. Величины относительной атомной массы определяют с помощью таблицы периодической системы элементов. Например, $A_r(\text{Cu}) = 63,54$.

ВНИМАНИЕ



В данной книге значения относительных атомных масс всех элементов за исключением хлора ($A_r(\text{Cl}) = 35,5$) округлены до целых. Однако иногда при составлении задач авторы используют точные значения относительных атомных масс элементов (10,8 для бора; 24,3 для магния; 63,5 для меди и т. д.). В таких случаях использование целых значений может привести к существенному расхождению с ответами.

Абсолютная масса атома равна относительной атомной массе, умноженной на 1 а. е. м. Например, $A(\text{Cu}) = 63,54$ а. е. м.

Относительная молекулярная масса соединения (M_r) — это безразмерная величина, равная отношению массы молекулы вещества к $1/12$ массы атома ^{12}C . Относительная молекулярная масса равна сумме относительных масс атомов, входящих в состав молекулы. Например, $M_r(\text{H}_2\text{O}) = 2 \cdot 1 + 16 = 18$.

Абсолютная масса молекулы равна относительной молекулярной массе, умноженной на 1 а. е. м. Например, $A(\text{H}_2\text{O}) = 18$ а. е. м.

Количество вещества, молярная масса

Чтобы избежать математических операций с большими числами, для характеристики *количества вещества*, участвующего в химической реакции, используется специальная единица — моль.

1 моль — это такое количество вещества, в котором содержится определенное число любых частиц (молекул, атомов, ионов и т. д.), равное числу Авогадро ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$).

Число Авогадро определяется как число атомов, содержащееся в 12 г изотопа ^{12}C .

Таким образом, 1 моль вещества содержит $6,022 \cdot 10^{23}$ частиц этого вещества. Причем под веществом подразумеваются абсолютно любые частицы.

Исходя из этого, любое количество вещества можно выразить определенным числом молей (ν):

$$\nu = N : N_A,$$

где N — число частиц данного вещества;

N_A — число частиц в одном моле вещества (число Авогадро).

Молярная масса вещества (M) — масса одного моля этого вещества.

По величине она равна относительной молекулярной массе (M_r) (для веществ атомного строения — относительной атомной массе (A_r)). Размерность молярной массы — г/моль.

Молярную массу вещества неизвестного состава можно вычислить, если известны его масса (m) и количество, то есть число молей, (ν), по формуле:

$$M = m : \nu.$$

Соответственно, зная массу и молярную массу вещества, можно рассчитать число его молей:

$$v = m : M,$$

или найти массу вещества по числу молей и молярной массе:

$$m = v \cdot M.$$

Необходимо отметить, что значение молярной массы вещества определяется его качественным и количественным составом, то есть зависит от M_r и A_r . Поэтому разные вещества при одинаковом количестве молей имеют различные массы (m).

Таким образом, *моль* — это порция вещества, содержащая одно и то же число частиц, но имеющая разную массу для разных веществ, так как частицы вещества (атомы и молекулы) неодинаковы по массе.

ВНИМАНИЕ



Необходимо уверенно владеть данным теоретическим материалом, так как вычисление количества вещества используется практически в каждой расчетной задаче.

Закон постоянства состава

Все индивидуальные вещества имеют постоянный качественный и количественный состав независимо от способа их получения.

На основании этого закона состав веществ выражается химической формулой с помощью химических знаков и индексов. Например: H_2O , H_2SO_4 , NaOH и т. п.

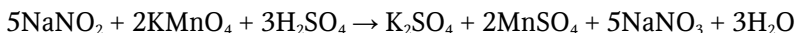
Закон постоянства состава справедлив для веществ молекулярного строения. Наряду с веществами, имеющими постоянный состав, существуют вещества переменного состава. К ним относятся соединения, в которых чередование нераздельных структурных единиц (атомов, ионов) осуществляется с нарушением периодичности.

Закон сохранения массы

Масса веществ, вступающих в химическую реакцию, равна массе веществ, образующихся в результате реакции.

Закон сохранения массы является частным случаем общего закона природы — сохранения материи и энергии. На основании этого закона химические реакции можно отобразить с помощью химических уравнений, используя химические формулы веществ и стехиометрические коэффициенты, отражающие относительные количества (число молей) участвующих в реакции веществ.

Именно этот закон является основанием для необходимости уравнивания стехиометрических коэффициентов перед формулами вступающих в реакцию и образующихся в ее результате веществ. Например:



Для каждого элемента количество его атомов в левой и правой частях уравнения должно быть одинаковым.

На основании полученных химических уравнений проводятся стехиометрические расчеты.

ВНИМАНИЕ



Алгоритм решения практически каждой расчетной задачи начинается с составления уравнения описываемого процесса или совокупности процессов. Поэтому правильное уравнивание стехиометрических коэффициентов в уравнениях — залог успешного решения задачи.

Закон Авогадро

В равных объемах газов при одинаковых условиях (температуре и давлении) содержится одинаковое число молекул.

Следствие из закона Авогадро: **один моль любого газа при одинаковых условиях занимает одинаковый объем.**

В частности, при нормальных условиях, то есть при 0°C ($273,16\text{ K}$) и атмосферном давлении $101,3\text{ кПа}$, объем 1 моля газа равен $22,4\text{ л}$. Этот объем называют *молярным объемом газа* (V_m). Таким образом, при нормальных условиях (н. у.) молярный объем любого газа $V_m = 22,4\text{ л/моль}$. Данный факт используется во множестве задач, связанных с газообразными веществами. По объему прореагировавшего или образовавшегося

газа можно определить его количество, а затем с помощью уравнения реакции и количество других продуктов и реагентов:

$$v = V : V_m.$$

Закон Авогадро используется в расчетах для газообразных веществ. При пересчете объема газа от нормальных условий к любым иным используется объединенный газовый закон *Бойля-Мариотта и Гей-Люссака*:

$$PV : T = P_0V_0 : T_0,$$

где P_0 , V_0 , T_0 — давление, объем газа и температура при нормальных условиях ($P_0 = 101,3$ кПа; $T_0 = 273,16$ К).

Если известна масса (m) или количество (v) газа и требуется вычислить его объем или наоборот, используют уравнение *Менделеева–Клапейрона*

$$PV = \nu RT,$$

где ν — описанное выше количество вещества;

R — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль · К).

Из закона Авогадро вытекает еще одно важное следствие: **отношение масс одинаковых объемов двух газов есть величина постоянная для данных газов**. Эта постоянная величина называется *относительной плотностью газа* и обозначается D . Поскольку молярные объемы всех газов одинаковы (1-е следствие закона Авогадро), то отношение молярных масс любой пары газов также равно этой постоянной:

$$D = M_1 : M_2,$$

где M_1 и M_2 — молярные массы двух газообразных веществ.

Величина D определяется экспериментально как отношение масс одинаковых объемов исследуемого газа (M_1) и эталонного газа с известной молекулярной массой (M_2). По величинам D и M_2 можно найти молярную массу исследуемого газа или смеси газов:

$$M_1 = D \cdot M_2.$$

Обычно в качестве эталонного газа используют водород ($M_2 = 2$ г/моль) или воздух ($M_2 = 29$ г/моль).

Это очень важный и удобный способ определения молярной массы.

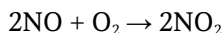
Решение задач

Задача 1

☉ После смешивания 50 мл смеси монооксида азота и азота с 25 мл воздуха объем газа составил 70 мл. К полученной смеси прибавили 145 мл воздуха, после чего объем смеси составил 200 мл. Определить объемный процентный состав газов в конечной смеси.

Ⓛ Решение.

Газовая смесь состоит из азота N_2 и его монооксида NO и имеет объем 50 мл. С кислородом смешиваемого воздуха 2 молекулы NO образуют 2 молекулы NO_2 согласно уравнению:



К 50 мл исходной газовой смеси добавили 25 мл воздуха. Таким образом, должно было образоваться 75 мл смеси. Однако после того как компоненты образованной газовой смеси прореагировали между собой, произошло сокращение ее объема:

$$\Delta V = 75 - 70 = 5 \text{ мл.}$$

Поскольку из трех объемов газов по реакции образуется 2 объема, ΔV реакции равно 1-му объему. Таким образом, имеем пропорцию:

$$2 \text{ мл } NO \text{ соответствует } \Delta V \text{ реакции} = 1 \text{ мл;}$$

$$x \text{ мл } NO \text{ соответствует } \Delta V \text{ реакции} = 5 \text{ мл;}$$

$$x = 10 \text{ мл.}$$

Итак, объем прореагировавшего монооксида азота NO равен 10 мл. В соответствии со стехиометрическими коэффициентами уравнения протекающей реакции объемы прореагировавшего кислорода воздуха O_2 и образовавшегося диоксида азота NO_2 равны, соответственно, 5 и 10 мл.

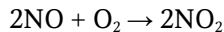
По условию задачи к смеси добавлено 25 мл воздуха. Известно, что содержание кислорода в воздухе составляет 20 %, то есть одну пятую часть. Используя эти данные, находим объем кислорода в добавленном к исходной газовой смеси объеме воздуха:

$$V(\text{кислорода}) = 25 : 5 = 5 \text{ мл.}$$

Объем кислорода равен 5 мл. Остальной объем ($25 - 5 = 20$ мл) составляет азот.

Выше нами определен объем израсходованного кислорода в реакции окисления монооксида азота. Он составил 5 мл. Такое же количество кислорода присутствовало в воздухе, добавленном к исходной смеси. То есть весь кислород добавленного воздуха был израсходован.

Переходим ко второй части задачи. По условию к полученной смеси добавили еще 145 мл воздуха, после чего конечный объем газовой смеси составил 200 мл. В данном случае также произошло уменьшение объема смеси газов, так как образоваться должно было $70 + 145 = 215$ мл. То есть снова протекает реакция окисления монооксида азота до диоксида:



В данном случае сокращение объема составляет 15 мл:

$$\Delta V = 70 + 145 - 200 = 15 \text{ мл.}$$

Для определения объема прореагировавшего монооксида азота используем пропорцию

$$2 \text{ мл NO соответствует } \Delta V \text{ реакции} = 1 \text{ мл;}$$

$$x \text{ мл NO соответствует } \Delta V \text{ реакции} = 15 \text{ мл;}$$

$$x = 30 \text{ мл.}$$

Итак, объем прореагировавшего во втором случае монооксида азота NO равен 30 мл. В соответствии со стехиометрическими коэффициентами уравнения протекающей реакции объемы прореагировавшего кислорода воздуха O_2 и образовавшегося диоксида азота NO_2 равны, соответственно, 15 и 30 мл.

Всего за обе стадии прореагировало $10 + 30 = 40$ мл монооксида азота NO, потребовалось $5 + 15 = 20$ мл кислорода воздуха и образовалось $10 + 30 = 40$ мл диоксида азота NO_2 .

Определим, прореагировал ли монооксид азота полностью. Вторая порция добавленного воздуха объемом 145 мл содержала $145 : 5 = 29$ мл кислорода. В реакцию окисления NO вступило лишь 15 мл. Следовательно, в конечном итоге кислород находился в избытке, а монооксид

азота прореагировал полностью. Из 40 мл монооксида азота NO образовано 40 мл диоксида азота NO_2 .

Как мы уже определили, объем кислорода во второй порции воздуха равен 29 мл. Из данного объема прореагировало 15 мл, а осталось в смеси $29 - 15 = 14$ мл.

Остальную часть конечной смеси составляет азот. Начальная смесь монооксида азота и азота объемом 50 мл содержала 40 мл монооксида азота, следовательно, содержание азота составляло 10 мл. 4/5 объема добавленного воздуха также составлял азот. То есть 20 мл азота было в первой порции добавленного воздуха и 116 мл — во второй.

Азот в описанной реакции участия не принимал. Его объем остался неизменным:

$$V(\text{N}_2) = 10 + 20 + 116 = 146 \text{ мл.}$$

Этот же результат можно получить, отняв от конечного объема смеси объемы образованного диоксида азота и оставшегося кислорода:

$$V(\text{N}_2) = 200 - 40 - 14 = 146 \text{ мл.}$$

Итак, состав конечной смеси нам известен. Определим ее объемный процентный состав. Для этого объемы компонентов разделим на суммарный объем (200 мл) и помножим результат на 100 %:

$$\varphi(\text{NO}_2) = 40 \text{ мл} / 200 \text{ мл} \cdot 100 \% = 20 \%;$$

$$\varphi(\text{O}_2) = 14 \text{ мл} / 200 \text{ мл} \cdot 100 \% = 7 \%;$$

$$\varphi(\text{N}_2) = 146 \text{ мл} / 200 \text{ мл} \cdot 100 \% = 73 \%.$$

Таким образом, конечная смесь содержит по объему 20 % диоксида азота NO_2 , 7 % кислорода O_2 и 73 % азота N_2 .

Задача 2

☉ Относительная плотность паров белого фосфора по водороду равна 62. Найти формулу белого фосфора.

☪ Решение.

Запишем молекулярную формулу белого фосфора как P_n . Относительная плотность по водороду представляет собой отношение плотностей паров белого фосфора и водорода. Выражение для относи-

тельной плотности паров белого фосфора по водороду выглядит следующим образом:

$$D = \rho(P_n) : \rho(H_2).$$

Как известно, плотность газа пропорциональна его молекулярной массе. Поэтому отношение плотностей газов можно заменить отношением молекулярных масс газов:

$$D = \rho(P_n) : \rho(H_2) = M(P_n) : M(H_2) = 62.$$

Молярная масса P_n в 62 раза выше молярной массы водорода H_2 . Молярная масса H_2 равна 2 г/моль. Следовательно, молярная масса P_n равна $62 \cdot 2 = 124$ г/моль.

Атомная масса фосфора равна 31 г/моль, поэтому молярную массу молекулы P_n можно записать как $(31n)$ г/моль. Получаем уравнение:

$$31n = 124;$$

$$n = 4.$$

Таким образом, молекула белого фосфора содержит четыре атома фосфора, и его молекулярная формула — P_4 .

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 3 имеет аналогичное решение. Задача 4 решается по общим уравнениям, приведенным в теоретической части раздела. Обе задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 6

- ⊖ Плотность газовой смеси, состоящей из оксида углерода (II) и оксида углерода (IV), по водороду — 17,6. К 100 мл этой смеси добавили 200 мл воздуха и взорвали. По объему содержание кислорода в воздухе составляет 20 %, а азота — 80 %. Определить среднюю молярную массу полученной газовой смеси.

- ⊕ Решение.

Определим среднюю молярную массу и состав исходной газовой смеси.

Выражение для относительной плотности смеси по водороду:

$$D = \rho_{\text{cp}}(\text{смеси}) : \rho(\text{H}_2) = M_{\text{cp}}(\text{смеси}) : M(\text{H}_2) = 17,6.$$

Средняя молярная масса смеси:

$$M_{\text{cp}}(\text{смеси}) = 17,6 \cdot 2 = 35,2 \text{ г/моль}.$$

Молярные массы компонентов смеси равны 28 г/моль (оксид углерода (II) — CO) и 44 г/моль (оксид углерода (IV) — CO₂).

Объем исходной смеси равен 100 мл. Положим, объем монооксида углерода составлял x мл, тогда объем диоксида углерода был равен $(100 - x)$ мл.

Средняя молярная масса смеси равна сумме произведений молярных масс компонентов на их мольные доли. Мольная доля пропорциональна количеству, а значит — объему. Запишем выражение для средней молярной массы следующим образом:

$$M_{\text{cp}}(\text{смеси}) = (M_1 V_1 + M_2 V_2) : (V_1 + V_2);$$

$$M_{\text{cp}} = 35,2 \text{ г/моль};$$

$$M_1 = 28 \text{ г/моль};$$

$$V_1 = x \text{ мл};$$

$$M_2 = 44 \text{ г/моль};$$

$$V_2 = (100 - x) \text{ мл}.$$

Получим уравнение:

$$(28x + 44(100 - x)) : (x + 100 - x) = 35,2;$$

$$28x + 44(100 - x) = 35,2 \cdot 100;$$

$$28x + 4400 - 44x = 3520;$$

$$16x = 880;$$

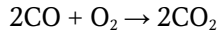
$$x = 55 \text{ мл};$$

$$100 - x = 45 \text{ мл}.$$

Таким образом, объем монооксида углерода CO в исходной смеси равен 55 мл, объем диоксида углерода CO₂ — 45 мл.

К исходной смеси добавили 200 мл воздуха, который содержал $200 : 5 = 40$ мл кислорода и $200 - 40 = 160$ мл азота.

Кислород воздуха при взрыве окислил монооксид углерода CO до диоксида CO₂ согласно уравнению



В соответствии со стехиометрическими коэффициентами для окисления 2 объемов CO необходим 1 объем O₂ и образуется 2 объема CO₂. Следовательно, для окисления 55 мл монооксида углерода необходимо $55 : 2 = 27,5$ мл кислорода. Поскольку объем кислорода воздуха равен 40 мл, можно заключить, что он находится в избытке, и реакция окисления CO до CO₂ прошла полностью. При этом образовалось 55 мл CO₂.

Итак, конечная смесь содержит диоксид углерода CO₂, кислород O₂ и азот N₂.

Как показано выше, перед взрывом в смеси газов присутствовало 45 мл CO₂, в результате реакции получено еще 55 мл углекислого газа. Итого, в конечной смеси содержится $45 + 55 = 100$ мл CO₂.

Исходный объем кислорода — 40 мл. 27,5 мл из них пошло на окисление CO до CO₂, осталось $40 - 27,5 = 12,5$ мл кислорода в конечной смеси.

160 мл азота N₂ не вступало в химические реакции, и объем азота остался неизменным.

Суммарный объем конечной смеси равен:

$$V(\text{конечной смеси}) = 100 + 12,5 + 160 = 272,5 \text{ мл.}$$

Молярные массы углекислого газа, кислорода и азота, соответственно, равны 44, 32 и 28 г/моль.

Найдем среднюю молярную массу конечной смеси:

$$M_{\text{cp}}(\text{конечной смеси}) = (M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3) : (V_1 + V_2 + V_3);$$

$$M_{\text{cp}}(\text{конечной смеси}) = (44 \cdot 100 + 32 \cdot 12,5 + 28 \cdot 160) :$$

$$: (100 + 12,5 + 160) = 34,1 \text{ г/моль.}$$

Средняя молярная масса конечной смеси составляет 34,1 г/моль.

ПРИМЕЧАНИЕ

Задачи 5, 7 и 8 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 10

- ☉ Вычислить массу одного литра газовой смеси, состоящей из гелия, аргона и неона, если в смеси на один атом гелия приходится два атома неона и три атома аргона.

☉ Решение.

Молекулы газообразных гелия, неона и аргона состоят из одного атома. Таким образом, соотношения количеств атомов равны соотношениям количеств, а значит, и соотношениям объемов газов.

Положим, объем гелия равен x л. Следовательно:

$$V(\text{Ne}) = 2V(\text{He}) = 2x;$$

$$V(\text{Ar}) = 3V(\text{He}) = 3x;$$

$$V(\text{смеси}) = V(\text{He}) + V(\text{Ne}) + V(\text{Ar}) = x + 2x + 3x = 6x = 1 \text{ л};$$

$$x = 1/6 \text{ л}.$$

Отсюда известен объемный состав смеси:

$$V(\text{He}) = 1/6 \text{ л}; V(\text{Ne}) = 1/3 \text{ л}; V(\text{Ar}) = 1/2 \text{ л}.$$

Определим массу данной газовой смеси объемом 1 л.

Способ I.

Определим массу каждого газа с помощью пропорций.

Молярные массы газов:

$$M(\text{He}) = 4 \text{ г/моль}; M(\text{Ne}) = 20 \text{ г/моль}; M(\text{Ar}) = 40 \text{ г/моль}.$$

В соответствии с законом Авогадро 22,4 л содержит 1 моль газа и имеет массу, равную молярной массе газа.

$$22,4 \text{ л гелия весит } 4 \text{ г};$$

$$1/6 \text{ л гелия весит } y_1 \text{ г};$$

$$y_1 = 0,0298 \text{ г.}$$

22,4 л неона весит 20 г;

1/3 л неона весит y_2 г;

$$y_2 = 0,2976 \text{ г.}$$

22,4 л аргона весит 40 г;

1/2 л аргона весит y_3 г;

$$y_3 = 0,8929 \text{ г.}$$

Общая масса смеси газов равна $0,0298 + 0,2976 + 0,8929 = 1,22 \text{ г.}$

Способ II.

Определим среднюю молярную массу смеси газов:

$$M_{\text{cp}} = (M_1V_1 + M_2V_2 + M_3V_3) : (V_1 + V_2 + V_3);$$

$$M_{\text{cp}} = (4 \cdot 1/6 + 20 \cdot 1/3 + 40 \cdot 1/2) : 1 = 27,33 \text{ г/моль.}$$

Средняя молярная масса смеси газов равна 27,33 г/моль. Определим массу 1 л смеси газов:

22,4 л смеси весит 27,33 г;

1 л гелия весит z г;

$$z = 1,22 \text{ г.}$$

Таким образом, 1 л смеси газов весит 1,22 г.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 9 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом диске.

Задача 11

- ☉ Газовая смесь объемом 12,32 л состоит из водорода, сероводорода и углекислого газа. В этой смеси масса углекислого газа больше суммы масс водорода и сероводорода на 4 грамма, а масса сероводорода в 34 раза больше массы водорода. Вычислить среднюю молярную массу газовой смеси.

🕒 Решение.

Примем за x массу водорода в смеси:

$$m(\text{H}_2) = x.$$

По условию задачи масса сероводорода в 34 раза больше массы водорода, другими словами:

$$m(\text{H}_2\text{S}) = 34m(\text{H}_2) = 34x.$$

Кроме того, известно, что масса углекислого газа больше суммы масс водорода и сероводорода на 4 г, то есть

$$m(\text{CO}_2) = m(\text{H}_2\text{S}) + m(\text{H}_2) + 4 = 34x + x + 4 = 35x + 4$$

(при этом массы должны быть выражены в граммах).

Нам известны массы газов. Узнав их молярные массы, мы сможем определить их объем с помощью пропорций, использованных нами в решении предыдущей задачи.

Молярные массы водорода H_2 , сероводорода H_2S и углекислого газа CO_2 равны, соответственно, 2, 34 и 44 г/моль.

2 г водорода занимают объем 22,4 л;

x г водорода занимают объем y_1 л;

$$y_1 = 11,2x \text{ л.}$$

34 г сероводорода занимают объем 22,4 л;

$34x$ г сероводорода занимают объем y_2 л;

$$y_2 = 22,4x \text{ л.}$$

44 г углекислого газа занимают объем 22,4 л;

$(35x + 4)$ г углекислого газа занимают объем y_3 л;

$$y_3 = (17,82x + 2,04) \text{ л.}$$

Общий объем газовой смеси равен сумме объемов газов, в нее входящих:

$$V_{\text{сум}} = y_1 + y_2 + y_3 = 11,2x + 22,4x + 17,82x + 2,04 = (51,42x + 2,04) \text{ л.}$$

По условию известно, что объем газовой смеси равен 12,32 л, откуда имеем:

$$51,42x + 2,04 = 12,32;$$

$$x = 0,2 \text{ г.}$$

$$m(\text{H}_2) = x = 0,2 \text{ г;}$$

$$m(\text{H}_2\text{S}) = 34x = 6,8 \text{ г;}$$

$$m(\text{CO}_2) = 35x + 4 = 11 \text{ г.}$$

Суммарная масса смеси равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{H}_2) + m(\text{H}_2\text{S}) + m(\text{CO}_2) = 0,2 + 6,8 + 11 = 18 \text{ г.}$$

С помощью пропорции определим среднюю молярную массу смеси:

$$18 \text{ г смеси занимают объем } 12,32 \text{ л;}$$

$$x \text{ г смеси занимают объем } 22,4 \text{ л;}$$

$$x = 32,7 \text{ г.}$$

Итак, 1 моль газовой смеси занимает объем 22,4 л и имеет массу 32,7 г, то есть средняя молярная масса смеси равна 32,7 г/моль.

Термохимические реакции

Химическое превращение — это качественный скачок, при котором исчезают одни вещества и образуются другие. Происходящая при этом перестройка электронных структур атомов, ионов и молекул сопровождается выделением или поглощением теплоты, света, электричества и т. п., то есть превращением химической энергии в другой вид энергии.

Каждое вещество обладает теплотой образования, следовательно, при изменении состава реакционной смеси изменяется и сумма теплот образований веществ. При постоянном давлении эта разница является тепловым эффектом реакции:

$$Q(P - \text{const}) = \Delta H^0.$$

Закон Гесса гласит: **тепловой эффект зависит только от вида и состояния исходных веществ и конечных продуктов, он не зависит**

от пути процесса, то есть от числа и характера промежуточных стадий.

Согласно следствию из закона Гесса изменение энтальпии химической реакции равно:

$$\Delta H^0(298) = [\Delta_f H^0(298) \text{ продуктов}] - [\Delta_f H^0(298) \text{ реагентов}].$$

По определению, энтальпия образования простого вещества равна нулю. Однако здесь есть определенная особенность. Нулю равна энтальпия образования такого простого вещества, которое принято за эталон, то есть является стартовым для реакций получения других веществ. Обычно это простое вещество в тех аллотропной модификации и агрегатном состоянии, в которых оно существует в природе (жидкая вода, углерод в виде графита, кислород в виде O_2).

Тепловой эффект химической реакции, с которым чаще приходится сталкиваться при решении задач, является противоположной по значению величиной по отношению к изменению энтальпии химической реакции:

$$Q = -\Delta H^0(298).$$

Тепловой эффект реакции, соответственно, равен разнице между теплотами образования продуктов и реагентов:

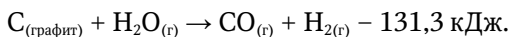
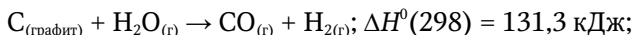
$$Q \text{ (реакции)} = Q_f \text{ (продуктов)} - Q_f \text{ (реагентов)}.$$

Необходимо учитывать следующее.

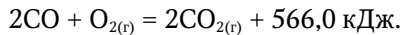
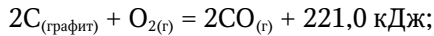
- Если $Q < 0$, а $\Delta H^0(298) > 0$, то реакция *эндотермическая*, то есть происходит поглощение тепла.
- Если $Q > 0$, а $\Delta H^0(298) < 0$, то реакция *экзотермическая*, то есть происходит выделение тепла.

Уравнения химических реакций с указанием теплового эффекта называют *термохимическими уравнениями*.

Термохимическое уравнение можно записывать разными способами:



Несомненное удобство термохимических уравнений в том, что их вместе с тепловыми эффектами можно умножать и складывать, как математические:



В результате получаем:



Возможность самопроизвольного протекания реакции определяется значением изменения энергии Гиббса (ΔG), которое можно определить двумя способами.

1. С помощью уравнения Гиббса:

$$\Delta G^0 (298) = \Delta H^0 (298) - T \cdot \Delta S^0 (298).$$

При этом не следует забывать, что $\Delta H^0 (298)$ выражен в кДж/моль, а $\Delta S^0 (298)$ имеет размерность Дж/К · моль.

2. С помощью следствия из закона Гесса:

$$\Delta G^0 (298) = [\Delta_f G^0 (298) \text{ продуктов}] - [\Delta_f G^0 (298) \text{ реагентов}].$$

Необходимо учитывать следующее.

- Если $\Delta G^0 < 0$, то реакция является термодинамически возможной.
- Если $\Delta G^0 > 0$, то прямая реакция является термодинамически невозможной, а обратная — возможной.
- Если $\Delta G^0 \approx 0$, то существует термодинамическое равновесие.

Для простых веществ энергия Гиббса, как и энтальпия, равна нулю.

Значение ΔG^0 реакции изменяется при изменении температуры. Если при изменении температуры значение ΔG^0 прямой реакции уменьшилось, это свидетельствует о том, что сместилось равновесие вправо.

Таким образом, химическая термодинамика позволяет установить принципиальную возможность протекания химической реакции и решить вопрос об условиях ее равновесия.

Решение задач

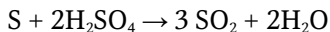
Задача 1

☉ Смесь серы и углерода взаимодействует с концентрированной серной кислотой. Выделилось 12,096 л газовой смеси. При каталитическом окислении этой смеси выделилось 40,404 кДж теплоты. Определить количество первоначальной смеси в граммах, если известно, что при окислении 1 моля оксида серы (IV) выделилось 96,2 кДж теплоты.

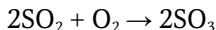
☐ Решение.

Запишем уравнения описываемых в задаче превращений.

При взаимодействии с концентрированной серной кислотой сера и углерод окисляются до диоксидов в соответствии с уравнениями реакций:



При каталитическом окислении диоксид серы превращается в триоксид по реакции



Как видно из уравнений первых двух реакций, в результате окисления серы и углерода концентрированным раствором серной кислоты в качестве газообразных продуктов образуются углекислый газ CO_2 и диоксид серы SO_2 . Объем образованной в результате реакции смеси CO_2 и SO_2 равен 12,096 л. Определим ее количество:

$$v(\text{смеси } \text{CO}_2 \text{ и } \text{SO}_2) = V : V_M = 12,096 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,54 \text{ моля.}$$

На второй стадии диоксид серы из образованной смеси окисляется до триоксида. При этом выделяется 96,2 кДж теплоты при окислении 1 моля SO_2 . В нашем же случае выделилось 40,404 кДж теплоты. Составим пропорцию:

при окислении 1 моля SO_2 выделяется 96,2 кДж теплоты;

при окислении x молей SO_2 выделяется 40,404 кДж теплоты;

$$x = 40,404 : 96,2 = 0,42.$$

Таким образом, в первоначально образованной газовой смеси общим количеством 0,54 моля присутствовало 0,42 моля SO_2 . Следовательно, количество CO_2 в смеси равно $0,54 - 0,42 = 0,12$ моля.

Определим количество серы и углерода перед началом реакции с раствором концентрированной серной кислоты.

В соответствии со стехиометрическими коэффициентами во втором уравнении количество вступившего в реакцию углерода равно количеству образованного диоксида углерода, то есть 0,12 моля:

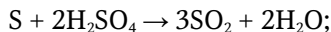
$$\nu(\text{C}) = 0,12 \text{ моля.}$$

Кроме углекислого газа в данной реакции образовался и диоксид серы в количестве, в 2 раза превышающем количество углерода или 0,24 моля:



Это означает, что не весь SO_2 из первоначально образованной смеси образовался в результате окисления серы по первой реакции. 0,24 моля SO_2 образовано при окислении углерода. Всего же образовано 0,42 моля SO_2 . То есть количество SO_2 образовано непосредственно по первой реакции и равно $0,42 - 0,24 = 0,18$ моля.

Стехиометрические коэффициенты данного уравнения указывают на то, что из одного моля серы образуется 3 моля диоксида серы. Отсюда можно сделать вывод о том, что 0,18 моля диоксида серы SO_2 образовано при окислении $0,18 : 3 = 0,06$ моля серы S:



$$\nu(\text{S}) = 0,06 \text{ моля.}$$

Определим массы компонентов начальной смеси твердых веществ:

$$m(\text{C}) = \nu(\text{C}) \cdot M(\text{C}) = 0,12 \text{ моля} \cdot 12 \text{ г/моль} = 1,44 \text{ г};$$

$$m(\text{S}) = \nu(\text{S}) \cdot M(\text{S}) = 0,06 \text{ моля} \cdot 32 \text{ г/моль} = 1,92 \text{ г.}$$

Общая масса смеси равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{C}) + m(\text{S}) = 1,44 + 1,92 = 3,36 \text{ г.}$$

Масса первоначальной смеси составляла 3,36 г.

ПРИМЕЧАНИЕ

Задачи 3, 4, 8 и 9 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

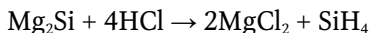
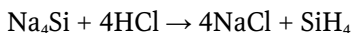
Задача 5

- ☉ 55 г смеси силицида магния и натрия обработали соляной кислотой. После полного выделения газа и выпаривания раствора осталось 117,7 г сухого остатка. Выделенный газ собрали и сожгли. Определить количество теплоты, выделенной при сжигании, если при сжигании 1 моля газа выделилось 416 кДж теплоты.

- 🕒 Решение.

Запишем уравнения описываемых в задаче превращений.

При взаимодействии с соляной кислотой силициды магния и натрия образуют соответствующие хлориды и газообразный силан SiH_4 :



После выделения силана и выпаривания растворов в сухом остатке останутся хлориды металлов NaCl и MgCl_2 . Итак, обратим внимание на следующие выводы:

$$m(\text{Na}_4\text{Si}) + m(\text{Mg}_2\text{Si}) = 55 \text{ г};$$

$$m(\text{NaCl}) + m(\text{MgCl}_2) = 117,7 \text{ г}.$$

С помощью этих данных можно определить количественный состав исходной смеси.

Рассчитаем молярные массы силицидов и хлоридов металлов:

$$M(\text{Na}_4\text{Si}) = 120 \text{ г/моль}; M(\text{Mg}_2\text{Si}) = 76 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{NaCl}) = 58,5 \text{ г/моль}; M(\text{MgCl}_2) = 95 \text{ г/моль}.$$

Определим состав исходной смеси двумя способами.

Способ I.

За переменную примем массу одного из силицидов.

$$\text{Пусть } m(\text{Na}_4\text{Si}) = x, \text{ тогда } m(\text{Mg}_2\text{Si}) = 55 - m(\text{Na}_4\text{Si}) = (55 - x) \text{ г}.$$

В соответствии со стехиометрическими коэффициентами первого уравнения при обработке соляной кислотой силицида натрия из 1 молекулы Na_4Si образуется 4 молекулы NaCl , то есть из 120 г Na_4Si образуется $(4 \cdot 58,5)$ г NaCl . Составим пропорцию:

из 120 г Na_4Si образуется $4 \cdot 58,5$ г NaCl ;

из x г Na_4Si образуется y_1 г NaCl ;

$$y_1 = 1,95x \text{ г.}$$

В соответствии со стехиометрическими коэффициентами второго уравнения при обработке соляной кислотой силицида магния из 1 молекулы Mg_2Si образуется 2 молекулы MgCl_2 , то есть из 76 г Mg_2Si образуется $(2 \cdot 95)$ г MgCl_2 . Составим пропорцию:

из 76 г Mg_2Si образуется $(2 \cdot 95)$ г MgCl_2 ;

из $(55 - x)$ г Mg_2Si образуется y_2 г MgCl_2 ;

$$y_2 = (137,5 - 2,5x) \text{ г.}$$

Общая масса хлоридов равна:

$$m(\text{NaCl}) + m(\text{MgCl}_2) = y_1 + y_2 = 1,95x + 137,5 - 2,5x = 117,7 \text{ г;}$$

$$1,95x + 137,5 - 2,5x = 117,7;$$

$$137,5 - 117,7 = 2,5x - 1,95x;$$

$$19,8 = 0,55x;$$

$$x = 36 \text{ г;}$$

$$m(\text{Na}_4\text{Si}) = 36 \text{ г; } m(\text{Mg}_2\text{Si}) = 55 - 36 = 19 \text{ г.}$$

Определим количество силицидов в исходной смеси:

$$v(\text{Na}_4\text{Si}) = m(\text{Na}_4\text{Si}) : M(\text{Na}_4\text{Si}) = 36 \text{ г} : 120 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля;}$$

$$v(\text{Mg}_2\text{Si}) = m(\text{Mg}_2\text{Si}) : M(\text{Mg}_2\text{Si}) = 19 \text{ г} : 76 \text{ г/моль} = 0,25 \text{ моля.}$$

Способ II.

За переменные примем количество силицидов.

Пусть $v(\text{Na}_4\text{Si}) = x$ молей, а $v(\text{Mg}_2\text{Si}) = y$ молей.

В соответствии со стехиометрическими коэффициентами первого уравнения при обработке соляной кислотой силицида натрия из 1 молекулы Na_4Si образуется 4 молекулы NaCl , то есть $\nu(\text{NaCl}) = 4x$ молей.

В соответствии со стехиометрическими коэффициентами второго уравнения при обработке соляной кислотой силицида магния из 1 молекулы Mg_2Si образуется 2 молекулы MgCl_2 , то есть $\nu(\text{MgCl}_2) = 2y$ молей.

Массы силицидов равны:

$$m(\text{Na}_4\text{Si}) = \nu(\text{Na}_4\text{Si}) \cdot M(\text{Na}_4\text{Si}) = 120x \text{ г};$$

$$m(\text{Mg}_2\text{Si}) = \nu(\text{Mg}_2\text{Si}) \cdot M(\text{Mg}_2\text{Si}) = 76y \text{ г}.$$

Массы хлоридов равны:

$$m(\text{NaCl}) = \nu(\text{NaCl}) \cdot M(\text{NaCl}) = 4x \cdot 58,5 = 234x \text{ г};$$

$$m(\text{MgCl}_2) = \nu(\text{MgCl}_2) \cdot M(\text{MgCl}_2) = 2x \cdot 95 = 190x \text{ г}.$$

Нам известно следующее:

$$m(\text{Na}_4\text{Si}) + m(\text{Mg}_2\text{Si}) = 55 \text{ г};$$

$$m(\text{NaCl}) + m(\text{MgCl}_2) = 117,7 \text{ г}.$$

Подставим выражения для масс веществ и получим систему уравнений:

$$120x + 76y = 55;$$

$$234x + 190y = 117,7.$$

Решая ее, получим: $x = 0,3$ моля; $y = 0,25$ моля.

Для нахождения количества теплоты, выделенной при сжигании полученного силана, определим количество силана. В соответствии со стехиометрическими коэффициентами обоих уравнений при обработке соляной кислотой силицидов натрия и магния из 1 молекулы силицида образуется 1 молекула силана SiH_4 . Следовательно, общее количество выделившегося силана равно суммарному количеству силицидов в смеси:

$$\nu(\text{SiH}_4) = \nu(\text{Na}_4\text{Si}) + \nu(\text{Mg}_2\text{Si}) = 0,3 + 0,25 = 0,55 \text{ моля}.$$

Зная, что при сжигании 1 моля газа выделилось 416 кДж теплоты, составим пропорцию:

при сжигании 1 моля SiH_4 выделяется 416 кДж теплоты;

при сжигании 0,55 моля SiH_4 выделяется x кДж теплоты;

$$x = 0,55 \cdot 416 = 228,8.$$

Количество теплоты, которое выделилось при сжигании силана, равно 228,8 кДж.

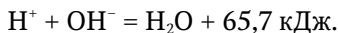
ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 2 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом диске.

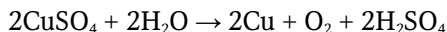
Задача 7

- 200 г раствора сульфата меди подвергли электролизу, пользуясь при этом инертным электродом. После полного осаждения меди электролиз прекратили, а оставшийся раствор нейтрализовали 25%-м раствором гидроксида натрия. Выделилось 52,56 кДж теплоты. Вычислить массу полученного после реакции нейтрализации раствора. Термохимическое уравнение реакции нейтрализации следующее:

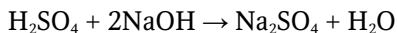


- Решение.

При электролизе водного раствора сульфата меди с использованием инертного электрода происходит следующий процесс:



После полного осаждения меди в растворе остается только серная кислота, которая нейтрализуется раствором гидроксида натрия по реакции



Зная тепловой эффект реакции нейтрализации и количество выделившейся при нейтрализации теплоты, мы можем определить количество добавленной щелочи и присутствовавшей кислоты.

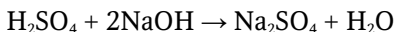
При взаимодействии 1 моля ионов H^+ с 1 молем ионов OH^- выделяется 65,7 кДж теплоты. Поскольку в нашем случае выделилось 52,56 кДж теплоты, то количество прореагировавших ионов H^+ и OH^- равно $52,56 : 65,7 = 0,8$ моля.

$$v(\text{H}^+) = 0,8 \text{ моля}; v(\text{OH}^-) = 0,8 \text{ моля.}$$

Таким образом, количество прореагировавшей щелочи равно:

$$v(\text{NaOH}) = v(\text{OH}^-) = 0,8 \text{ моля.}$$

Количество серной кислоты в 2 раза меньше количества щелочи в соответствии со стехиометрическими коэффициентами уравнения нейтрализации:



$$v(\text{H}_2\text{SO}_4) = v(\text{NaOH}) : 2 = 0,8 : 2 = 0,4 \text{ моля.}$$

Поскольку серная кислота образована при электролизе раствора сульфата меди, мы можем определить количество выделившихся меди и кислорода:

$$v(\text{Cu}) = v(\text{H}_2\text{SO}_4) = 0,4 \text{ моля};$$

$$v(\text{O}_2) = v(\text{H}_2\text{SO}_4) : 2 = 0,4 : 2 = 0,2 \text{ моля.}$$

Итак, определим массу полученного после реакции нейтрализации раствора. Для этого определим массы выделенных из раствора при электролизе меди и кислорода и добавленного при нейтрализации раствора щелочи:

$$m(\text{Cu}) = v(\text{Cu}) \cdot M(\text{Cu}) = 0,4 \text{ моля} \cdot 63,5 \text{ г/моль} = 25,4 \text{ г};$$

$$m(\text{O}_2) = v(\text{O}_2) \cdot M(\text{O}_2) = 0,2 \text{ моля} \cdot 32 \text{ г/моль} = 6,4 \text{ г.}$$

Масса NaOH , израсходованного на нейтрализацию, равна:

$$m(\text{NaOH}) = v(\text{NaOH}) \cdot M(\text{NaOH}) = 0,8 \text{ моля} \cdot 40 \text{ г/моль} = 32 \text{ г.}$$

Масса раствора NaOH , израсходованного на нейтрализацию, равна:

$$\begin{aligned} m(\text{р-ра NaOH}) &= m(\text{NaOH}) \cdot 100 \% : W(\text{NaOH}) = \\ &= 32 \cdot 100 \% : 25 \% = 128 \text{ г.} \end{aligned}$$

Определим массу полученного после реакции нейтрализации раствора:

$$m(\text{конечного р-ра}) = m(\text{начального р-ра}) - m(\text{Cu}) - m(\text{O}_2) + m(\text{р-ра NaOH}) = 200 - 25,4 - 6,4 + 128 = 296,2 \text{ г.}$$

Итак, масса полученного после реакции нейтрализации раствора равна 296,2 г.

ПРИМЕЧАНИЕ



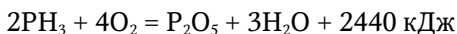
Задача 6 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом диске.

Задача 10

- ☛ При сжигании 2 молей фосфина образуется оксид фосфора (V) и вода. При этом выделяется 2440 кДж теплоты. Определить теплоту образования фосфина, если при образовании P_2O_5 и воды выделяется, соответственно, 1548 кДж/моль и 286 кДж/моль теплоты.

- 👉 Решение.

Запишем термохимическое уравнение протекающей реакции:



Тепловой эффект реакции (2440 кДж) равен разнице между теплотами образования продуктов и реагентов:

$$\begin{aligned} Q(\text{реакции}) &= Q_{\text{обр}}(\text{продуктов}) - Q_{\text{обр}}(\text{реагентов}) = \\ &= Q_{\text{обр}}(\text{P}_2\text{O}_5) + 3Q_{\text{обр}}(\text{H}_2\text{O}) - 2Q_{\text{обр}}(\text{PH}_3) - 4Q_{\text{обр}}(\text{O}_2). \end{aligned}$$

ВНИМАНИЕ



Необходимо помнить, что теплоты образования простых веществ равны нулю. Однако простые вещества могут находиться в разных агрегатных состояниях и аллотропных модификациях. Нулю равна лишь теплота образования простого вещества в той аллотропной модификации, которая превалирует в природе, и в том агрегатном состоянии, которое соответствует стандартным условиям. Например, в случае кислорода нулю равна теплота образования газообразного O_2 . Теплота образования озона (O_3) равна 142,3 кДж/моль.

Итак, $Q(\text{реакции}) = 2440 \text{ кДж}$;

$$Q_{\text{обр}}(\text{P}_2\text{O}_5) = 1548 \text{ кДж/моль};$$

$$Q_{\text{обр}}(\text{H}_2\text{O}) = 286 \text{ кДж/моль};$$

$$Q_{\text{обр}}(\text{O}_2) = 0 \text{ кДж/моль};$$

$$2440 = 1548 + 3 \cdot 286 - 2Q_{\text{обр}}(\text{PH}_3) - 4 \cdot 0;$$

$$Q_{\text{обр}}(\text{PH}_3) = -17 \text{ кДж/моль}.$$

Таким образом, теплота образования фосфина равна -17 кДж/моль .

1.2. ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН МЕНДЕЛЕЕВА И СТРОЕНИЕ АТОМОВ

Периодический закон

Менделеев сформулировал открытый им закон следующим образом: **свойства элементов, а потому и свойства образуемых ими простых и сложных тел стоят в периодической зависимости от их атомного веса.**

Современная формулировка периодического закона: **физические и химические свойства простых веществ, а также формы и свойства сложных соединений находятся в периодической зависимости от величины заряда ядра атома.**

Практически все свойства находятся в периодической зависимости. Для атомов — атомный радиус и объем, ионный радиус, ионизационный потенциал, электроотрицательность, степени окисления. Для простых веществ и соединений — физические свойства: ковкость, твердость, коэффициент расширения, преломления, плотность; химические свойства: формулы оксидов, гидридов, галогенидов, реакционная способность, теплоты образования соединений, сольватации и т. д.

Строение атома

Химический элемент — это совокупность атомов с одинаковым зарядом ядра. Носителем положительного заряда ядра являются протоны ${}^1_1\text{p}$. Их число определяет величину заряда ядра (Z) и, следовательно, порядко-

вый номер химического элемента. Масса электрона ${}_{-1}^0e$ почти в 2000 раз меньше массы протона ${}_{1}^1p$ и нейтрона ${}_{0}^1n$. Поэтому масса атома практически равна массе ядра — сумме масс нуклонов (протонов и нейтронов).

Важной характеристикой ядра также является массовое число A , которое равно общему числу нуклонов — протонов Z (зарядовое число) и нейтронов N , входящих в состав ядра:

$$A = Z + N.$$

Все частицы и ядра обозначаются символом ${}_{-1}^0e$ (верхний индекс — массовое число, нижний — заряд).

Если для всех атомов одного элемента по определению число протонов и электронов всегда одинаково, то число нейтронов может различаться. В результате будет различаться масса атомов с неодинаковым числом нейтронов.

Разновидности одного и того же химического элемента, отличающиеся массой атомов, называются *изотопами*. Для одного элемента обычно является стабильным и, следовательно, существующим в природе небольшое количество изотопов, а иногда один или ноль (технеций, астат, большинство лантаноидов и актиноидов). Для водорода это устойчивые против ${}_{1}^1H$ и дейтерий ${}_{1}^2D$ и неустойчивый тритий ${}_{1}^3T$. Для хлора — ${}_{17}^{35}HCl$ и ${}_{17}^{37}Cl$. Средняя атомная масса элемента определяется соотношением изотопов с различными массовыми числами.

Средняя атомная масса элемента равна:

$$A_r(\text{ср.}) = [A_r({}_{z}^x\text{Э}) \cdot w({}_{z}^x\text{Э}) + A_r({}_{z}^y\text{Э}) \cdot w({}_{z}^y\text{Э})]: 100 \%$$

Поскольку хлор на четверть состоит из ${}_{17}^{37}Cl$ и на три четверти из ${}_{17}^{35}HCl$, то средняя атомная масса его равна 35,5.

Количество протонов и электронов в атоме находить легко: оно равно заряду ядра, то есть порядковому номеру элемента:

$$n({}_{-1}^0e) = n({}_{1}^1p) = Z.$$

Количество нейтронов можно определить вычитанием атомного номера элемента от относительной атомной массы изотопа:

$$n({}_{0}^1n) = A_r - n({}_{1}^1p) = A_r - N(\text{номер элемента}).$$

Электронная конфигурация

Основываясь на квантовом подходе к строению атома и зная заряды атомов, мы можем построить периодическую таблицу, не глядя в учебник.

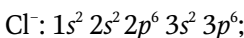
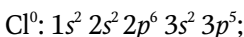
Начнем с водорода (H): $Z = 1$; $1e$; электронная конфигурация $1s^1$. Следующий атом — гелий (He): $Z = 2$, электронная конфигурация $1s^2$. Уровень с главным квантовым числом 1 заполнен, надо заполнять следующий слой с $n = 2$, то есть начинать новый период.

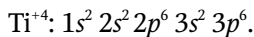
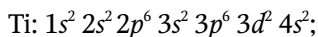
Во втором периоде заполняем $2s$ - и $2p$ -орбитали, их четыре, их емкость составляет $8e$. Во втором периоде как раз восемь элементов. Ne: $1s^2 2s^2 2p^6$. Такую заполненную оболочку при построении электронных конфигураций следующих атомов обозначают как [Ne]. Начинаем следующий третий период — $n = 3$. Na: [Ne] $3s^1$... Ar: [Ne] $3s^2 3p^6$. Далее, по правилу Клячковского мы должны заполнять не $3d$ -, а $4s$ -уровень, то есть начинать новый период. K: [Ar] $4s^1$; Ca: [Ar] $4s^2$. Теперь начинается заполнение $3d$ -орбиталей, их пять, следовательно, таких d -элементов окажется десять. Sc: $3d^1 4s^2$... Zn: $3d^{10} 4s^2$.

Следует учесть особенность электронных конфигураций атомов хрома и меди. Для Cr вместо $3d^4 4s^2$ — $3d^5 4s^1$; для Cu вместо $3d^9 4s^2$ — $3d^{10} 4s^1$. Это связано с особой устойчивостью полузаполненных и полностью заполненных электронных оболочек.

Закончив заполнять $3d$ -орбиталь, переходим к $4p$ ($n + 1 = 5$) и добираемся до Kr: $3d^{10} 4s^2 4p^6$. Дальше ситуация повторяется с d -электронами и f -электронами — $4d$ ($n + 1 = 6$), $4f$ ($n + 1 = 7$), в то время как $5s$ ($n + 1 = 5$). Сначала заполняется $5s$ (Rb, Sr), затем $4d$ (Y, Cd), и наконец $5p$ ($n + 1 = 7$, как и у $4d$). Закончили на Xe: $4d^{10} 5s^2 5p^6$. Теперь приходится заполнять $6s$ орбиталь, у нее $n + 1 = 6$ меньше, чем у $5d$ и $4f$. После лантана (La): $5d^1 6s^2$ начинается заполнение $4f$ -орбиталей, и мы получаем 14 лантанидов. Все остальные электронные конфигурации вы с легкостью напишете сами.

Таким образом, зная зарядовое число элемента и правила заполнения орбиталей, можно записать электронную конфигурацию любого атома или иона (у ионов изменяется количество электронов на валентных орбиталях):





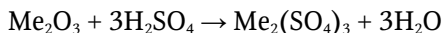
Решение задач

Задача 4

2,4 г оксида трехвалентного металла при взаимодействии с серной кислотой образует 6 г сульфата. Определить относительную атомную массу элемента.

Решение.

Запишем уравнение протекающей реакции, при этом неизвестный металл обозначим как Me:



Примем неизвестную относительную атомную массу элемента равной x . Вычислим молярные массы оксида и сульфата металла:

$$M(\text{Me}_2\text{O}_3) = 2x + 3 \cdot 16 = (2x + 48) \text{ г/моль};$$

$$M(\text{Me}_2(\text{SO}_4)_3) = 2x + 3 \cdot 96 = (2x + 288) \text{ г/моль}.$$

Согласно уравнению реакции 1 молекула оксида металла образует 1 молекулу сульфата. Составим пропорцию:

2,4 г оксида образует 6 г сульфата;

$(2x + 48)$ г оксида образует $(2x + 288)$ г сульфата;

$$6(2x + 48) = 2,4(2x + 288);$$

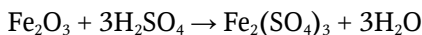
$$12x + 288 = 4,8x + 691,2;$$

$$7,2x = 403,2;$$

$$x = 56.$$

Относительная атомная масса элемента равна 56. Элементом с такой относительной атомной массой является железо Fe.

Уравнение реакции будет выглядеть следующим образом:



ПРИМЕЧАНИЕ

Задачи 5, 6, 7, 13, 16, 20, 26, 31 и 32 имеют аналогичное решение. Задачи 1, 2, 3 и 17 решаются с помощью простой пропорции по молярным массам веществ. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 8

☉ Природный галлий имеет 2 изотопа. Содержание изотопа ^{71}Ga составляет 36 %. Найти другой изотоп, если средняя относительная атомная масса элемента галлия ($A_r(\text{ср.})$) равна 69,72. Определить число нейтронов в найденном изотопе.

🕒 Решение.

Положим, что относительная атомная масса второго изотопа равна x . Таким образом, его можно записать как ^xGa .

Содержание второго изотопа равно:

$$100 - 36 = 64 \%$$

Средняя атомная масса элемента равна:

$$A_r(\text{ср.}) = (A_r(^{71}\text{Ga}) \cdot w(^{71}\text{Ga}) + A_r(^x\text{Ga}) \cdot w(^x\text{Ga})) : 100\%$$

Подставим в это выражение известные данные:

$$69,72 = (71 \cdot 36 + x \cdot 64) : 100;$$

$$6972 = 2556 + 64x;$$

$$x = 69.$$

Итак, неизвестный — это изотоп ^{69}Ga с относительной атомной массой 69.

Элемент галлий Ga находится в четвертом ряду, в главной подгруппе третьей группы периодической системы химических элементов и имеет атомный номер 31.

Известно, что относительная атомная масса изотопа равна сумме нуклонов (протонов и нейтронов). Количество протонов равно атомному номеру.

Таким образом, количество нейтронов можно определить вычитанием атомного номера элемента из относительной атомной массы изотопа:

$$n({}_0^1n) = A_r - n({}_1^1p) = A_r - N(\text{номер элемента}) = 69 - 31 = 38.$$

В изотопе галлия ${}^{69}\text{Ga}$ 38 нейтронов.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 9, 10, 12 и 30 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 11

- ☉ В смеси простой и тяжелой воды вычислить массовую долю тяжелой воды D_2O , если в этой смеси массовая доля элемента кислорода составляет 88 %.

- 🕒 Решение.

Молярная масса простой воды равна:

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 2 \cdot 1 + 16 = 18 \text{ г/моль.}$$

Молярная масса тяжелой воды равна:

$$M(\text{D}_2\text{O}) = 2 \cdot 2 + 16 = 20 \text{ г/моль.}$$

Положим, масса смеси равна 100 г. Пусть масса простой воды равна:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = x \text{ г.}$$

Тогда масса тяжелой воды равна:

$$m(\text{D}_2\text{O}) = (100 - x) \text{ г.}$$

Определим содержание элемента кислорода в 100 г смеси.

Определим массу элемента кислорода, находящегося в составе простой воды H_2O :

18 г воды содержит 16 г кислорода;

x г воды содержит y_1 г кислорода;

$$y_1 = 16x:18 = 0,889x \text{ г.}$$

Определим массу элемента кислорода, находящегося в составе тяжелой воды D_2O :

20 г воды содержит 16 г кислорода;

$(100 - x)$ г воды содержат y_2 г кислорода;

$$y_2 = (100 - x) \cdot 16 : 20 = (80 - 0,8x) \text{ г.}$$

Общая масса кислорода в смеси равна:

$$y_1 + y_2 = 0,889x + 80 - 0,8x = (0,089x + 80) \text{ г.}$$

Из условия известно, что в смеси массовая доля элемента кислорода составляет 88 %, то есть в смеси массой 100 г находится 88 г кислорода, значит:

$$0,089x + 80 = 88;$$

$$x = 90.$$

Масса простой воды равна $m(H_2O) = x = 90$ г.

Масса тяжелой воды равна $m(D_2O) = 100 - x = 10$ г.

Массовая доля тяжелой воды равна:

$$W(D_2O) = m(D_2O) \cdot 100\% : m(\text{смеси}) = 10 \cdot 100\% : 100 = 10\%.$$

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 14 и 15 решаются путем определения мольных соотношений атомов и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 18

- ☉ Одно и то же количество металла в одном случае реагирует с 0,04 г кислорода с образованием оксида, а в другом — с 0,1775 г некоторого галогена. Определить число нейтронов тяжелого изотопа взятого галогена. Металл имеет постоянную валентность.

- ☪ Решение.

Запишем формулу неизвестного галогена как Hal_2 . Пусть атомная масса элемента равна $A_r(Hal) = x$, тогда молярная масса галогена $M(Hal_2) = 2x$ г/моль.

В первом случае металл реагирует с кислородом, образуя оксид, в котором кислород находится в степени окисления -2 . Во втором случае металл реагирует с галогеном, образуя галогенид, в котором галоген находится в степени окисления -1 . Следовательно, при постоянной валентности металла количество прореагировавшего галогена в 2 раза больше количества кислорода, так как 1 молекула O_2 эквивалентна 2 молекулам Hal_2 . Составим пропорцию:

металл реагирует с 32 г O_2 или с $(2 \cdot 2x)$ г Hal_2 ;

металл реагирует с 0,04 г O_2 или с 0,1775 г Hal_2 ;

$$0,04 \cdot 4x = 0,1775 \cdot 32;$$

$$x = 35,5.$$

Атомная масса галогена — 35,5. Это хлор. Его основные изотопы — ^{35}Cl и ^{37}Cl .

Более тяжелым изотопом данного элемента является изотоп ^{37}Cl .

Элемент Cl находится в третьем ряду, в главной подгруппе седьмой группы периодической системы химических элементов и имеет атомный номер 17.

Известно, что относительная атомная масса изотопа равна сумме нуклонов (протонов и нейтронов). Количество протонов равно атомному номеру.

Таким образом, количество нейтронов можно определить вычитанием атомного номера элемента из относительной атомной массы изотопа:

$$n({}_0^1n) = A_r - n({}_1^1p) = A_r - N(\text{номер элемента}) = 37 - 17 = 20.$$

В изотопе хлора ^{37}Cl 20 нейтронов.

ПРИМЕЧАНИЕ



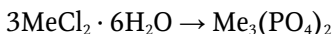
Задача 19 решается по общим уравнениям, приведенным в теоретической части разд. 1.1. Задачи 21, 22, 29 и 33 являются обычными задачами на смеси, типовые решения таких задач рассмотрены в разд. 1.4 данной главы. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 27

Из 65,7 г кристаллогидрата хлорида двухвалентного металла, который содержит 6 молей кристаллизационной воды, получили 31 г ортофосфата. Определить общую сумму электронов в ионе металла.

Решение.

Схематически запишем описанное превращение. Металл при этом обозначим символом Me:



Из трех молекул гексагидрата хлорида двухвалентного металла образуется одна молекула фосфата двухвалентного металла.

Примем неизвестную относительную атомную массу элемента равной x . Вычислим молярные массы гексагидрата хлорида металла и фосфата металла:

$$M(\text{MeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = x + 2 \cdot 35,5 + 6 \cdot 18 = (x + 179) \text{ г/моль};$$

$$M(\text{Me}_3(\text{PO}_4)_2) = 3x + 2 \cdot 95 = (3x + 190) \text{ г/моль}.$$

Согласно уравнению реакции, 3 молекулы хлорида образуют 1 молекулу фосфата. Составим пропорцию:

65,7 г кристаллогидрата хлорида образуют 31 г фосфата;

$3 \cdot (x + 179)$ г кристаллогидрата хлорида

образуют $(3x + 190)$ г фосфата;

$$65,7(3x + 190) = 93(x + 179);$$

$$197,1x + 12483 = 93x + 16647;$$

$$104,1x = 4164;$$

$$x = 40.$$

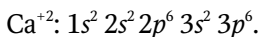
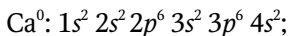
Относительная атомная масса элемента равна 40. Элемент с такой относительной атомной массой — кальций Ca. В составе солей кальций принимает степень окисления +2, что соответствует условию задачи.

Определим общую сумму электронов в ионе Ca^{+2} .

Элемент Са находится в четвертом ряду, в главной подгруппе второй группы периодической системы химических элементов и имеет атомный номер 20.

Известно, что количество протонов и электронов в нейтральном атоме равно атомному номеру. Поскольку заряд иона Ca^{+2} равен +2, следовательно, у него на 2 электрона меньше, чем у нейтрального атома кальция ($20 - 2 = 18$).

Можно более подробно рассмотреть структуру электронной оболочки атома кальция и его двухзарядного катиона. Запишем электронные конфигурации атома Са и иона Ca^{+2} :



Итак, общее количество электронов в ионе кальция Ca^{+2} равно 18.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 23, 24 и 25 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 28

⌚ 0,3 моля сульфата одновалентного металла содержит 21 моль электронов. Вычислить в одном моле хлорида этого металла число молей нейтронов.

⌚ Решение.

Составим пропорцию:

0,3 моля сульфата одновалентного металла содержат

21 моль электронов;

1 моль сульфата одновалентного металла содержит

x молей электронов;

$$x = 21 : 0,3 = 70.$$

Итак, 1 моль сульфата одновалентного металла содержит 70 молей электронов, то есть 1 молекула сульфата одновалентного металла содержит 70 электронов.

Запишем формулу сульфата одновалентного металла, при этом неизвестный металл обозначим символом Me: Me_2SO_4 .

Молекула содержит 2 атома металла, атом серы и 4 атома кислорода. Порядковые номера, а следовательно, и количество электронов в атомах серы и кислорода равны, соответственно, 8 и 16.

Если принять порядковый номер неизвестного элемента за x , то общее число электронов в молекуле сульфата равно:

$$2x + 16 + 4 \cdot 8 = 2x + 48 = 70 \text{ (как мы рассчитали выше);}$$

$$x = 11.$$

Порядковый номер элемента равен 11. Элементом с таким порядковым номером является натрий Na. В составе солей натрия принимает степень окисления +1, что соответствует условию задачи.

Хлоридом данного металла является хлорид натрия NaCl.

Чтобы узнать количество нейтронов в молекуле NaCl, определим количество нейтронов в каждом из атомов по отдельности:

для натрия Na:

$$n({}_0^1n) = A_r - n({}_1^1p) = A_r - N(\text{номер элемента}) = 23 - 11 = 12;$$

для хлора Cl:

$$n({}_0^1n) = A_r - n({}_1^1p) = A_r - N(\text{номер элемента}) = 35,5 - 17 = 18,5.$$

Среднее суммарное количество нейтронов в 1 молекуле NaCl равно $12 + 18,5 = 30,5$.

Следовательно, в 1 моле NaCl находится 30,5 моля нейтронов.

1.3. СКОРОСТЬ РЕАКЦИИ. ХИМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ

Скорость химической реакции

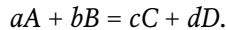
Под *скоростью химической реакции* понимают изменение концентрации реагирующих или образующихся веществ в единицу времени.

Различают реакции, протекающие в гомогенных и гетерогенных системах. В случае *гомогенных систем* реагирующие вещества находятся в одной фазе, а в случае *гетерогенных* — в разных. Скорость реакции

зависит от природы реагирующих веществ, концентрации, давления, температуры и присутствия катализаторов.

Зависимость скорости реакции от концентрации реагирующих веществ в гомогенной системе выражается законом действующих масс: **при данной температуре скорость химической реакции прямо пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ, причем каждая из концентраций взята в степени, равной коэффициенту перед формулой этого вещества в уравнении реакции.**

В общем виде для реакции имеем:



Скорость реакции выражается уравнением

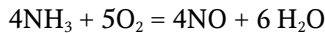
$$V = k[A]^a[B]^b,$$

где $[A]$ и $[B]$ — текущие молярные концентрации реагирующих веществ (эти концентрации непрерывно уменьшаются, в результате чего скорость плавно падает);

a и b — стехиометрические коэффициенты;

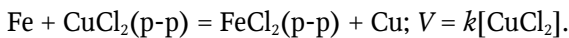
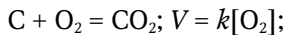
k — коэффициент пропорциональности, называемый константой скорости реакции.

Так, для реакции



$$V = k[\text{NH}_3]^4[\text{O}_2]^5.$$

Если реакция протекает в гетерогенных средах, ее скорость зависит только от веществ, находящихся в газовой или жидкой фазах, например:



От давления зависит только скорость тех реакций, которые протекают с участием газообразных веществ.

Зависимость скорости реакции от температуры наиболее просто описывается правилом Вант-Гоффа: **при изменении температуры на каждые десять градусов скорость реакции изменяется в 2–4 раза.**

Математически этот закон выражается следующим образом:

$$\frac{v_2}{v_1} = \gamma^{\frac{T_2 - T_1}{10}},$$

где v_1 и v_2 — скорости реакции при температурах T_1 и T_2 ;

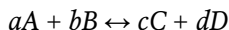
γ — температурный коэффициент скорости химической реакции.

Температурный коэффициент скорости химической реакции показывает, во сколько раз изменится скорость реакции при изменении температуры на каждые 10 градусов.

Химическое равновесие

Различают обратимые и необратимые (вернее, условно необратимые) химические реакции. *Необратимые* реакции протекают до конца (практически), а *обратимые* протекают как в прямом, так и в обратном направлении.

Обратимые реакции характеризуются состоянием *химического равновесия*, под которым понимают момент, когда скорости прямой и обратной реакций становятся равными. Состояние равновесия характеризуется константой равновесия (K), которая для данной реакции при данной температуре является величиной постоянной. Так, для обратимой гомогенной реакции



константа равновесия реакции равна:

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

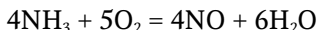
При этом в выражении константы равновесия используются только равновесные концентрации веществ (концентрации после наступления равновесия).

Таким образом, *константа равновесия реакции* равна отношению произведений равновесных концентраций продуктов и реагентов реакции в степенях, равных их стехиометрическим коэффициентам.

ВНИМАНИЕ

Наиболее частой ошибкой при решении задач является использование в данном выражении начальных концентраций веществ вместо равновесных.

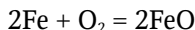
Так, для реакции



константа равновесия реакции равна:

$$K = \frac{[\text{NO}]^4 \cdot [\text{H}_2\text{O}]^6}{[\text{NH}_3]^4 \cdot [\text{O}_2]^5}.$$

В случае гетерогенной реакции в выражение константы химического равновесия включают значения только равновесных концентраций веществ, находящихся в газообразном состоянии или в растворе. Например:



$$K = \frac{1}{[\text{O}_2]}.$$

Процесс перехода от одного равновесного состояния к новому равновесному состоянию называется *смещением химического равновесия*. Направление смещения химического равновесия определяется принципом Ле Шателье: **если на систему, находящуюся в состоянии химического равновесия, оказывать внешнее воздействие (концентрация, температура, давление), то равновесие смещается в направлении реакции, ослабляющей внешнее воздействие.**

Увеличение концентрации какого-либо вещества смещает равновесие в сторону реакции расходования этого вещества. При повышении температуры равновесие смещается в направлении эндотермической реакции; при понижении температуры — в направлении экзотермической реакции. Давление оказывает влияние на смещение равновесия только в реакциях, протекающих с участием газообразных веществ.

Если в результате реакции число молекул газообразных веществ не изменяется, то изменение давления не вызывает смещения равновесия.

Увеличение давления сдвигает равновесие в сторону реакции, идущей с уменьшением объема, то есть содержащей меньшее число молекул газообразных веществ в уравнении реакции.

Для газообразных соединений вместо концентраций при записи константы равновесия можно использовать давление; очевидно, численное значение константы при этом может измениться, если число газообразных молекул в правой и левой частях уравнения неодинаково.

Задача 1

⊙ В растворе содержатся 4 вещества, концентрации которых составляют, соответственно: $[A] = 2$ моля/л, $[B] = 3$ моля/л, $[C] = 4$ моля/л, $[D] = 2,5$ моля/л. При определенных условиях установилось равновесие в соответствии с указанной схемой: $2A + B \leftrightarrow 2D + 3C$. Во сколько раз $[C]^3 \cdot [D]^2$ больше $[B] \cdot [A]^2$, если в момент равновесия обнаружено 1,5 моля/л вещества D?

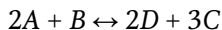
Ⓜ Решение.

В задании фактически требуется определить константу равновесия рассматриваемой реакции. В соответствии со стехиометрическими коэффициентами запишем для нее следующее выражение:

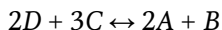
$$K = \frac{[C]^3 \cdot [D]^2}{[A]^2 \cdot [B]}.$$

Нам известна равновесная концентрация вещества D: $[D] = 1,5$ моля/л. Учитывая, что исходная концентрация D равна 2,5 моля/л, можно заключить следующее:

□ поскольку концентрация вещества D уменьшилась, реакция



протекала в обратную сторону, то есть



□ в результате реакции израсходовано $2,5 - 1,5 = 1$ моль/л вещества D.

Согласно стехиометрическим коэффициентам, 2 моля/л D при реакции с 3 молями/л C образуют 2 моля/л A и 1 моль/л B.

Можно составить пропорцию:

2 моля/л *D* и 3 моля/л *C* образуют 2 моля/л *A* и 1 моль/л *B*;

1 моль/л *D* и *x* молей/л *C* образуют *y* молей/л *A* и *z* молей/л *B*.

В результате решения получаем:

$$x = 1,5 \text{ моля/л}; y = 1 \text{ моль/л}; z = 0,5 \text{ моля/л}.$$

Таким образом,

1 моль/л *D* при реакции с 1,5 моля/л *C*
образовали 1 моль/л *A* и 0,5 моля/л *B*.

Рассчитаем равновесные концентрации реагентов и продуктов реакции.

Исходная концентрация вещества *A* равна 2 моля/л, при реакции образовался 1 моль/л, равновесная концентрация составила:

$$[A] = 2 + 1 = 3 \text{ моля/л}.$$

Исходная концентрация вещества *B* равна 3 моля/л, при реакции образовалось 0,5 моля/л, равновесная концентрация составила:

$$[B] = 3 + 0,5 = 3,5 \text{ моля/л}.$$

Исходная концентрация вещества *C* равна 4 моля/л, в реакции израсходовалось 1,5 моля/л, равновесная концентрация составила:

$$[C] = 4 - 1,5 = 2,5 \text{ моля/л}.$$

Из условия известно, что в момент равновесия обнаружено 1,5 моля/л вещества *D*.

Мы знаем равновесные концентрации всех веществ. Рассчитаем константу равновесия реакции $2A + B \leftrightarrow 2D + 3C$:

$$K = \frac{[C]^3 \cdot [D]^2}{[A]^2 \cdot [B]} = \frac{[2,5]^3 \cdot [1,5]^2}{[3]^2 \cdot [3,5]} = 1,116.$$

При этом размерность полученной константы — (моль/л)²:

$$K = [C]^3 \cdot [D]^2 : ([B] \cdot [A]^2) = 2,5 \text{ (моля/л)}^3 \cdot 1,5 \text{ (моля/л)}^2 : (3,5 \text{ моля/л} \cdot 3 \text{ (моля/л)}^2) = 1,116 \text{ (моля/л)}^2.$$

Таким образом, $[C]^3 \cdot [D]^2$ больше, чем $[B] \cdot [A]^2$ в 1,116 раза.

ВНИМАНИЕ



При расчете значений констант необходимо внимательно следить за размерностью полученной величины. В зависимости от выражения для константы реакции она может выглядеть по-разному: моль/л, л/моль, моль²/л² и т. д. В случае равенства суммы стехиометрических коэффициентов продуктов и реагентов константа равновесия реакции будет безразмерной величиной.

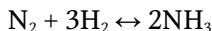
Решение задач

Задача 2

☉ Смесь, состоящую из 40 л водорода, 40 л азота и 14 л аммиака, подогрели. Создалось равновесие, при котором содержание аммиака в смеси составило 8 % по объему. Определить объемное процентное содержание водорода в полученной равновесной смеси. Равновесие установлено в присутствии катализатора.

🕒 Решение.

Запишем уравнение равновесной реакции, которая может протекать в описанных условиях:



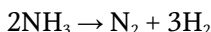
Определим суммарный объем исходной смеси:

$$V_{\text{общ}} = 40 + 40 + 14 = 94 \text{ л.}$$

Определим содержание аммиака в исходной смеси (по объему):

$$W_{\text{объемн}}(\text{NH}_3) = V(\text{NH}_3) : V_{\text{общ}} \cdot 100 \% = 14 : 94 \cdot 100 \% \approx 14,9 \%$$

В полученной смеси содержание аммиака составило 8 %, следовательно, можно заключить, что до установления равновесия обратная реакция разложения аммиака протекала быстрее, чем прямая реакция его образования, и фактически аммиак разлагался:



Введем переменную: положим, разложилось x л NH_3 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам, 2 моля NH_3 при разложении образуют 1 моль N_2 и 3 моля H_2 . Поскольку количество газа пропорционально его объему, можно составить следующую пропорцию:

2 л NH_3 образуют 1 л N_2 и 3 л H_2 ;

x л NH_3 образуют y л N_2 и z л H_2 .

В результате решения получаем:

$$y = (0,5x); z = (1,5x).$$

Таким образом, при разложении x л NH_3 образовалось

$$0,5x \text{ л } \text{N}_2 \text{ и } 1,5x \text{ л } \text{H}_2.$$

Рассчитаем равновесные объемы газов в образованной смеси.

Исходный объем аммиака NH_3 равен 14 л, при реакции разложилось x л, равновесный объем составил $V_{\text{кон}}(\text{NH}_3) = (14 - x)$ л.

Исходный объем азота N_2 равен 40 л, при реакции образовалось 0,5 x л, равновесный объем составил $V_{\text{кон}}(\text{N}_2) = (40 + 0,5x)$ л.

Исходный объем водорода H_2 равен 40 л, при реакции образовалось 1,5 x л, равновесный объем составил $V_{\text{кон}}(\text{H}_2) = (40 + 1,5x)$ л.

Суммарный объем равновесной смеси равен:

$$V_{\text{кон}}(\text{смеси}) = 14 - x + 40 + 0,5x + 40 + 1,5x = (94 + x) \text{ л.}$$

По условию задачи содержание аммиака в конечной смеси составило 8 % по объему, иными словами, в 100 л смеси содержится 8 л аммиака. Составим пропорцию:

100 л смеси содержат 8 л аммиака;

(94 + x) л смеси содержат (14 - x) л аммиака.

Получаем уравнение:

$$8(94 + x) = 100(14 - x);$$

$$752 + 8x = 1400 - 100x;$$

$$108x = 648; x = 6.$$

Итак, в реакции разложилось 6 л NH_3 и образовалось 3 л N_2 и 9 л H_2 .

Конечный объем водорода составил $V_{\text{конеч}}(\text{H}_2) = 40 + 9 = 49$ л.

Конечный объем смеси составил $V_{\text{конеч}}(\text{смеси}) = 94 + x = 94 + 6 = 100$ л.

Объемное процентное содержание водорода в полученной равновесной смеси равно

$$W_{\text{объемн}}(\text{H}_2) = V_{\text{конеч}}(\text{H}_2) : V_{\text{конеч}}(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 49 : 100 \cdot 100 \% = 49 \%$$

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 3, 6 и 7 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 4

- ⊙ Две реакции протекают с такой скоростью, что в единицу времени во время первой реакции образовалось 3 г сероводорода, а во время второй — 10 г йодоводорода. Какая из указанных реакций идет с большей скоростью?

- ⊙ Решение.

Скорость реакции выражается в количестве образованного вещества в единицу времени. Таким образом, в какой реакции в единицу времени образовалось большее количество продукта, та реакция и имеет большую скорость.

Молярные массы сероводорода и йодоводорода равны:

$$M(\text{H}_2\text{S}) = 2 \cdot 1 + 32 = 34 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{HI}) = 1 + 127 = 128 \text{ г/моль}.$$

Определим количество образованных продуктов, разделив их массы на молярные массы:

$$v(\text{H}_2\text{S}) = m(\text{H}_2\text{S}) : M(\text{H}_2\text{S}) = 3 \text{ г} : 34 \text{ г/моль} = 0,088 \text{ моля};$$

$$v(\text{HI}) = m(\text{HI}) : M(\text{HI}) = 10 \text{ г} : 128 \text{ г/моль} = 0,078 \text{ моля}.$$

Поскольку количество образованного сероводорода больше, чем количество йодоводорода, образованного за тот же промежуток времени, можно заключить, что реакция образования сероводорода имеет большую скорость, нежели реакция образования йодоводорода.

Задача 5

- ☉ Во сколько раз увеличится скорость реакции $\text{H}_2 + \text{I}_2 = 2\text{HI}$, если температуру от 20°C поднять до 170°C , если при повышении температуры на каждые 25°C скорость реакции возрастает в три раза?

- ☉ Решение.

Правило Вант-Гоффа выглядит следующим образом:

$$\frac{v_2}{v_1} = \gamma^{\frac{T_2 - T_1}{10}}.$$

Данная формула показывает, что при повышении температуры на каждые 10°C скорость реакции возрастает в γ раз. При повышении температуры с T_1 до T_2 скорость реакции вырастет в $\gamma^{\frac{T_2 - T_1}{10}}$ раз.

В нашем же случае известно, что при повышении температуры на каждые 25°C скорость реакции возрастает в три раза. Изменим формулу следующим образом:

$$\frac{v_2}{v_1} = \gamma^{\frac{T_2 - T_1}{25}}.$$

Данная формула показывает, что при повышении температуры на каждые 25°C скорость реакции возрастает в 3 раза. При повышении температуры с T_1 до T_2 скорость реакции вырастет в $3^{\frac{T_2 - T_1}{25}}$ раза.

Используя данную формулу, рассчитаем, во сколько раз вырастет скорость реакции, если температуру от 20°C поднять до 170°C :

$$3^{\frac{170 - 20}{25}}.$$

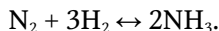
Таким образом, скорость реакции $\text{H}_2 + \text{I}_2 = 2\text{HI}$ при повышении температуры от 20°C до 170°C увеличится в $3^6 = 729$ раз.

Задача 8

- ☉ В закрытом сосуде емкостью 12 л осуществили синтез аммиака. В равновесной смеси имеется 16,8 г азота, 2,4 г водорода и 10,2 г аммиака. Определить константу равновесия.

🔊 Решение.

Запишем уравнение равновесной реакции, которая может протекать в описанных условиях:



Как уже было сказано, константа равновесия реакции равна отношению произведений равновесных концентраций продуктов и реагентов реакции в степенях, равных их стехиометрическим коэффициентам. Итак, в случае описанной реакции выражение для константы равновесия будет выглядеть следующим образом:

$$K = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2] \cdot [\text{H}_2]^3}.$$

Определим концентрации веществ в равновесной смеси. Поскольку объем сосуда, в котором содержится смесь, нам известен, необходимо определить количество веществ.

Молярные массы азота, водорода и аммиака равны:

$$M(\text{N}_2) = 2 \cdot 14 = 28 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \cdot 1 = 2 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{NH}_3) = 14 + 3 \cdot 1 = 17 \text{ г/моль}.$$

Определим количество всех веществ в равновесной смеси, разделив их массы на молярные массы:

$$\nu(\text{N}_2) = m(\text{N}_2) : M(\text{N}_2) = 16,8 \text{ г} : 28 \text{ г/моль} = 0,6 \text{ моля};$$

$$\nu(\text{H}_2) = m(\text{H}_2) : M(\text{H}_2) = 2,4 \text{ г} : 2 \text{ г/моль} = 1,2 \text{ моля};$$

$$\nu(\text{NH}_3) = m(\text{NH}_3) : M(\text{NH}_3) = 10,2 \text{ г} : 17 \text{ г/моль} = 0,6 \text{ моля}.$$

Определим равновесные концентрации всех веществ в смеси, разделив их количество на объем сосуда:

$$[\text{N}_2] = \nu(\text{N}_2) : V = 0,6 \text{ моля} : 12 \text{ л} = 0,05 \text{ моля/л};$$

$$[\text{H}_2] = \nu(\text{H}_2) : V = 1,2 \text{ моля} : 12 \text{ л} = 0,1 \text{ моля/л};$$

$$[\text{NH}_3] = \nu(\text{NH}_3) : V = 0,6 \text{ моля} : 12 \text{ л} = 0,05 \text{ моля/л}.$$

Подставив значения равновесных концентраций продуктов и реагентов реакции в выражение для константы равновесия реакции, рассчитаем ее значение:

$$K = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2] \cdot [\text{H}_2]^3} = \frac{[0,05]^2}{[0,05] \cdot [0,1]^3} = 50.$$

Итак, константа реакции образования аммиака из азота и водорода равна 50 (л/моль)^2 .

СОВЕТ



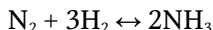
Для закрепления материала рекомендуется вновь обратиться к примечаниям, приведенным в решении задачи 1 в данном разделе.

Задача 9

☉ В закрытом сосуде при давлении 300 атм смешали 25 молей азота и 75 молей водорода. При определенной температуре в присутствии катализатора создано равновесие, при котором 10 % азота превратилось в аммиак. Определить в атмосферах давление в сосуде, которое создаст равновесная газовая смесь после приведения к начальной температуре.

☉ Решение.

Запишем уравнение протекающей реакции:



Известно, что 10 % азота превратилось в аммиак. Следовательно, прореагировало $0,1 \cdot 25 = 2,5$ моля азота.

Согласно стехиометрическим коэффициентам, 1 моль N_2 и 3 моля H_2 при реакции образуют 2 моля NH_3 . Составим следующую пропорцию:

1 моль N_2 и 3 моля H_2 образуют 2 моля NH_3 ;

2,5 моля N_2 и x молей H_2 образуют y молей NH_3 .

В результате решения получаем: $x = 7,5$; $y = 5$.

Таким образом, при реакции израсходовано 2,5 моля N_2 и 7,5 моля H_2 и образовалось 5 молей NH_3 .

Рассчитаем количество газов в образованной смеси.

Исходное количество азота N_2 равно 25 молей, при реакции израсходовалось 2,5 моля, равновесное количество составило:

$$\nu(N_2) = 25 - 2,5 = 22,5 \text{ моля.}$$

Исходное количество водорода H_2 равно 75 молей, при реакции израсходовалось 7,5 моля, равновесное количество составило:

$$\nu(H_2) = 75 - 7,5 = 67,5 \text{ моля.}$$

Изначально аммиак NH_3 в смеси не присутствовал, при реакции образовалось 5 молей, равновесное количество составило:

$$\nu(NH_3) = 5 \text{ молей.}$$

Суммарное количество исходной смеси равно:

$$\nu_{\text{исх}}(\text{смеси}) = 25 + 75 = 100 \text{ молей.}$$

Суммарное количество равновесной смеси равно:

$$\nu_{\text{конеч}}(\text{смеси}) = 22,5 + 67,5 + 5 = 95 \text{ молей.}$$

Согласно уравнению Менделеева – Клапейрона (см. теоретическую часть разд. 1.1), количество газа пропорционально давлению, которое он создает в определенном объеме. Следовательно, можно составить следующую пропорцию:

100 молей газовой смеси создают давление 300 атм;

95 молей газовой смеси создают давление x атм.

Получаем $100x = 28500$; $x = 285$.

Итак, равновесная газовая смесь после приведения к начальной температуре создаст в сосуде давление 285 атм.

1.4. СВОЙСТВА РАСТВОРОВ

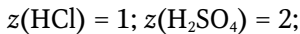
Способы выражения концентраций веществ в растворах

Как было описано в разд. 1.1, масса вещества обозначается как $m(X)$ (где X — химический символ вещества) и обычно измеряется в граммах или миллиграммах.

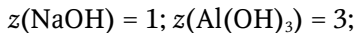
За единицу количества вещества $\nu(X)$ принят моль. Масса одного моля вещества называется молярной массой. Последняя обозначается буквой M и обычно измеряется в г/моль. Например, $M(\text{H}_2\text{O}) = 18$ г/моль; $M(\text{NaOH}) = 40$ г/моль.

Наряду с единицей количества вещества используется также единица количества вещества эквивалентов $\nu[(1/z)X]$, определяемая как произведение числа эквивалентности $z(X)$ на количество вещества $\nu(X)$. При этом под эквивалентом подразумевают реальную или условную частицу вещества, которая в конкретной кислотно-основной реакции эквивалентна одному иону водорода, в окислительно-восстановительной реакции — одному электрону. Соответственно, число эквивалентности $z(X)$ определяется исходя из химической формулы вещества и типа химической реакции:

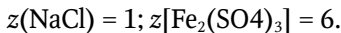
- для кислот $z(X)$ равно числу катионов водорода, способных замещаться катионами металлов, например:



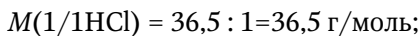
- для гидроксидов $z(X)$ равно числу гидроксигрупп OH^- , например:



- для солей z равно числу катионов водорода кислоты, замещенных катионами металла или аммония, например:



Молярная масса эквивалента $M[(1/z)X]$ есть отношение молярной массы $M(X)$ вещества к числу эквивалентности. Например,



Понятие «молярная масса эквивалента» равноценно прежнему «грамм-эквивалент», в современной литературе не используемому.

Молярная концентрация вещества

Молярная концентрация вещества (C , моль/л) — отношение количества растворенного вещества в молях (ν) к объему раствора (V):

$$C = \nu : V.$$

Молярная концентрация численно равна количеству молей вещества, содержащихся в 1 литре (1000 мл, 1 дм³) раствора.

Молярную концентрацию записывают следующим образом:

$$C(\text{HCl}) = 3 \text{ моля/л}; C(\text{H}_2\text{SO}_4) = 2 \text{ моля/л}.$$

Молярная концентрация эквивалента $C[(1/z)X]$ есть произведение молярной концентрации $C(X)$ на число эквивалентности z данного вещества, то есть $C[(1/z)X] = c(X) \cdot z$. Молярная концентрация эквивалента показывает количество вещества эквивалентов, содержащееся в 1 л раствора.

Для многих используемых в химическом анализе растворов (KOH, HCl, NaOH и др.) молярная концентрация эквивалентов веществ совпадает с их молярной концентрацией.

Размерность молярной концентрации эквивалентов вещества записывается следующим образом: моль/л экв. (ммоль/л экв.).

Массовая доля вещества

Массовая доля (массовый процент, процентная концентрация) (w , %) — отношение массы растворенного вещества к общей массе раствора, то есть сумме масс растворенного вещества и растворителя, например:

$$\begin{aligned} W(\text{Na}_2\text{HPO}_4) &= m(\text{Na}_2\text{HPO}_4) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = \\ &= 28,4 \text{ г} : 69,55 \text{ г} \cdot 100 \% = 40,8 \%. \end{aligned}$$

Доля также может выражаться и безразмерно, то есть в долях от единицы. В нашем случае $W(\text{Na}_2\text{HPO}_4) = 0,408$.

Для разбавленных растворов, имеющих значение плотности, близкое 1 г/см³, часто пользуются такой разновидностью массовой доли, как массовая концентрация, измеряемая в мг/л (г/л, г/дм³ и т. п.).

Мольная и объемная доли

Мольная доля (χ) — отношение числа молей данного компонента к сумме молей данного компонента и всех других компонентов раствора (растворителя и других растворенных веществ):

$$\chi = v(\text{вещества}) : v(\text{смеси/р-ра}).$$

Аналогично определяется объемная доля φ :

$$\varphi = V(\text{вещества}) : V(\text{смеси/р-ра}).$$

Моляльная концентрация

Моляльная концентрация (B , моль/кг) — отношение количества растворенного вещества в молях (v) к массе растворителя (m) (классическая моляльная концентрация — это число молей вещества в 1 кг растворителя):

$$B = v : m.$$

Данная концентрация используется в основном при исследовании коллативных свойств растворителей (криоскопия и эбуллиоскопия), так как смещение температуры замерзания или кипения растворителя прямо пропорционально моляльной концентрации растворенного в нем вещества.

Часто встречаются также производные от единиц измерения концентраций, например: мг/л, мг/дм³, мг/см³, мг/мл, ммоль/л, г/мл (титр) и др. Наиболее употребимыми единицами в справочной литературе применительно к оценке содержания примесей в воде (например, значения ПДК) являются мг/л и ммоль/л экв. В международной практике широко используется миллионная доля — *ppm* (part per million), что для растворов с плотностью около 1 г/мл соответствует размерности мг/л.

Решение задач

Задача 5

☉ Какую массу 10 и 20%-го растворов хлорида натрия необходимо взять для приготовления 300 г 12%-го раствора.

☉ Решение.

Способ I.

Примем за x массу взятого 10%-го раствора хлорида натрия:

$$m(10\text{-го р-ра}) = x.$$

Поскольку масса конечного 12 %-го раствора равна 300 г, то масса 20 %-го раствора хлорида натрия должна составить:

$$m(20\text{-го р-ра}) = m(12\text{-го р-ра}) - m(10\text{-го р-ра}) = (300 - x).$$

Определим массу хлорида натрия в каждом из этих растворов:

$$\begin{aligned} m(\text{NaCl в } 10\% \text{-м р-ре}) &= m(10\% \text{-го р-ра}) \cdot W(\text{NaCl}) : 100 \% = \\ &= x \cdot 10 \% : 100 \% = (0,1x) \text{ г}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m(\text{NaCl в } 20\% \text{-м р-ре}) &= m(20\% \text{-го р-ра}) \cdot W(\text{NaCl}) : 100 \% = \\ &= (300 - x) \cdot 20 \% : 100 \% = (60 - 0,2x) \text{ г}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m(\text{NaCl в } 12\% \text{-м р-ре}) &= m(12\% \text{-го р-ра}) \cdot W(\text{NaCl}) : 100 \% = \\ &= 300 \text{ г} \cdot 12 \% : 100 \% = 36 \text{ г}. \end{aligned}$$

Очевидно, масса хлорида натрия в конечном 12%-м растворе складывается из масс хлорида натрия в растворах, из которых будет образован конечный раствор. Иными словами, $m(\text{NaCl в } 12\% \text{-м р-ре}) = m(\text{NaCl в } 10\% \text{-м р-ре}) + m(\text{NaCl в } 20\% \text{-м р-ре})$ или $0,1x + 60 - 0,2x = 36$.

Решаем полученное уравнение:

$$60 - 36 = 0,2x - 0,1x;$$

$$24 = 0,1x;$$

$$x = 240 \text{ г}.$$

Итак, $m(10\% \text{-го р-ра}) = 240 \text{ г}$.

Следовательно, $m(20\% \text{-го р-ра}) = 300 - 240 = 60 \text{ г}$.

Способ II.

При решении подобных задач широко применяется так называемое «правило креста». Суть его в следующем. Допустим, необходимо получить раствор с концентрацией растворенного вещества z путем смешивания растворов с концентрациями x и y . Составляется следующая крестообразная (отсюда и название правила) расчетная схема:

$$\begin{array}{cc} x & (y - z) \\ & z \\ y & (z - x). \end{array}$$

Правые значения определяются по разнице между цифрами, находящимися на одной диагонали.

Смысл схемы следующий. Чтобы, смешивая растворы с концентрациями x и y , получить раствор с концентрацией z ($y > z > x$), исход-

ные растворы необходимо взять в соответствующем массовом (или объемном, в зависимости от способа выражения концентрации) отношении $(y - z) : (z - x)$.

Таким образом, $m(\text{р-ра с концентрацией } x)$:

$$m(\text{р-ра с концентрацией } y) = (y - z) : (z - x).$$

В нашем случае:

$$\begin{array}{r} 10 \\ 20 \end{array} \begin{array}{l} \\ 12 \end{array} \begin{array}{l} (20 - 12) \\ (12 - 10). \end{array}$$

Чтобы, смешивая 10% и 20%-е растворы, получить 12%-й раствор, исходные растворы необходимо взять в массовом отношении 8 : 2 или 4 : 1.

Итак,

$$m(10\text{-го р-ра}) : m(20\text{-го р-ра}) = 4.$$

Таким образом, масса 10%-го раствора составит $4/5$ от массы приготавливаемого раствора или $300 \cdot 0,8 = 240$ г, а масса 20%-го раствора составит $1/5$ от массы приготавливаемого раствора либо $300 \cdot 0,2 = 60$ г.

Итак, $m(10\text{-го р-ра}) = 240$ г, $m(20\text{-го р-ра}) = 60$ г.

ПРИМЕЧАНИЕ



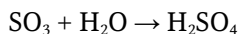
Задачи 1–4, 6–14, 16, 17, 22, 26, 27, 37, 45 и 51 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 15

⌚ Определить процентную концентрацию раствора серной кислоты, образующегося при растворении 100 г оксида серы (VI) в 400 г 42,875%-го раствора серной кислоты.

⌚ Решение.

При добавлении оксида серы (VI) к водному раствору серной кислоты протекает реакция с водой и образуется серная кислота:



Молярные массы оксида серы (VI) и серной кислоты равны:

$$M(\text{SO}_3) = 32 + 3 \cdot 16 = 80 \text{ г/моль.}$$

$$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 2 \cdot 1 + 32 + 4 \cdot 16 = 98 \text{ г/моль.}$$

Согласно реакции и значениям молярных масс, из 80 г оксида серы (VI) при реакции с водой образуется 98 г серной кислоты. Определим, сколько серной кислоты образуется из 100 г оксида серы (VI):

из 80 г SO_3 образуется 98 г H_2SO_4 ;

из 100 г SO_3 образуется x г H_2SO_4 ;

$$x = 9800 : 80 = 122,5 \text{ г.}$$

Итак, в результате реакции оксида серы (VI) с водой образуется 122,5 г серной кислоты.

Определим содержание кислоты в исходном растворе:

$$\begin{aligned} m(\text{H}_2\text{SO}_4) &= m(\text{р-ра}) \cdot W(\text{H}_2\text{SO}_4) : 100 \% = \\ &= 400 \text{ г} \cdot 42,875 \% : 100 \% = 171,5 \text{ г.} \end{aligned}$$

В исходном растворе присутствовало 171,5 г серной кислоты. При растворении оксида серы SO_3 в растворе образовалось еще 122,5 г, общее количество серной кислоты в конечном растворе составило

$$m_{\text{конеч}}(\text{H}_2\text{SO}_4) = 171,5 \text{ г} + 122,5 \text{ г} = 294 \text{ г.}$$

Масса конечного раствора складывается из массы исходного раствора и массы добавленного оксида серы SO_3 :

$$m_{\text{конеч}}(\text{р-ра}) = 400 \text{ г} + 100 \text{ г} = 500 \text{ г.}$$

Определим процентную концентрацию серной кислоты в конечном растворе:

$$\begin{aligned} W(\text{H}_2\text{SO}_4) &= m(\text{H}_2\text{SO}_4) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = \\ &= 294 \text{ г} : 500 \text{ г} \cdot 100 \% = 58,8 \%. \end{aligned}$$

Итак, при растворении 100 г оксида серы SO_3 в 400 г 42,875%-го раствора серной кислоты концентрация серной кислоты увеличилась до 58,8 %.

ВНИМАНИЕ


Необходимо понимать, что при растворении ангидрида серной кислоты, коим является оксид серы SO_3 , в водном растворе количество воды уменьшается за счет ее расходования в реакции образования серной кислоты. Если добавить избыток SO_3 , вся вода прореагирует и образуется олеум — раствор оксида серы SO_3 в серной кислоте.

ПРИМЕЧАНИЕ

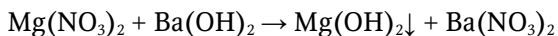

Задачи 28, 34 и 54 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 25

- ☉ К 250 мл децимолярного раствора нитрата магнезиума прилили 194 мл 4,3%-го раствора гидроксида бария с плотностью 1,03 г/мл. Определить молярные концентрации веществ в растворе, если весь объем раствора после удаления осадка уменьшился на 4 мл.

- 🕒 Решение.

При добавлении раствора гидроксида бария $\text{Ba}(\text{OH})_2$ к раствору нитрата магния (магнезиума) $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ протекает реакция замещения и образуется малорастворимый гидроксид магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$, который выпадает в осадок:



Содержание $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ выражено молярной концентрацией, а $\text{Ba}(\text{OH})_2$ — массовой концентрацией. Определим количества веществ в исходных растворах:

$$\begin{aligned} v(\text{Mg}(\text{NO}_3)_2) &= C(\text{Mg}(\text{NO}_3)_2) \cdot V(\text{р-ра } \text{Mg}(\text{NO}_3)_2) = \\ &= 0,1 \text{ моля/л} \cdot 0,25 \text{ л} = 0,025 \text{ моля.} \end{aligned}$$

Для определения количества гидроксида бария предварительно определим массу раствора, а затем массу гидроксида бария:

$$\begin{aligned} m(\text{р-ра } \text{Ba}(\text{OH})_2) &= \rho \cdot V = 1,03 \text{ г/мл} \cdot 194 \text{ мл} = 199,82 \text{ г.} \\ m(\text{Ba}(\text{OH})_2) &= m(\text{р-ра } \text{Ba}(\text{OH})_2) \cdot W(\text{Ba}(\text{OH})_2) : 100 \% = \\ &= 199,82 \text{ г} \cdot 4,3 \% : 100 \% = 8,59 \text{ г.} \end{aligned}$$

Молярная масса гидроксида бария равна:

$$M(\text{Ba}(\text{OH})_2) = 137 + 2 \cdot 16 + 2 \cdot 1 = 171 \text{ г/моль.}$$

Количество гидроксида бария равно:

$$\begin{aligned} v(\text{Ba}(\text{OH})_2) &= m(\text{Ba}(\text{OH})_2) : M(\text{Ba}(\text{OH})_2) = \\ &= 8,59 \text{ г} : 171 \text{ г/моль} = 0,05 \text{ моля.} \end{aligned}$$

Таким образом, при смешении двух растворов образуется раствор с 0,025 моля $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ и 0,05 моля $\text{Ba}(\text{OH})_2$. Как видно из уравнения реакции, указанные вещества взаимодействуют между собой в молярном соотношении 1 : 1. То есть можно заключить, что гидроксид бария находился в избытке, а следовательно, в конечном растворе присутствуют образовавшийся нитрат бария $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и непрореагировавший избыток гидроксида бария $\text{Ba}(\text{OH})_2$. Гидроксид магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ находится в удаленном осадке.

Итак, согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 0,025 моля $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ прореагировало с 0,025 моля $\text{Ba}(\text{OH})_2$, образовалось 0,025 моля $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и 0,025 моля $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Кроме этого, в растворе присутствует $0,05 - 0,025 = 0,025$ моля непрореагировавшего избытка $\text{Ba}(\text{OH})_2$:

$$v(\text{Ba}(\text{OH})_2) = 0,025 \text{ моля;}$$

$$v(\text{Ba}(\text{NO}_3)_2) = 0,025 \text{ моля.}$$

По условию задачи весь объем раствора после смешения и удаления осадка уменьшился на 4 мл, то есть равен:

$$V(\text{p-ра}) = 250 + 194 - 4 = 440 \text{ мл} = 0,44 \text{ л.}$$

Определим молярные концентрации веществ в конечном растворе:

$$\begin{aligned} C(\text{Ba}(\text{OH})_2) &= v(\text{Ba}(\text{OH})_2) : V(\text{p-ра}) = \\ &= 0,025 \text{ моля} : 0,44 \text{ л} = 0,0568 \text{ моля/л;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C(\text{Ba}(\text{NO}_3)_2) &= v(\text{Ba}(\text{NO}_3)_2) : V(\text{p-ра}) = \\ &= 0,025 \text{ моля} : 0,44 \text{ л} = 0,0568 \text{ моля/л.} \end{aligned}$$

Конечный раствор содержит 0,0568 моля/л гидроксида бария $\text{Ba}(\text{OH})_2$ и 0,0568 моля/л нитрата бария $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 20, 21, 24, 36, 39, 48, 50, 52, 53 и 55 имеют аналогичные решения, которые заключаются в тривиальном расчете по уравнению протекающей реакции, и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 29

- ☉ Определить массу кристаллогидрата нитрита бария $\text{Ba}(\text{NO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, выделяющегося при охлаждении до 20°C в 800 г насыщенного при 100°C раствора. Растворимость безводного нитрита бария при 100°C равна 300 г на 100 г воды, а при 20°C — 67,5 г на 100 г воды.

- 🕒 Решение.

При охлаждении растворимость соли иногда падает ниже ее текущей концентрации в растворе, вследствие чего соль выкристаллизовывается. Большинство солей, кристаллизуясь, включают в состав кристалла молекулы воды. Таким образом образуются кристаллогидраты.

Рассчитаем массу соли в насыщенном при 100°C растворе. В данных условия растворяется 300 г соли на 100 г воды. Поскольку раствор является насыщенным, в нем действительно 300 г соли на 100 г воды или 300 г соли на $300 + 100 = 400$ г раствора. Составим пропорцию:

в 400 г р-ра находится 300 г соли $\text{Ba}(\text{NO}_2)_2$;

в 800 г р-ра находится x г соли $\text{Ba}(\text{NO}_2)_2$;

$$x = 600.$$

Итак, в исходном растворе находится 600 г нитрита бария.

Введем переменную, в качестве которой выберем непосредственно искомое количество кристаллогидрата, выделяющегося при охлаждении раствора. При этом за x можно принять как массу, так и химическое количество кристаллогидрата.

СОВЕТ



Если в качестве переменной выбрать массу выпавшего кристаллогидрата, решение задачи впоследствии осложнится необходимостью оперировать с множеством дробных чисел, что может привести (и часто приводит) к путанице, неоправданным округлениям и в конечном итоге — к ошибкам в расчетах. Поэтому настоятельно рекомендуется

в качестве переменной принимать количество молей выпавшего кристаллогидрата, что позволит избежать возможных досадных ошибок и неточностей. Данный совет в большинстве случаев будет полезен во всех расчетных задачах, а не только в задачах о кристаллогидратах.

Таким образом, пусть $\nu(\text{Ba}(\text{NO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}) = x$ молей.

Рассчитаем молярные массы соли и кристаллогидрата:

$$M(\text{Ba}(\text{NO}_2)_2) = 137 + 2 \cdot (14 + 2 \cdot 16) = 229 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{Ba}(\text{NO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}) = 229 + 18 = 247 \text{ г/моль}.$$

Масса выпавшего кристаллогидрата $\text{Ba}(\text{NO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ равна

$$m(\text{Ba}(\text{NO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}) = \nu \cdot M = x \cdot 247 = 247x \text{ г}.$$

Масса соли $\text{Ba}(\text{NO}_2)_2$ в составе выпавшего кристаллогидрата равна

$$m(\text{Ba}(\text{NO}_2)_2) = \nu \cdot M = x \cdot 229 = 229x \text{ г}.$$

Масса раствора уменьшилась на массу выпавшего кристаллогидрата, а масса соли в растворе — на массу соли в составе кристаллогидрата. Из раствора массой 800 г, содержащего 600 г соли, выпало $247x$ г кристаллогидрата, содержащего $229x$ г соли. Массы раствора и соли в растворе после охлаждения до 20°C составили:

$$m(\text{р-ра}) = 800 - 247x = (800 - 247x) \text{ г};$$

$$m(\text{Ba}(\text{NO}_2)_2) = 600 - 229x = (600 - 229x) \text{ г}.$$

Выпадение кристаллогидрата будет продолжаться до тех пор, пока концентрация растворенной соли не станет равной ее растворимости при данных условиях. Иными словами, в данном случае раствор также будет насыщенным.

При 20°C растворимость нитрита бария равна 67,5 г соли на 100 г воды. Поскольку раствор является насыщенным, в нем после кристаллизации действительно 67,5 г соли на 100 г воды или 67,5 г соли на $67,5 + 100 = 167,5$ г раствора. Массы раствора и соли, выраженные через переменную, нам известны. Составим пропорцию:

в 167,5 г р-ра находится 67,5 г соли $\text{Ba}(\text{NO}_2)_2$;

в $(800 - 247x)$ г р-ра находится $(600 - 229x)$ г соли $\text{Ba}(\text{NO}_2)_2$.

Получим уравнение:

$$167,5(600 - 229x) = 67,5(800 - 247x);$$

$$100\,500 - 38\,357,5x = 54\,000 - 16\,672,5x;$$

$$21\,685x = 46\,500;$$

$$x = 2,144.$$

Количество выпавшего кристаллогидрата:

$$v(\text{Ba}(\text{NO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}) = x = 2,144 \text{ моля.}$$

Масса выпавшего кристаллогидрата:

$$m(\text{Ba}(\text{NO}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}) = 247x = 529,65 \text{ г.}$$

ВНИМАНИЕ



Распространенной ошибкой при решении задач такого типа является использование начальной массы раствора или воды в растворе (в случае использования в пропорции массы воды) в качестве конечной, вследствие чего решение задачи становится неверным. Необходимо четко представить, как изменились массы соли, растворителя (воды) и конечного раствора после кристаллизации.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 23, 30–32 и 46 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 33

- ⌚ Рассчитать количество йодида калия, выпавшего при охлаждении 58,4 г насыщенного при 80 °С раствора йодида калия (растворимость равна 192 г на 100 г воды) до 20 °С (растворимость равна 144 г на 100 г воды). Сколько граммов перманганата калия израсходуется, если при взаимодействии его с избытком соляной кислоты образуется такое количество хлора, которое необходимо для выделения всего йода из оставшегося после кристаллизации раствора йодида калия?

- ⌚ Решение.

Йодид калия не образует кристаллогидрата при кристаллизации из водного раствора. Данный факт позволяет нам упростить решение.

Определим содержание KI в исходном растворе. Растворимость равна 192 г соли на 100 г воды или 192 г соли на $100 + 192 = 292$ г раствора. Составим пропорцию:

в 292 г р-ра находится 192 г соли KI;

в 58,4 г р-ра находится x г соли KI;

$$x = 192 \cdot 58,4 : 292 = 38,4.$$

Следовательно, в исходном растворе массой 58,4 г находится 38,4 г йодида калия KI и $58,4 - 38,4 = 20$ г воды.

При охлаждении до 20°C из раствора выпало некоторое количество соли, однако количество воды в растворе осталось неизменным — 20 г.

Определим содержание KI в конечном растворе. Растворимость равна 144 г соли на 100 г воды. Составим пропорцию:

в 100 г воды растворяется 144 г соли KI;

в 20 г воды растворяется x г соли KI;

$$x = 144 \cdot 20 : 100 = 28,8.$$

В конечном растворе находится 28,8 г йодида калия KI, в начальном содержалось 38,4 г, следовательно, при охлаждении выпало

$$38,4 - 28,8 = 9,6 \text{ г KI}.$$

Итак, первая часть задачи решена: масса выпавшего при охлаждении йодида калия равна 9,6 г.

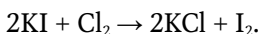
ВНИМАНИЕ



Необходимо предупредить, что данный ход решения неприемлем в случае, если речь идет о кристаллогидратах, так как при их выпадении количество воды в растворе изменяется (уменьшается).

Определим количество хлора, необходимое для выделения всего йода из оставшегося после кристаллизации раствора йодида калия.

Запишем уравнение протекающей в данном случае реакции:



Как мы уже определили, масса оставшегося после кристаллизации раствора йодида калия равна 28,8 г. Определим его количество:

$$M(\text{KI}) = 39 + 127 = 166 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{KI}) = m(\text{KI}) : M(\text{KI}) = 28,8 \text{ г} : 166 \text{ г/моль} = 0,173 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 2 моля KI реагируют с 1 молем Cl₂. Можно составить пропорцию:

$$2 \text{ моля KI реагируют с } 1 \text{ молем Cl}_2;$$

$$0,173 \text{ моля KI реагирует с } x \text{ молями Cl}_2;$$

$$x = 0,0867.$$

Для выделения всего йода из оставшегося после кристаллизации раствора йодида калия необходимо 0,0867 моля хлора Cl₂.

Из условия известно, что при взаимодействии порции перманганата калия с избытком соляной кислоты образуется такое количество хлора, которое необходимо для выделения всего йода из оставшегося после кристаллизации раствора йодида калия, то есть 0,0867 моля.

Запишем уравнение протекающей в данном случае реакции:



СОВЕТ



Чтобы правильно уравнивать коэффициенты данного уравнения, используйте метод электронного баланса. Определите, сколько электронов отдает атом хлора и сколько получает атом марганца, затем приведите обе полуреакции данного окислительно-восстановительного процесса к общему количеству переданных (полученных) электронов.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при взаимодействии 2 молей KMnO₄ с избытком соляной кислоты образуется 5 молей Cl₂. Нам известно количество образованного хлора Cl₂ — 0,0867 моля. Можно составить пропорцию:

$$\text{при расходе } 2 \text{ молей KMnO}_4 \text{ образуется } 5 \text{ молей Cl}_2;$$

$$\text{при расходе } x \text{ молей KMnO}_4 \text{ образуется } 0,0867 \text{ моля Cl}_2;$$

$$x = 0,0867 \cdot 2 : 5 = 0,0347.$$

Израсходуется 0,0347 моля перманганата калия. Определим его массу:

$$M(\text{KMnO}_4) = 39 + 55 + 4 \cdot 16 = 158 \text{ г/моль.}$$

$$m(\text{KMnO}_4) = \nu(\text{KMnO}_4) \cdot M(\text{KMnO}_4) =$$

$$= 0,0347 \text{ моля} \cdot 158 \text{ г/моль} = 5,48 \text{ г.}$$

Итак, при реакции с избытком соляной кислоты израсходуется 5,48 г перманганата калия.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 18 и 19 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

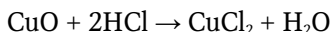
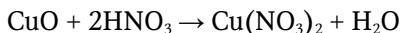
Задача 35

- ☉ В 100 г раствора, содержащего азотную и соляную кислоты, максимально растворилось 24 г оксида меди (II). После выпаривания раствора и прокаливания масса остатка составила 29,5 г. Написать уравнения протекающих реакций и определить массовые доли кислот в процентах в исходном растворе.

- 🕒 Решение.

Азотная и соляная кислоты при реакции с оксидом меди CuO образуют соли (нитрат и хлорид). После прокаливания сухого остатка хлорид меди остается без изменений, а нитрат меди разлагается, снова образуя оксид меди CuO .

Запишем уравнения протекающих реакций:



Определим общее количество прореагировавшего оксида меди CuO :

$$M(\text{CuO}) = 64 + 16 = 80 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{CuO}) = m(\text{CuO}) : M(\text{CuO}) = 24 \text{ г} : 80 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля.}$$

Пусть в реакцию с азотной кислотой вступило x молей CuO , тогда в реакцию с соляной кислотой вступило $(0,3 - x)$ молей.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций оксида с кислотами, 1 моль CuO реагирует с 2 молями одноосновной кислоты (азотной или соляной) с образованием 1 моля соли. Можно составить сложную пропорцию:

1 моль CuO реагирует с 2 молями одноосновной кислоты
с образованием 1 моля соли;

x молей CuO реагируют с y_1 молями HNO_3

с образованием y_2 молей $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$;

$(0,3 - x)$ молей реагируют с z_1 молями HCl

с образованием z_2 молей CuCl_2 ;

$$y_1 = 2x, y_2 = x;$$

$$z_1 = (0,6 - 2x), z_2 = (0,3 - x).$$

Таким образом, x молей CuO прореагировало с $2x$ молями HNO_3 с образованием x молей $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$; $(0,3 - x)$ молей CuO прореагировало с $(0,6 - 2x)$ молями HCl с образованием $(0,3 - x)$ молей CuCl_2 .

Рассмотрим третью реакцию.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции разложения нитрата меди, 1 моль $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ при прокаливании образует 1 моль CuO . То есть x молей $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, образованного в первой реакции, при прокаливании образует x молей CuO .

С хлоридом меди при прокаливании ничего не произошло.

Мы определили состав остатка после прокаливании: x молей CuO и $(0,3 - x)$ молей CuCl_2 . Определим его массу:

$$M(\text{CuO}) = 80 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{CuCl}_2) = 64 + 2 \cdot 35,5 = 135 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CuO}) = v \cdot M = x \text{ молей} \cdot 80 \text{ г/моль} = 80x \text{ г};$$

$$m(\text{CuCl}_2) = v \cdot M = (0,3 - x) \text{ молей} \cdot 135 \text{ г/моль} = (40,5 - 135x) \text{ г}.$$

Суммарная масса остатка равна:

$$m(\text{остатка}) = 80x + 40,5 - 135x = 40,5 - 55x = 29,5 \text{ г.}$$

Отсюда имеем: $x = 0,2$.

Таким образом, в реакцию с азотной кислотой вступило 0,2 моля CuO , с соляной кислотой — 0,1 моля CuO .

С оксидом меди прореагировало 0,4 и 0,2 моля азотной и соляной кислот соответственно.

Определим массовые доли кислот в процентах в исходном растворе. Найдем массы кислот в исходном растворе:

$$M(\text{HNO}_3) = 1 + 14 + 3 \cdot 16 = 63 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{HCl}) = 1 + 35,5 = 36,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HNO}_3) = \nu \cdot M = 0,4 \text{ моля} \cdot 63 \text{ г/моль} = 25,2 \text{ г};$$

$$m(\text{HCl}) = \nu \cdot M = 0,2 \text{ моля} \cdot 36,5 \text{ г/моль} = 7,3 \text{ г};$$

$$m(\text{р-ра}) = 100 \text{ г};$$

$$W(\text{HNO}_3) = m(\text{HNO}_3) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = 25,2 \text{ г} : 100 \text{ г} \cdot 100 \% = 25,2 \%;$$

$$W(\text{HCl}) = m(\text{HCl}) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = 7,3 \text{ г} : 100 \text{ г} \cdot 100 \% = 7,3 \%;$$

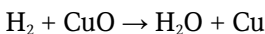
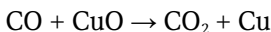
Массовые доли азотной и соляной кислот в исходном растворе равны, соответственно, 25,2 % и 7,3 %.

Задача 38

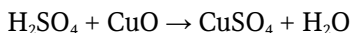
⦿ 0,38 г смеси оксида углерода (II) и водорода нагрели и пропустили над 6,4 г оксида меди (II). Полученный твердый остаток обработали 28,3 мл 9,8%-го раствора серной кислоты плотностью 1,6 г/мл. Для нейтрализации избытка серной кислоты потребовалось 40 мл гидрокарбоната натрия, концентрация которого равна 0,5 моля/л. Определить процентную концентрацию газов в смеси и объем смеси.

⦿ Решение.

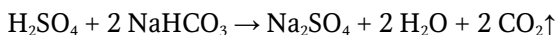
Оксид углерода (II) и водорода при реакции с оксидом меди (II) восстанавливают до чистой меди:



Остатки оксида растворяются в разбавленной серной кислоте в отличие от меди:



Для начала определим, какое количество серной кислоты прореагировало при обработке твердого остатка. Это значение мы можем определить косвенно. Известно, что для нейтрализации избытка серной кислоты потребовалось 40 мл гидрокарбоната натрия с концентрацией 0,5 моля/л. Запишем уравнение реакции:



Определим начальное количество серной кислоты и количество гидрокарбоната натрия для нейтрализации ее избытка.

Изначальное количество серной кислоты равно:

$$m(\text{p-ра H}_2\text{SO}_4) = \rho \cdot V = 1,6 \text{ г/мл} \cdot 28,3 \text{ мл} = 45,28 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{H}_2\text{SO}_4) &= m(\text{p-ра H}_2\text{SO}_4) \cdot W(\text{H}_2\text{SO}_4) : 100 \% = \\ &= 45,28 \text{ г} \cdot 9,8 \% : 100 \% = 4,437 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} v(\text{H}_2\text{SO}_4) &= m(\text{H}_2\text{SO}_4) : M(\text{H}_2\text{SO}_4) = \\ &= 4,437 \text{ г} : 98 \text{ г/моль} = 0,0453 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Количество гидрокарбоната натрия, необходимое для нейтрализации избытка серной кислоты, равно:

$$\begin{aligned} v(\text{NaHCO}_3) &= C(\text{NaHCO}_3) \cdot V(\text{p-ра}) = \\ &= 0,5 \text{ моля/л} \cdot 0,04 \text{ л} = 0,02 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации серной кислоты гидрокарбонатом, для нейтрализации 1 моля H_2SO_4 необходимо 2 моля NaHCO_3 . Можно составить пропорцию:

$$1 \text{ моль H}_2\text{SO}_4 \text{ реагирует с } 2 \text{ молями NaHCO}_3;$$

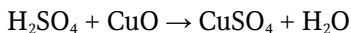
$$x \text{ молей H}_2\text{SO}_4 \text{ реагируют с } 0,02 \text{ моля NaHCO}_3;$$

$$x = 0,01.$$

Итак, избыток серной кислоты после обработки твердого остатка составил 0,01 моля. Изначальное количество кислоты — 0,0453 моля. Следовательно, при обработке твердого остатка израсходовалось

$$0,0453 - 0,01 = 0,0353 \text{ моля.}$$

Количество оксида меди, восстановленного до меди при обработке газовой смесью, также определим косвенно. Твердый остаток после восстановления оксида меди газовой смесью представлял собой смесь оксида меди CuO (невосстановленная часть) и непосредственно самой меди Cu (образованной при восстановлении). Остаток обработали разбавленной (9,8 %) серной кислотой. Поскольку известно, что медь не реагирует с разбавленной серной кислотой, следует, что серная кислота вступала в реакцию только с оксидом меди по реакции



Как было рассчитано выше, в данной реакции участвовало 0,0353 моля серной кислоты. Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль серной кислоты реагирует с 1 молем оксида меди, следовательно, 0,0353 моля серной кислоты реагирует с 0,0353 моля оксида меди. Это означает, что в твердом остатке находилось 0,0353 моля оксида меди. Начальное количество оксида меди определим по массе:

$$M(\text{CuO}) = 64 + 16 = 80 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{CuO}) = m(\text{CuO}) : M(\text{CuO}) = 6,4 \text{ г} : 80 \text{ г/моль} = 0,08 \text{ моля.}$$

Таким образом, нам известно следующее: после обработки 0,08 моля оксида меди (II) газовой смесью в твердом остатке остается 0,0353 моля оксида меди, а подвергается восстановлению $0,08 - 0,0353 = 0,0447$ моля.

Иными словами, в реакции со смесью оксида углерода (II) и водорода вступило 0,0447 моля оксида меди. Поскольку оксид меди не израсходовался полностью, можно заключить, что он находился в избытке (считается, что реакция восстановления протекала количественно).

Далее можно действовать несколькими способами. Рассмотрим способ с использованием системы уравнений. Предположим, что коли-

чество оксида углерода (II) равно: $v(\text{CO}) = x$ молей, а водорода — $v(\text{H}_2) = y$ молей.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций взаимодействия оксида углерода (II) и водорода с оксидом меди, 1 моль оксида углерода (II) восстанавливает 1 моль оксида меди, 1 моль водорода восстанавливает 1 моль оксида меди. Следовательно, x молей оксида углерода (II) восстанавливают x молей оксида меди, y молей водорода восстанавливают y молей оксида меди.

Всего вступило в реакцию $(x + y)$ молей оксида меди, или 0,0447 моля, как и было определено выше.

Первое уравнение системы готово:

$$x + y = 0,0447.$$

Для составления второго уравнения воспользуемся значением массы газовой смеси — 0,38 г. Выразим через переменные поочередно массы оксида углерода (II) и водорода и приравняем полученную сумму к значению 0,38 г:

$$M(\text{CO}) = 12 + 16 = 28 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CO}) = v(\text{CO}) \cdot M(\text{CO}) = x \text{ молей} \cdot 28 \text{ г/моль} = 28x \text{ г};$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2) = v(\text{H}_2) \cdot M(\text{H}_2) = y \text{ молей} \cdot 2 \text{ г/моль} = 2y \text{ г};$$

$$m(\text{CO}) + m(\text{H}_2) = 28x \text{ г} + 2y \text{ г} = 0,38 \text{ г или } 28x + 2y = 0,38.$$

Получили систему уравнений:

$$x + y = 0,0447$$

$$28x + 2y = 0,38.$$

Умножим первое уравнение на 2 и вычтем его из второго. В результате получим:

$$28x + 2y - 2x - 2y = 0,38 - 2 \cdot 0,0447;$$

$$26x = 0,2906;$$

$$x = 0,0112;$$

$$y = 0,0447 - 0,0112 = 0,0335.$$

Следовательно, состав исходной газовой смеси таков: 0,0112 моля оксида углерода (II) и 0,0335 моля водорода. Общее количество газовой смеси равно 0,0447 моля.

ПРИМЕЧАНИЕ



Вместо составления системы из двух уравнений можно было использовать лишь одну переменную и решать одно уравнение. Например, количество оксида меди, прореагировавшего с оксидом углерода (II), примем за x молей, количество оксида меди, прореагировавшего с водородом, — за $(0,0447 - x)$ молей. Данный ход решения предложен на прилагаемом к книге мультимедийном диске.

Определим процентную концентрацию газов в смеси:

$$m(\text{CO}) = 28x = 28 \cdot 0,0112 = 0,313 \text{ г};$$

$$m(\text{H}_2) = 2y = 2 \cdot 0,0335 = 0,067 \text{ г};$$

$$m(\text{смеси}) = m(\text{CO}) + m(\text{H}_2) = 0,38 \text{ г};$$

$$W(\text{CO}) = m(\text{CO}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,313 \text{ г} : 0,38 \text{ г} \cdot 100 \% = 82,4 \%;$$

$$W(\text{H}_2) = m(\text{H}_2) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,067 \text{ г} : 0,38 \text{ г} \cdot 100 \% = 17,6 \%.$$

Массовые доли оксида углерода (II) и водорода в исходной газовой смеси равны, соответственно, 82,4 % и 17,6 %.

Определим объем смеси.

Общее количество газовой смеси равно 0,0447 моля. Полагая, что условия в данной задаче нормальные, и используя закон Авогадро, рассчитаем объем смеси:

$$V = \nu \cdot V_m = 0,0447 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 1 \text{ л}.$$

Итак, объем исходной газовой смеси равен 1 л.

ПРИМЕЧАНИЕ



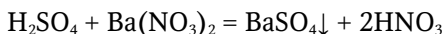
В решении данной задачи на прилагаемом диске на одной из стадий было допущено неоправданное округление до одной значащей цифры, что привело к несоответствию в конечных результатах. Ход же решения практически совпадает.

Задача 40

К 1/10 части определенного количества смеси азотной, соляной и серной кислот прибавили избыток нитрата бария. Образовалось 2,33 г осадка. Для нейтрализации оставшихся 9/10 частей потребовалось 41,01 г гидроксида бария. Образовалось 57,43 г смеси сухих солей. Определить число молей азотной кислоты в первоначальной смеси.

Решение.

Из всех кислот, находящихся в смеси, соли бария образуют нерастворимый осадок лишь при реакции с серной кислотой:



Определим количество образующегося осадка:

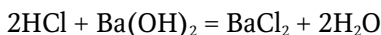
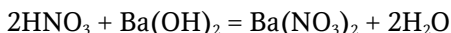
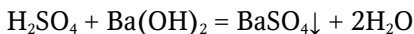
$$M(\text{BaSO}_4) = 137 + 32 + 4 \cdot 16 = 233 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{BaSO}_4) = m(\text{BaSO}_4) : M(\text{BaSO}_4) = 2,33 \text{ г} : 233 \text{ г/моль} = 0,01 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль H_2SO_4 образует 1 моль BaSO_4 . Следовательно, 0,01 моля H_2SO_4 образует 0,01 моля BaSO_4 .

Итак, в 1/10 части смеси кислот находится 0,01 моля серной кислоты H_2SO_4 . Следовательно, в оставшихся 9/10 частях смеси кислот находится $9 \cdot 0,01 = 0,09$ моля H_2SO_4 .

При нейтрализации смеси кислот гидроксидом бария протекают следующие реакции:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации серной кислоты гидроксидом бария, 1 моль H_2SO_4 нейтрализует 1 моль $\text{Ba}(\text{OH})_2$ и образуется 1 моль соли BaSO_4 . Следовательно, 0,09 моля H_2SO_4 нейтрализует 0,09 моля $\text{Ba}(\text{OH})_2$ и образуется 0,09 моля BaSO_4 .

Определим массу гидроксида бария, потребовавшуюся для нейтрализации H_2SO_4 в 9/10 частях смеси и массу образованной при этом соли BaSO_4 :

$$M(\text{Ba}(\text{OH})_2) = 137 + 2 \cdot 17 = 171 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Ba}(\text{OH})_2) = \nu(\text{Ba}(\text{OH})_2) \cdot M(\text{Ba}(\text{OH})_2) = 0,09 \text{ моля} \cdot 171 \text{ г/моль} = 15,39 \text{ г};$$

$$M(\text{BaSO}_4) = 233 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{BaSO}_4) = \nu(\text{BaSO}_4) \cdot M(\text{BaSO}_4) = 0,09 \text{ моля} \cdot 233 \text{ г/моль} = 20,97 \text{ г}.$$

Итак, для нейтрализации серной кислоты во второй части смеси потребовалось 15,39 г гидроксида бария. При этом образовалось 20,97 г соли сульфата бария. Согласно условию, для нейтрализации всех кислот потребовалось 41,01 г гидроксида бария и образовалось 57,43 г смеси сухих солей. Следовательно, для нейтрализации азотной и соляной кислот во второй части смеси потребовалось $41,01 - 15,39 = 25,62$ г гидроксида бария, при этом образовалось $57,43 - 20,97 = 36,46$ г смеси нитрата и хлорида бария.

Определим количество гидроксида бария, необходимое для для нейтрализации азотной и соляной кислот:

$$M(\text{Ba}(\text{OH})_2) = 171 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{Ba}(\text{OH})_2) = m(\text{Ba}(\text{OH})_2) : M(\text{Ba}(\text{OH})_2) =$$

$$= 25,62 \text{ г} : 171 \text{ г/моль} = 0,15 \text{ моля}.$$

Введем переменную. Пусть количество гидроксида бария, необходимое для нейтрализации азотной кислоты во второй части смеси, равно x молей. Тогда количество, необходимое для нейтрализации соляной кислоты, равно $(0,15 - x)$ молей.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации азотной кислоты гидроксидом бария, 2 моля HNO_3 нейтрализует 1 моль $\text{Ba}(\text{OH})_2$, и образуется 1 моль соли $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Составим пропорцию:

$$2 \text{ моля } \text{HNO}_3 \text{ нейтрализует } 1 \text{ моль } \text{Ba}(\text{OH})_2,$$

$$\text{и образуется } 1 \text{ моль } \text{Ba}(\text{NO}_3)_2;$$

$$y_1 \text{ молей } \text{HNO}_3 \text{ нейтрализует } x \text{ молей } \text{Ba}(\text{OH})_2,$$

$$\text{и образуется } y_2 \text{ молей } \text{Ba}(\text{NO}_3)_2;$$

$$y_1 = 2x, y_2 = x.$$

Следовательно, $2x$ молей HNO_3 нейтрализует x молей $\text{Ba}(\text{OH})_2$, и образуется x молей соли $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации соляной кислоты гидроксидом бария, 2 моля HCl нейтрализует 1 моль $\text{Ba}(\text{OH})_2$, и образуется 1 моль соли BaCl_2 . Составим пропорцию:

2 моля HCl нейтрализует 1 моль $\text{Ba}(\text{OH})_2$,

и образуется 1 моль BaCl_2 ;

y_1 молей HCl нейтрализует $(0,15 - x)$ молей $\text{Ba}(\text{OH})_2$,

и образуется y_2 молей BaCl_2 ;

$$y_1 = (0,3 - 2x),$$

$$y_2 = (0,15 - x).$$

Следовательно, $(0,3 - 2x)$ молей HCl нейтрализует $(0,15 - x)$ молей $\text{Ba}(\text{OH})_2$, и образуется $(0,15 - x)$ молей соли BaCl_2 .

Определим массы образованных при нейтрализации солей $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и BaCl_2 :

$$M(\text{Ba}(\text{NO}_3)_2) = 137 + 2 \cdot (14 + 3 \cdot 16) = 261 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Ba}(\text{NO}_3)_2) = \nu(\text{Ba}(\text{NO}_3)_2) \cdot M(\text{Ba}(\text{NO}_3)_2) =$$

$$= x \text{ молей} \cdot 261 \text{ г/моль} = 261x \text{ г};$$

$$M(\text{BaCl}_2) = 137 + 2 \cdot 35,5 = 208 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{BaCl}_2) = \nu(\text{BaCl}_2) \cdot M(\text{BaCl}_2) =$$

$$= (0,15 - x) \text{ молей} \cdot 208 \text{ г/моль} = (31,2 - 208x) \text{ г}.$$

Суммарная масса нитрата и хлорида бария равна:

$$m(\text{Ba}(\text{NO}_3)_2) + m(\text{BaCl}_2) =$$

$$= 261x + (31,2 - 208x) = (31,2 + 53x) = 36,46 \text{ г}.$$

Решаем уравнение:

$$31,2 + 53x = 36,46;$$

$$53x = 5,36;$$

$$x = 0,101.$$

Таким образом, количество гидроксида бария, затраченного на нейтрализацию азотной кислоты в 9/10 частях смеси кислот, равно 0,101 моля. Количество же самой азотной кислоты в 9/10 частях смеси равно $2x = 0,202$ моля. Составим пропорцию:

в 9 частях смеси находится 0,202 моля кислоты;

в 10 частях смеси находится z молей кислоты;

$$z = 0,202 \cdot 10 : 9 = 0,224.$$

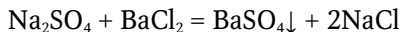
Следовательно, в первоначальной смеси находилось 0,224 моля азотной кислоты.

Задача 43

Ⓢ 40,25 г смеси хлорида натрия, нитрата натрия и сульфата натрия растворили в 187,95 г воды. К полученному раствору прибавили 31,2 г хлорида бария, в результате чего образовалось 23,3 г осадка. Осадок удалили, а для осаждения ионов хлора потребовалось 250 г 40,8%-го раствора нитрата серебра. Определить процентную концентрацию нитрат-ионов в конечном растворе после удаления хлорид-ионов.

Ⓢ Решение.

Из всех солей, находящихся в первоначально полученном растворе, только сульфат натрия образует нерастворимый осадок при реакции с хлоридом бария



Определим количество добавленного хлорида бария и образованного сульфата бария:

$$M(\text{BaCl}_2) = 208 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{BaCl}_2) = m(\text{BaCl}_2) : M(\text{BaCl}_2) = 31,2 \text{ г} : 208 \text{ г/моль} = 0,15 \text{ моля};$$

$$M(\text{BaSO}_4) = 233 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{BaSO}_4) = m(\text{BaSO}_4) : M(\text{BaSO}_4) = 23,3 \text{ г} : 233 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при реакции 1 моля BaCl_2 и 1 моля Na_2SO_4 образуется 1 моль BaSO_4 . Следовательно, для образования 0,1 моля BaSO_4 потребовалось 0,1 моль BaCl_2

и 0,1 моль Na_2SO_4 . Было добавлено больше BaCl_2 , нежели необходимо для реакции, на основании чего можно сделать вывод, что сульфат натрия Na_2SO_4 прореагировал полностью, и его количество в смеси солей было равно 0,1 моля.

После добавления к раствору BaCl_2 содержание хлорид-ионов увеличилось, благодаря диссоциации хлорида бария



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при растворении 1 моля BaCl_2 в растворе появляется 2 моля ионов Cl^- . Составим пропорцию:

1 моль BaCl_2 образует в р-ре 2 моля ионов Cl^- ;

0,15 моля BaCl_2 образует в р-ре x молей ионов Cl^- ;

$$x = 2 \cdot 0,15 = 0,3.$$

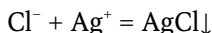
После добавления к раствору 0,15 моля BaCl_2 содержание хлорид-ионов увеличилось на 0,3 моля.

ВНИМАНИЕ



В данной достаточно простой ситуации возможны ошибки из-за непонимания процессов, происходящих в водном растворе. Может быть неясно, почему учитывается 0,15 моля BaCl_2 , а не тот избыток, который остался после реакции с сульфатом натрия (0,05 моля). Часто ошибочно учитывается количество хлорид-ионов из образованного хлорида натрия (то есть еще плюс 0,2 моля хлорид-ионов). Для понимания взаимодействия ионов в водных растворах необходимо сделать акцент на то, что в растворе не существует ни хлорида бария, ни хлорида натрия. Есть лишь хлорид-ионы, образованные при диссоциации растворенного хлорида бария. Данные ионы в реакции образования сульфата бария не участвуют. Фактическое уравнение реакции следует записывать в ионном виде: $\text{SO}_4^{2-} + \text{Ba}^{2+} = \text{BaSO}_4\downarrow$.

Запишем в ионном виде уравнение образования хлорида серебра:



Для осаждения ионов хлора потребовалось 250 г 40,8%-го раствора нитрата серебра. Данная фраза означает, что нитрата серебра было

добавлено ровно столько, сколько было необходимо для реакции с хлорид-ионами. Определим количество выпавшего осадка хлорида серебра после добавления нитрата серебра:

$$M(\text{AgNO}_3) = 108 + 14 + 3 \cdot 16 = 170 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} m(\text{AgNO}_3) &= m(\text{раствора AgNO}_3) \cdot W(\text{AgNO}_3) : 100 \% = \\ &= 250 \text{ г} \cdot 40,8 \% : 100 \% = 102 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$v(\text{AgNO}_3) = m(\text{AgNO}_3) : M(\text{AgNO}_3) = 102 \text{ г} : 170 \text{ г/моль} = 0,6 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль хлорид-ионов реагирует с 1 молем ионов серебра. Следовательно, 0,6 моля хлорид-ионов реагирует с 0,6 моля ионов серебра. Иными словами, нами установлено, что перед добавлением раствора нитрата серебра в нем находилось 0,6 моля хлорид-ионов. Ранее мы определили, что добавление хлорида бария увеличило содержание хлорид-ионов в растворе на 0,3 моля. Следовательно, до внесения хлорида бария в раствор в нем находилось $0,6 - 0,3 = 0,3$ моля хлорид-ионов. А это, в свою очередь, говорит о том, что в самом начале в составе смеси солей в воде было растворено 0,3 моля хлорида натрия NaCl (1 моль хлорида натрия при растворении дает 1 моль хлорид-ионов).

В самом начале решения задачи мы определили количество другой соли из первоначальной смеси — 0,1 моля сульфата натрия Na_2SO_4 .

Итак, исходная смесь солей массой 40,25 г содержала 0,3 моля хлорида натрия NaCl, 0,1 моля сульфата натрия Na_2SO_4 и нитрат натрия. Определим его количество:

$$M(\text{NaCl}) = 23 + 35,5 = 58,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{NaCl в смеси}) = v(\text{NaCl}) \cdot M(\text{NaCl}) = 0,3 \text{ моля} \cdot 58,5 \text{ г/моль} = 17,55 \text{ г};$$

$$M(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 2 \cdot 23 + 32 + 4 \cdot 16 = 142 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{ в смеси}) = v(\text{Na}_2\text{SO}_4) \cdot M(\text{Na}_2\text{SO}_4) =$$

$$= 0,1 \text{ моля} \cdot 142 \text{ г/моль} = 14,2 \text{ г};$$

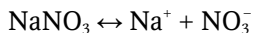
$$m(\text{NaNO}_3 \text{ в смеси}) = m(\text{смеси}) - m(\text{NaCl}) - m(\text{Na}_2\text{SO}_4) =$$

$$= 40,25 - 17,55 - 14,2 = 8,5 \text{ г};$$

$$M(\text{NaNO}_3) = 23 + 14 + 3 \cdot 16 = 85 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{NaNO}_3) = m(\text{NaNO}_3) : M(\text{NaNO}_3) = 8,5 \text{ г} : 85 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

При растворении 1 моль нитрата натрия дает 1 моль нитрат-ионов:



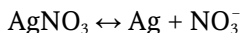
Следовательно, 0,1 моля нитрата натрия дает 0,1 моля нитрат-ионов NO_3^- .

ВНИМАНИЕ



Не следует забывать, что нитрат-ионы, попавшие в раствор после добавления раствора нитрата серебра, при расчете конечного содержания нитрат-ионов необходимо учитывать также, как и нитрат-ионы нитрата натрия.

При диссоциации 1 моль нитрата серебра дает 1 моль нитрат-ионов:



Следовательно, 0,6 моля нитрата натрия дает 0,6 моля нитрат-ионов NO_3^- .

Таким образом, суммарное количество нитрат-ионов в конечном растворе составляет $0,6 + 0,1 = 0,7$ моля.

Чтобы определить процентную концентрацию нитрат-ионов в конечном растворе, необходимо рассчитать массу конечного раствора и массу нитрат-ионов:

$$M(\text{NO}_3^-) = 14 + 3 \cdot 16 = 62 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{NO}_3^-) = v(\text{NO}_3^-) \cdot M(\text{NO}_3^-) = 0,7 \text{ моля} \cdot 62 \text{ г/моль} = 43,4 \text{ г};$$

$$m(\text{конечн. р-ра}) = m(\text{смеси солей}) + m(\text{воды}) + m(\text{BaCl}_2) - \\ - m(\text{BaSO}_4) + m(\text{р-ра AgNO}_3) - m(\text{AgCl});$$

$$m(\text{смеси солей}) = 40,25 \text{ г};$$

$$m(\text{воды}) = 187,95 \text{ г};$$

$$m(\text{BaCl}_2) = 31,2 \text{ г};$$

$$m(\text{BaSO}_4) = 23,3 \text{ г};$$

$$m(\text{р-ра AgNO}_3) = 250 \text{ г};$$

$$M(\text{AgCl}) = 108 + 35,5 = 143,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{AgCl}) = \nu(\text{AgCl}) \cdot M(\text{AgCl}) = 0,6 \text{ моля} \cdot 143,5 \text{ г/моль} = 86,1 \text{ г};$$

$$m(\text{AgCl}) = 23,3 \text{ г};$$

$$m(\text{конеч. р-ра}) = 40,25 + 187,95 + 31,2 - 23,3 + 250 - 86,1 = 400 \text{ г}.$$

Определим процентную концентрацию нитрат-ионов в конечном растворе:

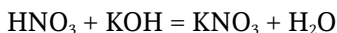
$$W(\text{NO}_3^-) = m(\text{NO}_3^-) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = 43,4 \text{ г} : 400 \text{ г} \cdot 100 \% = 10,85 \%.$$

Задача 49

☉ К 40,32 мл 37,8%-го раствора азотной кислоты плотностью 1,24 г/мл медленно прилили 33,6%-й раствор гидроксида калия до полной нейтрализации кислоты. Затем полученный раствор охладили до 0 °С. Сколько граммов соли выделится из раствора, если при 0 °С массовая доля соли в насыщенном растворе составляет 11,6 %?

☉ Решение.

Запишем уравнение протекающей реакции нейтрализации:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, для нейтрализации 1 моля азотной кислоты необходим 1 моль гидроксида калия, при нейтрализации образуется 1 моль нитрата калия.

Отсюда полезный для расчетов вывод: количество азотной кислоты равно количеству гидроксида калия.

Рассчитаем массу раствора гидроксида калия, необходимую для полной нейтрализации азотной кислоты, а также массу нитрата калия, образованного в результате данной реакции:

$$m(\text{р-ра HNO}_3) = \rho \cdot V = 1,24 \text{ г/мл} \cdot 40,32 \text{ мл} = 50 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{HNO}_3 \text{ в } 37,8\text{-м р-ре}) &= m(\text{р-ра}) \cdot W(\text{HNO}_3) : 100 \% = \\ &= 50 \cdot 37,8 \% : 100 \% = 18,9 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{HNO}_3) = 1 + 14 + 3 \cdot 16 = 63 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{HNO}_3) = m(\text{HNO}_3) : M(\text{HNO}_3) = 18,9 \text{ г} : 63 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля};$$

$$v(\text{KOH}) = v(\text{KNO}_3) = v(\text{HNO}_3) = 0,3 \text{ моля};$$

$$M(\text{KOH}) = 39 + 16 + 1 = 56 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KOH}) = v(\text{KOH}) \cdot M(\text{KOH}) = 0,3 \text{ моля} \cdot 56 \text{ г/моль} = 16,8 \text{ г};$$

$$m(\text{р-ра KOH}) = m(\text{KOH}) : W(\text{H}_2\text{SO}_4) \cdot 100 \% =$$

$$= 16,8 \text{ г} : 33,6 \% \cdot 100 \% = 50 \text{ г};$$

$$M(\text{KNO}_3) = 39 + 14 + 3 \cdot 16 = 101 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KNO}_3) = v(\text{KNO}_3) \cdot M(\text{KNO}_3) = 0,3 \text{ моля} \cdot 101 \text{ г/моль} = 30,3 \text{ г}.$$

Итак, 50 г 37,8%-го раствора азотной кислоты полностью нейтрализовали с помощью 50 г 33,6%-го раствора гидроксида калия, при этом образовался раствор общей массой $50 + 50 = 100$ г, содержащий 30,3 г нитрата калия.

После реакции нейтрализации раствор охладили до 0°C . При этом растворимость нитрата калия упала до 11,6 % (массовая доля). Поскольку массовая доля нитрата калия до охлаждения ($30,3 : 100 \cdot 100 \% = 30,3 \%$) была намного выше растворимости при 0°C , очевидно, некоторая часть соли выкристаллизовалась. Определим это количество.

Пусть масса выпавших кристаллов нитрата калия равна x г. Следовательно, масса оставшегося в растворе нитрата калия равна $(30,3 - x)$ г, а масса раствора — $(100 - x)$ г. При этом масса соли в растворе и масса раствора приняли такие значения, что массовая доля соли составила 11,6 %. Составим пропорцию:

при 0°C в 100 г р-ра растворяется 11,6 г соли;

при 0°C в $(100 - x)$ г р-ра растворяется $(30,3 - x)$ г соли.

Решаем полученное уравнение:

$$100(30,3 - x) = 11,6(100 - x);$$

$$3030 - 100x = 1160 - 11,6x;$$

$$88,4x = 1870;$$

$$x = 21,15.$$

Таким образом, после охлаждения из раствора выделится 21,15 г нитрата калия.

ПРИМЕЧАНИЕ

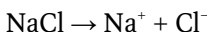
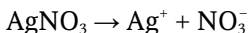


Задачи 41, 42, 44 и 47 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

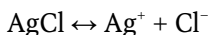
Электролитическая диссоциация

Распад вещества на сольватированные ионы под действием молекул растворителя называется *ионизацией вещества в растворах*, или *электролитической диссоциацией*.

Большинство солей при растворении в воде нацело диссоциируют на ионы (положительно заряженные катионы и отрицательно заряженные анионы). Например:



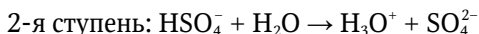
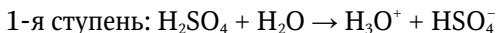
Однако не все вещества хорошо сольватируются водой. Малорастворимые и нерастворимые соли диссоциируют в том количестве, которое им позволяет произведение растворимости:



Большинство кислот также не диссоциируют нацело:



Даже такая сильная минеральная кислота, как серная диссоциирует полностью (почти) только по первой ступени:



В связи с этим существует понятие «степень диссоциации вещества».

Степень диссоциации равна выраженному в процентах отношению количества продиссоциировавшего вещества к исходному его количеству:

$$\alpha = v(\text{продисс.}) : v(\text{исх.}) \cdot 100 \%$$

Тогда количество продиссоциировавшего вещества равно:

$$v(\text{продисс.}) = \alpha \cdot v(\text{исх.}) : 100 \%$$

ВНИМАНИЕ



Распространенной ошибкой является использование равновесного количества вещества, не подвергшегося диссоциации, вместо исходного.

В результате диссоциации суммарное количество растворенных частиц в растворе увеличивается, в результате чего меняются коллегативные свойства растворов. Данный факт широко используется для расчета степени диссоциации веществ в растворах.

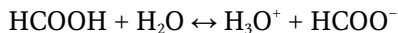
Решение задач

Задача 3

☉ Определить число частиц — ионов и молекул — в 10 мл 0,3 молярного раствора муравьиной кислоты, если степень диссоциации муравьиной кислоты в этом растворе равна 2 %.

☉ Решение.

Запишем уравнение диссоциации муравьиной кислоты:



Определим количество муравьиной кислоты (общее количество всех форм):

$$v(\text{НСООН}) = C(\text{НСООН}) \cdot V(\text{р-ра}) = 0,3 \text{ моля/л} \cdot 0,01 \text{ л} = 0,003 \text{ моля.}$$

Степень диссоциации равна выраженному в процентах отношению количества продиссоциировавшей муравьиной кислоты к исходному количеству муравьиной кислоты:

$$\alpha = v(\text{продисс. НСООН}) : v(\text{исх. НСООН}) \cdot 100 \%$$

Тогда количество продиссоциировавшей муравьиной кислоты равно:

$$\begin{aligned} v(\text{продисс. НСООН}) &= \alpha \cdot v(\text{исх. НСООН}) : 100 \% = \\ &= 2 \% \cdot 0,003 \text{ моля} : 100 \% = 0,00006 \text{ моля.} \end{aligned}$$

Итак, продиссоциировало 0,000 06 моля муравьиной кислоты. В молекулярной форме осталось $0,003 - 0,000\ 06 = 0,002\ 94$ моля.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при диссоциации 1 моля муравьиной кислоты образуется 1 моль формиат-ионов НСОО^- и 1 моль ионов $\text{Н}_3\text{О}^+$. Следовательно, при диссоциации 0,000 06 моля муравьиной кислоты образуется 0,000 06 моля формиат-ионов НСОО^- и 0,000 06 моля ионов $\text{Н}_3\text{О}^+$.

Итого, в 10 мл 0,3-молярного раствора муравьиной кислоты находится 0,002 94 моля молекул муравьиной кислоты НСООН , 0,000 06 моля формиат-ионов НСОО^- и 0,000 06 моля ионов $\text{Н}_3\text{О}^+$.

Общее количество частиц — ионов и молекул — равно:

$$\begin{aligned} v(\text{частиц}) &= v(\text{НСООН}) + v(\text{НСОО}^-) + v(\text{Н}_3\text{О}^+) = \\ &= 0,002\ 94 + 0,000\ 06 + 0,000\ 06 = 0,003\ 06 \text{ моля.} \end{aligned}$$

Общее количество частиц — ионов и молекул — равно:

$$N(\text{частиц}) = v(\text{частиц}) \cdot N_A = 0,00306 \text{ моля} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 1,842 \cdot 10^{21}.$$

Итак, число частиц — ионов и молекул — в 10 мл 0,3 молярного раствора муравьиной кислоты равно $1,842 \cdot 10^{21}$.

ПРИМЕЧАНИЕ



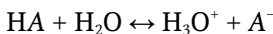
Задачи 5, 7–10, 12, 18 и 20 имеют аналогичное решение. Задачи 1 и 2 решаются с помощью простых расчетов по стандартным формулам, приведенным в разд. 1.1. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 6

- ⊙ В 1 л одноосновной кислоты обнаружено 5,7 г ионов гидроксония. На нейтрализацию 50 мл этого раствора израсходовано 8 мл 40%-го раствора NaOH плотностью 1,25 г/мл. Определить степень диссоциации кислоты в данном растворе.

- ⊙ Решение.

Запишем уравнение диссоциации неизвестной одноосновной кислоты (кислотный остаток обозначим как A):



Определим количество ионов гидроксония H_3O^+ , образованных в результате диссоциации:

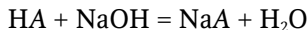
$$M(\text{H}_3\text{O}^+) = 3 \cdot 1 + 16 = 19 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{H}_3\text{O}^+) = m(\text{H}_3\text{O}^+) : M(\text{H}_3\text{O}^+) = 5,7 \text{ г} : 19 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при диссоциации 1 моля кислоты образуется 1 моль ионов гидроксония H_3O^+ и 1 моль ионов A^- . Следовательно, при диссоциации 0,3 моля кислоты образуется 0,3 моля ионов гидроксония H_3O^+ и 0,3 моля ионов A^- .

Итак, количество кислоты в растворе неизвестно, однако известно, что продиссоциировало 0,3 моля кислоты.

Запишем уравнение нейтрализации данной кислоты гидроксидом натрия:



В отличие от реакции диссоциации, реакция нейтрализации протекает количественно. Благодаря этому можно определить количество кислоты в 50 мл ее раствора.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, количество потраченного на нейтрализацию гидроксида натрия равно количеству кислоты.

Определим количество потраченного на нейтрализацию гидроксида натрия:

$$m(\text{р-ра NaOH}) = \rho \cdot V = 1,25 \text{ г/мл} \cdot 8 \text{ мл} = 10 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{NaOH в 40\%-м р-ре}) &= m(\text{р-ра}) \cdot W(\text{NaOH}) : 100 \% = \\ &= 10 \cdot 40 \% : 100 \% = 4 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{NaOH}) = 23 + 16 + 1 = 40 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) = 4 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Количество потраченного на нейтрализацию гидроксида натрия равно 0,1 моля, значит, и количество кислоты HA в 50 мл ее раствора также равно 0,1 моля.

Определим, какое количество кислоты содержится в 1 л ее раствора с помощью следующей пропорции:

в 50 мл р-ра находится 0,1 моля кислоты НА;

в 1000 мл р-ра находится x молей кислоты НА;

$$x = 1000 \cdot 0,1 : 50 = 2.$$

Итак, в 1 л раствора находится 2 моля кислоты, из которых диссоциирует 0,3 моля, как было определено выше. Рассчитаем степень диссоциации кислоты в данном растворе:

$$\alpha = v(\text{продисс. НА}) : v(\text{исх. НА}) \cdot 100 \% = 0,3 : 2 \cdot 100 \% = 15 \%$$

Таким образом, степень диссоциации неизвестной одноосновной кислоты в 2-молярном растворе равна 15 %.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 4, 13 и 16 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 11

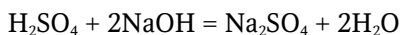
- ⊙ В 1 л раствора серной кислоты плотностью 1,02 г/мл обнаружено 4,56 г ионов гидроксония. На нейтрализацию 50 мл этого раствора израсходовано 0,8 г гидроксида натрия. Определить процентную концентрацию сульфат-ионов в данном растворе, если диссоциация кислоты по первой ступени протекает на 75 %.

- ⊙ Решение.

Данная задача является усложненным вариантом предыдущей. В этом случае кислота двухосновная, а значит, диссоциирует по двум ступеням и имеет две степени диссоциации.

Вначале определим количество серной кислоты в 50 мл ее раствора.

Запишем уравнение нейтрализации серной кислоты гидроксидом натрия:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции количество потраченного на нейтрализацию гидроксида натрия в 2 раза больше количества серной кислоты.

Определим количество потраченного на нейтрализацию гидроксида натрия:

$$m(\text{NaOH}) = 0,8 \text{ г};$$

$$M(\text{NaOH}) = 40 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) = 0,8 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,02 \text{ моля}.$$

Количество потраченного на нейтрализацию гидроксида натрия равно 0,02 моля, значит, количество серной кислоты равно $0,02 : 2 = 0,01$ моля. Данное количество кислоты содержится в 50 мл раствора.

Определим, какое количество кислоты содержится в 1 л ее раствора с помощью следующей пропорции:

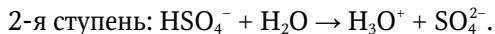
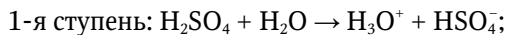
$$\text{в } 50 \text{ мл р-ра находится } 0,01 \text{ моля } \text{H}_2\text{SO}_4;$$

$$\text{в } 1000 \text{ мл р-ра находится } x \text{ молей } \text{H}_2\text{SO}_4;$$

$$x = 1000 \cdot 0,01 : 50 = 0,2.$$

Итак, в 1 л раствора находится 0,2 моля серной кислоты, которая диссоциирует по двум ступеням.

Запишем уравнения диссоциации серной кислоты по ступеням:



Известно, что диссоциация кислоты по первой ступени протекает на 75 %. Определим количество серной кислоты, диссоциирующей по первой ступени:

$$\begin{aligned} \nu(\text{продисс. } \text{H}_2\text{SO}_4) &= \alpha \cdot \nu(\text{исх. } \text{H}_2\text{SO}_4) : 100 \% = \\ &= 75 \% \cdot 0,2 \text{ моля} : 100 \% = 0,15 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции диссоциации по первой ступени, при диссоциации 1 моля серной кислоты образуется 1 моль ионов HSO_4^- и 1 моль ионов H_3O^+ . Следовательно, при

диссоциации 0,15 моля серной кислоты образуется 0,15 моля ионов HSO_4^- и 0,15 моля ионов H_3O^+ .

В растворе обнаружено 4,56 г ионов гидроксония. Определим количество ионов гидроксония:

$$M(\text{H}_3\text{O}^+) = 19 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{H}_3\text{O}^+) = m(\text{H}_3\text{O}^+) : M(\text{H}_3\text{O}^+) = 4,56 \text{ г} : 19 \text{ г/моль} = 0,24 \text{ моля}.$$

ВНИМАНИЕ



Следует обратить особое внимание на тот факт, что ионы гидроксония образуются в обеих реакциях диссоциации и их количество характеризует не каждую ступень в отдельности, а процесс диссоциации кислоты в целом.

Можно заметить, что в результате диссоциации образовано 0,24 моля ионов гидроксония, в то время как в первой ступени образуется лишь 0,15 моля. На основании этого можно заключить то, что количество ионов H_3O^+ , образованных в результате диссоциации серной кислоты по второй ступени, равно $0,24 - 0,15 = 0,09$ моля.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции диссоциации по второй ступени, при диссоциации 1 моля ионов HSO_4^- образуется 1 моль сульфат-ионов SO_4^{2-} и 1 моль ионов H_3O^+ . Следовательно, при диссоциации 0,09 моля ионов HSO_4^- образуется 0,09 моля сульфат-ионов SO_4^{2-} и 0,09 моля ионов H_3O^+ .

Итак, нам известно количество сульфат-ионов в растворе серной кислоты. Определим процентную концентрацию сульфат-ионов в данном растворе:

$$m(\text{р-ра } \text{H}_2\text{SO}_4) = \rho \cdot V = 1,02 \text{ г/мл} \cdot 1000 \text{ мл} = 1020 \text{ г};$$

$$M(\text{ионов } \text{SO}_4^{2-}) = 32 + 4 \cdot 16 = 96 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} m(\text{ионов } \text{SO}_4^{2-}) &= \nu(\text{ионов } \text{SO}_4^{2-}) \cdot M(\text{ионов } \text{SO}_4^{2-}) = \\ &= 0,09 \text{ моля} \cdot 96 \text{ г/моль} = 8,64 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W(\text{ионов } \text{SO}_4^{2-}) &= m(\text{ионов } \text{SO}_4^{2-}) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = \\ &= 8,64 : 1020 \cdot 100 \% = 0,85 \%. \end{aligned}$$

Таким образом, процентная концентрация сульфат-ионов SO_4^{2-} в растворе серной кислоты равна 0,85 %.

ПРИМЕЧАНИЕ



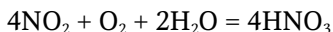
Задачи 14, 15 и 17 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 19

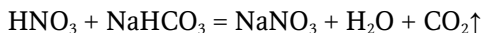
☞ Сколько граммов оксида азота (IV) в присутствии необходимого количества кислорода надо растворить в 100 г 8,4%-го раствора гидрокарбоната натрия, чтобы концентрация нитрат-ионов в растворе составила 10 %? Азотная кислота в растворе диссоциирована на 60 %. В растворе обнаружено 2,3 г ионов натрия. Выделившийся газ связывается с гидроксидом кальция с образованием 10 г осадка.

🗨 Решение.

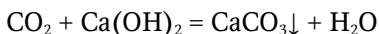
Запишем химические уравнения описываемых процессов. При растворении в воде в присутствии кислорода оксид азота (IV) образует азотную кислоту:



Образованная кислота реагирует с присутствующим в растворе гидрокарбонатом натрия:



В первую очередь определим, полностью ли прореагировал гидрокарбонат натрия (то есть находился ли он в недостатке). Определим количество гидрокарбоната натрия в исходном растворе и количество углекислого газа CO_2 , выделившегося при реакции и связанного гидроксидом кальция. Для этого вначале запишем уравнение реакции углекислого газа и гидроксида кальция:



Количество гидрокарбоната натрия в исходном растворе равно:

$$m(\text{р-ра NaHCO}_3) = 100 \text{ г};$$

$$m(\text{NaHCO}_3 \text{ в } 8,4\% \text{-м р-ре}) = m(\text{р-ра}) \cdot W(\text{NaHCO}_3) : 100 \% = \\ = 100 \cdot 8,4 \% : 100 \% = 8,4 \text{ г};$$

$$M(\text{NaHCO}_3) = 23 + 1 + 12 + 3 \cdot 16 = 84 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{NaHCO}_3) = m(\text{NaHCO}_3) : M(\text{NaHCO}_3) = 8,4 \text{ г} : 84 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля.}$$

Количество карбоната кальция, выпавшего в осадок, равно:

$$m(\text{CaCO}_3) = 10 \text{ г};$$

$$M(\text{CaCO}_3) = 40 + 12 + 3 \cdot 16 = 100 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{CaCO}_3) = m(\text{CaCO}_3) : M(\text{CaCO}_3) = 10 \text{ г} : 100 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, при реакции 1 моля HNO_3 с 1 молем NaHCO_3 образуется 1 моль NaNO_3 , а при поглощении 1 моля CO_2 гидроксидом бария выпадает 1 моль осадка CaCO_3 . Следовательно, можно выстроить следующий логический ряд: 0,1 моля CaCO_3 образовано из 0,1 моля CO_2 ; 0,1 моля CO_2 образовано из 0,1 моля NaHCO_3 , а гидрокарбоната натрия в исходном растворе ровно, сколько и было, что говорит о том, что он полностью израсходовался.

Положим, что количество поглощенного оксида азота NO_2 равно x молей.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции образования азотной кислоты, 4 моля NO_2 и 1 моль O_2 образуют 4 моля HNO_3 .

Составим пропорцию:

$$4 \text{ моля } \text{NO}_2 \text{ и } 1 \text{ моль } \text{O}_2 \text{ образуют } 4 \text{ моля } \text{HNO}_3;$$

$$x \text{ молей } \text{NO}_2 \text{ и } y_1 \text{ молей } \text{O}_2 \text{ образуют } y_2 \text{ молей } \text{HNO}_3;$$

$$y_1 = 0,25; y_2 = 1.$$

Итак, раствор поглотил x молей NO_2 и $0,25x$ молей O_2 , при этом было образовано x молей HNO_3 .

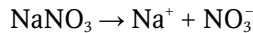
На следующем этапе азотная кислота прореагировала с гидрокарбонатом натрия, при этом весь гидрокарбонат в количестве 0,1 моля был израсходован. 0,1 моля HNO_3 прореагировало, с 0,1 моля NaHCO_3 , образовалось 0,1 моля NaNO_3 , и выделилось из раствора 0,1 моля CO_2 .

В растворе обнаружено 2,3 г ионов натрия. Определим их количество:

$$M(\text{Na}^+) = 23 \text{ г/моль};$$

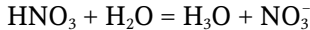
$$v(\text{Na}^+) = m(\text{Na}^+) : M(\text{Na}^+) = 2,3 \text{ г} : 23 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля.}$$

Количество ионов натрия равно количеству образованного нитрата натрия. Данный факт говорит о полной диссоциации нитрата натрия:



Кроме этого, становится известно, что только из 0,1 моля нитрата натрия в растворе образуется 0,1 моля нитрат-ионов NO_3^- .

Поскольку азотная кислота была по крайней мере не в недостатке, после реакции с гидрокарбонатом натрия ее количество составило $(x - 0,1)$ молей. Оставшаяся часть азотной кислоты в растворе является частично диссоциированной:



Известно, что азотная кислота в полученном растворе диссоциирована на 60 %. Определим количество нитрат-ионов, обусловленных диссоциацией кислоты в растворе:

$$\begin{aligned} v(\text{продисс. HNO}_3) &= \alpha \cdot v(\text{исх. HNO}_3) : 100 \% = \\ &= 60 \% \cdot (x - 0,1) \text{ молей} : 100 \% = (0,6x - 0,06) \text{ молей.} \end{aligned}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции диссоциации азотной кислоты, количество нитрат-ионов равно количеству протиссоциировавших молекул кислоты, то есть $(0,6x - 0,06)$ молей.

Суммарное количество нитрат-ионов (из NaNO_3 и HNO_3) равно:

$$0,1 + (0,6x - 0,06) = (0,6x + 0,04) \text{ молей.}$$

Концентрация нитрат-ионов в растворе составила 10 %. Чтобы воспользоваться данным условием, определим массу раствора и массу нитрат-ионов:

$$M(\text{ионов NO}_3^-) = 14 + 3 \cdot 16 = 62 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned}
m(\text{ионов NO}_3^-) &= \nu(\text{ионов NO}_3^-) \cdot M(\text{ионов NO}_3^-) = \\
&= (0,6x + 0,04) \text{ молей} \cdot 62 \text{ г/моль} = (37,2x + 2,48) \text{ г}; \\
m(\text{р-ра}) &= m(\text{исх. р-ра}) + m(\text{NO}_2) + m(\text{O}_2) - m(\text{CO}_2); \\
m(\text{исх. р-ра}) &= 100 \text{ г}; \\
m(\text{NO}_2) &= \nu(\text{NO}_2) \cdot M(\text{NO}_2) = x \text{ молей} \cdot 46 \text{ г/моль} = 46x \text{ г}; \\
m(\text{O}_2) &= \nu(\text{O}_2) \cdot M(\text{O}_2) = 0,25x \text{ молей} \cdot 32 \text{ г/моль} = 8x \text{ г}; \\
m(\text{CO}_2) &= \nu(\text{CO}_2) \cdot M(\text{CO}_2) = 0,1 \text{ моля} \cdot 44 \text{ г/моль} = 4,4 \text{ г}; \\
m(\text{р-ра}) &= 100 + 46x + 8x - 4,4 = (95,6 + 54x) \text{ г}.
\end{aligned}$$

Подставим в формулу для массовой концентрации выраженные через переменную значения массы ионов NO_3^- и раствора в целом и приравняем значение к 10 %:

$$\begin{aligned}
W(\text{ионов NO}_3^-) &= m(\text{ионов NO}_3^-) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = 10 \%; \\
(37,2x + 2,48) : (95,6 + 54x) \cdot 100 \% &= 10 \%; \\
10(37,2x + 2,48) &= (95,6 + 54x); \\
372x + 24,8 &= 95,6 + 54x; \\
318x &= 70,8; \\
x &= 0,223.
\end{aligned}$$

Итак, чтобы создать 10%-ю концентрацию нитрат-ионов в данном растворе, необходимо в присутствии кислорода растворить 0,223 моля оксида азота (IV) NO_2 . Определим его массу:

$$m(\text{NO}_2) = 46x = 10,2 \text{ г}.$$

Необходимо растворить 10,2 г NO_2 .

1.5. ГИДРОЛИЗ

Гидролизом называется взаимодействие вещества с водой, при котором составные части вещества соединяются с составными частями воды, с образованием малодиссоциированного соединения и с изменением реакции среды (рН).

Гидролизу подвержены соединения различных классов. Важнейшим является гидролиз солей. Гидролизу подвергаются соли, образованные:

- слабым гидроксидом и сильной кислотой;
- слабой кислотой и сильным гидроксидом;
- слабым гидроксидом и слабой кислотой.

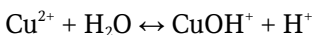
Рассмотрим примеры гидролиза солей.

Сульфат меди CuSO_4 .

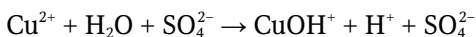
Соль образована слабым гидроксидом и сильной кислотой:



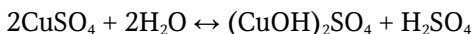
Краткое ионно-молекулярное уравнение гидролиза:



Полное ионно-молекулярное уравнение гидролиза:



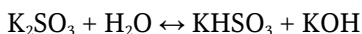
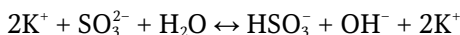
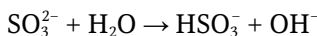
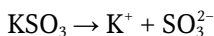
Молекулярное уравнение гидролиза:



Гидролиз по катиону приводит к связыванию гидроксид-ионов воды и накоплению ионов водорода, образуя кислую среду ($\text{pH} < 7$).

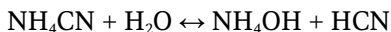
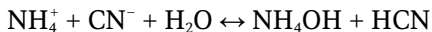
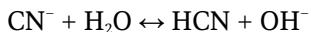
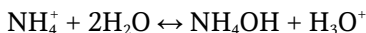
Сульфит калия K_2SO_3 .

Соль образована слабой кислотой и сильным гидроксидом:



Гидролиз по аниону приводит к связыванию ионов водорода воды и накоплению гидроксид-ионов, создавая щелочную среду: ($\text{pH} > 7$).

Особенно глубоко протекает гидролиз соли, образованной слабым гидроксидом и слабой кислотой.

Цианид аммония NH_4CN .

Так, при гидролизе катиона образуются ионы гидроксония H_3O^+ , а при гидролизе аниона — гидроксид-ионы OH^- . Эти ионы не могут сосуществовать в значительных концентрациях, они соединяются, образуя молекулы воды, что приводит к смещению обоих равновесий вправо.

Гидролиз катиона и аниона в этом случае усиливают друг друга. Реакция растворов солей, образованных слабым гидроксидом и слабой кислотой, зависит от соотношения констант протолиза гидроксида и кислоты, образующих соль.

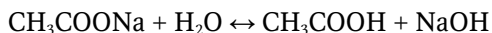
Если константа основности гидроксида аммония (K_b) больше константы кислотности синильной кислоты (K_a), то раствор будет иметь слабощелочную реакцию ($\text{pH} > 7$), при обратном соотношении констант протолиза — слабокислую ($\text{pH} < 7$). В любом случае, значение pH не настолько отклонится от значения 7, как в первых двух случаях.

Решение задач**Задача 1**

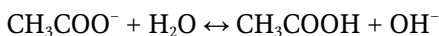
☉ Сколько молей ацетат-ионов останется в 80 мл 16,4%-го раствора ацетата натрия плотностью 1,25 г/мл, если за счет гидролиза этой соли в 1 л раствора образуется 0,5 моля гидроксид-ионов?

☉ Решение.

Запишем уравнение гидролиза ацетата натрия:



или в ионной форме:



Данный случай относится к гидролизу соли по слабой кислоте, в результате гидролиза образуется кислота с относительно низкой константой диссоциации.

За счет гидролиза ацетата натрия в 1 л раствора образуется 0,5 моля гидроксид-ионов. С помощью пропорции определим, сколько гидроксид-ионов образуется в 80 мл раствора:

в 1 л р-ра образуется 0,5 моля OH^- ;

в 0,08 л р-ра образуется x молей OH^- ;

$$x = 0,5 \cdot 0,08 = 0,04.$$

В 80 мл 16,4%-го раствора ацетата натрия за счет гидролиза образуется 0,04 моля гидроксид-ионов OH^- . Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции гидролиза, количество подвергшихся гидролизу ацетат-ионов равно количеству образованных гидроксид-ионов.

Следовательно, 0,04 моля гидроксид-ионов образовались при гидролизе 0,04 моля ацетат-ионов.

Определим исходное количество (до гидролиза) ацетат-ионов:

$$m(\text{р-ра } \text{CH}_3\text{COONa}) = \rho \cdot V = 1,25 \text{ г/мл} \cdot 80 \text{ мл} = 100 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{CH}_3\text{COONa в } 16,4 \% \text{ р-ре}) &= m(\text{р-ра}) \cdot W(\text{CH}_3\text{COONa}) : 100 \% = \\ &= 100 \cdot 16,4 \% : 100 \% = 16,4 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{CH}_3\text{COONa}) = 23 + 2 \cdot 12 + 2 \cdot 16 + 3 \cdot 1 = 82 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} \nu(\text{CH}_3\text{COONa}) &= m(\text{CH}_3\text{COONa}) : M(\text{CH}_3\text{COONa}) = \\ &= 16,4 \text{ г} : 82 \text{ г/моль} = 0,2 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Таким образом, из находящихся в 80 мл 0,2 моля ацетат-ионов гидролизу подверглось 0,04 моля. Осталось же $0,2 - 0,04 = 0,16$ моля ацетат-ионов.

ПРИМЕЧАНИЕ



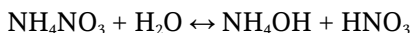
Задачи 3, 5 и 7 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 2

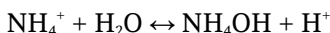
☉ При растворении нитрата аммония в воде 20 % его подверглось гидролизу. Сколько граммов нитрата аммония было в 200 мл раствора, если 1 л такого раствора содержит 0,1 г ионов водорода?

☉ Решение.

Запишем уравнение гидролиза нитрата аммония:



или в ионной форме:



Данный случай относится к гидролизу соли по слабому основанию, в результате гидролиза образуется основание с относительно низкой константой диссоциации.

За счет гидролиза нитрата аммония в 1 л раствора образуется 0,1 г ионов водорода. С помощью пропорции определим, сколько ионов водорода образуется в 200 мл раствора:

в 1 л р-ра образуется 0,1 г H^+ ;

в 0,2 л р-ра образуется x молей H^+ ;

$$x = 0,1 \cdot 0,2 = 0,02.$$

В 200 мл раствора нитрата аммония за счет гидролиза образуется 0,02 г ионов водорода H^+ . Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции гидролиза, количество подвергшихся гидролизу ионов аммония NH_4^+ равно количеству образованных ионов водорода. Определим это количество:

$$M(\text{H}^+) = 1 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{H}^+) = m(\text{H}^+) : M(\text{H}^+) = 0,02 \text{ г} : 1 \text{ г/моль} = 0,02 \text{ моля}.$$

Следовательно, 0,02 моля ионов водорода образовались при гидролизе 0,02 моля ионов аммония.

Гидролизу подверглось 20 % нитрата аммония или 0,02 моля.

Определим исходное количество ионов аммония:

$$20 \% - 0,02 \text{ моля};$$

$$100 \% - y \text{ молей};$$

$$y = 0,1.$$

В 200 мл раствора находилось 0,1 моля ионов аммония, то есть 0,1 моля нитрата аммония. Определим его массу:

$$M(\text{NH}_4\text{NO}_3) = 18 + 62 = 80 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{NH}_4\text{NO}_3) = \nu(\text{NH}_4\text{NO}_3) \cdot M(\text{NH}_4\text{NO}_3) = 0,1 \text{ моля} \cdot 80 \text{ г/моль} = 8 \text{ г}.$$

Таким образом, в 200 мл раствора находилось 8 г нитрата аммония.

ПРИМЕЧАНИЕ



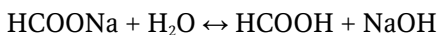
Задачи 6 и 9 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 8

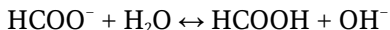
- ☉ Сколько молей формиат-ионов имеется в 160 мл 27,2%-го раствора натриевой соли муравьиной кислоты плотностью 1,25 г/мл, если гидролизу подверглось 20 % этой соли? Диссоциацией муравьиной кислоты пренебречь.

- 🕒 Решение.

Запишем уравнение гидролиза формиата натрия:



или в ионной форме:



Данный случай относится к гидролизу соли по слабой кислоте. Определим исходное количество формиата натрия в растворе:

$$m(\text{р-ра HCOONa}) = \rho \cdot V = 1,25 \text{ г/мл} \cdot 160 \text{ мл} = 200 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{HCOONa в 27,2\%-м р-ре}) &= m(\text{р-ра}) \cdot W(\text{HCOONa}) : 100 \% = \\ &= 200 \cdot 27,2 \% : 100 \% = 54,4 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{HCOONa}) = 23 + 12 + 2 \cdot 16 + 1 = 68 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{HCOONa}) = m(\text{HCOONa}) : M(\text{CH}_3\text{COONa}) =$$

$$= 54,4 \text{ г} : 68 \text{ г/моль} = 0,8 \text{ моля}.$$

В растворе находилось 0,8 моля формиата натрия, гидролизу подверглось 20% этой соли, 80 % или $0,8 \cdot 0,8 = 0,64$ моля осталось в виде формиата.

Таким образом, в 160 мл 27,2%-го раствора натриевой соли муравьиной кислоты имеется 0,64 моля формиат-ионов.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 4 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом диске.

1.6. ЭЛЕКТРОЛИЗ

При составлении схем электролиза растворов необходимо учитывать, что протекание электрохимических процессов у электродов будет зависеть прежде всего от относительных значений электродных потенциалов соответствующих электрохимических систем. Из нескольких возможных процессов будет протекать тот, осуществление которого сопряжено с минимальной затратой энергии. Это означает, что на катоде будут восстанавливаться окисленные формы электрохимических систем, имеющих наибольший электродный потенциал, а на аноде будут окисляться восстановленные формы систем с наименьшим электродным потенциалом.

С учетом сказанного ряд напряжений можно разделить на три группы, которые представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Катодные процессы (инертные электроды)

	Электродный потенциал процесса восстановления		
	$\varphi^\circ \text{Me}^{n+} / \text{Me} < -1,4 \text{ В}$	$\varphi^\circ \text{Me}^{n+} / \text{Me} = -1,4 \dots 0 \text{ В}$	$\varphi^\circ \text{Me}^{n+} / \text{Me} > 0 \text{ В}$
Группы металлов	I	II	III
	Li, Rb, K, Cs, Ba, Sr, Ca, Na, Mg, Sc, Be, Al, Ti	Mn, Nb, Zn, Cr, Ga, Fe, Cd, Co, Ni, Mo, Sn, Pb, H	Bi, Re, Cu, Ag, Os, Hg, Pd, Pt, Au

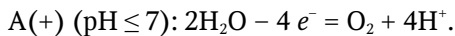
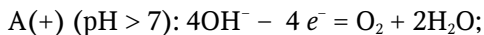
	Электродный потенциал процесса восстановления		
	$\varphi^0 \text{Me}^{n+} / \text{Me} < -1,4 \text{ В}$	$\varphi^0 \text{Me}^{n+} / \text{Me} = -1,4 \dots 0 \text{ В}$	$\varphi^0 \text{Me}^{n+} / \text{Me} > 0 \text{ В}$
Катодный процесс	$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- = \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$\text{Me}^{n+} + ne^- = \text{Me}$ $2\text{H}_2\text{O} + 2e^- = \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$\text{Me}^{n+} + ne^- = \text{Me}$
Описание процесса	Ионы металла не восстанавливаются. Восстанавливаются молекулы воды	Одновременно восстанавливаются ионы металла и молекулы воды	Восстанавливаются ионы металла

С учетом стандартных электродных потенциалов анионов и перенапряжения анодные процессы протекают в следующей последовательности (инертный анод — графит, платина).

- В первую очередь окисляются анионы бескислородных кислот, имеющие $\varphi^0 \text{A} / \text{A}^{n-} < 1,5 \text{ В}$: Cl^- ($\varphi^0 = 1,358 \text{ В}$); Br^- ($\varphi^0 = 1,065 \text{ В}$); I^- ($\varphi^0 = 0,536 \text{ В}$); S^{2-} ($\varphi^0 = -0,48 \text{ В}$) и др. (кроме F^- , так как его $\varphi^0 = 2,866 \text{ В}$).

Анодный процесс в общем виде: $\text{A}^{n-} - ne^- = \text{A}$.

- Во вторую очередь, в зависимости от реакции среды, окисляются гидроксо-ионы ($\varphi^0 = 0,401 \text{ В}$) или молекулы воды ($\varphi^0 = 1,229 \text{ В}$):



Анионы кислородсодержащих кислот: SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} и др., имеющие $\varphi^0 \text{A} / \text{A}^{n-} > 1,5 \text{ В}$, в водных растворах не окисляются.

Анодный процесс окисления металла с растворимым (металлическим) анодом будет происходить, если $\varphi^0 \text{Me}^{n+} / \text{Me} > -1,4 \text{ В}$.

Катодный процесс восстановления только ионов металла с растворимым анодом происходит, если стандартный потенциал металла больше потенциала водорода в нейтральной среде ($\varphi^0 = -0,41 \text{ В}$).

Если стандартный потенциал металла меньше $\varphi^0 = -0,41 \text{ В}$, то на катоде одновременно восстанавливаются ионы металла и молекулы воды.

Количество полученных в результате электролиза веществ пропорционально количеству электричества (ампер-часов), прошедшему между электродами.

Формула для определения массы выделяющегося при электролизе вещества:

$$m(X) = \frac{M_э(X) \cdot J \cdot t}{F} \quad \text{или} \quad n(X) = \frac{M_э(X) \cdot J \cdot t}{n \cdot F},$$

где $M_э$ — молярная масса эквивалента вещества;

M — молярная масса вещества;

n — количество переданных (полученных) веществом электронов в процессе электролиза;

J — сила тока, А;

t — время электролиза, с;

F — постоянная Фарадея ($96500 \text{ А} \cdot \text{с/моль}$). При $F = 26,8 \text{ А} \cdot \text{ч/моль}$ время выражается в часах.

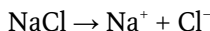
Решение задач

Задача 2

⊕ 46,8 г хлорида натрия растворили в 400 г воды и раствор подвергли электролизу. Выделилось 2,24 л хлора. Определить процентную концентрацию хлорида натрия в растворе, полученном после электролиза.

Ⓜ Решение.

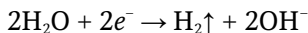
В водном растворе хлорид натрия диссоциирует на хлорид-ионы и ионы натрия:



Составим схему электролиза.

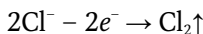
Катод К(-).

Натрий относится к первой группе металлов ($\varphi^0\text{Na}^+ / \text{Na} < -1,4 \text{ В}$), поэтому его ионы при электролизе водного раствора не восстанавливаются. Вместо ионов натрия восстанавливаются молекулы воды:

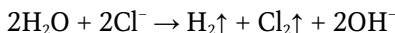


Анод А(+).

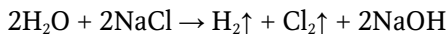
Соляная кислота является бескислородной, ($\varphi^0\text{Cl}_2 / 2\text{Cl}^- < 1,5 \text{ В}$), поэтому на аноде окисляются хлорид-ионы:



Таким образом, при электролизе водного раствора хлорида натрия на катоде выделяется водород, а на аноде — хлор:



Полное уравнение электролиза можно записать следующим образом:



Определим количество выделившегося хлора:

$$v(\text{Cl}_2) = V : V_M = 2,24 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,1 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 2 молей хлорида натрия образуется 1 моль водорода и 1 моль хлора. Составим пропорцию:

$$\begin{aligned} &\text{из 2 молей NaCl образуется 1 моль H}_2 \text{ и 1 моль Cl}_2; \\ &\text{из } x \text{ молей NaCl образуется } y \text{ молей H}_2 \text{ и 0,1 моля Cl}_2; \\ &x = 0,1 \cdot 2 = 0,2; y = 0,1. \end{aligned}$$

Итак, 0,1 моля водорода и 0,1 моля хлора образовались из 0,2 моля хлорида натрия.

Определим массы израсходованного хлорида натрия и выделившихся газов:

$$\begin{aligned} M(\text{NaCl}) &= 23 + 35,5 = 58,5 \text{ г/моль}; \\ m(\text{NaCl}) &= v \cdot M_r = 0,2 \cdot 58,5 = 11,7 \text{ г}; \\ M(\text{H}_2) &= 2 \cdot 1 = 2 \text{ г/моль}; \\ m(\text{H}_2) &= v \cdot M_r = 0,1 \cdot 2 = 0,2 \text{ г}; \\ M(\text{Cl}_2) &= 2 \cdot 35,5 = 71 \text{ г/моль}; \\ m(\text{Cl}_2) &= v \cdot M_r = 0,1 \cdot 71 = 7,1 \text{ г}. \end{aligned}$$

Определим массы хлорида натрия и раствора после электролиза. Исходная масса хлорида натрия равна 46,8 г, израсходовано при электролизе — 11,7 г, осталось:

$$m(\text{NaCl}) = 46,8 - 11,7 = 35,1 \text{ г.}$$

46,8 г хлорида натрия растворили в 400 г воды, в результате электролиза из раствора выделилось 0,2 г водорода и 7,1 г хлора.

Масса раствора составила:

$$m(\text{р-ра}) = 46,8 + 400 - 0,2 - 7,1 = 439,5 \text{ г.}$$

Определим процентную концентрацию хлорида натрия в растворе, полученном после электролиза:

$$\begin{aligned} W(\text{NaCl}) &= m(\text{NaCl}) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = \\ &= 35,1 : 439,5 \cdot 100 \% = 8 \%. \end{aligned}$$

Таким образом, после электролиза процентная концентрация хлорида натрия в растворе составила 8 %.

ПРИМЕЧАНИЕ



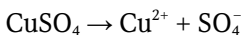
Задачи 7, 10, 16 и 18 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 5

☉ Для полной нейтрализации кислоты, полученной при электролизе раствора сульфата меди с инертными электродами, израсходовали 2 мл 40%-го раствора гидроксида натрия плотностью 1,25 г/мл. Сколько граммов вещества выделилось на катоде?

🕒 Решение.

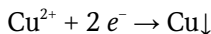
В водном растворе сульфат меди диссоциирует на сульфат-ионы и ионы меди:



Составим схему электролиза.

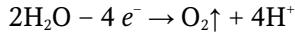
Катод К(-).

Медь относится к третьей группе металлов ($\varphi^0\text{Me}^{n+} / \text{Me} > 0 \text{ В}$), поэтому восстанавливаются только ее ионы при электролизе водного раствора:

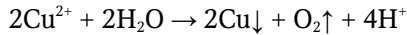


Анод А(+).

Серная кислота является кислородсодержащей, поэтому на аноде вместо сульфат-ионов окисляются молекулы воды:

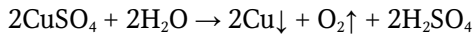


Таким образом, при электролизе водного раствора сульфата меди на катоде осаждается медь, на аноде выделяется кислород:

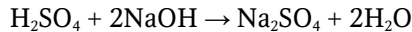


Реакция восстановления меди была умножена на 2 для уравнения числа электронов, участвующих в процессе.

Полное уравнение электролиза можно записать следующим образом:



Образованная при электролизе серная кислота в дальнейшем была нейтрализована гидроксидом натрия:



Определим количество израсходованного на нейтрализацию гидроксида натрия:

$$m(\text{p-ра NaOH}) = \rho \cdot V = 1,25 \text{ г/мл} \cdot 2 \text{ мл} = 2,5 \text{ г};$$

$$m(\text{NaOH в 40\%-м p-ре}) = m(\text{p-ра}) \cdot W(\text{NaOH}) : 100 \% = \\ = 2,5 \cdot 40 \% : 100 \% = 1 \text{ г};$$

$$M(\text{NaOH}) = 23 + 1 + 16 = 40 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) : M_r(\text{NaOH}) = 1 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,025 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации, на нейтрализацию 1 моля серной кислоты требуется 2 моля гидроксида натрия. Составим пропорцию:

$$2 \text{ моля NaOH нейтрализуют } 1 \text{ моль H}_2\text{SO}_4;$$

$$0,025 \text{ моля NaOH нейтрализует } x \text{ молей H}_2\text{SO}_4;$$

$$x = 0,025 : 2 = 0,0125.$$

Итак, количество серной кислоты, образованной при электролизе водного раствора сульфата меди, равно 0,0125 моля.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции электролиза раствора сульфата меди, количество осажденной на катоде меди равно количеству образованной серной кислоты или 0,0125 моля. На аноде осаждалась только медь.

Определим массу выделившейся на катоде меди:

$$A_r(\text{Cu}) = 64; m(\text{Cu}) = \nu(\text{Cu}) \cdot M(\text{Cu}) = 0,0125 \text{ моля} \cdot 64 \text{ г/моль} = 0,8 \text{ г};$$

Таким образом, на катоде выделилось 0,8 г меди.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 3, 4, 6, 8, 17 и 19 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 9

⊕ 19,34 г смеси хлоридов калия и бария растворили в воде и раствор подвергли электролизу с инертными электродами. Электролиз прекратили, когда на электродах выделилось 29,63 г газовой смеси, причем количество выделившегося на катоде газа составило 1,31 моля. Определить количество вещества хлорида бария в исходной смеси.

⊕ Решение.

Данная задача сходна схемами электролиза солей с задачей 1 данного раздела.

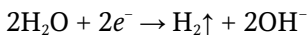
В водном растворе хлориды калия и бария диссоциируют на хлорид-ионы и ионы калия и бария:



Составим схемы электролиза.

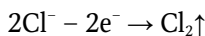
Катод К(-).

Калий и барий относится к первой группе металлов ($\varphi^0 < -1,4 \text{ В}$), поэтому их ионы при электролизе водного раствора не восстанавливаются. Восстанавливаются молекулы воды:

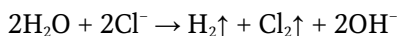


Анод А(+).

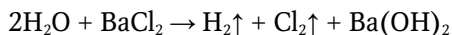
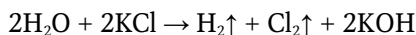
Соляная кислота является бескислородной, ($\varphi^0\text{Cl}_2 / 2\text{Cl}^- < 1,5 \text{ В}$), поэтому на аноде окисляются хлорид-ионы:



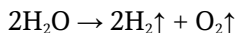
Таким образом, при электролизе водного раствора хлоридов калия и бария на катоде выделяется водород, на аноде выделяется хлор:



Полные уравнения электролиза можно записать следующим образом:



Кроме этого, в случае если электролиз продолжился после того, как израсходовались обе соли, протекает электролиз воды:



На катоде выделяется водород, образующийся во всех трех реакциях.

Покажем, что электролиз воды с выделением кислорода действительно протекал. Используем метод от противного. Предположим, что электролизу подвергались лишь соли KCl и BaCl_2

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций электролиза хлоридов калия и бария, образуется одинаковое количество водорода и хлора. Количество выделившегося на катоде газа составило 1,31 моля. Это водород, так как только данный газ выделяется на катоде. Следовательно, количество хлора также равно 1,31 моля.

Определим массы водорода и хлора:

$$M(\text{H}_2) = 2 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2) = \nu \cdot M = 1,31 \cdot 2 = 2,62 \text{ г};$$

$$M(\text{Cl}_2) = 71 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Cl}_2) = \nu \cdot M = 1,31 \cdot 71 = 93,01 \text{ г}.$$

Общая масса выделившихся газов равна $2,62 + 93,01 = 95,63$ г, что противоречит условию, по которому на электродах выделилось $29,63$ г газовой смеси. Следовательно, наше предположение неверно, и электролиз воды с выделением кислорода действительно протекал.

Итак, общее количество выделившегося на катоде водорода равно $1,31$ моля.

Положим, количество водорода, выделившегося при электролизе солей, равно x молей (соответственно, и количество выделившегося на аноде хлора также равно x молей). Тогда количество водорода, выделившегося при электролизе воды, равно $(1,31 - x)$ молей.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций электролиза воды, водород и кислород образуются в мольном отношении $2 : 1$. Составим пропорцию:

образуется 2 моля H_2 и 1 моль O_2 ;

образуется $(1,31 - x)$ молей H_2 и y молей O_2 ;

$$y = (1,31 - x) : 2 = 0,655 - 0,5x.$$

При электролизе воды образовалось $(1,31 - x)$ молей H_2 и $(0,655 - 0,5x)$ молей O_2 . С учетом всех реакций электролиза количества выделившихся газов равны:

$$v(H_2) = 1,31 \text{ моля};$$

$$v(Cl_2) = x \text{ молей};$$

$$v(O_2) = (0,655 - 0,5x) \text{ молей}.$$

Определим массу выделившейся на электродах газовой смеси, выраженную через переменную, и приравняем ее к $29,63$ г:

$$m(H_2) = v(H_2) \cdot M(H_2) = 1,31 \cdot 2 = 2,62 \text{ г};$$

$$m(Cl_2) = v(Cl_2) \cdot M(Cl_2) = x \cdot 71 = 71x \text{ г};$$

$$m(O_2) = v(O_2) \cdot M(O_2) = (0,655 - 0,5x) \cdot 32 = (20,96 - 16x) \text{ г};$$

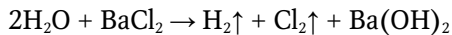
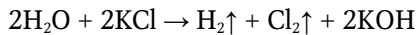
$$\begin{aligned} m(\text{газовой смеси}) &= m(H_2) + m(Cl_2) + m(O_2) = \\ &= 2,62 + 71x + 20,96 - 16x = 29,63 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$55x + 23,58 = 29,63;$$

$$55x = 6,05;$$

$$x = 0,11.$$

Итак, количество водорода, выделившегося при электролизе хлоридов калия и бария, равно 0,11 моля, количество выделившегося на аноде хлора также равно 0,11 моля.



Положим, исходное количество KCl равно a молей, а количество BaCl₂ равно b молей.

Согласно стехиометрическим коэффициентам при электролизе 2 молей KCl выделяется 1 моль H₂ и 1 моль Cl₂, при электролизе 1 моля BaCl₂ выделяется 1 моль H₂ и 1 моль Cl₂. Следовательно, при электролизе a молей KCl выделяется $0,5a$ молей H₂ и $0,5a$ молей Cl₂, при электролизе b молей BaCl₂ выделяется b молей H₂ и b молей Cl₂.

Общее количество водорода или хлора равно:

$$0,5a + b = 0,11.$$

Массы хлоридов калия и бария, выраженные через переменные, равны:

$$M(\text{KCl}) = 39 + 35,5 = 74,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KCl}) = \nu \cdot M = a \cdot 74,5 = 74,5a \text{ г};$$

$$M(\text{BaCl}_2) = 137 + 2 \cdot 35,5 = 208 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{BaCl}_2) = \nu \cdot M = b \cdot 208 = 208b \text{ г}.$$

Приравняем сумму масс солей к 19,34 г:

$$m(\text{KCl}) + m(\text{BaCl}_2) = 74,5a + 208b = 74,5a + 208b = 19,34.$$

Получили систему из двух уравнений:

$$0,5a + b = 0,11;$$

$$74,5a + 208b = 19,34.$$

Умножим первое уравнение на 208 и отнимем от него второе:

$$104a + 208b - 74,5a - 208b = 22,88 - 19,34;$$

$$29,5a = 3,54;$$

$$a = 0,12;$$

$$b = 0,11 - 0,5a = 0,11 - 0,06 = 0,05.$$

Таким образом, количество вещества хлорида бария в исходной смеси равно 0,05 моля.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 12–14 и 22 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

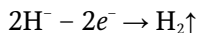
Задача 11

⦿ При электролизе расплава какого-то вещества масса вещества, выделенного на катоде, в 23 раза больше массы водорода, выделенного на аноде. Рассчитать объем газа в литрах, выделенного при растворении 12 г исходного вещества в воде, если при этом образуется однокислотное основание.

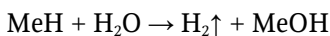
⦿ Решение.

При электролизе неизвестного соединения водород образуется на аноде, то есть водород при этом окисляется, а это означает, что в соединении он имеет отрицательную степень окисления, а именно –1. Запишем уравнение реакции, протекающей на аноде.

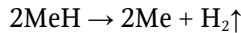
Анод $A(+)$.



Следовательно, неизвестное соединение — гидрид металла. Данное предположение подтверждает тот факт, что при растворении гидрид-металла в воде образуется однокислотное основание и выделяется газ:



Запишем общее уравнение электролиза расплава гидрида неизвестного металла:



Согласно стехиометрическим коэффициентам, при электролизе 2 молей MeH на катоде выделяется 2 моля металла Me, а на аноде — 1 моль H₂. Известно, что масса вещества, выделенного на катоде, в 23 раза больше массы водорода, выделенного на аноде.

Мы не ограничены конкретным количеством гидрида металла. Положим, было 2 моля MeH, выделилось 2 моля Me и 1 моль H₂. Определим массы образовавшихся веществ:

$$Ar(\text{Me}) = x \text{ (переменная);}$$

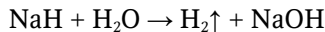
$$m(\text{Me}) = \nu(\text{Me}) \cdot M(\text{Me}) = 2 \cdot x = 2x \text{ г;}$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \text{ г/моль;}$$

$$m(\text{H}_2) = \nu(\text{H}_2) \cdot M(\text{H}_2) = 1 \cdot 2 = 2 \text{ г.}$$

По условию $m(\text{Me}) = 23 \cdot m(\text{H}_2)$ или $2x = 23 \cdot 2$; $x = 23$.

Следовательно, $A_r(\text{Me}) = 23$ г/моль. Данной атомной массе соответствует натрий Na. Он также удовлетворяет требованиям по валентности и химическим свойствам:



Рассчитаем объем водорода, выделенного при растворении 12 г гидрида натрия в воде.

Количество гидрида натрия равно:

$$M(\text{NaH}) = 23 + 1 = 24 \text{ г/моль;}$$

$$\nu(\text{NaH}) = m(\text{NaH}) : M(\text{NaH}) = 12 \text{ г} : 24 \text{ г/моль} = 0,5 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам, при растворении в воде 1 моля MeH выделяется 1 моль водорода H₂. Следовательно, при растворении в воде 0,5 моля MeH выделяется 0,5 моля водорода H₂.

Зная количество водорода, определим его объем:

$$V(\text{Cl}_2) = \nu \cdot V_M = 0,5 \text{ моля} : 22,4 \text{ л/моль} = 11,2 \text{ л.}$$

Таким образом, при растворении 12 г гидрида натрия в воде выделяется 11,2 л водорода.

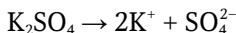
Задача 15

⦿ 540 г 32%-го раствора сульфата калия подвергли электролизу. Электролиз прекратили, когда на аноде выделилось 112 л газа. Сколько граммов кристаллогидрата $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ осело после прекращения электролиза и приведения раствора к первоначальным условиям, если известно, что массовая доля соли в насыщенном растворе равна 46 %?

⦿ Решение.

Данная «синтетическая» задача, кроме темы электролиза, также затрагивает тему образования кристаллогидратов.

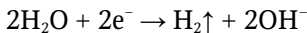
В водном растворе сульфат калия диссоциирует на сульфат-ионы и ионы калия:



Составим схему электролиза.

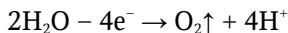
Катод К(-).

Калий относится к первой группе металлов ($\varphi^0\text{K}^+ / \text{K} < -1,4 \text{ В}$), поэтому его ионы при электролизе водного раствора не восстанавливаются. Вместо ионов калия восстанавливаются молекулы воды:

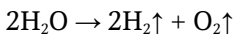


Анод А(+).

Серная кислота является кислородсодержащей, поэтому на аноде окисляются молекулы воды:



Таким образом, в водном растворе сульфата калия фактически подвергается электролизу растворитель — вода. На катоде выделяется водород, на аноде выделяется кислород:



На аноде выделилось 112 л кислорода. Определим его количество:

$$v(\text{O}_2) = V : V_M = 112 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 5 \text{ молей.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам, при электролизе 2 молей воды образуется 1 моль кислорода. Составим пропорцию:

при электролизе 2 молей H_2O образуется 1 моль O_2 ;

при электролизе x молей H_2O образуется 5 молей O_2 ;

$$x = 2 \cdot 5 = 10.$$

Следовательно, при электролизе 10 молей воды ушло из раствора. Определим массу воды, которую потерял раствор при электролизе:

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = v(\text{H}_2\text{O}) \cdot M(\text{H}_2\text{O}) = 10 \cdot 18 = 180 \text{ г.}$$

Определим исходную массу сульфата калия в растворе:

$$\begin{aligned} m(\text{K}_2\text{SO}_4 \text{ в } 32\% \text{-м р-ре}) &= m(\text{р-ра}) \cdot W(\text{K}_2\text{SO}_4) : 100 \% = \\ &= 540 \cdot 32 \% : 100 \% = 172,8 \text{ г.} \end{aligned}$$

В результате уменьшения содержания воды в растворе из него выделилось некоторое количество кристаллогидрата $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, концентрация сульфата калия в растворе стала равной 46 %. Положим, что количество выпавшего кристаллогидрата равно y молей. Определим массу кристаллогидрата и соли в его составе:

$$M(\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}) = 2 \cdot 39 + 96 + 7 \cdot 18 = 300 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}) = v \cdot M = y \cdot 300 = 300y \text{ г};$$

$$M_r(\text{K}_2\text{SO}_4) = 2 \cdot 39 + 96 = 174 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{K}_2\text{SO}_4) = v \cdot M = y \cdot 174 = 174y \text{ г.}$$

Итак, масса сульфата калия в растворе уменьшилась на $174y$ г. Масса раствора сульфата калия уменьшилась на 180 г за счет электролиза и еще на $300y$ г за счет выпадения кристаллогидрата:

$$m(\text{K}_2\text{SO}_4) = (172,8 - 174y) \text{ г};$$

$$m(\text{р-ра } \text{K}_2\text{SO}_4) = (540 - 180 - 300y) = (360 - 300y) \text{ г.}$$

Массовая доля сульфата калия в растворе стала равной 46 %. Выразим ее через переменные и приравняем к 46 %:

$$W(\text{K}_2\text{SO}_4) = m(\text{K}_2\text{SO}_4) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \%$$

или

$$46 \% = (172,8 - 174y) : (360 - 300y) \cdot 100 \%;$$

$$100(172,8 - 174y) = 46(360 - 300y);$$

$$17280 - 17400y = 16560 - 13800y;$$

$$3600y = 720;$$

$$y = 0,2.$$

Итак, количество выпавшего кристаллогидрата равно 0,2 моля. Определим его массу:

$$m(\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}) = 300y = 60 \text{ г.}$$

Таким образом, после прекращения электролиза и приведения раствора к первоначальным условиям осело 60 г кристаллогидрата $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 1 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом диске.

Задача 20

⊖ Имеется раствор, состоящий из 200 г воды, 7,45 г хлорида калия, 16 г сульфата меди. При инертных электродах осуществили электролиз. Когда на электродах выделилось 3 моля газовой смеси, электролиз прекратили. Вычислить массовую долю соли в полученном растворе после электролиза.

Ⓛ Решение.

Определим количества веществ в исходном растворе:

$$M(\text{KCl}) = 39 + 35,5 = 74,5 \text{ г/моль};$$

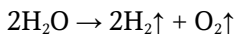
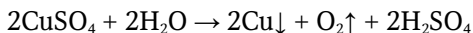
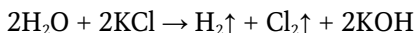
$$v(\text{KCl}) = m(\text{KCl}) : M(\text{KCl}) = 7,45 \text{ г} : 74,5 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля};$$

$$M(\text{CuSO}_4) = 64 + 96 = 160 \text{ г/моль};$$

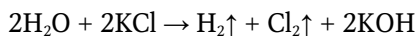
$$v(\text{CuSO}_4) = m(\text{CuSO}_4) : M(\text{CuSO}_4) = 16 \text{ г} : 160 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Итак, в растворе — 0,1 моля хлорида калия и 0,1 моля сульфата меди, а при его электролизе выделяется 3 моля газовой смеси. Очевидно, что не только электролиз солей проведен до конца, но и значительная часть воды подверглась гидролизу.

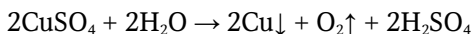
Не следует приводить полные выкладки по схемам электролиза (непосредственно по данным солям они уже были рассмотрены в данном разделе в задачах 2 и 3). Запишем уравнения описываемых процессов:



Определим количества образованных веществ.

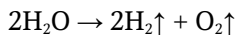


Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции электролиза раствора хлорида калия при электролизе 2 молей хлорида калия образуется 1 моль водорода, 1 моль хлора и 2 моля гидроксида калия. Следовательно, при электролизе 0,1 моля хлорида калия образуется 0,05 моля водорода, 0,05 моля хлора и 0,1 моля гидроксида калия:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции электролиза раствора сульфата меди, при электролизе 2 молей сульфата меди образуется 1 моль кислорода и 2 моля серной кислоты, осаждается 2 моля меди. Следовательно, при электролизе 0,1 моля сульфата меди образуется 0,05 моля кислорода и 0,1 моля серной кислоты, осаждается 0,1 моля меди.

Итак, при электролизе солей выделилось суммарно $0,05 + 0,05 + 0,05 = 0,15$ моля газообразных веществ, следовательно, остальные $3 - 0,15 = 2,85$ моля газов образованы в результате электролиза воды:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции электролиза воды, при электролизе 2 молей воды образуется 2 моля водорода и 1 моль кислорода или суммарно 3 моля газообразных веществ. Составим пропорцию:

при электролизе 2 молей воды образуется 3 моля газов;

при электролизе x молей воды образуется 2,85 моля газов;

$$x = 2 \cdot 2,85 : 3 = 1,9.$$

Итак, электролизу подверглось 1,9 моля воды, при этом, согласно стехиометрическим коэффициентам реакции электролиза воды, образовалось 1,9 моля водорода и 0,95 моля кислорода.

Количество веществ, выделившихся из раствора:

$$v(\text{H}_2) = 0,05 \text{ (гидролиз KCl)} + 1,9 \text{ (гидролиз H}_2\text{O)} = 1,95 \text{ моля};$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2) = v(\text{H}_2) \cdot M(\text{H}_2) = 1,95 \cdot 2 = 3,9 \text{ г};$$

$$v(\text{Cl}_2) = 0,05 \text{ моля};$$

$$M(\text{Cl}_2) = 71 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Cl}_2) = v(\text{Cl}_2) \cdot M(\text{Cl}_2) = 0,05 \cdot 71 = 3,55 \text{ г};$$

$$v(\text{O}_2) = 0,05 \text{ (гидролиз KCl)} + 0,95 \text{ (гидролиз H}_2\text{O)} = 1 \text{ моль};$$

$$M(\text{O}_2) = 32 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{O}_2) = v(\text{O}_2) \cdot M(\text{O}_2) = 1 \cdot 32 = 32 \text{ г};$$

$$v(\text{Cu}) = 0,1 \text{ моля};$$

$$A_r(\text{Cu}) = 64;$$

$$m(\text{Cu}) = v(\text{Cu}) \cdot M(\text{Cu}) = 0,1 \cdot 64 = 6,4 \text{ г}.$$

Заметим, что исходный раствор состоял из 200 г воды, 7,45 г хлорида калия, 16 г сульфата меди.

Итого, масса раствора после электролиза составила:

$$m(\text{р-ра}) = 200 + 7,45 + 16 - 3,9 - 3,55 - 32 - 6,4 = 177,6 \text{ г}.$$

После электролиза в растворе осталось 0,1 моля KOH и 0,1 моля H₂SO₄. Они прореагировали между собой с образованием кислой соли (гидросульфат калия):



Согласно стехиометрическим коэффициентам, образовалось 0,1 моля KHSO₄. Определим его массу:

$$M(\text{KHSO}_4) = 39 + 1 + 96 = 136 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KHSO}_4) = \nu(\text{KHSO}_4) \cdot M(\text{KHSO}_4) = 0,1 \cdot 136 = 13,6 \text{ г}.$$

Вычислим массовую долю гидросульфата калия в полученном растворе:

$$\begin{aligned} W(\text{KHSO}_4) &= m(\text{KHSO}_4) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = \\ &= 13,6 : 177,6 \cdot 100 \% = 7,66 \%. \end{aligned}$$

Таким образом, после электролиза раствора, состоящего из 200 г воды, 7,45 г хлорида калия и 16 г сульфата меди, образовался 7,66 % раствор гидросульфата калия.

ПРИМЕЧАНИЕ



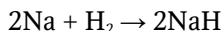
Задача 21 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом диске.

ХИМИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

2.1. ВОДОРОД И ГАЛОГЕНЫ

Особенности химических свойств водорода

Большинство задач, связанных со свойствами водорода, касаются либо реакций металлов с кислотами и щелочами с выделением водорода, либо свойств гидридов. Гидриды металлов — это особые соединения, в которых водород имеет степень окисления -1 , например:



Кроме того, металлы с переменной валентностью способны «растворять» в себе водород. Это свойство обуславливает применение таких металлов в качестве катализаторов при гидрировании.

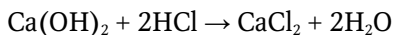
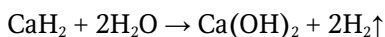
Решение задач

Задача 3

☉ Для нейтрализации раствора, полученного взаимодействием гидрида кальция с водой, необходимо потратить 43,67 мл 29,2%-го раствора соляной кислоты плотностью 1,145 г/мл. Определить, сколько литров водорода выделится в первой реакции.

🕒 Решение.

Запишем уравнения протекающих реакций:



Определим количество соляной кислоты, израсходованное на нейтрализацию гидроксида кальция:

$$m(\text{р-ра HCl}) = \rho \cdot V = 1,145 \text{ г/мл} \cdot 43,674 \text{ мл} = 50 \text{ г};$$

$$m(\text{HCl}) = m(\text{p-ра HCl}) \cdot W(\text{HCl}) : 100 \% = 50 \text{ г} \cdot 29,2 \% : 100 \% = 14,6 \text{ г};$$

$$M(\text{HCl}) = 36,5 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{HCl}) = m(\text{HCl}) : M(\text{HCl}) = 14,6 \text{ г} : 36,5 \text{ г/моль} = 0,4 \text{ моля}.$$

Итак, во второй реакции приняло участие 0,4 моля соляной кислоты.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации 2 моля соляной кислоты HCl нейтрализуют 1 моль гидроксида кальция Ca(OH)₂. Можно составить пропорцию:

$$2 \text{ моля HCl нейтрализуют } 1 \text{ моль Ca(OH)}_2;$$

$$0,4 \text{ моля HCl нейтрализует } x \text{ молей Ca(OH)}_2;$$

$$x = 0,4 : 2 = 0,2.$$

Мы определили количество гидроксида кальция, образованного в первой реакции, — 0,2 моля.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции гидрида кальция с водой гидроксид кальция и водород образуются в мольном соотношении 1 : 2. Следовательно, при взаимодействии гидрида кальция с водой и образовании 0,2 моля гидроксида кальция выделилось $0,2 \cdot 2 = 0,4$ моля водорода.

Определим объем выделившегося газа:

$$V(\text{O}_2) = v \cdot V_M = 0,4 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 8,96 \text{ л}.$$

Таким образом, при взаимодействии гидрида кальция с водой выделилось 8,96 л водорода.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 8, 10 и 14 имеют аналогичное решение. Задачи 1, 6 и 13, касающиеся восстановления оксидов металлов, и задачи 2 и 15, касающиеся свойств кислот, решаются простой пропорцией по молярным массам веществ. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

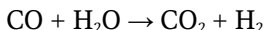
Задача 5

- ☞ Для получения водорода в контактный аппарат пропустили оксид углерода (II) и водяные пары в мольном соотношении 1 : 5. Определить в процентах степень превращения оксида углерода (II) и объемные

доли газовой смеси, выходящей из контактного аппарата, если в этой смеси оксид углерода (II) составляет 5 % по объему.

 Решение.

При реакции с водой монооксид углерода CO окисляется до диоксида CO₂. Запишем уравнение протекающей реакции:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, и 1 моль CO реагирует с 1 молекул H₂O, образуя 1 моль CO₂ и 1 моль H₂. При данных условиях все продукты и реагенты находятся в газообразном состоянии. Из 2 молей газов образуется 2 моля газов. Таким образом, при протекании реакции объем газовой смеси не изменяется. Объем смеси неизвестен, так как его значение не влияет на решение. Положим, объем смеси равен 6 л (очевидно, что предстоит деление на 6).

ВНИМАНИЕ



Иногда для упрощения можно (и рекомендуется) принимать неизвестные значения объема, массы, количества смеси или раствора равными удобным для расчета числам (1 л, 1 моль, 100 г). Однако делать это допускается только в том случае, если очевидно, что данные значения никоим образом не влияют на конечное решение. Обычно в таких случаях оперируют безразмерным количеством смеси или раствора и исходными данными являются данные об относительном содержании веществ в смеси или растворе (массовые, объемные доли, концентрации).

Итак, объем исходной и конечной смеси равен 6 л, так как он не изменился. Известно, что оксид углерода (II) и водяные пары в исходной смеси находились в мольном (а значит, и в объемном) соотношении 1 : 5. Иными словами, смесь состояла на 1/6 объемную часть из оксида углерода (II) и на 5/6 объемных частей из водяных паров. Следовательно, объемы газов в исходной смеси составляли:

$$V_{\text{исх}}(\text{CO}) = 6 \text{ л} \cdot 1/6 = 1 \text{ л};$$

$$V_{\text{исх}}(\text{H}_2\text{O}) = 6 \text{ л} \cdot 5/6 = 5 \text{ л}.$$

После того как определенное количество CO и H₂O вступило в реакцию, в конечной смеси содержание CO составило лишь 5 %. Объем CO стал равен:

$$V_{\text{конеч}}(\text{CO}) = V(\text{смеси}) \cdot \varphi(\text{CO}) : 100 \% = 6 \text{ л} \cdot 5 \% : 100 \% = 0,3 \text{ л.}$$

Следовательно, в реакцию вступило $1 - 0,3 = 0,7$ л монооксида углерода CO.

Степень превращения оксида углерода (II) равна:

$$\alpha = V(\text{прореаг. CO}) : V_{\text{исх}}(\text{CO}) \cdot 100 \% = 0,7 : 1 \cdot 100 \% = 70 \%.$$

Итак, оксид углерода (II) прореагировал с парами воды на 70 %.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации, 0,7 л CO реагирует с 0,7 л H₂O, образуя 0,7 л CO₂ и 0,7 л H₂.

Определим конечные объемы газов:

$$V_{\text{конеч}}(\text{CO}) = 1 - 0,7 = 0,3 \text{ л;}$$

$$V_{\text{конеч}}(\text{H}_2\text{O}) = 5 - 0,7 = 4,3 \text{ л;}$$

$$V_{\text{конеч}}(\text{CO}_2) = 0,7 \text{ л;}$$

$$V_{\text{конеч}}(\text{H}_2) = 0,7 \text{ л.}$$

Определим объемные доли газовой смеси, выходящей из контактного аппарата:

$$\varphi(\text{CO}) = V_{\text{конеч}}(\text{CO}) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,3 \text{ л} : 6 \text{ л} \cdot 100 \% = 5 \%;$$

$$\varphi(\text{H}_2\text{O}) = V_{\text{конеч}}(\text{H}_2\text{O}) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 4,3 \text{ л} : 6 \text{ л} \cdot 100 \% = 71,7 \%;$$

$$\varphi(\text{CO}_2) = V_{\text{конеч}}(\text{CO}_2) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,7 \text{ л} : 6 \text{ л} \cdot 100 \% = 11,7 \%;$$

$$\varphi(\text{H}_2) = V_{\text{конеч}}(\text{H}_2) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,7 \text{ л} : 6 \text{ л} \cdot 100 \% = 11,7 \%.$$

Таким образом, конечная смесь состоит из 71,7 % водяных паров, 11,7 % углекислого газа CO₂, 11,7 % водорода H₂, 5 % угарного газа CO (по объему).

ПРИМЕЧАНИЕ



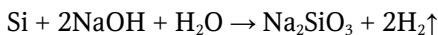
Задачи 4, 7 и 11 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 9

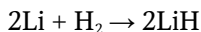
☉ Сколько мл с 50%-м избытком 20%-го раствора гидроксида натрия плотностью 1,22 г/мл необходимо взять, чтобы выделившегося при взаимодействии с кремнием газа хватило на получение 8 г гидрида лития?

☉ Решение.

При взаимодействии со щелочью кремний окисляется, образуя силикат натрия:



Выделившийся в данной реакции водород должен быть потрачен на образование гидрида лития по реакции:



Определим количество гидрида лития, которое необходимо получить:

$$M(\text{LiH}) = 7 + 1 = 8 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{HCl}) = m(\text{HCl}) : M(\text{HCl}) = 8 \text{ г} : 8 \text{ г/моль} = 1 \text{ моль}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции образования гидрида лития, 2 моля лития при реакции с 1 молем водорода образуют 2 моля гидрида лития. Составим пропорцию:

2 моля Li при реакции с 1 молем H_2 образуют 2 моля LiH;

x молей Li при реакции с y молями H_2 образуют 1 моль LiH;

$$x = 1, y = 0,5.$$

Итак, для образования 1 моля гидрида лития необходимо 0,5 моля водорода. Следовательно, столько водорода должно выделиться при реакции кремния с гидроксидом натрия.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции кремния с гидроксидом натрия, количество вступившего в реакцию гидроксида натрия равно количеству выделившегося при ее протекании водорода. Следовательно, 0,5 моля водорода выделится при реакции

с кремнием 0,5 моля гидроксида натрия. Зная количество гидроксида натрия, определим необходимый объем его 20%-го раствора:

$$M(\text{NaOH}) = 23 + 1 + 16 = 40 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{NaOH}) = \nu(\text{NaOH}) \cdot M(\text{NaOH}) = 0,5 \text{ моля} \cdot 40 \text{ г/моль} = 20 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{р-ра NaOH}) &= m(\text{NaOH}) : W(\text{NaOH}) \cdot 100 \% = \\ &= 20 \text{ г} : 20 \% \cdot 100 \% = 100 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$V(\text{р-ра NaOH}) = m : \rho = 100 \text{ г} : 1,22 \text{ г/мл} = 82 \text{ мл}.$$

Итак, для образования 8 г гидрида натрия изначально необходимо 82 мл 20%-го раствора гидроксида натрия. Однако по условию задачи гидроксид натрия следует взять с 50%-м избытком, то есть в полтора раза больше, нежели необходимо.

Требуемый объем равен $82 \cdot 1,5 = 143 \text{ мл}$.

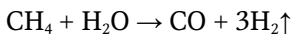
Для образования 8 г гидрида натрия изначально необходимо 143 мл 20%-го раствора гидроксида натрия.

Задача 12

☛ В соотношении 1 : 3 в контактный аппарат пропустили метан и водяные пары. Определить в процентах объемное содержание газовой смеси, выходящей из контактного аппарата, если прореагировало 80 % метана.

🕒 Решение.

При реакции с водой метан CH_4 окисляется до монооксида углерода CO . Запишем уравнение протекающей реакции:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль CH_4 реагирует с 1 молем H_2O , образуя 1 моль CO и 3 моля H_2 . При данных условиях все продукты и реагенты находятся в газообразном состоянии. Из 2 молей газов образуется 4 моля газов. Таким образом, при протекании реакции объем газовой смеси изменяется. Однако это не мешает нам так же, как и при решении задачи 2 данного раздела, принять объем смеси равным определенному числу.

Положим, объем смеси равен 1 л.

Известно, что метан и водяные пары в исходной смеси находились в объемных соотношениях 1 : 3. Иными словами, смесь состояла на 1/4 объемную часть из метана и на 3/4 объемные части из водяных паров. Следовательно, объемы газов в исходной смеси составляли:

$$V_{\text{исх}}(\text{CH}_4) = 1 \text{ л} \cdot 1/4 = 0,25 \text{ л};$$

$$V_{\text{исх}}(\text{H}_2\text{O}) = 1 \text{ л} \cdot 3/4 = 0,75 \text{ л}.$$

Известно, что прореагировало 80 % метана.

$$V(\text{прореаг. CH}_4) = \alpha \cdot V_{\text{исх}}(\text{CH}_4) : 100 \% = 80 \% \cdot 0,25 \text{ л} : 100 \% = 0,2 \text{ л}.$$

Итак, в реакцию вступило 0,2 л метана CH_4 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции 1 л CH_4 реагирует с 1 л H_2O , образуя 1 л CO и 3 л H_2 . Составим сложную пропорцию:

1 л CH_4 реагирует с 1 л H_2O , образуя 1 л CO и 3 л H_2 ;

0,2 л CH_4 реагирует с x л H_2O , образуя y л CO и z л H_2 ;

$$x = 0,2 \text{ л}, y = 0,2 \text{ л}, z = 0,6 \text{ л}.$$

Таким образом, прореагировало 0,2 л CH_4 и 0,2 л H_2O , образовалось 0,2 л CO и 0,6 л H_2 .

Определим конечные объемы газов:

$$V_{\text{конеч}}(\text{CH}_4) = 0,25 - 0,2 = 0,05 \text{ л};$$

$$V_{\text{конеч}}(\text{H}_2\text{O}) = 0,75 - 0,2 = 0,55 \text{ л};$$

$$V_{\text{конеч}}(\text{CO}) = 0,2 \text{ л};$$

$$V_{\text{конеч}}(\text{H}_2) = 0,6 \text{ л}.$$

Суммарный объем конечной газовой смеси равен:

$$V_{\text{конеч}}(\text{смеси}) = 0,05 \text{ л} + 0,55 \text{ л} + 0,2 \text{ л} + 0,6 \text{ л} = 1,4 \text{ л}.$$

Определим объемные доли газовой смеси, выходящей из контактного аппарата:

$$\varphi(\text{CH}_4) = V_{\text{конеч}}(\text{CH}_4) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,05 \text{ л} : 1,4 \text{ л} \cdot 100 \% = 3,6 \%;$$

$$\varphi(\text{H}_2\text{O}) = V_{\text{конеч}}(\text{H}_2\text{O}) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,55 \text{ л} : 1,4 \text{ л} \cdot 100 \% = 39,3 \%;$$

$$\varphi(\text{CO}) = V_{\text{конеч}}(\text{CO}) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,2 \text{ л} : 1,4 \text{ л} \cdot 100 \% = 14,7 \%;$$

$$\varphi(\text{H}_2) = V_{\text{конеч}}(\text{H}_2) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,6 \text{ л} : 1,4 \text{ л} \cdot 100 \% = 42,9 \%.$$

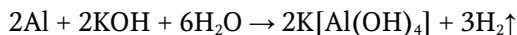
Таким образом, конечная смесь состоит из 42,9 % водорода H_2 , 39,3 % водяных паров, 14,7 % угарного газа CO , 3,6 % метана CH_4 (по объему).

Задача 16

8,1 г алюминия взаимодействует со 160 г 7%-го раствора гидроксида калия. Выделившийся газ пропустили над 48 г нагретого оксида меди. Определить массу 25,2%-го раствора азотной кислоты, которая необходима для растворения твердого остатка, полученного после восстановления.

Решение.

Алюминий является амфотерным металлом, при его реакции со щелочью образуется соль и выделяется водород:



Определим исходное количество алюминия и гидроксида калия:

$$A_r(\text{Al}) = 27;$$

$$\nu(\text{Al}) = m(\text{Al}) : M(\text{Al}) = 8,1 \text{ г} : 27 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля};$$

$$m(\text{KOH}) = m(\text{р-ра KOH}) \cdot W(\text{KOH}) : 100 \% = 160 \text{ г} \cdot 7 \% : 100 \% = 11,2 \text{ г};$$

$$M(\text{KOH}) = 39 + 1 + 16 = 56 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{KOH}) = m(\text{KOH}) : M(\text{KOH}) = 11,2 \text{ г} : 56 \text{ г/моль} = 0,2 \text{ моля}.$$

Изначально присутствовало 0,3 моля алюминия и 0,2 моля гидроксида калия.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, алюминий и гидроксид калия реагируют в мольном соотношении 1 : 1. Гидроксид калия находился в недостатке, так как его количество было меньшим. Следовательно, в реакцию вступило 0,2 моля алюминия и 0,2 моля

гидроксида калия. Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при участии в реакции 2 молей гидроксида калия образуется 3 моля водорода. Составим пропорцию:

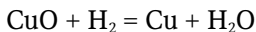
$$2 \text{ моля КОН образуют } 3 \text{ моля } \text{H}_2;$$

$$0,2 \text{ моля КОН образует } x \text{ молей } \text{H}_2;$$

$$x = 0,2 \cdot 3 : 2 = 0,3.$$

Выделилось 0,3 моля водорода.

Выделившийся водород восстанавливает оксид меди по реакции:



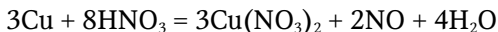
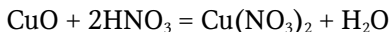
Определим количество оксида меди:

$$M(\text{CuO}) = 64 + 16 = 80 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{CuO}) = m(\text{CuO}) : M(\text{CuO}) = 48 \text{ г} : 80 \text{ г/моль} = 0,6 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, водород и оксид меди реагируют в мольном соотношении 1 : 1. Водород находился в недостатке, так как его количество меньше. Следовательно, в реакцию вступило 0,3 моля водорода и 0,3 моля оксида меди. Еще $0,6 - 0,3 = 0,3$ моля оксида меди осталось. Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 1 моля оксида меди при восстановлении водородом образуется 1 моль меди. Следовательно, в реакции из 0,3 моля оксида меди образовалось 0,3 моля меди.

В полученном твердом остатке находилось 0,3 моля оксида меди и 0,3 моля меди. Его растворили 25,2%-м раствором азотной кислоты. При этом протекали реакции:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, 1 моль CuO реагирует с 2 молями HNO₃, а 3 моля Cu реагируют с 8 молями HNO₃. Составим пропорции:

$$1 \text{ моль CuO реагирует с } 2 \text{ молями HNO}_3;$$

$$0,3 \text{ моля CuO реагирует с } x \text{ молями HNO}_3;$$

$$x = 0,6;$$

3 моля Cu реагируют с 8 молями HNO_3 ;

0,3 моля Cu реагирует с y молями HNO_3 ;

$$y = 0,3 \cdot 8 : 3 = 0,8.$$

Итак, для растворения 0,3 моля оксида меди и 0,3 моля меди необходимо $0,8 + 0,6 = 1,4$ моля азотной кислоты. Определим массу раствора азотной кислоты, необходимую для растворения твердого остатка:

$$M(\text{HNO}_3) = 1 + 14 + 3 \cdot 16 = 63 \text{ г/моль};$$

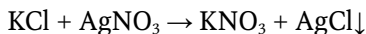
$$m(\text{HNO}_3) = \nu(\text{HNO}_3) \cdot M(\text{HNO}_3) = 1,4 \text{ моля} \cdot 63 \text{ г/моль} = 88,2 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{р-ра } \text{HNO}_3) &= m(\text{HNO}_3) : W(\text{HNO}_3) \cdot 100 \% = \\ &= 88,2 \text{ г} \cdot 25,2 \% : 100 \% = 350 \text{ г}. \end{aligned}$$

Таким образом, для растворения твердого остатка необходимо 350 г раствора азотной кислоты с концентрацией 25,2 %.

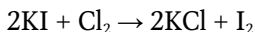
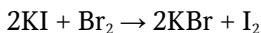
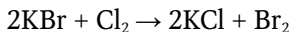
Галогены

Самыми распространенными, решаемыми уже не первым поколением, являются задачи об образовании осадков галогенидов серебра при взаимодействии галогенидов щелочных металлов и растворимой соли серебра (обычно нитрата):

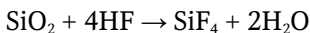


Единственный растворимый галогенид серебра — фторид AgF . Увы, данный факт для многих остается неизвестным, в результате чего при решении допускаются грубые ошибки.

Особенностью свойств галогенидов является то, что они вытесняют друг друга из солей (вернее сказать, галогенид с большей электроотрицательностью окисляет галогенид с меньшей):



Характерным свойством плавиковой кислоты (фтороводород HF) является то, что она способна растворять стекло:



Поэтому плавиковую кислоту содержат в специальных емкостях из свинца (свинец образует далее нерастворимую пленку из фторида свинца PbF_2), каучука или полиэтилена.

Хлор при растворении в воде или щелочах *диспропорционирует*. Причем продукты реакции зависят от температуры раствора. В холодном растворе щелочи образуется гипохлорит.



В горячей воде один атом хлора окисляется до хлорат-иона за счет восстановления пяти атомов до хлорида:



Диспропорционирование — это такой тип окислительно-восстановительной реакции, при котором реагируют атомы одного и того же элемента с одной степенью окисления, образуя атомы с разными степенями окисления, при этом значение исходной степени окисления находится между конечными значениями.

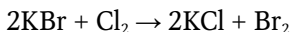
Решение задач

Задача 9

☉ К раствору, содержащему 1,6 г бромида калия, прибавили 6 г бром-сырца, содержащего примесь хлора. Получили 1,36 г сухого остатка. Вычислить, чему равна массовая доля хлора в бром-сырце.

☉ Решение.

Присутствующий в бром-сырце хлор замещает бром из бромида калия (в данном случае происходит восстановление хлора и окисление бромид-ионов) по реакции:



В сухом остатке находятся соли KBr и KCl .

Изначально в растворе присутствовало 1,6 бромида калия, после реакции осталось 1,36 г смеси бромида и хлорида калия.

Решим данную задачу двумя способами.

Способ I.

Примем количество хлора, присутствовавшего в бром-сырце, равным x молям.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 2 моля KBr реагируют с 1 молем Cl_2 , при этом образуется 2 моля KCl и 1 моль Br_2 . Составим пропорцию:

2 моля KBr и 1 моль Cl_2 образуют 2 моля KCl и 1 моль Br_2 ;

y_1 молей KBr и x молей Cl_2 образуют y_2 молей KCl и y_3 молей Br_2 ;

$$y_1 = 2x, y_2 = 2x, y_3 = x.$$

Итак, $2x$ молей KBr реагируют с x молями Cl_2 , при этом образуется $2x$ молей KCl и x молей Br_2 .

Определим массу вступившего в реакцию бромида калия и массу образовавшегося в результате реакции хлорида калия:

$$M(\text{KBr}) = 39 + 80 = 119 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KBr}) = \nu(\text{KBr}) \cdot M(\text{KBr}) = 2x \text{ молей} \cdot 119 \text{ г/моль} = 238x \text{ г};$$

$$M(\text{KCl}) = 39 + 35,5 = 74,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KCl}) = \nu(\text{KCl}) \cdot M(\text{KCl}) = 2x \text{ молей} \cdot 74,5 \text{ г/моль} = 149x \text{ г}.$$

Масса сухого остатка равна:

$$\begin{aligned} m_{\text{кон}}(\text{сух. ост.}) &= m_{\text{исх}}(\text{сух. ост.}) - m(\text{израсх. KBr}) + m(\text{образ. KCl}) = \\ &= 1,6 - 238x + 149x = 1,36. \end{aligned}$$

Имеем уравнение:

$$1,6 - 89x = 1,36; 89x = 0,24; x = 0,0027.$$

Итак, количество хлора, присутствовавшего в бром-сырце, равно 0,0027 моля. Определим его содержание в бром-сырце:

$$M(\text{Cl}_2) = 2 \cdot 35,5 = 71 \text{ г/моль};$$

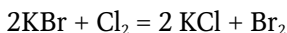
$$m(\text{Cl}_2) = \nu(\text{Cl}_2) \cdot M(\text{Cl}_2) = 0,0027 \text{ моля} \cdot 71 \text{ г/моль} = 0,191 \text{ г};$$

$$W(\text{Cl}_2) = m(\text{Cl}_2) : m(\text{бром-сырца}) \cdot 100 \% = 0,191 : 6 \cdot 100 \% = 3,2 \%.$$

Массовая доля хлора в бром-сырце равна 3,2 %.

Способ II.

Для более удобного и быстрого решения задач можно использовать понятие «количество молей реакции»:

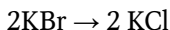


$$M(2\text{KBr}) = 238 \text{ г/моль}; M(\text{Cl}_2) = 71 \text{ г/моль};$$

$$M(2\text{KCl}) = 149 \text{ г/моль}; M(\text{Br}_2) = 160 \text{ г/моль}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при реакции 238 г/моль бромида калия с 71 г/моль хлора образуется 149 г/моль хлорида калия и 160 г/моль брома. Это означает, что при количестве молей реакции, равном 1 молю (то есть если в реакцию вступит 1 моль хлора и 2 моля бромида калия), прореагирует 238 г бромида калия с 71 г хлора и образуется 149 г хлорида калия и 160 г брома.

Для сухого остатка можно записать следующую схему превращений:



При этом из 238 г/моль бромида калия образуется 149 г/моль хлорида калия. Изменение молярной массы остатка равно:

$$\Delta M = 149 - 238 = -89 \text{ г/моль}.$$

Изменение массы остатка равно:

$$\Delta m = 1,36 - 1,6 = -0,24 \text{ г}.$$

Количество реакции равно:

$$v = \Delta m : \Delta M = -0,24 \text{ г} : (-89 \text{ г/моль}) = 0,0027 \text{ моля}.$$

Количество молей реакции составило 0,0027 моля. Это равно количеству того вещества, вступившего или образованного в результате реакции, стехиометрический коэффициент которого в уравнении реакции равен 1. Например, хлор.

Таким образом, количество хлора равно 0,0027 моля.

$$m(\text{Cl}_2) = v(\text{Cl}_2) \cdot M(\text{Cl}_2) = 0,0027 \text{ моля} \cdot 71 \text{ г/моль} = 0,191 \text{ г}.$$

$$W(\text{Cl}_2) = m(\text{Cl}_2) : m(\text{бром-сырца}) \cdot 100 \% = 0,191 : 6 \cdot 100 \% = 3,2 \%.$$

Массовая доля хлора в бром-сырце равна 3,2 %.

ПРИМЕЧАНИЕ

Задачи 3, 4, 6, 13, 19 и 20 имеют аналогичное решение. Задачи 2, 5, 10, 15, 16 и 23 решаются по общим уравнениям, приведенным в теоретической части разд. 1.1. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 11

- ☉ В смеси, содержащей перманганат калия и оксид марганца (IV), на 5 атомов марганца приходится 14 атомов кислорода. Какое минимальное количество этой смеси необходимо обработать избытком соляной кислоты, чтобы выделившегося газа хватило для получения 36,75 г бертолетовой соли?

- ☉ Решение.

Построим ход решения задачи следующим образом:

- примем количество смеси равным 1 молю;
- определим состав смеси;
- определим количество хлора, которое выделится при обработке смеси избытком соляной кислоты;
- определим количество бертолетовой соли, которое образуется из выделившегося хлора;
- с помощью пропорции определим, какое количество смеси необходимо, чтобы в конечном итоге получить 36,75 г бертолетовой соли.

Итак, количество смеси равно 1 моль, то есть $v(\text{KMnO}_4) + v(\text{MnO}_2) = 1$ моль.

Определим состав смеси. Пусть количество перманганата калия равно x молей. Тогда количество оксида марганца (IV) равно $(1 - x)$ молей.

Количество молей атомов в x молях перманганата калия KMnO_4 : x молей атомов марганца и $4x$ молей атомов кислорода. Количество молей атомов в $(1 - x)$ молях оксида марганца (IV) MnO_2 : $(1 - x)$ молей атомов марганца и $(2 - 2x)$ молей атомов кислорода.

Итак, количество молей атомов в 1 моле смеси:

$$v(\text{атомов Mn}) = x + 1 - x = 1 \text{ моль};$$

$$v(\text{атомов O}) = 4x + 2 - 2x = (2 + 2x) \text{ молей.}$$

Известно, что на 5 атомов марганца приходится 14 атомов кислорода. Составим пропорцию:

5 атомов марганца – 14 атомов кислорода;

1 моль атомов марганца – $(2 + 2x)$ молей атомов кислорода;

$$5(2 + 2x) = 14;$$

$$10x + 10 = 14; 10x = 4;$$

$$x = 0,4.$$

В смеси присутствовало 0,4 моля перманганата калия KMnO_4 и $1 - 0,4 = 0,6$ моля оксида марганца (IV) MnO_2 .

Определим количество хлора, которое выделится при обработке смеси избытком соляной кислоты. Запишем уравнения протекающих реакций:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, 2 моля KMnO_4 образует 5 молей Cl_2 , а 1 моль MnO_2 образует 1 моль Cl_2 . Составим пропорции:

2 моля KMnO_4 образуют 5 молей Cl_2 ;

0,4 моля KMnO_4 образует x молей Cl_2 ;

$$x = 0,4 \cdot 5 : 2 = 1;$$

1 моль MnO_2 образует 1 моль Cl_2 ;

0,6 моля MnO_2 образует y молей Cl_2 ;

$$y = 0,6.$$

Всего при действии на 1 моль смеси перманганата калия и оксида марганца (IV) соляной кислоты в двух реакциях образуется $1 + 0,6 = 1,6$ моля хлора Cl_2 .

При пропускании полученного хлора Cl_2 через раствор гидроксида калия KOH образуется бертолетовая соль – хлорат калия KClO_3 :



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, 3 моля Cl_2 образуют 1 моль KClO_3 . Составим пропорцию:

3 моля Cl_2 образуют 1 моль KClO_3 ;

1,6 моля Cl_2 образует z молей KClO_3 ;

$$z = 1,6 \cdot 1 : 3 = 0,533.$$

Из хлора, образованного при обработке 1 моля исходной смеси соляной кислотой, образуется 0,533 моля бертолетовой соли KClO_3 . Найдем ее массу:

$$M(\text{KClO}_3) = 39 + 35,5 + 3 \cdot 16 = 112,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KClO}_3) = \nu(\text{KClO}_3) \cdot M(\text{KClO}_3) =$$

$$= 0,533 \text{ моля} \cdot 112,5 \text{ г/моль} = 65,33 \text{ г}.$$

Из 1 моля исходной смеси после ряда превращений образуется 65,33 г бертолетовой соли KClO_3 . Определим массу 1 моля исходной смеси, состоящей из 0,4 моля перманганата калия KMnO_4 и 0,6 моля оксида марганца (IV) MnO_2 :

$$M(\text{KMnO}_4) = 39 + 55 + 4 \cdot 16 = 158 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KMnO}_4) = \nu(\text{KMnO}_4) \cdot M(\text{KMnO}_4) = 0,4 \text{ моля} \cdot 158 \text{ г/моль} = 63,2 \text{ г};$$

$$M(\text{MnO}_2) = 55 + 2 \cdot 16 = 87 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{MnO}_2) = \nu(\text{MnO}_2) \cdot M(\text{MnO}_2) = 0,6 \text{ моля} \cdot 87 \text{ г/моль} = 52,2 \text{ г};$$

$$m(1 \text{ моль смеси}) = m(\text{KMnO}_4) + m(\text{MnO}_2) = 63,2 + 52,2 = 115,4 \text{ г}.$$

Из 115,4 г исходной смеси после ряда превращений образуется 65,33 г бертолетовой соли KClO_3 . Определим, из какой массы исходной смеси образуется 36,75 г бертолетовой соли. Составим пропорцию:

из 115,4 г исходной смеси образуется 65,33 г KClO_3 ;

из a г исходной смеси образуется 36,75 г KClO_3 ;

$$a = 36,75 \cdot 115,4 : 65,33 = 64,9.$$

Итак, необходимо обработать избытком соляной кислоты 64,9 г исходной смеси, чтобы выделившегося газа хватило для получения 36,75 г бертолетовой соли.

ПРИМЕЧАНИЕ

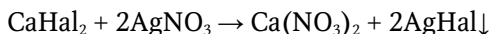
Задачи 17, 22 и 25 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 12

☞ При взаимодействии 0,2 г галогенида кальция с нитратом серебра образовался осадок желтого цвета массой 0,376 г. Какая соль кальция была взята?

🕒 Решение.

Запишем уравнение протекающей реакции, обозначив неизвестный галоген символом Hal и принимая во внимание то, что его степень окисления равна -1 :



Очевидно, что выпадающий осадок — галогенид серебра.

ВНИМАНИЕ

Помните, что фторид серебра, в отличие от всех остальных его галогенидов, является растворимой солью. В данной задаче вариант фтор F исключается. Этот факт зачастую используется в задачах, и одной из распространенных ошибок при их решении является то, что все галогениды серебра считают нерастворимыми.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, 1 моль CaHal_2 образует 2 моля осадка AgHal . Положим, атомная масса неизвестного галогена равна x . Определим молярные массы и массы галогенидов кальция и серебра, выраженные через переменную:

$$M(\text{CaHal}_2) = 40 + 2 \cdot x = (40 + 2x) \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CaHal}_2) = \nu(\text{CaHal}_2) \cdot M(\text{CaHal}_2) =$$

$$= 1 \text{ моль} \cdot (40 + 2x) \text{ г/моль} = (40 + 2x) \text{ г};$$

$$M(\text{AgHal}) = (108 + x) \text{ г/моль};$$

$$m(\text{AgHal}) = \nu(\text{AgHal}) \cdot M(\text{AgHal}) =$$

$$= 2 \text{ моля} \cdot (108 + x) \text{ г/моль} = (216 + 2x) \text{ г}.$$

Итак, согласно стехиометрическим коэффициентам реакций,

$(40 + 2x)$ г CaHal_2 образует $(108 + x)$ г осадка AgHal .

Составим пропорции:

$(40 + 2x)$ г CaHal_2 образует $(216 + 2x)$ г AgHal ;

0,2 г CaHal_2 образует 0,376 г AgHal .

Имеем уравнение:

$$0,376(40 + 2x) = 0,2(216 + 2x);$$

$$0,752x + 15,04 = 0,4x + 43,2;$$

$$0,352x = 28,16;$$

$$x = 80.$$

Неизвестный галоген имеет атомную массу, равную 80 г/моль. Такую атомную массу имеет бром Br, который, действительно, является галогеном.

Таким образом, изначально был взят бромид кальция CaBr_2 .

ПРИМЕЧАНИЕ



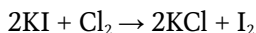
Задачи 1, 7, 18 и 26 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 14

68,3 г смеси нитрата калия, йодида калия и хлорида калия растворили в воде и обработали хлорной водой. Выделилось 25,4 г йода. Тот же самый раствор обработали нитратом серебра. Образовалось 75,7 г осадка. Вычислить процентное содержание солей в исходной смеси. Растворимость йода в воде пренебречь.

Решение.

При реакции йодида калия с хлором происходит процесс замещения йода хлором:



Определим количество выделившегося йода:

$$M(I_2) = 2 \cdot 127 = 254 \text{ г/моль};$$

$$\nu(I_2) = m(I_2) : M(I_2) = 25,4 \text{ г} : 254 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при обработке 2 молей йодида калия KI выделяется 1 моль йода I₂. Составим пропорцию:

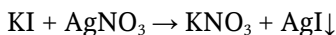
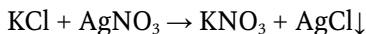
из 2 молей KI образуется 1 моль I₂;

из x молей KI образуется 0,1 моля I₂;

$$x = 0,1 \cdot 2 : 1 = 0,2.$$

Итак, количество йодида калия KI в исходной смеси равно 0,2 моля.

При обработке такого же раствора нитратом серебра образуется осадок галогенидов серебра:



Нитрат калия не вступает в реакции.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, при обработке 1 моля галогенида калия нитратом серебра образуется 1 моль осадка галогенида серебра.

Следовательно, из 0,2 моля йодида калия образуется 0,2 моля йодида серебра. Определим массу йодида серебра в составе осадка:

$$M(AgI) = 108 + 127 = 235 \text{ г/моль};$$

$$m(AgI) = \nu(AgI) \cdot M(AgI) = 0,2 \text{ моля} \cdot 235 \text{ г/моль} = 47 \text{ г.}$$

Остальная часть осадка — хлорид серебра AgCl. Его масса равна $75,7 - 47 = 28,7$ г. Определим его количество:

$$M(AgCl) = 108 + 35,5 = 143,5 \text{ г/моль};$$

$$\nu(AgCl) = m(AgCl) : M(AgCl) = 28,7 \text{ г} : 143,5 \text{ г/моль} = 0,2 \text{ моля.}$$

При обработке раствора нитратом серебра выпало 0,2 моля хлорида серебра. Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, образовалось такое количество осадка из 0,2 моля хлорида калия.

Итак, нам известно, что в исходной смеси присутствовало 0,2 моля хлорида калия и 0,2 моля йодида калия. Определим их массы и по разнице найдем массу нитрата калия:

$$M(\text{KI}) = 39 + 127 = 166 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KI}) = \nu(\text{KI}) \cdot M(\text{KI}) = 0,2 \text{ моля} \cdot 166 \text{ г/моль} = 33,2 \text{ г};$$

$$M(\text{KCl}) = 39 + 35,5 = 74,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KCl}) = \nu(\text{KCl}) \cdot M(\text{KCl}) = 0,2 \text{ моля} \cdot 74,5 \text{ г/моль} = 14,9 \text{ г}.$$

В исходной смеси присутствовало 14,9 г хлорида калия и 33,2 г йодида калия. Учитывая, что масса смеси равна 68,3 г, определим массу нитрата калия в смеси

$$\begin{aligned} m(\text{KNO}_3) &= m(\text{смеси}) - m(\text{KI}) - m(\text{KCl}) = \\ &= 68,3 - 33,2 - 14,9 = 20,2 \text{ г}. \end{aligned}$$

Вычислим процентное содержание солей в исходной смеси:

$$\begin{aligned} W(\text{KCl}) &= m(\text{KCl}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = \\ &= 14,9 \text{ г} : 68,3 \text{ г} \cdot 100 \% = 21,8 \%; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W(\text{KI}) &= m(\text{KI}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = \\ &= 33,2 \text{ г} : 68,3 \text{ г} \cdot 100 \% = 48,6 \%; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W(\text{KNO}_3) &= m(\text{KNO}_3) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = \\ &= 20,2 \text{ г} : 68,3 \text{ г} \cdot 100 \% = 29,6 \%. \end{aligned}$$

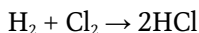
Исходная смесь состояла из 21,8 % хлорида калия KCl, 48,6 % йодида калия KI и 29,6 % нитрата калия KNO₃.

Задача 24

- ☉ Смесь водорода и хлора объемом 4,8 л поместили в закрытый кварцевый сосуд и облучили рассеянным красным светом. Через некоторое время облучение прекратили и полученную газовую смесь подвергли анализу. Оказалось, что в ней содержится 30 % по объему хлороводорода, а содержание хлора снизилось до 20 % от начального количества. Затем образовавшаяся смесь была пропущена через 14%-й горячий раствор гидроксида калия массой 40 г. Определить, какие вещества содержатся в растворе и массовые доли в процентах каждого из них.

🕒 Решение.

При реакции между водородом и хлором образуется хлороводород:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль водорода реагирует с 1 молем хлора, при этом образуется 2 моля хлороводорода. При данных условиях все продукты и реагенты находятся в газообразном состоянии. Из 2 молей газов образуется 2 моля газов. Таким образом, при протекании реакции объем газовой смеси не изменяется.

Определим количество хлороводорода в конечной смеси:

$$V(\text{HCl}) = \varphi(\text{HCl}) \cdot V(\text{смеси}) : 100 \% = 30 \% \cdot 4,8 \text{ л} : 100 \% = 1,44 \text{ л};$$

$$\nu(\text{HCl}) = V : V_M = 1,44 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,0643 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль водорода реагирует с 1 молем хлора, при этом образуется 2 моля хлороводорода. Составим пропорцию:

из 1 моля Cl_2 образуется 2 моля HCl ;

из x молей Cl_2 образуется 0,0643 моля HCl ;

$$x = 0,0643 \cdot 1 : 2 = 0,0321.$$

В реакции расходовалось 0,0321 моля хлора. Его содержание снизилось до 20 % от начального количества, значит, прореагировало $100 - 20 = 80$ % или 0,0321 моля. Определим, какое количество хлора осталось в смеси. Для этого составим пропорцию:

0,0321 моля составляет 80 %;

y молей составляет 20 %;

$$y = 0,0321 \cdot 20 : 80 = 0,00804.$$

Итак, конечная смесь содержала 0,0643 моля HCl и 0,00804 Cl_2 . Кроме того, в смеси находился и водород, однако, так как данное вещество не реагирует с раствором щелочи, его количество знать нам не нужно.

Определим количество гидроксида калия в его 14%-м растворе:

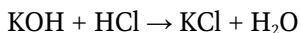
$$m(\text{KOH}) = m(\text{р-ра KOH}) \cdot W(\text{KOH}) : 100 \% =$$

$$= 40 \text{ г} \cdot 14 \% : 100 \% = 5,6 \text{ г};$$

$$M(\text{KOH}) = 56 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{KOH}) = m(\text{KOH}) : M(\text{KOH}) = 5,6 \text{ г} : 56 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Запишем уравнения реакций хлора и хлороводорода с гидроксидом калия:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции хлора и гидроксида калия 3 моля хлора реагирует с 6 молями гидроксида калия, при этом образуется 1 моль хлората калия и 5 молей хлорида калия. Составим пропорцию:

3 моля Cl_2 и 6 молей KOH образуют 1 моль KClO_3 и 5 молей KCl;

0,00804 моля Cl_2 и a_1 молей KOH образуют a_2 молей KClO_3

и a_3 молей KCl;

$$a_1 = 0,0161; a_2 = 0,00268; a_3 = 0,0134.$$

Итак, 0,00804 моля Cl_2 прореагировало с 0,0161 моля KOH, при этом образовалось 0,00268 моля KClO_3 и 0,0134 моля KCl.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции хлороводорода и гидроксида калия, 1 моль хлороводорода реагирует с 1 молем гидроксида калия, при этом образуется 1 моль хлорида калия. Следовательно, 0,0643 моля HCl прореагировало с 0,0643 моля KOH, при этом образовалось 0,0643 моля KCl.

Проверка: всего израсходовалось гидроксида калия $0,0161 + 0,0643 = 0,0804$ моля, что меньше, чем его было в 14%-м растворе, то есть гидроксид калия находился в избытке, и наши расчеты верны.

В растворе осталось $0,1 - 0,0804 = 0,0196$ моля KOH.

Кроме того, образовалось 0,00268 моля KClO_3 и $0,0134 + 0,0643 = 0,0777$ моля KCl.

Определим массы присутствующих в растворе веществ:

$$M(\text{KOH}) = 56 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KOH}) = \nu(\text{KOH}) \cdot M(\text{KOH}) = 0,0196 \text{ моля} \cdot 56 \text{ г/моль} = 1,10 \text{ г};$$

$$M(\text{KCl}) = 74,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KCl}) = \nu(\text{KCl}) \cdot M(\text{KCl}) = 0,0777 \text{ моля} \cdot 74,5 \text{ г/моль} = 5,79 \text{ г};$$

$$M(\text{KClO}_3) = 112,5 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} m(\text{KClO}_3) &= \nu(\text{KClO}_3) \cdot M(\text{KClO}_3) = \\ &= 0,00268 \text{ моля} \cdot 112,5 \text{ г/моль} = 0,302 \text{ г}. \end{aligned}$$

Рассчитав массы хлороводорода и хлора, поглощенных раствором щелочи, определим массу конечного раствора:

$$m_{\text{конеч}}(\text{р-ра}) = m_{\text{исх}}(\text{р-ра}) + m(\text{HCl}) + m(\text{Cl}_2);$$

$$M(\text{Cl}_2) = 71 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Cl}_2) = \nu(\text{Cl}_2) \cdot M(\text{Cl}_2) = 0,00804 \text{ моля} \cdot 71 \text{ г/моль} = 0,571 \text{ г};$$

$$M(\text{HCl}) = 36,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HCl}) = \nu(\text{HCl}) \cdot M(\text{HCl}) = 0,0643 \text{ моля} \cdot 36,5 \text{ г/моль} = 2,347 \text{ г};$$

$$m_{\text{конеч}}(\text{р-ра}) = 40 + 2,347 + 0,571 = 42,92 \text{ г}.$$

Определим массовые доли растворенных веществ в конечном растворе:

$$W(\text{KOH}) = m(\text{KOH}) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = 1,10 \text{ г} : 42,92 \text{ г} \cdot 100 \% = 2,56 \%;$$

$$W(\text{KCl}) = m(\text{KCl}) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = 5,79 \text{ г} : 42,92 \text{ г} \cdot 100 \% = 13,49 \%;$$

$$\begin{aligned} W(\text{KClO}_3) &= m(\text{KClO}_3) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = \\ &= 0,302 \text{ г} : 42,92 \text{ г} \cdot 100 \% = 0,70 \%. \end{aligned}$$

Итак, в конечном растворе находятся 2,56 % гидроксида калия KOH, 13,49 % хлорида калия KCl и 0,70 % хлората калия KClO₃.

ПРИМЕЧАНИЕ



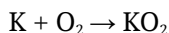
Задачи 8 и 21 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

2.2. Подгруппа кислорода

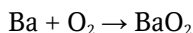
Элементы VI группы периодической системы называют халькогенами, так как, подобно галогенам, образующим схожие по свойствам галогениды, они образуют оксиды, сульфиды, селениды. В органических соединениях спирты и тиолы также обладают схожими свойствами.

Неорганическая химия кислорода связана в основном со свойствами оксидов, пероксидов и надпероксидов металлов.

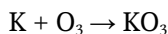
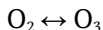
Наиболее активные щелочные металлы (калий, рубидий, цезий) при окислении кислородом образуют надпероксиды:



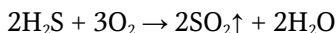
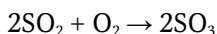
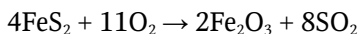
Щелочноземельные металлы, натрий при окислении кислородом образуют пероксиды:



Кроме того, часто затрагиваются темы озона, озонирования воздуха или чистого кислорода и химических свойств озона. Образование озонидов:



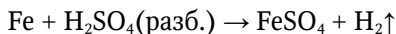
Неорганическая химия серы в расчетных задачах — это химия пирита, серной кислоты, оксидов серы и сероводорода:



Особенностью серной кислоты и оксида серы (VI) является то, что при растворении оксида серы в кислоте образуется устойчивый раствор — олеум. Это обусловлено тем, что при недостатке воды для образования серной кислоты из оксидов образуются полисерные кислоты $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_7$, $\text{H}_2\text{S}_3\text{O}_{10}$ и т. д. Во многих руководствах по решению задач тема олеумов выделена отдельно. Как следствие, концентрированная серная кислота является

сильнейшим дегидратирующим агентом. В ее присутствии обугливаются углеводы, дегидратируются спирты и другие соединения.

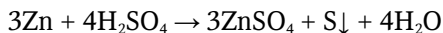
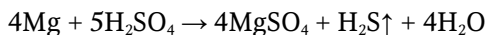
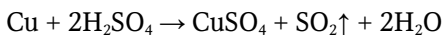
Химические свойства серной кислоты по отношению к металлам во многом зависят от ее концентрации. Разбавленная серная кислота ведет себя, как обычные кислоты. Активные металлы, стоящие в ряду напряжений левее водорода, вытесняют водород из разбавленной серной кислоты:



Медь стоит в ряду напряжений после водорода, поэтому разбавленная серная кислота не действует на медь:



Концентрированная серная кислота является сильным окислителем. Она окисляет многие металлы. Продуктами восстановления кислоты обычно является оксид серы (IV). Сероводород и сера (H_2S и S) образуются в реакциях кислоты с активными металлами: магнием, кальцием, натрием, калием и др. Примеры реакций:



Цинк как активный металл может образовывать с концентрированной серной кислотой сернистый газ, элементарную серу и даже сероводород, а медь — менее активный металл. При взаимодействии с концентрированной серной кислотой восстанавливает ее до сернистого газа.

Серная кислота высокой концентрации (практически безводная) не взаимодействует с железом в результате пассивации металла. Явление пассивации связано с образованием на поверхности металла прочной сплошной пленки, состоящей из оксидов или других любых соединений, которая препятствует контакту металла с кислотой. Пассивируются также алюминий, никель, хром, титан. Разбавленная же кислота пассивирует свинец и очень медленно реагирует с оловом и никелем.

Разные металлы обладают разной активностью по отношению к разбавленной и концентрированной серной кислоте и образуют с ней различные продукты реакций. На этом основано множество задач, поэтому знание химических свойств серной кислоты тяжело переоценить.

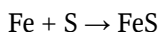
Сера. Решение задач

Задача 2

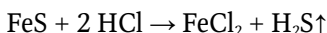
☉ Продукты, полученные после прокаливания смеси серы с железом, растворили в соляной кислоте. Произошло полное растворение и выделилось 8,96 л газа, после сгорания которого образовалось 0,2 моля другого газа. Определить состав исходной смеси.

Ⓛ Решение.

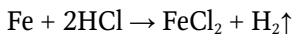
При прокаливании серы с железом образуется сульфид железа (II) по реакции:



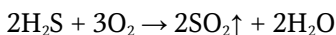
Образованный сульфид активно реагирует с соляной кислотой:



Если в смеси был избыток железа, тогда при реакции с соляной кислотой он также реагирует с выделением газа:



При сгорании сероводорода образуется сернистый газ:



Известно, что после растворения продуктов прокаливания в соляной кислоте выделилось 8,96 л газа. Определим его количество.

$$v = V : V_M = 8,96 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,4 \text{ моля.}$$

Итак, после сгорания 0,4 моля газа образовалось 0,2 моля другого газа (сернистый газ SO_2).

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции горения сероводорода, из 1 моля сероводорода образуется 1 моль сернистого газа. Следовательно, 0,2 моля сернистого газа образовалось из 0,2 моля сероводорода. Это меньше 0,4 моля, значит, газ, выделившийся после растворения продуктов прокаливания в соляной кислоте, содержал не только сероводород, но и водород. Его количество равно разнице между общим количеством газов и количеством сероводорода:

$$v(\text{H}_2) = 0,4 - 0,2 = 0,2 \text{ моля.}$$

Итак, полученная при растворении продуктов прокаливания в соляной кислоте газовая смесь состояла из 0,2 моля сероводорода и 0,2 моля водорода.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций железа и сульфида железа с соляной кислотой, 1 моль Fe образует 1 моль H_2 , а 1 моль FeS образует 1 моль H_2S .

Следовательно, 0,2 моля водорода образовалось из 0,2 моля железа, а 0,2 моля сероводорода образовалось из 0,2 моля сульфида железа.

Итак, продукты прокаливания состояли из 0,2 моля сульфида железа и избытка 0,2 моля железа.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции образования сульфида железа, 1 моль Fe реагирует с 1 молекул S, образуя 1 моль FeS. Следовательно, при образовании 0,2 моля сульфида железа израсходовано 0,2 моля железа и 0,2 моля серы.

Исходная смесь железа и серы содержала $0,2 + 0,2 = 0,4$ моля железа и 0,2 моля серы.

Определим их массы:

$$A_r(\text{Fe}) = 56;$$

$$m(\text{Fe}) = \nu(\text{Fe}) \cdot M(\text{Fe}) = 0,4 \text{ моля} \cdot 56 \text{ г/моль} = 22,4 \text{ г};$$

$$A_r(\text{S}) = 32;$$

$$m(\text{S}) = \nu(\text{S}) \cdot M(\text{S}) = 0,2 \text{ моля} \cdot 32 \text{ г/моль} = 6,4 \text{ г}.$$

Итак, в исходной смеси находилось 22,4 г железа и 6,4 г серы.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 28 имеет аналогичное решение. Задача 4, касающаяся специфических свойств серы, решается с помощью простой пропорции по молярным массам веществ. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 5

- ☉ Сколько мл 64%-го раствора серной кислоты плотностью 1,52 г/мл необходимо прибавить к 323 г 30%-го олеума, чтобы получить 10%-й олеум?

🔊 Решение.

В разд. 1.4 олеумы были упомянуты. Как говорилось ранее, олеум – раствор триоксида серы SO_3 в серной кислоте.

Способ I.

Примем искомый объем 64%-го раствора серной кислоты равным x мл.

Определим массу серной кислоты и воды в данном растворе:

$$m(\text{р-ра } \text{H}_2\text{SO}_4) = \rho \cdot V = 1,52 \text{ г/мл} \cdot x \text{ мл} = 1,52x \text{ г};$$

$$m(\text{H}_2\text{SO}_4) = m(\text{р-ра } \text{H}_2\text{SO}_4) \cdot W(\text{H}_2\text{SO}_4) : 100 \% =$$

$$= 1,52x \text{ г} \cdot 64 \% : 100 \% = 0,9728x \text{ г};$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = m(\text{р-ра } \text{H}_2\text{SO}_4) - m(\text{H}_2\text{SO}_4) =$$

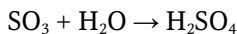
$$= 1,52x - 0,9728x = 0,5472x \text{ г}.$$

Определим массу серной кислоты и оксида серы SO_3 в 30%-м олеуме:

$$m(\text{SO}_3) = m(\text{олеума}) \cdot W(\text{SO}_3) : 100 \% = 323 \text{ г} \cdot 30 \% : 100 \% = 96,9 \text{ г};$$

$$m(\text{H}_2\text{SO}_4) = m(\text{олеума}) - m(\text{SO}_3) = 323 - 96,9 = 226,1 \text{ г}.$$

При смешении происходит реакция образования серной кислоты:



При смешении 64%-го раствора серной кислоты и 30 % олеума образуется 10%-й олеум. Это означает, что в избытке находится оксид серы.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, вода и оксид серы реагируют в мольном соотношении 1 : 1. Следовательно, количество прореагировавшего оксида серы равно количеству воды, находившейся в 64%-м растворе серной кислоты. Определим это количество:

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{H}_2\text{O}) = m(\text{H}_2\text{O}) : M(\text{H}_2\text{O}) = 0,5472x \text{ г} : 18 \text{ г/моль} = 0,0304x \text{ молей};$$

$$v(\text{H}_2\text{O}) = v(\text{прореаг. } \text{SO}_3) = 0,0304x \text{ молей}.$$

Определим начальное количество оксида серы:

$$M(\text{SO}_3) = 80 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{SO}_3) = m(\text{SO}_3) : M(\text{SO}_3) = 96,9 \text{ г} : 80 \text{ г/моль} = 1,211 \text{ моля.}$$

Оставшееся количество оксида серы

$$v_{\text{кон}}(\text{SO}_3) = v_{\text{исх}}(\text{SO}_3) - v(\text{прореаг. SO}_3) = (1,211 - 0,0304x) \text{ молей.}$$

Оставшаяся масса оксида серы:

$$\begin{aligned} m(\text{SO}_3) &= v(\text{SO}_3) \cdot M(\text{SO}_3) = (1,211 - 0,0304x) \text{ молей} \cdot 80 \text{ г/моль} = \\ &= (96,9 - 2,432x) \text{ г.} \end{aligned}$$

Конечная масса образованного 10%-го олеума:

$$\begin{aligned} m(10\% \text{ олеума}) &= m(30\% \text{ олеума}) + m(64\text{-й серной кислоты}) = \\ &= (323 + 1,52x) \text{ г.} \end{aligned}$$

Для получения уравнения применим формулу массовой доли оксида серы:

$$\begin{aligned} W(\text{SO}_3) &= m(\text{SO}_3) : m(\text{олеума}) \cdot 100\% = \\ &= (96,9 - 2,432x) \text{ г} : (323 + 1,52x) \text{ г} \cdot 100\% = 10\%. \end{aligned}$$

Получаем уравнение:

$$100(96,9 - 2,432x) = 10(323 + 1,52x);$$

$$9690 - 243,2x = 3230 + 15,2x;$$

$$258,4x = 6460;$$

$$x = 25.$$

Итак, к 323 г 30%-го олеума для получения 10%-го олеума необходимо прибавить 25 мл 64%-го раствора серной кислоты.

Способ II.

Данный способ решения достаточно оригинален.

Представим смешиваемые и конечный растворы как растворы SO_3 в воде и применим правило креста.

Определим содержание оксида серы в 64%-м растворе серной кислоты:

98 г H_2SO_4 содержит 80 г SO_3 ;

64%-й р-р H_2SO_4 содержит y_1 % SO_3 ;

$$y_1 = 64 \cdot 80 : 98 = 52,24.$$

Таким образом, 64%-й раствор серной кислоты — 52,24 % раствор оксида серы.

Определим содержание оксида серы в 30%-м олеуме. В олеуме 30 % оксида серы и 70 % серной кислоты. Определим содержание воды:

98 г H_2SO_4 содержит 18 г H_2O ;

70%-й р-р H_2SO_4 содержит y_2 % H_2O ;

$$y_2 = 70 \cdot 18 : 98 = 12,86.$$

Таким образом, 30%-й олеум — 12,86%-й раствор воды или 87,14%-й раствор оксида серы.

Так же определим содержание оксида серы в 10%-м олеуме. В олеуме 10 % оксида серы и 90 % серной кислоты. Определим содержание воды:

98 г H_2SO_4 содержит 18 г H_2O ;

90%-й р-р H_2SO_4 содержит y_3 % H_2O ;

$$y_3 = 90 \cdot 18 : 98 = 16,53.$$

Таким образом, 10%-й олеум — 16,53%-й раствор воды или 83,47%-й раствор оксида серы.

Итак, необходимо смешать 87,14 и 52,24%-е растворы SO_3 в воде, чтобы получить 83,47%-й раствор.

Применим «правило креста» (см. задачу 1 в разд. 1.4)

87,14		(83,47 – 52,24)
	83,47	
52,24		(87,14 – 83,47)

Чтобы, смешивая 87,14 и 52,24%-е растворы, получить 83,47%-й раствор, исходные растворы необходимо взять в массовом отношении 31,23 : 3,67 или 8,5 : 1.

Необходимая масса 64%-го раствора серной кислоты равна

$$323 : 8,5 = 38 \text{ г.}$$

Необходимый объем 64%-го раствора серной кислоты равен

$$V = m : \rho = 38 \text{ г} : 1,52 \text{ г/мл} = 25 \text{ мл.}$$

Итак, к 323 г 30%-го олеума для получения 10%-го олеума необходимо прибавить 25 мл 64%-го раствора серной кислоты.

ПРИМЕЧАНИЕ



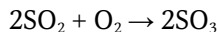
Задачи 6, 12, 21, 22 и 24 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 7

☉ В контактный аппарат для окисления сернистого газа подают воздух, содержащий 10 % сернистого газа. Определить процентный состав газов, выходящих из контактного аппарата, если сернистый газ окислился полностью.

☉ Решение.

Сернистый газ окисляется кислородом воздуха до оксида серы (VI):



Допустим, объем исходной смеси газов был равен 1 л.

Состав исходной смеси газов:

$$V(\text{SO}_2) = \varphi \cdot V(\text{смеси}) : 100 \% = 10 \% \cdot 1 \text{ л} : 100 \% = 0,1 \text{ л};$$

$$V(\text{воздуха}) = V(\text{смеси}) - V(\text{SO}_2) = 1 \text{ л} - 0,1 \text{ л} = 0,9 \text{ л.}$$

Воздух на 4/5 состоит из азота и на 1/5 из кислорода. Определим объемы кислорода и азота в исходной смеси:

$$V(\text{N}_2) = V(\text{смеси}) \cdot 4/5 = 0,9 \cdot 4/5 = 0,72 \text{ л};$$

$$V(\text{O}_2) = V(\text{смеси}) \cdot 1/5 = 0,9 \cdot 1/5 = 0,18 \text{ л.}$$

Итак, в исходной газовой смеси объемом 1 л находилось 0,72 л N_2 , 0,18 л O_2 и 0,1 л SO_2 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 2 моля SO_2 реагирует с 1 молем O_2 , при этом образуется 2 моля SO_3 . Сернистый газ окислился полностью, так как находился в недостатке. Составим пропорцию:

2 моля SO_2 реагируют с 1 молем O_2 , при этом образуется 2 моля SO_3 ;

0,1 л SO_2 реагирует с x л O_2 , при этом образуется y л SO_3 ;

$$x = 0,1 \cdot 1 : 2 = 0,05; y = 0,1 \cdot 2 : 2 = 0,1.$$

В реакцию вступило 0,05 л кислорода, израсходовался весь сернистый газ, и образовалось 0,1 л оксида серы (VI). Состав конечной газовой смеси:

$$V_{\text{кон}}(N_2) = V_{\text{исх}}(N_2) = 0,72 \text{ л};$$

$$V_{\text{кон}}(O_2) = V_{\text{исх}}(O_2) - V(\text{прореаг. } O_2) = 0,18 - 0,05 = 0,13 \text{ л};$$

$$V_{\text{кон}}(SO_3) = V(\text{образ. } SO_3) = 0,1 \text{ л}.$$

Общий объем конечной смеси равен:

$$V(\text{смеси}) = 0,72 + 0,13 + 0,1 = 0,95 \text{ л}.$$

Определим процентный состав смеси газов, выходящих из контактного аппарата:

$$\varphi(N_2) = V(N_2) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,72 \text{ л} : 0,95 \text{ л} \cdot 100 \% = 75,8 \%;$$

$$\varphi(O_2) = V(O_2) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,13 \text{ л} : 0,95 \text{ л} \cdot 100 \% = 13,7 \%;$$

$$\varphi(SO_3) = V(SO_3) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,1 \text{ л} : 0,95 \text{ л} \cdot 100 \% = 10,5 \%.$$

Смесь газов, выходящих из контактного аппарата, содержит 75,8 % азота N_2 , 13,7 % кислорода O_2 и 10,5 % оксида серы SO_3 .

ПРИМЕЧАНИЕ



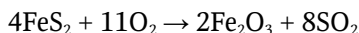
Задачи 1, 3, 13, 18, 19, 26 и 27 имеют аналогичное решение. Задачи 8 и 11 являются обычными задачами на смеси. Типовые решения данного типа задач рассмотрены в разд. 1.4. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 9

При обжиге 124,8 г пирита получили 44,8 л оксида серы (IV), который предварительно тщательно очистили от примесей, а затем пропустили через 500 мл 25%-го раствора гидроксида натрия плотностью 1,28 г/мл. Какое количество бихромата калия можно восстановить образовавшейся солью в растворе, подкисленном серной кислотой? Вычислить процентное содержание примесей в пирите.

Решение.

Пирит — дисульфид железа FeS_2 . Запишем уравнение его высокотемпературного обжига:



Определим количество выделившегося оксида серы (IV):

$$v(\text{SO}_2) = V : V_M = 44,8 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 2 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 4 моля FeS_2 при обжиге дают 8 молей SO_2 . Составим пропорцию:

$$4 \text{ моля } \text{FeS}_2 \text{ дают } 8 \text{ молей } \text{SO}_2;$$

$$x \text{ молей } \text{FeS}_2 \text{ дают } 2 \text{ моля } \text{SO}_2;$$

$$x = 4 \cdot 2 : 8 = 1.$$

В исходной навеске пирита находился 1 моль FeS_2 . Определим его массу:

$$M(\text{FeS}_2) = 56 + 2 \cdot 32 = 120 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{FeS}_2) = v(\text{FeS}_2) \cdot M(\text{FeS}_2) = 1 \text{ моль} \cdot 120 \text{ г/моль} = 120 \text{ г.}$$

Навеска пирита массой 124,8 г содержала 120 г FeS_2 . Масса примесей в навеске пирита составляла $124,8 - 120 = 4,8$ г. Вычислим процентное содержание примесей в пирите:

$$\begin{aligned} W(\text{примесей}) &= m(\text{примесей}) : m(\text{пирита}) \cdot 100 \% = \\ &= 4,8 \text{ г} : 124,8 \text{ г} \cdot 100 \% = 3,85 \%. \end{aligned}$$

Итак, пирит содержал в своем составе 3,85 % посторонних примесей.

Определим, какая соль и в каком количестве образовалась при растворении выделившегося сернистого газа в растворе щелочи. Определим количество гидроксида натрия в растворе:

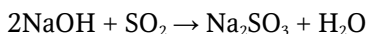
$$m(\text{р-ра NaOH}) = \rho \cdot V = 1,28 \text{ г/мл} \cdot 500 \text{ мл} = 640 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{NaOH}) &= m(\text{р-ра NaOH}) \cdot W(\text{NaOH}) : 100 \% = \\ &= 640 \text{ г} \cdot 25 \% : 100 \% = 160 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{NaOH}) = 40 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} \nu(\text{NaOH}) &= m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) = \\ &= 160 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 4 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Итак, в раствор, содержащий 4 моля NaOH, добавили 2 моля SO₂. Таким образом, на 2 молекулы гидроксида натрия приходится 1 молекула оксида серы. Запишем уравнение реакции с такими же стехиометрическими коэффициентами:



В данном случае образуется средняя соль — сульфит натрия Na₂SO₃.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, количество сульфита натрия равно количеству вступившего в реакцию оксида серы, то есть 2 моля.

Запишем уравнение реакции полученного сульфита натрия с бихроматом калия в подкисленном серной кислотой водном растворе:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, сульфит натрия в количестве 3 молей может восстановить 1 моль бихромата калия. Составим пропорцию:

$$3 \text{ моля Na}_2\text{SO}_3 \text{ восстановит } 1 \text{ моль K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7;$$

$$2 \text{ моля Na}_2\text{SO}_3 \text{ восстановит } y \text{ молей K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7;$$

$$y = 1 \cdot 2 : 3 = 2/3.$$

Следовательно, образовавшейся солью можно восстановить 2/3 моля бихромата калия.

Определим массу бихромата калия:

$$M(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = 2 \cdot 39 + 2 \cdot 52 + 7 \cdot 16 = 294 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = \nu(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) \cdot M(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = 2/3 \text{ моля} \cdot 294 \text{ г/моль} = 196 \text{ г}.$$

Итак, образовавшейся солью можно восстановить 196 г бихромата калия.

ПРИМЕЧАНИЕ



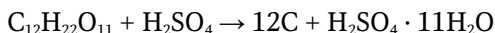
Задачи 16, 17 и 23 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 10

☉ Сахарную пудру обработали концентрированной серной кислотой. Получилась газовая смесь. Углерод окислился до CO_2 . При пропускании газовой смеси через бромную воду объем смеси сократился на 10,752 л. Вычислить массу сахара. Растворимостью CO_2 в воде пренебречь.

☪ Решение.

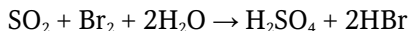
При обработке серной кислотой на первой стадии сахар обугливается:



Далее углерод окисляется концентрированной серной кислотой до углекислого газа:



При пропускании газовой смеси через бромную воду сернистый газ вступает в реакцию с растворенным бромом и поглощается раствором:

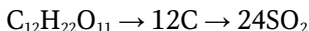


Таким образом, можно сделать вывод, что значение, на которое уменьшился объем пропускаемой через бромную воду газовой смеси, равно объему сернистого газа SO_2 .

Определим количество сернистого газа SO_2 :

$$\nu(\text{SO}_2) = V : V_M = 10,752 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,48 \text{ моля}.$$

Комбинируя уравнения первой и второй реакций, можно получить следующую схему:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, из 1 моля сахарозы при обработке концентрированной серной кислотой образуется 24 моля сернистого газа SO_2 . Составим пропорцию:

из 1 моля сахарозы образуется 24 моля сернистого газа;

из x молей сахарозы образуется 0,48 моля сернистого газа;

$$x = 0,48 \cdot 1 : 24 = 0,02.$$

Количество взятого сахара равно 0,02 моля. Определим его массу:

$$M(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = 12 \cdot 12 + 22 \cdot 1 + 11 \cdot 16 = 342 \text{ г/моль}.$$

$$m(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) = \nu(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) \cdot M(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}) =$$

$$= 0,02 \text{ моля} \cdot 342 \text{ г/моль} = 6,84 \text{ г}.$$

Масса сахарной пудры была равна 6,84 г.

Задача 14

☉ Для растворения угля, меди и серы потребовалось 120 г 98%-го раствора серной кислоты. При пропускании парогазовой смеси через раствор щелочи масса раствора увеличилась на 107,2 г. А при пропускании через образованный раствор горячего воздуха поглотилось 13,44 л кислорода. Сколько граммов воды потребуется для перевода сульфата меди, образовавшегося в результате взаимодействия меди с серной кислотой, в медный купорос?

☉ Решение.

Данная задача весьма интересна с математической точки зрения. При видимой нехватке исходных данных она решается достаточно легко.

Мы имеем 3 компонента исходной смеси с неизвестной общей массой и 3 численных значения. Построим систему из трех уравнений с тремя неизвестными.

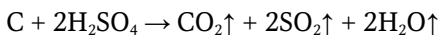
Для начала введем переменные. В качестве переменных выберем количества молей компонентов исходной смеси:

$$v(\text{C}) = x \text{ молей};$$

$$v(\text{Cu}) = y \text{ молей};$$

$$v(\text{S}) = z \text{ молей}.$$

Уголь при растворении в концентрированной серной кислоте образует углекислый и сернистый газы:



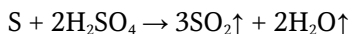
Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, x молей угля взаимодействует с $2x$ молями серной кислоты, образуется x молей углекислого газа, $2x$ молей сернистого газа и $2x$ молей паров воды.

Медь при растворении в концентрированной серной кислоте образует сернистый газ и сульфат меди:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, y молей меди взаимодействует с $2y$ молями серной кислоты, образуется y молей сульфата меди, y молей сернистого газа и $2y$ молей паров воды.

Сера и концентрированная кислота конпропорционируют, образуя сернистый газ:



ПРИМЕЧАНИЕ



Конпропорционирование — процесс, обратный диспропорционированию. Это такой тип окислительно-восстановительной реакции, в котором реагируют атомы одного и того же элемента с разными степенями окисления, образуя атомы с одной степенью окисления, значение которой находится между исходными значениями. Например, сероводород и сернистый газ при реакции образуют серу: $2\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2 \rightarrow 3\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$. Из соединений серы со степенями окисления -2 и $+4$ образовалась сера со степенью окисления 0 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, z молей серы взаимодействует с $2z$ молей серной кислоты, образуется $3z$ молей сернистого газа и $2z$ молей паров воды.

Количество серной кислоты, которое было использовано при растворении трех веществ:

$$v(\text{H}_2\text{SO}_4) = (2x + 2y + 2z) \text{ молей.}$$

Определим количество израсходованной серной кислоты другим путем:

$$\begin{aligned} m(\text{H}_2\text{SO}_4) &= m(\text{р-ра H}_2\text{SO}_4) \cdot W(\text{H}_2\text{SO}_4) : 100 \% = \\ &= 120 \text{ г} \cdot 98 \% : 100 \% = 117,6 \text{ г.} \end{aligned}$$

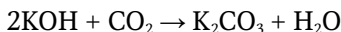
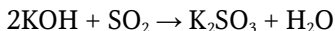
$$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98 \text{ г/моль.}$$

$$v(\text{H}_2\text{SO}_4) = m(\text{H}_2\text{SO}_4) : M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 117,6 \text{ г} : 98 \text{ г/моль} = 1,2 \text{ моля.}$$

Приравняв полученные значения, получим первое уравнение системы:

$$2x + 2y + 2z = 1,2.$$

Известно, что при пропускании парогазовой смеси через раствор щелочи масса раствора увеличилась на 107,2 г. В данном случае протекают реакции:



Выразим через переменные массу всех газообразных продуктов реакций, которые могут быть поглощены раствором щелочи (это углекислый и сернистый газы и пары воды).

При растворении угля образуется x молей углекислого газа, $2x$ молей сернистого газа и $2x$ молей паров воды.

При растворении меди образуется y молей сернистого газа и $2y$ молей паров воды.

При растворении серы образуется $3z$ молей сернистого газа и $2z$ молей паров воды.

Итого, образуется x молей углекислого газа, $(2x + y + 3z)$ молей сернистого газа и $(2x + 2y + 2z)$ молей паров воды. Определим массу этой парогазовой смеси:

$$M(\text{CO}_2) = 12 + 2 \cdot 16 = 44 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CO}_2) = \nu(\text{CO}_2) \cdot M(\text{CO}_2) = x \text{ молей} \cdot 44 \text{ г/моль} = 44x \text{ г};$$

$$M(\text{SO}_2) = 32 + 2 \cdot 16 = 64 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{SO}_2) = \nu(\text{SO}_2) \cdot M(\text{SO}_2) = (2x + y + 3z) \text{ молей} \cdot 64 \text{ г/моль} = \\ = M_r(\text{H}_2\text{O}) = 2 \cdot 1 + 16 = 18 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = \nu(\text{H}_2\text{O}) \cdot M(\text{H}_2\text{O}) = (2x + 2y + 2z) \text{ молей} \cdot 18 \text{ г/моль} = \\ = (36x + 36y + 36z) \text{ г}.$$

Масса парогазовой смеси:

$$m(\text{смеси газов}) = 44x + (128x + 64y + 192z) + (36x + 36y + 36z) = \\ = (208x + 100y + 228z) \text{ г}.$$

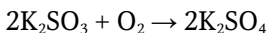
Приравняв данную массу к 107,2 г, получим второе уравнение системы:

$$208x + 100y + 228z = 107,2.$$

Известно, что при пропускании через образованный раствор горячего воздуха поглотилось 13,44 л кислорода. Определим его количество:

$$\nu(\text{O}_2) = V : V_M = 13,44 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,6 \text{ моля}.$$

С кислородом воздуха из образованного воздуха парогазовой смеси реагирует лишь сульфит калия:



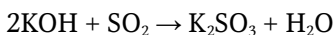
Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, на окисление 2 молей сульфита калия расходуется 1 моль кислорода. Составим пропорцию:

$$1 \text{ моль O}_2 \text{ окисляет } 2 \text{ моля K}_2\text{SO}_3;$$

$$0,6 \text{ моля O}_2 \text{ окисляет } a \text{ молей K}_2\text{SO}_3;$$

$$a = 0,6 \cdot 2 : 1 = 1,2.$$

Количество вступившего в реакцию сульфита калия равно 1,2 моля. Данное вещество образовано при поглощении сернистого газа раствором щелочи:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 1 моля сернистого газа образуется 1 моль сульфита калия. Следовательно, 1,2 моля сульфита калия образуется из 1,2 моля сернистого газа.

Как уже было показано выше, количество сернистого газа равно $(2x + y + 3z)$ молей или 1,2 моля. Получили третье уравнение системы:

$$2x + y + 3z = 1,2.$$

Итак, получили систему уравнений:

$$2x + 2y + 2z = 1,2;$$

$$208x + 100y + 228z = 107,2;$$

$$2x + y + 3z = 1,2.$$

Вычитая из первого уравнения третье, получаем:

$$y - z = 0 \text{ или } y = z.$$

Третье уравнение преобразуем следующим образом:

$$2x + z + 3z = 1,2;$$

$$x = 0,6 - 2z.$$

Подставляя $y = z$ и $x = 0,6 - 2z$ во второе уравнение, имеем:

$$208(0,6 - 2z) + 100z + 228z = 107,2;$$

$$124,8 - 416z + 328z = 107,2;$$

$$88z = 17,6;$$

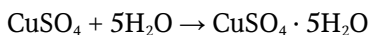
$$z = 0,2;$$

$$y = 0,2;$$

$$x = 0,2.$$

Итак, в исходной смеси содержалось 0,2 моля углерода, 0,2 моля серы и 0,2 моля меди.

Определим, сколько граммов воды потребуется для перевода сульфата меди, образовавшегося в результате взаимодействия меди с серной кислотой, в медный купорос по реакции:



Как было определено выше, при растворении смеси образовано $y = 0,2$ моля сульфата меди.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при реакции с 1 молем сульфата меди расходуется 5 молей воды. Составим пропорцию:

1 моль CuSO_4 реагирует с 5 молями H_2O ;

0,2 моля CuSO_4 реагирует с b молями H_2O ;

$$b = 0,2 \cdot 5 : 1 = 1.$$

Количество необходимой для образования кристаллогидрата воды равно 1 моль. Найдём её массу:

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = \nu(\text{H}_2\text{O}) \cdot M(\text{H}_2\text{O}) = 1 \text{ моль} \cdot 18 \text{ г/моль} = 18 \text{ г}.$$

Для перевода сульфата меди, образовавшегося в результате взаимодействия меди с серной кислотой, в медный купорос потребуется 18 г воды.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 25 имеет аналогичное решение. Задачи 15, 20 и 29 решаются простой пропорцией по молярным массам веществ. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Кислород. Решение задач

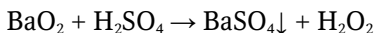
Задача 1

- 33,8 г пероксида бария BaO_2 обработали раствором серной кислоты. Полученный осадок отфильтровали, и 20 г полученного фильтрата оставили стоять открытым на свету. Через некоторое время к 10 г фильтрата добавили йодид калия. В результате выделилось 2,54 г йода.

Определить, как изменилась концентрация полученного вещества. Растворимость йода пренебречь.

🕒 Решение.

При взаимодействии пероксида бария с серной кислотой образуется пероксид водорода по реакции:



Определим количество пероксида бария, вступившего в реакцию:

$$M(\text{BaO}_2) = 137 + 2 \cdot 16 = 169 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{BaO}_2) = m(\text{BaO}_2) : M(\text{BaO}_2) = 33,8 \text{ г} : 169 \text{ г/моль} = 0,2 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 1 моля пероксида бария образуется 1 моль пероксида водорода. Следовательно, из 0,2 моля пероксида бария образуется 0,2 моля пероксида водорода.

Определим массу пероксида водорода в свежеприготовленном фильтрате:

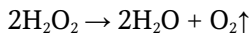
$$M(\text{H}_2\text{O}_2) = 2 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 34 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2\text{O}_2) = \nu(\text{H}_2\text{O}_2) \cdot M(\text{H}_2\text{O}_2) = 0,2 \text{ моля} \cdot 34 \text{ г/моль} = 6,8 \text{ г.}$$

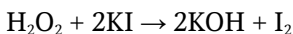
Масса полученного фильтрата составила 20 г. Определим массовую долю пероксида водорода в свежеприготовленном фильтрате:

$$W(\text{H}_2\text{O}_2) = m(\text{H}_2\text{O}_2) : m(\text{фильтрата}) \cdot 100 \% = 6,8 \text{ г} : 20 \text{ г} \cdot 100 \% = 34 \%.$$

При стоянии на свету пероксид водорода разлагается с выделением водорода по реакции:



Оставшийся в растворе пероксид водорода реагирует с йодидом калия:



Определим количество выделившегося йода:

$$M(\text{I}_2) = 2 \cdot 127 = 254 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{I}_2) = m(\text{I}_2) : M(\text{I}_2) = 2,54 \text{ г} : 254 \text{ г/моль} = 0,01 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль пероксида водорода образует 1 моль йода. Следовательно, 0,01 моля пероксида водорода образует 0,01 моля йода.

Определим массу пероксида водорода в фильтрате после стояния на свету:

$$m(\text{H}_2\text{O}_2) = \nu(\text{H}_2\text{O}_2) \cdot M(\text{H}_2\text{O}_2) = 0,01 \text{ моля} \cdot 34 \text{ г/моль} = 0,34 \text{ г.}$$

Масса взятой после стояния на свету для анализа порции фильтрата равна 10 г. Определим массовую долю пероксида водорода в фильтрате после стояния на свету:

$$\begin{aligned} W(\text{H}_2\text{O}_2) &= m(\text{H}_2\text{O}_2) : m(\text{фильтрата}) \cdot 100 \% = \\ &= 0,34 \text{ г} : 10 \text{ г} \cdot 100 \% = 3,4 \%. \end{aligned}$$

Итак, при стоянии на свету концентрация пероксида водорода уменьшилась от 34 % до 3,4 %, то есть в 10 раз.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 2, 8 и 12 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 6

- ⊕ Хлороводород, полученный из 100 г смеси хлорида калия и нитрата калия, растворили в 70,8 мл воды. Вычислить процентное содержание хлороводорода в полученном растворе, если известно, что при прокаливании 100 г исходной смеси сухой остаток весит 93,6 г.

- Ⓛ Решение.

Из солей, входящих в исходную смесь, при прокаливании разлагается лишь нитрат калия:



При этом в сухом остатке остается нитрит калия, а кислород покидает исходную смесь солей. Таким образом, по изменению масс исходной смеси можно определить массу кислорода, выделившегося при прокаливании нитрата калия:

$$m(\text{O}_2) = m_{\text{исх}}(\text{смеси}) - m_{\text{конеч}}(\text{остатка}) = 100 - 93,6 = 6,4 \text{ г.}$$

Определим его количество:

$$M(\text{O}_2) = 2 \cdot 16 = 32 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{O}_2) = m(\text{O}_2) : M(\text{O}_2) = 6,4 \text{ г} : 32 \text{ г/моль} = 0,2 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при разложении 2 молей нитрата калия образуется 1 моль кислорода. Составим пропорцию:

при разложении 2 молей KNO_3 образуется 1 моль O_2 ;

при разложении x молей KNO_3 образуется 0,2 моля O_2 ;

$$x = 0,2 \cdot 2 : 1 = 0,4.$$

Следовательно, в исходной смеси солей присутствовало 0,4 моля нитрата калия. Определим его массу:

$$M(\text{KNO}_3) = 39 + 14 + 3 \cdot 16 = 101 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KNO}_3) = \nu(\text{KNO}_3) \cdot M(\text{KNO}_3) = 0,4 \text{ моля} \cdot 101 \text{ г/моль} = 40,4 \text{ г.}$$

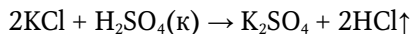
Хлорид калия составил вторую часть смеси:

$$m(\text{KCl}) = m(\text{смеси}) - m(\text{KNO}_3) = 100 - 40,4 = 59,6 \text{ г};$$

$$M(\text{KCl}) = 39 + 35,5 = 74,5 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{KCl}) = m(\text{KCl}) : M(\text{KCl}) = 59,6 \text{ г} : 74,5 \text{ г/моль} = 0,8 \text{ моля.}$$

Хлороводород из исходной смеси можно получить по реакции хлорида калия с концентрированной серной кислотой:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 2 молей хлорида калия образуется 2 моля хлороводорода. Следовательно, из 0,8 моля хлорида калия образуется 0,8 моля хлороводорода.

Определим массу полученного хлороводорода:

$$M(\text{HCl}) = 1 + 35,5 = 36,5 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HCl}) = \nu(\text{HCl}) \cdot M(\text{HCl}) = 0,8 \text{ моля} \cdot 36,5 \text{ г/моль} = 29,2 \text{ г.}$$

Полученный хлороводород растворили в 70,8 мл воды, образовался раствор, масса которого равна:

$$m(\text{р-ра}) = m(\text{воды}) + m(\text{HCl}) = 70,8 + 29,2 = 100 \text{ г.}$$

Вычислим процентное содержание хлороводорода в полученном растворе:

$$W(\text{HCl}) = m(\text{HCl}) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = 29,2 \text{ г} : 100 \text{ г} \cdot 100 \% = 29,2 \%.$$

Таким образом, из исходной смеси получен 29,2%-й раствор соляной кислоты.

Задача 9

- ☉ Средняя молярная масса смеси, состоящей из водорода и сероводорода, равна 26. Сколько литров этой смеси можно сжечь в 56 л озонированного кислорода, если средняя молярная масса последнего равна 44? Учтеть, что при сжигании сероводорода образуется оксид серы (IV).

🕒 Решение.

Определим состав исходной смеси водорода и сероводорода.

Возьмем 1 моль исходной смеси и определим, какое количество кислорода необходимо для ее сжигания.

Положим, количество водорода в смеси равно x молей. Тогда количество сероводорода равно $(1 - x)$ молей. Определим массу смеси:

$$M(\text{H}_2) = 2 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2) = \nu(\text{H}_2) \cdot M(\text{H}_2) = x \text{ молей} \cdot 2 \text{ г/моль} = 2x \text{ г};$$

$$M(\text{H}_2\text{S}) = 2 \cdot 1 + 32 = 34 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2\text{S}) = \nu(\text{H}_2\text{S}) \cdot M(\text{H}_2\text{S}) = (1 - x) \text{ молей} \cdot 34 \text{ г/моль} = (34 - 34x) \text{ г};$$

$$m(\text{смеси}) = m(\text{H}_2) + m(\text{H}_2\text{S}) = 2x + 34 - 34x = (34 - 32x) \text{ г.}$$

Средняя молярная масса смеси равна:

$$\begin{aligned} M_r(\text{смеси}) &= m(\text{смеси}) : \nu(\text{смеси}) = (34 - 32x) \text{ г} : 1 \text{ моль} = \\ &= (34 - 32x) = 26 \text{ г/моль}; \end{aligned}$$

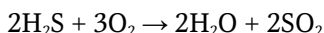
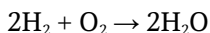
$$34 - 32x = 26;$$

$$32x = 8;$$

$$x = 0,25.$$

Итак, количество водорода в смеси равно 0,25 моля, сероводорода — 0,75 моля.

При сжигании исходной газовой смеси в кислороде протекают реакции:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции горения водорода, для сгорания 2 молей водорода необходим 1 моль кислорода. Составим пропорцию:

для сгорания 2 молей H_2 необходим 1 моль O_2 ;

для сгорания 0,25 моля H_2 необходимо a молей O_2 ;

$$a = 0,25 \cdot 1 : 2 = 0,125.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции горения сероводорода, для сгорания 2 молей сероводорода необходимо 3 моля кислорода. Составим пропорцию:

для сгорания 2 молей H_2S необходимо 3 моля O_2 ;

для сгорания 0,75 моля H_2S необходимо b молей O_2 ;

$$b = 0,75 \cdot 3 : 2 = 1,125.$$

Для сгорания 1 моля смеси водорода и сероводорода необходимо $0,125 + 1,125 = 1,25$ моля кислорода.

Переведем это количество в литры:

$$V(\text{исх. смеси } \text{H}_2 \text{ и } \text{H}_2\text{S}) = \nu \cdot V_M = 1 \text{ моль} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 22,4 \text{ л};$$

$$V(\text{O}_2) = \nu \cdot V_M = 1,25 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 28 \text{ л}.$$

Для сгорания 22,4 л исходной смеси водорода и сероводорода необходимо 28 л кислорода.

Определим состав 56 л озонированного кислорода. Количество газа равно:

$$v = V : V_M = 56 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 2,5 \text{ моля.}$$

Положим, количество кислорода в смеси равно y молей. Тогда количество озона равно $(2,5 - y)$ молей. Определим массу озонированного кислорода:

$$M(\text{O}_2) = 32 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{O}_2) = v(\text{O}_2) \cdot M(\text{O}_2) = y \text{ молей} \cdot 32 \text{ г/моль} = 32y \text{ г};$$

$$M(\text{O}_3) = 48 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{O}_3) = v(\text{O}_3) \cdot M(\text{O}_3) = (2,5 - y) \text{ молей} \cdot 48 \text{ г/моль} = \\ = (120 - 48y) \text{ г};$$

$$m(\text{смеси}) = m(\text{O}_2) + m(\text{O}_3) = 32x + 120 - 48y = (120 - 16y) \text{ г.}$$

Средняя молярная масса смеси равна:

$$M(\text{смеси}) = m(\text{смеси}) : v(\text{смеси}) = (120 - 16y) \text{ г} : 2,5 \text{ моля} = \\ = (48 - 6,4y) = 44 \text{ г/моль};$$

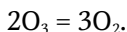
$$48 - 6,4y = 44;$$

$$6,4y = 4;$$

$$y = 0,625.$$

Итак, количество кислорода в смеси равно 0,625 моля, озона — 1,875 моля.

Для реакции горения 2 моля озона эквивалентны 3 молям кислорода:



Составим пропорцию:

$$2 \text{ моля } \text{O}_3 \text{ эквивалентны } 3 \text{ молям } \text{O}_2;$$

$$1,875 \text{ моля } \text{O}_3 \text{ эквивалентны } c \text{ молям } \text{O}_2;$$

$$c = 1,875 \cdot 3 : 2 = 2,8125.$$

Итак, исходный озонированный кислород в количестве 2,5 моля эквивалентен чистому кислороду в количестве $0,625 + 2,8125 = 3,4375$ моля.

Определим объем кислорода:

$$V(\text{O}_2) = \nu \cdot V_M = 3,4375 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 77 \text{ л.}$$

Итак, для сгорания 22,4 л исходной смеси водорода и сероводорода необходимо 28 л кислорода. 56 л озонированного кислорода эквивалентны 77 л чистого кислорода. Определим, сколько смеси водорода и сероводорода можно сжечь в 77 л чистого кислорода. Для этого составим пропорцию:

для сгорания 22,4 л смеси необходимо 28 л O_2 ;

для сгорания d л смеси необходимо 77 л O_2 ;

$$d = 22,4 \cdot 77 : 28 = 61,6.$$

Итак, для сгорания 61,6 л исходной смеси водорода и сероводорода необходимо 77 л кислорода, что эквивалентно 56 л озонированного кислорода.

То есть в 56 л озонированного кислорода можно сжечь 61,6 л исходной смеси водорода и сероводорода.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 3, 4 и 7 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 13

Ⓒ 6,8 г аммиака без остатка провзаимодействовало с 24 г озона. Полученные две кислоты растворили в воде. Вычислить в процентах массовые доли кислот в полученном растворе. Считать, что обе кислоты не разложились.

Ⓓ Решение.

Определим, в каком молярном соотношении были взяты аммиак и озон:

$$M(\text{NH}_3) = 17 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{NH}_3) = m(\text{NH}_3) : M(\text{NH}_3) = 6,8 \text{ г} : 17 \text{ г/моль} = 0,4 \text{ моля};$$

$$M(\text{O}_3) = 48 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{O}_3) = m(\text{O}_3) : M(\text{O}_3) = 24 \text{ г} : 48 \text{ г/моль} = 0,5 \text{ моля}.$$

Итак, исходные вещества были взяты в молярном соотношении 4 : 5, и, так как они провзаимодействовали без остатка, стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции перед NH_3 и O_3 соотносятся так же — 4 : 5.

Таким образом, при сгорании аммиака в озоне образуются азотная и азотистая кислоты по реакции:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при реакции 4 молей аммиака и 5 молей озона образуются 3 моля азотной кислоты и 1 моль азотистой кислоты. Составим пропорцию:

из 4 молей NH_3 и 5 молей O_3 образуются 3 моля HNO_3 и 1 моль HNO_2 ;

из 0,4 моля NH_3 и 0,5 моля O_3 образуется x молей HNO_3

и y молей HNO_2 ;

$$x = 0,5 \cdot 3 : 5 = 0,3;$$

$$y = 0,5 \cdot 1 : 5 = 0,1.$$

Таким образом, в результате реакции образовалось 0,3 моля азотной кислоты и 0,1 моля азотистой кислоты.

Масса образовавшегося при конденсации раствора равна сумме исходных масс аммиака и озона, так как масса не изменялась (все продукты реакции перешли в раствор):

$$m(\text{р-ра}) = m(\text{NH}_3) + m(\text{O}_3) = 6,8 + 24 = 30,8 \text{ г}.$$

Вычислим в процентах массовые доли кислот в полученном растворе:

$$M(\text{HNO}_3) = 63 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HNO}_3) = \nu(\text{HNO}_3) \cdot M(\text{HNO}_3) = 0,3 \text{ моля} \cdot 63 \text{ г/моль} = 18,9 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} W(\text{HNO}_3) &= m(\text{HNO}_3) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = \\ &= 18,9 \text{ г} : 30,8 \text{ г} \cdot 100 \% = 61,4 \%; \end{aligned}$$

$$M(\text{HNO}_2) = 47 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HNO}_2) = v(\text{HNO}_2) \cdot M(\text{HNO}_2) = 0,1 \text{ моля} \cdot 47 \text{ г/моль} = 4,7 \text{ г};$$

$$W(\text{HNO}_2) = m(\text{HNO}_2) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = \\ = 4,7 \text{ г} : 30,8 \text{ г} \cdot 100 \% = 15,3 \%$$

Таким образом, получен раствор, содержащий 61,4 % азотной кислоты и 15,3 % азотистой кислоты.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 5, 10 и 11 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

2.3. ПОДГРУППА АЗОТА

Азот — типичный неметалл, по электроотрицательности уступает лишь фтору и кислороду. Простое вещество N_2 обладает значительной устойчивостью. Чтобы азот вступил в реакцию, необходимы очень жесткие условия и катализаторы. Данный факт обуславливает его инертность в реакциях, рассматриваемых в большинстве задач на газовые смеси. Он не поглощается поглотительными склянками, что позволяет сразу определить объем азота в смеси.

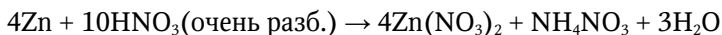
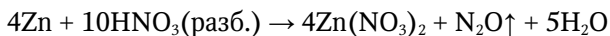
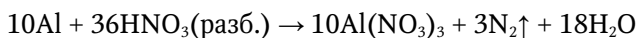
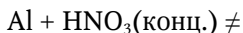
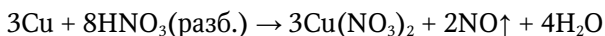
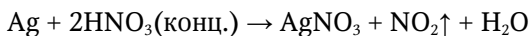
Характерным свойством азотной кислоты является ее ярко выраженная окислительная способность. Азотная кислота — один из энергичнейших окислителей. Многие неметаллы легко окисляются ею, превращаясь в соответствующие кислоты. Так, сера при кипячении с азотной кислотой постепенно окисляется в серную кислоту, фосфор — в фосфорную. Тлеющий уголек, погруженный в концентрированную азотную кислоту, ярко разгорается.

Азотная кислота действует почти на все металлы (за исключением золота, платины, тантала, родия, иридия), превращая их в нитраты, а некоторые металлы — в оксиды.

В зависимости от положения металла в электрохимическом ряду напряжений и концентрации азотной кислоты HN^{+5}O_3 могут образовываться совершенно разные продукты восстановления азота N^{+5} — от N^{+4} (NO_2) до N^{-3} (NH_3). А некоторые металлы не растворяются в азотной кислоте.

Железо, легко растворяющееся в разбавленной азотной кислоте, не растворяется в холодной концентрированной HNO_3 . Аналогичное действие азотная кислота оказывает на хром и алюминий. Эти металлы переходят под действием концентрированной азотной кислоты в пассивное состояние.

Для иллюстрации сказанного приведем несколько уравнений реакций металлов с азотной кислотой:

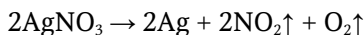
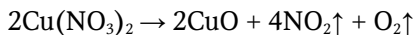


Какое из этих веществ образуется, то есть насколько глубоко восстанавливается азотная кислота в том или ином случае, зависит от природы восстановителя и от условий реакции, прежде всего от концентрации кислоты. Чем выше концентрации HNO_3 , тем менее глубоко она восстанавливается. При реакциях с концентрированной кислотой чаще всего выделяется NO_2 . При взаимодействии разбавленной кислоты с малоактивными металлами, например с медью, выделяется NO . В случае более активных металлов — железа, цинка — образуется N_2O . Сильно разбавленная азотная кислота взаимодействует с активными металлами — цинком, магнием, алюминием — с образованием иона аммония, дающего с кислотой нитрат аммония. Обычно одновременно образуется несколько продуктов.

Таким образом, при действии азотной кислоты различной концентрации так же, как и при действии концентрированной серной кислоты на любой металл, как правило, водород не выделяется, поскольку окисляющее действие кислородсодержащих кислот обусловлено не ионами водорода. При этом образуется еще более широкий круг возможных продуктов превращений.

Особенность солей азотной кислоты — нитратов — в том, что при их прокаливании также образуются различные продукты. В конечном ито-

ге в зависимости от природы металла могут образоваться как нитриты металлов, так и свободные металлы:



Нитриты образуются в основном при разложении нитратов щелочных металлов и магния. Свободные металлы образуются при разложении нитратов практически инертных металлов (серебро, золото и т. п.). В остальных случаях основным продуктом является оксид соответствующего металла.

Специфические свойства азотной кислоты и нитратов положены в основу многих задач. Ключевым фактором успеха при решении задач, касающихся данных превращений, является твердое знание химических свойств металлов по отношению к растворам кислот и их нитратов.

Неорганическая химия фосфора не так разнообразна. Задачи в основном связаны с фосфином PH_3 (аналогом аммиака) и фосфорными удобрениями — различными фосфатами, гидрофосфатами и дигидрофосфатами.

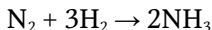
Азот. Решение задач

Задача 1

☉ Из 67,2 л азота и 224 л водорода получили аммиак. Затем аммиак перевели в азотную кислоту и получили 400 мл 40%-го раствора азотной кислоты плотностью 1,25 г/мл. Вычислить выход азотной кислоты из аммиака.

🕒 Решение.

Запишем уравнение образования аммиака:



Определим количества вступивших в реакцию веществ:

$$\nu(\text{N}_2) = V : V_M = 67,2 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 3 \text{ моля};$$

$$\nu(\text{H}_2) = V : V_M = 224 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 10 \text{ молей.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, азот и водород вступают в реакцию в мольном отношении 1 : 3. Исходное количество водорода более чем в три раза превышает количество азота, следовательно, в недостатке находился азот, и по его количеству мы будем рассчитывать количество образовавшегося аммиака.

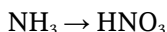
Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 1 моля азота образуется 2 моля аммиака. Составим пропорцию:

из 1 моля азота образуется 2 моля аммиака;

из 3 молей азота образуется x молей аммиака;

$$x = 3 \cdot 2 : 1 = 6.$$

В результате реакции образовалось 6 молей аммиака. Затем аммиак перевели в азотную кислоту по схеме:



Из 1 моля аммиака образуется 1 моль азотной кислоты, таким образом, из образовавшихся в первой реакции 6 молей аммиака должно было образоваться 6 молей азотной кислоты.

Определим ее теоретическую и практическую массы:

$$M(\text{HNO}_3) = 63 \text{ г/моль};$$

$$m_{\text{теор}}(\text{HNO}_3) = \nu_{\text{теор}}(\text{HNO}_3) \cdot M(\text{HNO}_3) =$$

$$= 6 \text{ молей} \cdot 63 \text{ г/моль} = 378 \text{ г};$$

$$m_{\text{практ}}(\text{р-ра HNO}_3) = \rho \cdot V = 1,25 \text{ г/мл} \cdot 400 \text{ мл} = 500 \text{ г};$$

$$m_{\text{практ}}(\text{HNO}_3) = m(\text{р-ра HNO}_3) \cdot W(\text{HNO}_3) : 100 \% =$$

$$= 500 \text{ г} \cdot 40 \% : 100 \% = 200 \text{ г};$$

$$\eta = m_{\text{практ}} : m_{\text{теор}} \cdot 100 \% = 200 : 378 \cdot 100 \% = 52,9 \%.$$

Таким образом, выход производственной схемы получения азотной кислоты из аммиака составляет 52,9 %.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 2, 3, 4 и 6 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 5

☉ При термическом разложении какой-то соли образовалось 7,2 г воды и 4,48 л газа, плотность которого по гелию равна 7. Найти формулу соли. Вычислить, сколько литров газа образуется при обработке исходного количества соли раствором щелочи.

☉ Решение.

Плотность неизвестного газа X по гелию равна 7. Определим его молярную массу:

$$D_{\text{He}}(X) = M(X) : M(\text{He});$$

$$M(X) = D_{\text{He}}(X) \cdot M(\text{He}) = 7 \cdot 4 \text{ г/моль} = 28 \text{ г/моль}.$$

Такую молярную массу имеют следующие газы: N_2 , CO , C_2H_4 .

Исходное вещество представляет собой соль, то есть содержит катион и анион. Поскольку среди продуктов горения металлы и их соединения не содержатся, следовательно, в состав соли входит неметалл, способный образовывать катионы (азот или фосфор). Таким образом, можно сделать вывод, что образованным при разложении неизвестной соли газом является азот N_2 . Кроме атомов азота в состав соли входят атомы кислорода и водорода (так как кроме азота при разложении образуется и вода).

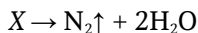
Определим количество воды и азота, образовавшихся при разложении:

$$v(\text{N}_2) = V : V_M = 4,48 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,2 \text{ моля};$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ г/моль};$$

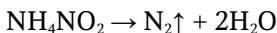
$$v(\text{H}_2\text{O}) = m(\text{H}_2\text{O}) : M(\text{H}_2\text{O}) = 7,2 \text{ г} : 18 \text{ г/моль} = 0,4 \text{ моля}.$$

Итак, известно, что при разложении неизвестной соли азот и вода образуются в молярном отношении $0,2 : 0,4 = 1 : 2$. Следовательно, стехиометрические коэффициенты в реакции соотносятся так же:



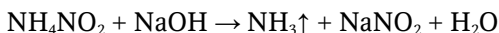
Если коэффициент перед X равен 1, то состав неизвестного соединения будет следующим: $\text{N}_2\text{H}_{2+2}\text{O}_{1+1}$ или $\text{N}_2\text{H}_4\text{O}_2$.

Неизвестная соль должна содержать катион (вероятно, водородное соединение азота) и анион (вероятно, остаток азотной или азотистой кислоты). Требованиям соответствует нитрит аммония NH_4NO_2 , при разложении которого, действительно, образуются вода и азот:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при разложении 1 моля нитрита натрия NH_4NO_2 образуется 1 моль азота N_2 . Следовательно, 0,2 моля азота N_2 образуется при разложении 0,2 моля нитрита натрия NH_4NO_2 .

Вычислим, сколько литров газа образуется при обработке исходного количества соли раствором щелочи. При обработке щелочью нитрита натрия выделяется аммиак:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при щелочном гидролизе 1 моля нитрита натрия NH_4NO_2 образуется 1 моль аммиака NH_3 . Следовательно, при щелочном гидролизе 0,2 моля нитрита натрия NH_4NO_2 образуется 0,2 моля аммиака NH_3 .

Определим объем выделившегося аммиака:

$$V = \nu \cdot V_M = 0,2 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 4,48 \text{ л.}$$

Таким образом, определено, что неизвестной солью является нитрит аммония NH_4NO_2 . При его гидролизе раствором щелочи выделится 4,48 л аммиака.

ПРИМЕЧАНИЕ



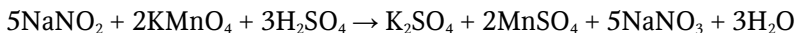
Задачи 7, 15 и 16 являются задачами на обычные газовые смеси и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 9

- ☉ При пропускании 20 л смеси диоксида азота и азота через раствор едкого натра образовались нитрит и нитрат натрия. На окисление нитрита натрия до нитрата в сернокислой среде израсходовалось 12,64 г перманганата калия. Определить процентный состав взятой смеси.

🕒 Решение.

Запишем уравнения протекающих реакций:



Определим количество перманганата калия KMnO_4 , израсходованного на окисление нитрита натрия NaNO_2 :

$$M(\text{KMnO}_4) = 39 + 55 + 4 \cdot 16 = 158 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{KMnO}_4) = m(\text{KMnO}_4) : M(\text{KMnO}_4) =$$

$$= 12,64 \text{ г} : 158 \text{ г/моль} = 0,08 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции окисления нитрита натрия, 2 моля перманганата калия окисляют 5 молей нитрита натрия. Составим пропорцию:

$$2 \text{ моля } \text{KMnO}_4 \text{ окисляют } 5 \text{ молей } \text{NaNO}_2;$$

$$0,08 \text{ моля } \text{KMnO}_4 \text{ окисляют } x \text{ молей } \text{NaNO}_2;$$

$$x = 0,08 \cdot 5 : 2 = 0,2.$$

Таким образом, в результате первой реакции образовалось 0,2 моля нитрита натрия NaNO_2 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции диспропорционирования диоксида азота, 2 моля диоксида азота приводят к образованию 1 моля нитрита натрия. Составим пропорцию:

$$2 \text{ моля } \text{NO}_2 \text{ образуют } 1 \text{ моль } \text{NaNO}_2;$$

$$y \text{ молей } \text{KMnO}_4 \text{ окисляют } 0,2 \text{ моля } \text{NaNO}_2;$$

$$y = 0,2 \cdot 2 : 1 = 0,4.$$

Таким образом, в исходной смеси газов присутствовало 0,4 моля диоксида азота NO_2 .

Определим его объем:

$$V(\text{NO}_2) = v \cdot V_M = 0,4 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 8,96 \text{ л}.$$

Объем исходной смеси азота и диоксида азота составлял 20 л. Определим объем азота:

$$V(\text{N}_2) = V(\text{смеси}) - V(\text{NO}_2) = 20 - 8,96 = 11,04 \text{ л.}$$

Определим процентный состав исходной смеси газов:

$$\varphi(\text{N}_2) = V(\text{N}_2) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 8,96 \text{ л} : 20 \text{ л} \cdot 100 \% = 44,8 \%;$$

$$\varphi(\text{NO}_2) = V(\text{NO}_2) : V(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 11,04 \text{ л} : 20 \text{ л} \cdot 100 \% = 55,2 \%.$$

Исходная смесь газов содержит 44,8 % азота N_2 и 55,2 % диоксида азота NO_2 .

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 8 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом диске.

Задача 11

⊙ Прокалили смесь нитратов двух одновалентных металлов. Суммарный объем выделившихся при этом газов оказался равным 8,96 л. При обработке твердого остатка водой часть его растворилась. Нерастворимое в воде вещество обработали избытком концентрированной азотной кислоты. Объем выделившегося бурого газа — 4,48 л. Нитраты каких металлов взяты, если масса одного из них равна 34 г, а второго — 20,2 г?

Ⓚ Решение.

При прокаливании нитратов металлов в зависимости от катиона могут образоваться нитрит, оксид металла или непосредственно металл. Нерастворимое в воде вещество, при обработке которого избытком концентрированной азотной кислоты выделяется бурый газ (диоксид азота), является металлом.

Запишем уравнение реакции неизвестного одновалентного металла Me с избытком концентрированной азотной кислоты:



Количество выделившегося бурого газа NO_2 равно:

$$\nu(\text{NO}_2) = V : V_M = 4,48 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,2 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль металла приводит к образованию 1 моля диоксида азота. Следовательно, 0,2 моля металла приводят к образованию 0,2 моля диоксида азота.

Металл образовался из нитрата по реакции:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при прокаливании 2 молей нитрата металла образуется 2 моля металла. Следовательно, при прокаливании 0,2 моля нитрата металла образуется 0,2 моля металла.

Итак, количество одного из нитратов равно 0,2 моля.

Согласно стехиометрическим коэффициентам этой же реакции, при прокаливании 2 молей нитрата металла образуется 3 моля газов (2 моля диоксида азота и 1 моль кислорода). Составим пропорцию:

2 моля MeNO_3 образуют 3 моля газов;

0,2 моля MeNO_3 образуют x молей газов;

$$x = 0,2 \cdot 3 : 2 = 0,3.$$

Таким образом, при прокаливании одного из нитратов образовалось 0,3 моля газов.

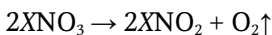
Суммарный объем выделившихся при прокаливании двух нитратов газов оказался равным 8,96 л. Его количество равно:

$$v(\text{смеси газов}) = V : V_M = 8,96 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,4 \text{ моля.}$$

Следовательно, при разложении другого нитрата выделилось $0,4 - 0,3 = 0,1$ моля газов.

Известно, что при обработке водой твердого остатка после прокаливании часть его растворилась. Эта часть есть нитрит щелочного металла X , так как при прокаливании нитратов других одновалентных металлов образуются нерастворимые в воде вещества.

Запишем уравнение разложения нитрата щелочного металла:



Количество кислорода равно найденному выше количеству 0,1 моля.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при прокаливании 2 молей нитрата металла образуется 1 моль кислорода.

Составим пропорцию:

2 моля XNO_3 образуют 1 моль O_2 ;

y молей XNO_3 образуют 0,1 моля O_2 ;

$$y = 0,1 \cdot 2 : 1 = 0,2.$$

Итак, количество второго нитрата равно 0,2 моля. Таково же количество и первого неизвестного нитрата.

Определим молярные массы неизвестных веществ:

$$M(1) = m(1) : \nu(1) = 34 \text{ г} : 0,2 \text{ моля} = 170 \text{ г/моль};$$

$$M(2) = m(2) : \nu(2) = 20,2 \text{ г} : 0,2 \text{ моля} = 101 \text{ г/моль}.$$

Поскольку молярная масса остатка азотной кислоты NO_3 равна 62 г/моль, то молярные массы неизвестных металлов равны $170 - 62 = 108$ г/моль и $101 - 62 = 39$ г/моль.

Металлами с такими молярными массами являются серебро Ag и калий K. Данные металлы являются одновалентными, и свойства их нитратов соответствуют использованным при решении задачи уравнениям реакций.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 13 и 17 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 19

- 6,3 г смеси фосфора и серы обработали избытком горячей и концентрированной азотной кислоты. Выделилось 24,64 л бурого газа, который пропустили через 949,4 г 6,5%-го раствора гидроксида калия. Какие соли будут в растворе и каковы их массовые доли в процентах? Вычислить также в процентах массовые доли серы и фосфора в исходной смеси.

🕒 Решение.

Запишем уравнения реакций фосфора и серы с избытком горячей концентрированной азотной кислоты:



Составим систему из двух уравнений.

Положим, количество серы равно x молей, а фосфора — y молей.

Тогда массы серы и фосфора равны:

$$m(\text{S}) = \nu(\text{S}) \cdot M(\text{S}) = x \text{ молей} \cdot 32 \text{ г/моль} = 32x \text{ г};$$

$$m(\text{P}) = \nu(\text{P}) \cdot M(\text{P}) = y \text{ молей} \cdot 31 \text{ г/моль} = 31y \text{ г}.$$

Общая масса исходной смеси равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{S}) + m(\text{P}) = (32x + 31y) = 6,3 \text{ г}.$$

Таким образом, имеем первое уравнение системы:

$$32x + 31y = 6,3.$$

Известно, что при растворении выделилось 24,64 л бурого газа NO_2 . Определим количество газа:

$$\nu(\text{NO}_2) = V : V_M = 24,64 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 1,1 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции растворения серы, при растворении 1 моля серы образуется 6 молей диоксида азота. Следовательно, при растворении x молей серы образуется $6x$ молей диоксида азота.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции растворения фосфора, при растворении 1 моля фосфора образуется 5 молей диоксида азота. Следовательно, при растворении y молей фосфора образуется $5y$ молей диоксида азота.

Общее количество бурого газа равно:

$$\nu(\text{NO}_2) = 6x + 5y = 1,1 \text{ моля}.$$

Таким образом, система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$32x + 31y = 6,3;$$

$$6x + 5y = 1,1.$$

Умножим второе уравнение на 6 и отнимем из него первое:

$$36x - 32x + 30y - 31y = 6,6 - 6,3;$$

$$4x - y = 0,3;$$

$$y = 4x - 0,3.$$

Подставим данное выражение во второе уравнение:

$$6x + 5(4x - 0,3) = 1,1;$$

$$26x = 1,1 + 1,5;$$

$$x = 0,1;$$

$$y = 4 \cdot 0,1 - 0,3 = 0,1.$$

Количество серы равно 0,1 моля, а фосфора — 0,1 моля.

Массы серы и фосфора равны:

$$m(\text{S}) = \nu(\text{S}) \cdot M(\text{S}) = 0,1 \text{ моля} \cdot 32 \text{ г/моль} = 3,2 \text{ г};$$

$$m(\text{P}) = \nu(\text{P}) \cdot M(\text{P}) = 0,1 \text{ моля} \cdot 31 \text{ г/моль} = 3,1 \text{ г}.$$

Массовые доли серы и фосфора в исходной смеси равны:

$$W(\text{S}) = m(\text{S}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 3,2 \text{ г} : 6,3 \text{ г} \cdot 100 \% = 50,8 \%;$$

$$W(\text{P}) = m(\text{P}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 3,1 \text{ г} : 6,3 \text{ г} \cdot 100 \% = 49,2 \%.$$

Определим, какие соли будут в растворе после пропускания диоксида азота NO_2 в раствор щелочи и каковы будут их массовые доли в процентах.

Количество щелочи в растворе:

$$\begin{aligned} m(\text{KOH}) &= m(\text{р-ра KOH}) \cdot W(\text{KOH}) : 100 \% = \\ &= 949,4 \text{ г} \cdot 6,5 \% : 100 \% = 61,71 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{KOH}) = 39 + 1 + 16 = 56 \text{ г/моля};$$

$$v(\text{KOH}) = m(\text{KOH}) : M(\text{KOH}) = 61,71 \text{ г} : 56 \text{ г/моль} = 1,1 \text{ моля}.$$

При растворении в растворе гидроксида калия диоксид азота диспропорционирует, образуя смесь солей азотной и азотистой кислот:



Количество гидроксида калия в растворе равно количеству поглощенного раствором диоксида азота. Следовательно, гидроксид калия и диоксид азота прореагировали нацело (ни одно из веществ не находится в избытке).

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при растворении 2 молей диоксида азота образуется 1 моль нитрата калия и 1 моль нитрита калия. Составим пропорцию:

$$2 \text{ моля } \text{NO}_2 \text{ образуют } 1 \text{ моль } \text{KNO}_3 \text{ и } 1 \text{ моль } \text{KNO}_2;$$

$$1,1 \text{ моля } \text{NO}_2 \text{ образуют } z \text{ молей } \text{KNO}_3 \text{ и } z \text{ молей } \text{KNO}_2;$$

$$z = 1,1 \cdot 1 : 2 = 0,55.$$

Итак, в растворе образовалось 0,55 моля нитрата калия и 0,55 моля нитрита калия. Определим массы полученных солей:

$$M(\text{KNO}_3) = 39 + 14 + 3 \cdot 16 = 101 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KNO}_3) = v(\text{KNO}_3) \cdot M(\text{KNO}_3) = 0,55 \text{ моля} \cdot 101 \text{ г/моль} = 55,55 \text{ г};$$

$$M(\text{KNO}_2) = 39 + 14 + 2 \cdot 16 = 85 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KNO}_2) = v(\text{KNO}_2) \cdot M(\text{KNO}_2) = 0,55 \text{ моля} \cdot 85 \text{ г/моль} = 46,75 \text{ г}.$$

Масса раствора увеличилась на массу поглощенного диоксида азота:

$$M(\text{NO}_2) = 14 + 2 \cdot 16 = 46 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{NO}_2) = v(\text{NO}_2) \cdot M(\text{NO}_2) = 1,1 \text{ моля} \cdot 46 \text{ г/моль} = 50,6 \text{ г}.$$

Конечная масса раствора равна:

$$m_{\text{кон}}(\text{р-ра}) = m_{\text{нач}}(\text{р-ра}) + m(\text{NO}_2) = 949,4 + 50,6 = 1000 \text{ г}.$$

Определим массовые доли образовавшихся солей в растворе:

$$W(\text{KNO}_3) = m(\text{KNO}_3) : m(\text{p-ра}) \cdot 100 \% = 55,55 \text{ г} : 1000 \text{ г} \cdot 100 \% = 5,6 \%;$$

$$W(\text{KNO}_2) = m(\text{KNO}_2) : m(\text{p-ра}) \cdot 100 \% = 46,75 \text{ г} : 1000 \text{ г} \cdot 100 \% = 4,7 \%.$$

Таким образом, при пропускании диоксида азота, образованного при растворении азотной кислотой смеси, содержащей 50,8 % серы и 49,2 % фосфора, через щелочной раствор образовались нитрат калия KNO_3 и нитрит калия KNO_2 , содержание которых в растворе составило 5,6 % и 4,7 % соответственно.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 10, 12, 14 и 18 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

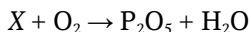
Фосфор. Решение задач

Задача 5

- ☉ При полном сжигании 6,8 г вещества получилось 14,2 г оксида фосфора (V) и 5,4 г воды. Продукт сжигания прибавили к 37 мл 32%-го раствора NaOH плотностью 1,35 г/мл. Определить формулу вещества и процентную концентрацию полученной соли в растворе.

- 🕒 Решение.

При сжигании неизвестного вещества X образуются оксид фосфора (V) и вода:



Следовательно, неизвестное вещество X обязательно содержит фосфор и водород, а также, возможно, кислород.

Определим массу фосфора и водорода в образовавшихся оксиде фосфора (V) и воде.

Молярные массы оксида фосфора (V) и воды равны:

$$M(\text{P}_2\text{O}_5) = 2 \cdot 31 + 5 \cdot 16 = 142 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 2 \cdot 1 + 16 = 18 \text{ г/моль}.$$

Составим пропорции:

в 142 г оксида фосфора P_2O_5 содержится $2 \cdot 31 = 62$ г фосфора P;

в 14,2 г оксида фосфора P_2O_5 содержится x г фосфора P;

$$x = 14,2 \cdot 62 : 142 = 6,2;$$

в 18 г воды H_2O содержится $2 \cdot 1 = 2$ г водорода H;

в 5,4 г воды H_2O содержится y г водорода H;

$$y = 5,4 \cdot 2 : 18 = 0,6.$$

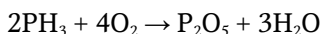
Итак, в 6,8 г неизвестного вещества X содержится 6,2 г фосфора и 0,6 г водорода. $6,8 = 6,2 + 0,6$, следовательно, кислород в веществе X отсутствует.

Определим количество молей атомов фосфора и водорода в веществе X:

$$v(P) = m(P) : M(P) = 6,2 \text{ г} : 31 \text{ г/моль} = 0,2 \text{ моля};$$

$$v(H) = m(H) : M(H) = 0,6 \text{ г} : 1 \text{ г/моль} = 0,6 \text{ моля}.$$

Молярное соотношение фосфора и водорода в веществе X равно $0,2 : 0,6 = 1 : 3$. Следовательно, эмпирическая формула вещества X — PH_3 . Это фосфин. Его молекулярная формула также PH_3 . Запишем уравнение его горения:



Полученный ангидрид фосфорной кислоты реагирует с гидроксидом натрия. При этом в зависимости от соотношений реагентов могут образоваться разные соли. Определим количество гидроксида натрия и оксида фосфора (V):

$$m(\text{р-ра NaOH}) = \rho \cdot V = 1,35 \text{ г/мл} \cdot 37 \text{ мл} = 49,95 \text{ г};$$

$$m(\text{NaOH}) = m(\text{р-ра NaOH}) \cdot W(\text{NaOH}) : 100 \% =$$

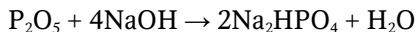
$$= 49,95 \text{ г} \cdot 32 \% : 100 \% = 15,98 \text{ г};$$

$$M(\text{NaOH}) = 40 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) = 15,98 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,4 \text{ моля};$$

$$v(P_2O_5) = m(P_2O_5) : M(P_2O_5) = 14,2 \text{ г} : 142 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Мольное отношение оксида фосфора и гидроксида натрия равно 1 : 4, хотя для полной нейтрализации оксида фосфора необходимо отношение 1 : 6. Следовательно, в результате реакции образуется кислая соль гидрофосфата натрия:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 1 моля оксида фосфора (V) образуется 2 моля гидрофосфата натрия. Составим пропорцию:

из 1 моля P_2O_5 образуется 2 моля Na_2HPO_4 ;

из 0,1 моля P_2O_5 образуется x молей Na_2HPO_4 ;

$$x = 0,1 \cdot 2 : 1 = 0,2.$$

Итак, образовалось 0,2 моля гидрофосфата натрия. Определим его массу:

$$M(\text{Na}_2\text{HPO}_4) = 2 \cdot 23 + 1 + 31 + 4 \cdot 16 = 142 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Na}_2\text{HPO}_4) = \nu(\text{Na}_2\text{HPO}_4) \cdot M(\text{Na}_2\text{HPO}_4) =$$

$$= 0,2 \text{ моля} \cdot 142 \text{ г/моль} = 28,4 \text{ г}.$$

Масса раствора увеличилась за счет поглощенных продуктов сгорания фосфина:

$$m_{\text{кон}}(\text{р-ра}) = m_{\text{нач}}(\text{р-ра}) + m(\text{P}_2\text{O}_5) + m(\text{H}_2\text{O}) =$$

$$= 49,95 + 14,2 + 5,4 = 69,55 \text{ г}.$$

Определим массовую долю гидрофосфата натрия в полученном растворе:

$$W(\text{Na}_2\text{HPO}_4) = m(\text{Na}_2\text{HPO}_4) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% =$$

$$= 28,4 \text{ г} : 69,55 \text{ г} \cdot 100 \% = 40,8 \%.$$

Таким образом, при пропускании продуктов сгорания фосфина PH_3 через щелочной раствор образовался гидрофосфат натрия Na_2HPO_4 , содержание которого в растворе составило 40,8 %.

ПРИМЕЧАНИЕ

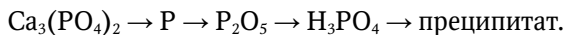


Задачи 4 и 11 имеют аналогичное решение. Задачи 1, 2, 7 и 12 касаются свойств ангидрида ортофосфорной кислоты и решаются прос-

той пропорцией по молярным массам веществ. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 10

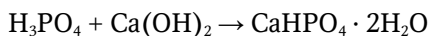
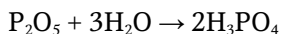
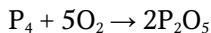
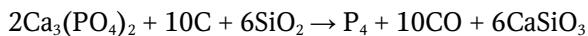
☞ Написать уравнения реакций по следующей схеме:



Руководствуясь этой схемой, вычислить, сколько преципитата получится из 77,5 г фосфорита, содержащего 80 % фосфата кальция. Учесть, что выход на последней стадии 80 %, на всех остальных стадиях — 50 %.

☞ Решение.

Запишем уравнения реакций по схеме получения преципитата (преципитат — это дигидрат гидрофосфата кальция $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) из фосфата кальция:



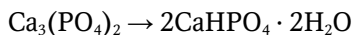
Определим исходное количество фосфата кальция в порции фосфорита:

$$\begin{aligned} m(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2) &= m(\text{фосфорита}) \cdot W(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2) : 100 \% = \\ &= 77,5 \text{ г} \cdot 80 \% : 100 \% = 62 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2) = 3 \cdot 40 + 2 \cdot (31 + 4 \cdot 16) = 310 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} \nu(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2) &= m(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2) : M(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2) = \\ &= 62 \text{ г} : 310 \text{ г/моль} = 0,2 \text{ моля.} \end{aligned}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам всех реакций, из 1 моля фосфата кальция $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ образуется 2 моля преципитата $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. То есть все уравнения реакций можно свести к схеме:



Составим пропорцию:

из 1 моля $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ образуется 2 моля $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;

из 0,2 моля $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ образуется x молей $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;

$$x = 0,2 \cdot 2 : 1 = 0,4.$$

Итак, при данной производственной схеме и при выходе, равном 100 %, должно образоваться 0,4 моля преципитата $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Однако в производстве всегда существуют потери, в результате чего практический выход снижается.

Определим суммарный выход производственной схемы из четырех реакций. Он представляет собой произведение выходов, выраженных в долях единицы, для всех стадий. Известно, что выход на последней стадии 0,8, на всех остальных стадиях — 0,5.

$$\eta_{\text{сумм}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 0,1.$$

Итак, суммарный выход производственной схемы равен 0,1, или 10 %.

Таким образом, практическое количество полученного преципитата равно:

$$\begin{aligned} v_{\text{практ}}(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) &= v_{\text{теор}}(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot \eta_{\text{сумм}} = \\ &= 0,4 \text{ моля} \cdot 0,1 = 0,04 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Определим массу полученного в результате преципитата:

$$M(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) = 40 + 1 + 31 + 4 \cdot 16 + 2 \cdot 18 = 172 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} m(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) &= v(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot M(\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) = \\ &= 0,04 \text{ моля} \cdot 172 \text{ г/моль} = 6,88 \text{ г}. \end{aligned}$$

Таким образом, из 77,5 г фосфорита будет получено 6,88 г преципитата.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 6, 8 и 9 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 13

☉ Раствор смеси дифосфорной и метафосфорной кислот разделили на 2 равные части, одну из которых сразу нейтрализовали гидрокарбонатом натрия. Вторую предварительно прокипятили, а затем только нейтрализовали. Для нейтрализации первой части раствора потребовалось в 2,5 раза меньше соды, чем для нейтрализации второй. В каком молярном соотношении находились мета- и дифосфорная кислоты в исходном растворе?

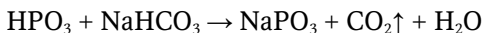
☉ Решение.

Введем переменные, в качестве которых выберем количество метафосфорной HPO_3 и дифосфорной $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ кислот в каждой из равных частей раствора:

$$v(\text{HPO}_3) = x \text{ молей};$$

$$v(\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7) = y \text{ молей}.$$

Запишем уравнения нейтрализации смеси кислот гидрокарбонатом натрия:

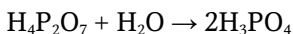
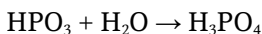


Согласно стехиометрическим коэффициентам первой реакции, на нейтрализацию 1 моля метафосфорной кислоты HPO_3 необходим 1 моль гидрокарбоната натрия NaHCO_3 . Следовательно, на нейтрализацию x молей HPO_3 необходимо x молей NaHCO_3 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам второй реакции, на нейтрализацию 1 моля $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ необходимо 4 моля NaHCO_3 . Следовательно, на нейтрализацию y молей $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ необходимо $4y$ молей NaHCO_3 .

Общее количество гидрокарбоната натрия, затраченного на нейтрализацию, равно $(x + 4y)$ молей.

Вторую часть раствора предварительно прокипятили, а затем только нейтрализовали. При этом кислоты прореагировали с образованием ортофосфорной кислоты H_3PO_4 :



Согласно стехиометрическим коэффициентам первой реакции, из 1 моля HPO_3 образуется 1 моль H_3PO_4 . Следовательно, из x молей HPO_3 образуется x молей H_3PO_4 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам второй реакции, из 1 моля $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ образуется 2 моля H_3PO_4 . Следовательно, из y молей $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ образуется $2y$ молей H_3PO_4 .

Общее количество образовавшейся ортофосфорной кислоты равно $(x + 2y)$ молей.

Ортофосфорную кислоту нейтрализовали гидрокарбонатом натрия:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, на нейтрализацию 1 моля H_3PO_4 необходимо 3 моля NaHCO_3 . На нейтрализацию $(x + 2y)$ молей H_3PO_4 необходимо $(3x + 6y)$ молей NaHCO_3 .

Общее количество гидрокарбоната натрия, затраченного на нейтрализацию второй порции раствора, равно $(3x + 6y)$ молей. Известно, что это количество в 2,5 раза больше, чем потраченное на нейтрализацию первой части $((x + 4y)$ молей).

Получим уравнение:

$$3x + 6y = 2,5 \cdot (x + 4y);$$

$$3x + 6y = 2,5x + 10y;$$

$$0,5x = 4y;$$

$$x = 8y;$$

$$v(\text{HPO}_3) = x = 8y \text{ молей};$$

$$v(\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7) = y \text{ молей}.$$

Таким образом, можно заключить, что в исходном растворе количество метафосфорной кислоты HPO_3 в 8 раз больше количества дифосфорной кислоты $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$.

ПРИМЕЧАНИЕ

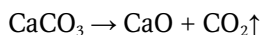
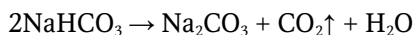
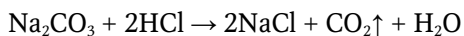
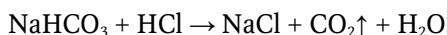


Задача 3 имеет аналогичное решение. Задача 14 решается с помощью простой пропорции по молярным массам веществ. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

2.4. ПОДГРУППА УГЛЕРОДА

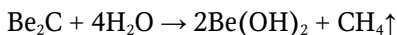
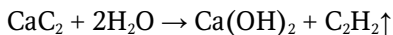
Углерод в виде простого вещества имеет много аллотропных модификаций: алмаз, графит, карбин. Технически наиболее важными видами графита являются кокс, древесный уголь и сажа. При этом аллотропные модификации значительно различаются в химических и физических свойствах.

Углерод связывают прежде всего с химией органических соединений. Основной объем задач, касающихся неорганической химии углерода, связан с задачами о газовых смесях и реакциях в них. Кроме этого распространены задачи, демонстрирующие различие в свойствах карбонатов и гидрокарбонатов щелочных и щелочноземельных металлов:

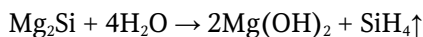


Углерод в неорганических соединениях может иметь и отрицательную степень окисления. Соединения углерода и металлов — карбиды — находятся на тонкой грани, весьма условно разделяющей органическую и неорганическую химию.

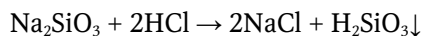
При этом существуют различные карбиды (от метанидов со степенью окисления углерода -4 до ацетилов со степенью окисления углерода -1), которые при взаимодействии с водой образуют различные углеводороды:



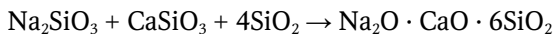
Кремний, подобно углероду, образует силициды, при гидролизе которых образуется силан:



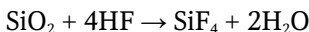
При гидролизе силикатов образуется гелеобразный продукт — нерастворимая кремниевая кислота:



Ангидрид данной кислоты SiO_2 используется в производстве стекла:



Реакция его растворения в плавиковой кислоте также является особым химическим свойством, иногда используемым в задачах:



В целом неорганическая химия элементов IV группы достаточно проста и большинство ошибок при решении задач допускается в вычислениях.

Углерод. Решение задач

Задача 5

☉ Белое кристаллическое вещество при взаимодействии с раствором сильной кислоты выделяет газ, плотность которого по водороду при нормальных условиях равна 22. При нагревании этого вещества выделяется тот же газ, но в количестве меньшем в два раза. Пламя горелки от внесения этого вещества окрашивается в желтый цвет. При действии избытка соляной кислоты на 8,4 г данного вещества и последующем упаривании раствора можно выделить 5,85 г соли — продукта реакции. Какое вещество было взято? Ответ подтвердить расчетами.

Ⓛ Решение.

Относительная плотность по водороду представляет собой отношение плотностей газа и водорода. Выражение для относительной плотности по водороду выглядит следующим образом:

$$D = \rho(X) : \rho(\text{H}_2).$$

Как известно, плотность газа пропорциональна его молекулярной массе. Поэтому отношение плотностей газов можно заменить отношением молекулярных масс газов:

$$D = \rho(X) : \rho(\text{H}_2) = M(X) : M(\text{H}_2) = 22.$$

Молярная масса X в 22 раза выше молярной массы водорода H_2 . Молярная масса H_2 равна 2 г/моль. Следовательно, молярная масса X равна $22 \cdot 2 = 44$ г/моль.

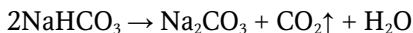
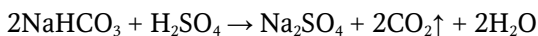
Среди газов, имеющих молярную массу, равную 44 г/моль, такие как CO_2 , C_3H_8 , C_2HF , N_2O и др.

Только углекислый газ может образовываться при действии раствора сильной кислоты на карбонаты либо при разложении этих карбонатов.

Пламя горелки окрашивается в желтый цвет при внесении в него солей натрия. Таким образом, можно заключить, что исходное неизвестное белое кристаллическое вещество является либо карбонатом, либо гидрокарбонатом натрия, либо кристаллогидратом карбоната или гидрокарбоната.

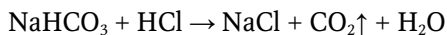
Поскольку при разложении карбоната натрия углекислый газ не выделяется, этот вариант исключается. Следовательно, исходное вещество — гидрокарбонат натрия NaHCO_3 (либо его кристаллогидрат).

Запишем уравнения описанных превращений (в качестве сильной кислоты выберем серную):



При нагревании выделяется тот же углекислый газ, но в объеме меньшем в два раза по сравнению с реакцией с серной кислотой. Это соответствует данным задачи.

При действии соляной кислоты на гидрокарбонат натрия образуется хлорид натрия:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при нейтрализации 1 моля гидрокарбоната натрия образуется 1 моль хлорида натрия. Молярные массы веществ равны:

$$M(\text{NaHCO}_3) = 23 + 12 + 3 \cdot 16 = 84 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{NaCl}) = 23 + 35,5 = 58,5 \text{ г/моль}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при нейтрализации 84 г гидрокарбоната натрия образуется 58,5 г хлорида натрия. Известно, что при действии избытка соляной кислоты на 8,4 г данного

вещества и последующем упаривании раствора можно выделить 5,85 г соли. Проверим пропорцию:

при нейтрализации 84 г NaHCO_3 образуется 58,5 г NaCl ;

при нейтрализации 8,4 г NaHCO_3 образуется 5,85 г NaCl .

Пропорция верна, следовательно, исходное белое кристаллическое вещество — действительно, гидрокарбонат натрия NaHCO_3 .

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 15, 17 и 20 имеют аналогичное решение. Задачи 1, 2, 8–10, 12 и 13 являются задачами на обычные газовые смеси. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 6

☉ Смесь хлорида натрия, гидрокарбоната натрия и карбоната натрия прокалили до постоянной массы, выделилось 6,72 л газа. Твердый остаток обработали соляной кислотой. Образовалось 13,44 л газа. В том же количестве первоначальную смесь при нагревании обработали серной кислотой. Выделилось 23,52 л газовой смеси. Вычислить массу затраченного 96%-го раствора серной кислоты, если известно, что образовались кислые соли.

🗨 Решение.

При прокаливании исходной смеси разлагается лишь одно вещество — гидрокарбонат натрия NaHCO_3 :



Определим количество выделившегося углекислого газа:

$$v(\text{CO}_2) = V : V_M = 6,72 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,3 \text{ моля.}$$

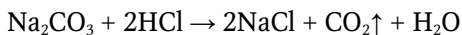
Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при разложении 2 молей гидрокарбоната натрия образуется 1 моль углекислого газа и остается 1 моль карбоната натрия. Составим пропорцию:

при разложении 2 молей NaHCO_3 образуется 1 моль CO_2
и 1 моль Na_2CO_3 ;

при разложении x молей NaHCO_3 образуется 0,3 моля CO_2
и 0,3 моля Na_2CO_3 ;
 $x = 0,3 \cdot 2 : 1 = 0,6$.

Количество гидрокарбоната натрия в исходной смеси солей составило 0,6 моля.

В твердом остатке после прокаливания присутствуют хлорид и карбонат натрия. С соляной кислотой реагирует лишь карбонат:



Определим количество выделившегося углекислого газа:

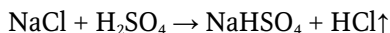
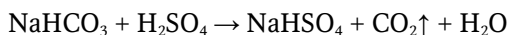
$$v(\text{CO}_2) = V : V_M = 13,44 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,6 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при обработке кислотой 1 моля карбоната натрия образуется 1 моль углекислого газа. Следовательно, при обработке кислотой 0,6 моля карбоната натрия образуется 0,6 моля углекислого газа.

Определили, что в смеси после прокаливания находилось 0,6 моля карбоната натрия. 0,3 моля из них составил карбонат натрия, образованный при прокаливании из гидрокарбоната натрия, а еще 0,3 моля карбоната натрия присутствовали в смеси изначально.

Итак, нам известно, что в первоначальной смеси присутствовало 0,6 моля гидрокарбоната натрия, 0,3 моля карбоната натрия и неизвестное количество хлорида натрия.

В том же количестве первоначальную смесь при нагревании обработали серной кислотой. При этом, как указано в условии, образовались кислые соли:



Определим количество выделившейся смеси газов:

$$v(\text{CO}_2) + v(\text{HCl}) = V : V_M = 23,52 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 1,05 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам всех реакций, во всех трех случаях при обработке кислотой 1 моля соли образуется 1 моль газа. Следовательно, при обработке кислотой 1,05 моля солей образуется 1,05 моля газов. То есть суммарное количество всех солей в исходной смеси равно 1,05 моля.

Выше нами установлено, что в первоначальной смеси присутствовало 0,6 моля гидрокарбоната натрия и 0,3 моля карбоната натрия, следовательно, количество хлорида натрия равно $1,05 - 0,6 - 0,3 = 0,15$ моля.

Определим количество затраченной серной кислоты:

для реакции с 0,6 моля NaHCO_3 потребовалось 0,6 моля H_2SO_4 ;

для реакции с 0,15 моля NaCl потребовалось 0,15 моля H_2SO_4 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции H_2SO_4 и Na_2CO_3 , для реакции с 1 молем Na_2CO_3 потребовалось 2 моля H_2SO_4 . Следовательно, для реакции с 0,3 моля Na_2CO_3 потребовалось 0,6 моля H_2SO_4 .

Общее количество затраченной серной кислоты равно $0,6 + 0,6 + 0,15 = 1,35$ моля.

Определим массу затраченного 96%-го раствора серной кислоты:

$$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{H}_2\text{SO}_4) = \nu(\text{H}_2\text{SO}_4) \cdot M(\text{H}_2\text{SO}_4) =$$

$$= 1,35 \text{ моля} \cdot 98 \text{ г/моль} = 132,3 \text{ г};$$

$$m(\text{р-ра } \text{H}_2\text{SO}_4) = m(\text{H}_2\text{SO}_4) : W(\text{H}_2\text{SO}_4) \cdot 100 \% =$$

$$= 132,3 \text{ г} : 96 \% \cdot 100 \% = 137,8 \text{ г}.$$

Итак, на обработку исходной смеси было затрачено 137,8 г 96%-го раствора серной кислоты.

ПРИМЕЧАНИЕ



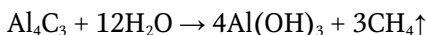
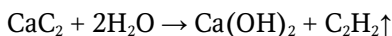
Задачи 3, 4, 18 и 19 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 7

Ⓒ Газовая смесь, полученная при гидролизе смеси карбидов кальция и алюминия, в 1,6 раза легче кислорода. Вычислить массовые доли карбидов в исходной смеси.

Ⓓ Решение.

Запишем уравнения гидролиза карбидов кальция и алюминия:



Полученная смесь ацетилена C_2H_2 и метана CH_4 в 1,6 раз легче кислорода O_2 . Это означает, что средняя молярная масса полученной газовой смеси в 1,6 раза меньше молярной массы кислорода:

$$M(\text{O}_2) = 2 \cdot 16 = 32 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{смеси}) = 32 : 1,6 = 20 \text{ г/моль}.$$

Определим состав полученной газовой смеси.

Пусть количество метана $\nu(\text{CH}_4) = x$ молей, а ацетилена $\nu(\text{C}_2\text{H}_2) = y$ молей.

Тогда массы газов равны:

$$M(\text{CH}_4) = 16 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CH}_4) = \nu(\text{CH}_4) \cdot M(\text{CH}_4) = x \text{ молей} \cdot 16 \text{ г/моль} = 16x \text{ г};$$

$$M(\text{C}_2\text{H}_2) = 26 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_2\text{H}_2) = \nu(\text{C}_2\text{H}_2) \cdot M(\text{C}_2\text{H}_2) = y \text{ молей} \cdot 26 \text{ г/моль} = 26y \text{ г}.$$

Общая масса газовой смеси равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{CH}_4) + m(\text{C}_2\text{H}_2) = (16x + 26y) \text{ г}.$$

Общее количество газовой смеси равно:

$$\nu(\text{смеси}) = \nu(\text{CH}_4) + \nu(\text{C}_2\text{H}_2) = (x + y) \text{ молей}.$$

Средняя молярная масса газовой смеси равна:

$$M(\text{смеси}) = m(\text{смеси}) : \nu(\text{смеси}) = (16x + 26y) : (x + y) = 20 \text{ г/моль}.$$

Решим полученное уравнение:

$$16x + 26y = 20(x + y);$$

$$6y = 4x;$$

$$x = 1,5y.$$

Итак, количество метана в полтора раза больше количества ацетилена:

$$\nu(\text{CH}_4) = 1,5y \text{ молей}; \nu(\text{C}_2\text{H}_2) = y \text{ молей}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции гидролиза CaC_2 , при гидролизе 1 моля CaC_2 образуется 1 моль C_2H_2 . Следовательно, при гидролизе y молей CaC_2 образуется y молей C_2H_2 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции гидролиза Al_4C_3 , при гидролизе 1 моля Al_4C_3 образуется 3 моля CH_4 . Составим пропорцию:

при гидролизе 1 моля Al_4C_3 образуется 3 моля CH_4 ;

при гидролизе z молей Al_4C_3 образуется 1,5 y молей CH_4 ;

$$z = 1,5y \cdot 1 : 3 = 0,5y.$$

Итак, в исходной смеси присутствовало y молей CaC_2 и 0,5 y молей Al_4C_3 . Поскольку мы не ограничены количеством смеси, примем $y = 1$. Тогда количественный состав исходной смеси будет следующим: 1 моль CaC_2 и 0,5 моля Al_4C_3 .

Определим массы компонентов и суммарную массу смеси:

$$M(\text{CaC}_2) = 40 + 2 \cdot 12 = 64 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CaC}_2) = \nu(\text{CaC}_2) \cdot M(\text{CaC}_2) = 1 \text{ моль} \cdot 64 \text{ г/моль} = 64 \text{ г};$$

$$M(\text{Al}_4\text{C}_3) = 4 \cdot 27 + 3 \cdot 12 = 144 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Al}_4\text{C}_3) = \nu(\text{Al}_4\text{C}_3) \cdot M(\text{Al}_4\text{C}_3) = 0,5 \text{ моля} \cdot 144 \text{ г/моль} = 72 \text{ г}.$$

Общая масса смеси равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{CaC}_2) + m(\text{Al}_4\text{C}_3) = 64 + 72 = 136 \text{ г}.$$

Вычислить массовые доли карбидов в исходной смеси:

$$W(\text{CaC}_2) = m(\text{CaC}_2) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 64 \text{ г} : 136 \text{ г} \cdot 100 \% = 47,1 \%;$$

$$W(\text{Al}_4\text{C}_3) = m(\text{Al}_4\text{C}_3) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 72 \text{ г} : 136 \text{ г} \cdot 100 \% = 52,9 \%.$$

Таким образом, исходная смесь на 47,1 % состояла из карбида кальция и на 52,9 % — из карбида алюминия.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 14 имеет аналогичное решение. Задачи 11 и 16 решаются с помощью простой пропорции по молярным массам веществ. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

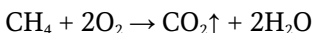
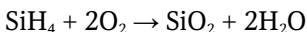
Кремний. Решение задач

Задача 2

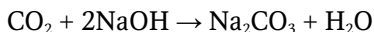
- ☉ Продукты сжигания силана SiH_4 и метана охладили. В результате образовался газ и 6 г твердого вещества. Образовавшийся газ пропустили через избыток раствора гидроксида натрия, в результате образовалось 31,8 г соли. Вычислить в процентах объемный состав исходной смеси и объем кислорода, израсходованный на сжигание этой смеси.

- ☉ Решение.

Запишем реакции горения силана и метана:



Образовавшийся при горении углекислый газ пропустили через избыток раствора гидроксида натрия:



В результате реакции образовалось 31,8 г карбоната натрия Na_2CO_3 . Определим количество образовавшейся соли:

$$M(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 2 \cdot 23 + 12 + 3 \cdot 12 = 106 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{Na}_2\text{CO}_3) = m(\text{Na}_2\text{CO}_3) : M(\text{Na}_2\text{CO}_3) =$$

$$= 31,8 \text{ г} : 106 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам последней реакции, 1 моль CO_2 образует 1 моль Na_2CO_3 . Следовательно, 0,3 моля CO_2 образует 0,3 моля Na_2CO_3 .

При сгорании метана образовалось 0,3 моля CO_2 .

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции горения метана, 1 моль CH_4 образует 1 моль CO_2 . Следовательно, 0,3 моля CH_4 образует 0,3 моля CO_2 .

Таким образом, известно, что в исходной смеси газов находилось 0,3 моля CH_4 .

В результате горения силана образовалось 6 г твердого вещества SiO_2 . Определим его количество:

$$M(\text{SiO}_2) = 28 + 2 \cdot 16 = 60 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{SiO}_2) = m(\text{SiO}_2) : M(\text{SiO}_2) = 6 \text{ г} : 60 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции горения силана, 1 моль SiH_4 образует 1 моль SiO_2 . Следовательно, 0,1 моля SiH_4 образует 0,1 моля SiO_2 .

Таким образом, известно, что в исходной смеси газов находилось 0,1 моля SiH_4 . Общее количество смеси газов равно $0,3 + 0,1 = 0,4$ моля. Определим молярный состав смеси:

$$\chi(\text{CH}_4) = \nu(\text{CH}_4) : \nu(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,3 \text{ моля} : 0,4 \text{ моля} \cdot 100 \% = 75 \%;$$

$$\chi(\text{SiH}_4) = \nu(\text{SiH}_4) : \nu(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,1 \text{ моля} : 0,4 \text{ моля} \cdot 100 \% = 25 \%.$$

В условии требуется вычислить в процентах объемный состав исходной смеси. Однако, как известно, для газообразных веществ количество пропорционально объему, а, следовательно, молярные доли равны объемным долям:

$$\varphi(\text{CH}_4) = 75 \% ; \varphi(\text{SiH}_4) = 25 \%.$$

Определим объем кислорода, израсходованный на сжигание этой смеси.

Согласно стехиометрическим коэффициентам обеих реакций горения, на сжигание 1 моля газа (SiH_4 либо CH_4) необходимо 2 моля O_2 .

Составим пропорцию:

на сжигание 1 моля смеси необходимо 2 моля O_2 ;

на сжигание 0,4 моля смеси необходимо x молей O_2 ;

$$x = 0,4 \cdot 2 : 1 = 0,8.$$

Определим объем кислорода:

$$V(CO_2) = v \cdot V_M = 0,8 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 17,92 \text{ л.}$$

Таким образом, на сжигание исходной смеси, состоящей из 75 % метана CH_4 и 75 % силана SiH_4 , потребовалось 17,92 л кислорода.

ПРИМЕЧАНИЕ



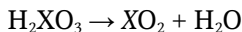
Задачи 1 и 3, касающиеся восстановления оксидов металлов, решаются с помощью простой пропорции по молярным массам веществ и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 4

- ⊙ Разложением 7,8 г двухосновной кислоты, образованной элементом IV группы периодической системы, получили 6 г твердого ангидрида. Найти формулу кислоты и вычислить, сколько граммов 30%-го раствора фтороводородной кислоты потратится для растворения полученного ангидрида.

- Ⓛ Решение.

Двухосновная кислота, образованная элементом IV группы периодической системы, будет иметь формулу H_2XO_3 , так как степень окисления неизвестного элемента должна быть равна +4. Запишем реакцию ее разложения с образованием ангидрида:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 1 моля кислоты образуется 1 моль ангидрида.

Пусть атомная масса неизвестного элемента равна x . Тогда молярные массы кислот и ангидрида будут равны:

$$M(H_2XO_3) = 2 \cdot 1 + x + 3 \cdot 16 = (x + 50) \text{ г/моль};$$

$$M(XO_2) = x + 2 \cdot 16 = (x + 32) \text{ г/моль}.$$

Составим пропорцию:

из $(x + 50)$ г кислоты образуется $(x + 32)$ г ангидрида;

из 7,8 г кислоты образуется 6 г ангидрида.

Решим полученное уравнение:

$$7,8(x + 32) = 6(x + 50);$$

$$7,8x + 249,6 = 6x + 300;$$

$$1,8x = 50,4;$$

$$x = 28.$$

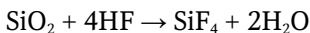
Такой атомной массой обладает кремний Si. Он действительно находится в IV группе периодической системы. Неизвестная кислота – кремниевая H_2SiO_3 , при ее разложении образуется оксид кремния SiO_2 .

Определим его количество:

$$M(\text{SiO}_2) = 28 + 32 = 60 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{SiO}_2) = m(\text{SiO}_2) : M(\text{SiO}_2) = 6 \text{ г} : 60 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Он растворяется плавиковой кислотой:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, для растворения 1 моля SiO_2 необходимо 4 моля HF. Составим пропорцию:

для растворения 1 моля SiO_2 необходимо 4 моля HF;

для растворения 0,1 моля SiO_2 необходимо y молей HF;

$$y = 0,1 \cdot 4 : 1 = 0,4.$$

Определим массу затраченного 30%-го раствора фтороводородной кислоты:

$$M(\text{HF}) = 1 + 19 = 20 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HF}) = \nu(\text{HF}) \cdot M(\text{HF}) = 0,4 \text{ моля} \cdot 20 \text{ г/моль} = 8 \text{ г};$$

$$m(\text{р-ра HF}) = m(\text{HF}) : W(\text{HF}) \cdot 100 \% = 8 \text{ г} : 30 \% \cdot 100 \% = 26,7 \text{ г}.$$

Итак, на растворение оксида кремния, полученного при разложении кремниевой кислоты, будет затрачено 26,7 г 30%-го раствора фтороводородной кислоты.

ПРИМЕЧАНИЕ



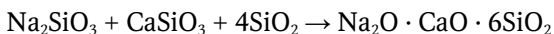
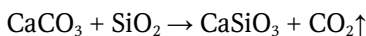
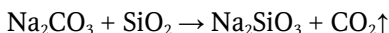
Задача 5 решается простой пропорцией по молярным массам веществ и рассмотрена на прилагаемом диске.

Задача 6

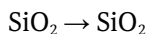
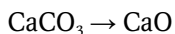
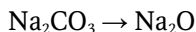
- ☉ Вычислить минимальные количества соды, известняка и оксида кремния, из которых может быть получена 1 тонна стекла, содержащего 13 % оксида натрия, 11,7 % оксида кальция и 75,3 % оксида кремния.

- ☉ Решение.

Получение стекла можно описать следующими реакциями:



Однако требуемый состав стекла может не совпадать с полученным в третьей реакции, поэтому представим схему получения стекла схематически:



Определим массу каждого из оксидов в 1 тонне стекла:

$$\begin{aligned} m(\text{Na}_2\text{O}) &= m(\text{стекла}) \cdot W(\text{Na}_2\text{O}) : 100 \% = \\ &= 1000 \text{ кг} \cdot 13 \% : 100 \% = 130 \text{ кг}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m(\text{CaO}) &= m(\text{стекла}) \cdot W(\text{CaO}) : 100 \% = \\ &= 1000 \text{ кг} \cdot 11,7 \% : 100 \% = 117 \text{ кг}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m(\text{SiO}_2) &= m(\text{стекла}) \cdot W(\text{SiO}_2) : 100 \% = \\ &= 1000 \text{ кг} \cdot 75,3 \% : 100 \% = 753 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Таким образом, масса необходимого оксида кремния известна – 753 кг.

Молярные массы карбонатов и оксидов натрия и кальция равны:

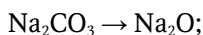
$$M(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 2 \cdot 23 + 12 + 3 \cdot 16 = 106 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{CaCO}_3) = 40 + 12 + 3 \cdot 16 = 100 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{Na}_2\text{O}) = 2 \cdot 23 + 16 = 62 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{CaO}) = 40 + 16 = 56 \text{ г/моль}.$$

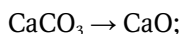
Итак, составим пропорции:



из 106 г Na_2CO_3 можно получить 62 г Na_2O ;

из x Na_2CO_3 можно получить 130 кг Na_2O ;

$$x = 106 \cdot 130 : 62 = 222 \text{ кг};$$



из 100 г CaCO_3 можно получить 56 г CaO ;

из y CaCO_3 можно получить 117 г CaO ;

$$y = 100 \cdot 117 : 56 = 209 \text{ кг}.$$

Таким образом, для получения 1 тонны стекла с вышеописанным составом необходимо минимум 222 кг соды Na_2CO_3 , 209 кг известняка CaCO_3 и 753 кг оксида кремния SiO_2 .

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 7 и 8 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

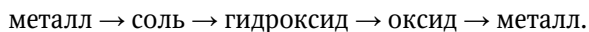
2.5. ОБЩИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

Все металлы (кроме ртути) при обычных условиях – твердые кристаллические вещества, обладающие характерными металлическими свойствами. Эти типичные для металлов свойства обусловлены их электронным строением.

При кажущейся общности и неразрывности всех металлов как класса среди них можно выделить группы металлов, существенно различающихся по своим химическим свойствам. Щелочные, щелочноземельные, переходные, амфотерные металлы по-разному реагируют с кислородом, кислотами, щелочами. Их соли, разлагаясь, образуют различные продукты. Многие задачи построены именно на этих различиях. Сплавы различных металлов попеременно растворяют то в одной, то в другой кислоте либо в растворе щелочи.

Необходимо твердо знать свойства металлов и их производных. Электрохимический ряд напряжений в некоторых случаях помогает предсказать свойства металлов и их производных, однако есть и исключения.

В задачах с металлами часто демонстрируется «генетическая» связь между различными классами неорганических соединений по следующей схеме:



При этом металл растворяется (если растворяется) в кислоте с образованием соли этой кислоты, соль гидролизуеться раствором щелочи до гидроксида металла, при прокаливании гидроксида уходит вода, остается оксид, который можно восстановить до чистого металла (например, водородом или углем).

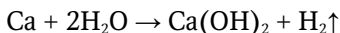
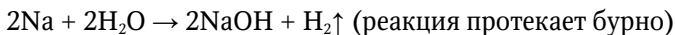
Отношение металлов к кислороду воздуха

Наиболее активные металлы (литий, натрий, калий, цезий, барий, кальций) очень легко реагируют с кислородом воздуха на холоде. Менее активные металлы (алюминий, хром, марганец и др.) при окислении на воздухе покрываются плотной оксидной пленкой, которая предохраняет их от дальнейшего взаимодействия с кислородом. При высокой температуре эти металлы сгорают, а иридий, золото в прямую реакцию с кислородом не вступают.

Отношение металлов к воде

Металл в виде простого вещества является восстановителем, причем восстановительные свойства его выражаются тем сильнее, чем меньше стандартный потенциал металла (E_0). Из всех металлов при обыкновенной температуре легко реагируют с водой лишь щелочные (литий, натрий, калий, рубидий, цезий) и щелочноземельные (кальций,

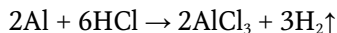
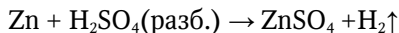
стронций, барий) металлы, поскольку их оксидные пленки и продукты взаимодействия — гидроксиды — растворимы в воде. Они не предохраняют металл от ее действия. Активность взаимодействия этих металлов с водой по ряду активности ослабевает слева направо. Например:



Другие активные металлы (Be, Al, Mg, Mn, Ti, Zn, Cr, Fe) также окисляется водой, но реакция тотчас же приостанавливается ввиду образования защитной пленки гидроокиси, не растворимой в воде. Однако при нагревании некоторые могут взаимодействовать с водой.

Отношение металлов к растворам кислот

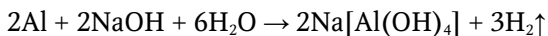
Характер взаимодействия металлов с кислотами зависит от активности окисляемого металла, природы и концентрации кислоты. При этом роль окислителя могут играть ионы кислот или основной элемент, образующий кислородсодержащую кислоту. В первом случае кислоты (соляная, разбавленная серная, уксусная и некоторые другие) растворяют почти все металлы, имеющие отрицательные значения стандартного электродного потенциала (алюминий, железо, цинк, никель и др.):



Металлы, имеющие положительное значение E_0 , окисляются за счет кислотных остатков азотной и концентрированной серной кислот. Со свойствами этих кислот мы уже познакомились в предыдущих разделах данной главы (разд. 2.2. и 2.3.).

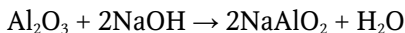
Отношение металлов к растворам щелочей

В щелочной среде металлы, образующие амфотерные гидроксиды и оксиды, образуют гидроокиси соли, например:

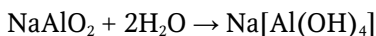


Обычно процесс растворения алюминия в водных растворах щелочей протекает по следующим стадиям.

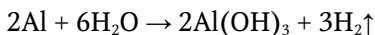
- Реакция снятия с металла естественной оксидной пленки щелочью:



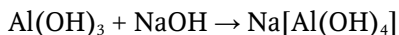
Образовавшийся алюминат натрия, вступая во взаимодействие с водой, образует комплексную гидроксид по уравнению:



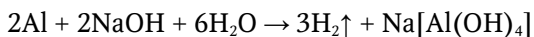
- Реакция взаимодействия алюминия с водой:



Алюминий, освобожденный от оксидной пленки, практически не взаимодействует с водой из-за очень плотного слоя трудно растворимой в воде гидроксиды алюминия. Однако в присутствии щелочи слой гидроксиды на поверхности металла разрушается, так как гидроксиды алюминия имеет амфотерный характер и, следовательно, она растворяется в щелочи. Таким образом, выделение водорода при действии растворов щелочи на алюминий является следствием взаимодействия алюминия с водой, а не с гидроксильными ионами щелочи. Роль же последних заключается в том, что они растворяют образующуюся гидроксиды:



Складывая все уравнения, получаем окончательное уравнение реакции растворения алюминия в растворах щелочи, идущей с образованием гидроксиды соли и выделением водорода:

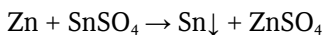
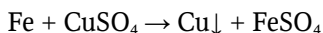


Аналогичным путем протекает процесс растворения остальных амфотерных металлов (бериллий, цинк, свинец, олово) в растворах щелочей.

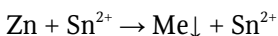
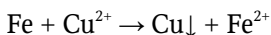
Отношение металлов к растворам солей других металлов

Во многих сборниках в отдельную главу выделены так называемые «задачи на пластинки». В их основу положен окислительно-восстановительный

процесс на границе раздела фаз между раствором соли одного металла и опущенным в раствор другим металлом. Например:



Металл-окислитель (медь и олово) окисляет металл-восстановитель (железо и цинк), восстанавливаясь при этом до нейтральной степени окисления и осаждаясь на пластинке. Суть процесса описывается ионными уравнениями:

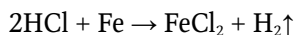
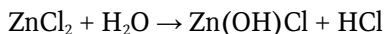


В электрохимическом ряду напряжений металл, находящийся правее, является окислителем по отношению к металлу, находящемуся левее:

Li, Rb, K, Cs, Ba, Sr, Ca, Na, Mg, Sc, Be, Al, Ti, Mn, Nb, Zn, Cr, Ga, Fe,
Cd, Co, Ni, Mo, Sn, Pb, H, Bi, Re, Cu, Ag, Os, Hg, Pd, Pt, Au.

Однако возможны случаи, когда менее активные металлы взаимодействуют в водной среде с солями, образованными активными металлами.


Так, протекание реакции между железом и хлоридом цинка обусловлено гидролизом соли в водном растворе и дальнейшим взаимодействием металла с продуктами гидролиза (образованной соляной кислотой):



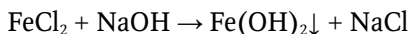
Решение задач

Задача 4

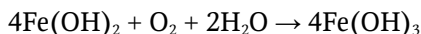
☉ Водный раствор щелочи при взаимодействии с хлоридом железа (II) образовал 18 г осадка. После стояния на воздухе его масса увеличилась на 3,4 г. Объяснить это явление и сделать соответствующие расчеты.

 Решение.

При реакции со щелочью хлорид железа (II) образует гидроксид:



Однако многие соединения со степенью окисления железа +2, включая данный гидроксид, являются неустойчивыми и легко окисляются даже кислородом воздуха:



При этом белый осадок гидроксида железа (II) постепенно превращается в бурый осадок гидроксида железа (III).

Подтвердим это предположение расчетами.

Молярные массы гидроксидов равны:

$$M(\text{Fe}(\text{OH})_2) = 56 + 2 \cdot 17 = 90 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{Fe}(\text{OH})_3) = 56 + 3 \cdot 17 = 107 \text{ г/моль}.$$

Составим пропорцию:

$$\text{из } 90 \text{ г } \text{Fe}(\text{OH})_2 \text{ образуется } 107 \text{ г } \text{Fe}(\text{OH})_3;$$

$$\text{из } 18 \text{ г } \text{Fe}(\text{OH})_2 \text{ образуется } x \text{ г } \text{Fe}(\text{OH})_3;$$

$$x = 18 \cdot 107 : 90 = 21,4.$$


Таким образом, при стоянии на воздухе масса осадка увеличится на $21,4 - 18 = 3,4$ г, как и сказано в условии.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 2 имеет аналогичное решение. Задачи 1, 6 и 10, касающиеся реакций щелочных металлов и их гидридов с водой, решаются с помощью простой пропорции по молярным массам веществ. Задачи 3, 9, 11, 12, 41, 45, 46, 51, 52, 54 и 55 являются обычными задачами на смеси, типовые решения данного типа задач рассмотрены в разд. 1.4. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

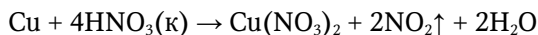
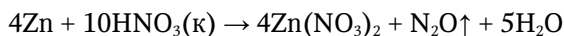
Задача 5

 При взаимодействии 8 г смеси алюминия, цинка и меди с избытком концентрированной азотной кислоты получилось 1,52 г твердого

остатка. При обработке исходной смеси концентрированным раствором щелочи образовалось 1,6 г твердого вещества. Вычислить в процентах массовые доли металлов в исходной смеси.

🔍 Решение.

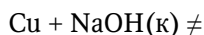
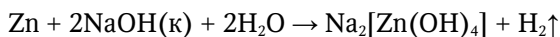
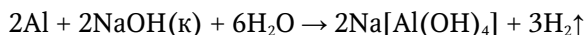
В то время как цинк и медь хорошо растворяются в концентрированной азотной кислоте, образуя различные продукты восстановления азотной кислоты, алюминий с ней не взаимодействует:



Следовательно, твердый остаток представляет собой алюминий:

$$m(\text{Al}) = 1,52 \text{ г.}$$

При обработке исходной смеси концентрированным раствором щелочи алюминий и цинк проявляют свои амфотерные свойства, в то время как медь в щелочи не растворяется:



Следовательно, твердый остаток представляет собой медь:

$$m(\text{Cu}) = 1,6 \text{ г.}$$

Остальной частью навески является цинк. Его массу можно определить по разнице:

$$m(\text{Zn}) = m(\text{смеси}) - m(\text{Al}) - m(\text{Cu}) = 8 - 1,52 - 1,6 = 4,88 \text{ г.}$$

Определим массовые доли металлов в смеси:

$$W(\text{Al}) = m(\text{Al}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 1,52 \text{ г} : 8 \text{ г} \cdot 100 \% = 19 \%;$$

$$W(\text{Cu}) = m(\text{Cu}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 1,6 \text{ г} : 8 \text{ г} \cdot 100 \% = 20 \%;$$

$$W(\text{Zn}) = m(\text{Zn}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 4,88 \text{ г} : 8 \text{ г} \cdot 100 \% = 61 \%.$$

Таким образом, исходная смесь металлов содержит 19 % алюминия, 20 % меди и 61 % цинка.

ПРИМЕЧАНИЕ



Данная задача замечательно иллюстрирует то, как важно знать основные свойства металлов. Различные металлы с различными кислотами и щелочами дают разнообразные продукты, а иногда и не реагируют вовсе. При этом большое значение также имеет и концентрация реагентов (азотной и серной кислот).

ПРИМЕЧАНИЕ



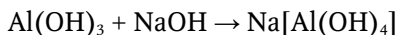
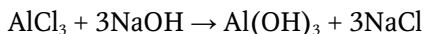
Задачи 42 и 47 имеют аналогичное решение. Задачи 7 и 8 решаются с помощью простой пропорции по молярным массам веществ. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 13

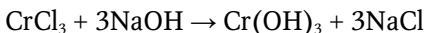
180,4 г смеси хлорида алюминия и хлорида хрома (III) обработали избытком раствора гидроксида натрия и бромной воды. К полученному раствору прилили избыток раствора хлорида бария. При этом образовалось 101,2 г желтого осадка. Определить количественный состав исходной смеси.

Решение.

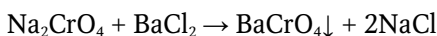
Хлорид алюминия при обработке исходного раствора избытком раствора гидроксида натрия образует гидроксид алюминия, а затем и комплексную соль:



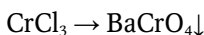
Хлорид хрома претерпевает подобные превращения, и, кроме того, хром окисляется бромной водой от степени окисления +3 до степени окисления +6:



Образованный в результате описанных превращений хромат натрия при взаимодействии с избытком раствора хлорида бария образует нерастворимый желтый осадок хромата бария:



При этом с учетом всех стадий из 1 молекулы хлорида хрома образуется 1 молекула хромата бария:



Молярные массы хлорида хрома и хромата бария равны:

$$M(\text{CrCl}_3) = 52 + 3 \cdot 35,5 = 158,5 \text{ г/моль};$$

$$M(\text{BaCrO}_4) = 137 + 52 + 4 \cdot 16 = 253 \text{ г/моль}.$$

Составим пропорцию:

$$\text{из } 158,5 \text{ г } \text{CrCl}_3 \text{ образуется } 253 \text{ г } \text{BaCrO}_4;$$

$$\text{из } x \text{ г } \text{CrCl}_3 \text{ образуется } 101,2 \text{ г } \text{BaCrO}_4;$$

$$x = 101,2 \cdot 158,5 : 253 = 63,4.$$

Итак, в исходной смеси содержалось 63,4 г хлорида хрома. Определим массу хлорида алюминия:

$$m(\text{AlCl}_3) = m(\text{смеси}) - m(\text{CrCl}_3) = 180,4 - 63,4 = 117 \text{ г}.$$

Таким образом, в исходной смеси содержалось 117 г хлорида алюминия и 63,4 г хлорида хрома.

ПРИМЕЧАНИЕ



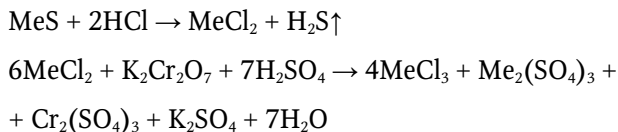
Задача 14 решается с помощью простой пропорции по молярным массам веществ и рассмотрена на прилагаемом диске.

Задача 15

- ☉ При растворении сульфида двухвалентного металла в соляной кислоте образовалось 7,62 г хлорида металла. На его окисление до трехвалентного состояния требуется 196 г 1,5%-го раствора бихромата калия. Реакция идет в среде с серной кислотой. Сульфид какого металла был взят?

🔊 Решение.

Запишем уравнения описанных превращений (при этом неизвестный металл обозначим как Me):



Определим количество бихромата калия:

$$\begin{aligned} m(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) &= m(\text{p-ра } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) \cdot W(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) : 100 \% = \\ &= 196 \text{ г} \cdot 1,5 \% : 100 \% = 2,94 \text{ г}; \\ M(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) &= 2 \cdot 39 + 2 \cdot 52 + 7 \cdot 16 = 294 \text{ г/моль}; \\ \nu(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) &= m(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) : M(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = \\ &= 2,94 \text{ г} : 294 \text{ г/моль} = 0,01 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 6 молей хлорида металла окисляются 1 молем бихромата калия. Составим пропорцию:

$$\begin{aligned} 6 \text{ молей } \text{MeCl}_2 &\text{ окисляются } 1 \text{ молем } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7; \\ x \text{ молей } \text{MeCl}_2 &\text{ окисляются } 0,01 \text{ молем } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7; \\ x &= 0,01 \cdot 6 : 1 = 0,06. \end{aligned}$$

Мы знаем количество хлорида неизвестного металла, определим его молярную массу:

$$M(\text{MeCl}_2) = m(\text{MeCl}_2) : \nu(\text{MeCl}_2) = 7,62 \text{ г} : 0,06 \text{ моля} = 127 \text{ г/моль}.$$

Определим атомную массу металла:

$$A_r(\text{Me}) = 127 - 2 \cdot 35,5 = 56.$$

Металлом с такой атомной массой является железо Fe. Описанные превращения соответствуют его химическим свойствам.

Таким образом, изначально был взят сульфид железа FeS.

ПРИМЕЧАНИЕ

Задачи 43 и 56 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 21

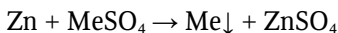
- ☉ В раствор массой 51,08 г, содержащий сульфат какого-то двухвалентного металла, погрузили цинковую пластину. Через некоторое время масса пластины увеличилась на 1,08 г, а в полученном растворе концентрация сульфата цинка составила 6,44 %. Найти неизвестный двухвалентный металл.

ПРИМЕЧАНИЕ

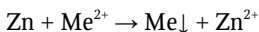
Данная задача относится к популярному классу задач «на пластинки», в основу которого положено свойство металлов вытеснять друг друга из растворов солей в зависимости от относительного друг от друга положения в электрохимическом ряду металлов. Простейшие задачи такого рода также представлены на прилагаемом диске.

- ☉ Решение.

В данном случае цинк вытесняет неизвестный двухвалентный металл (обозначим его Me) из раствора:

**СОВЕТ**

Правильнее говорить, что неизвестный металл окисляет цинк, восстанавливаясь при этом до нейтральной степени окисления и осаждаясь на пластинке. Суть процесса описывается ионным уравнением



Определим количество образовавшегося сульфата цинка. Поскольку масса пластинки увеличилась на 1,08 г, следовательно, масса раствора на эти же 1,08 г уменьшилась:

$$m_{\text{конеч}}(\text{p-ра}) = m_{\text{нач}}(\text{p-ра}) - \Delta m = 51,08 - 1,08 = 50 \text{ г};$$

$$m(\text{ZnSO}_4) = m(\text{p-ра}) \cdot W(\text{ZnSO}_4) : 100 \% =$$

$$= 50 \text{ г} \cdot 6,44 \% : 100 \% = 3,22 \text{ г};$$

$$M(\text{ZnSO}_4) = 65 + 32 + 4 \cdot 16 = 161 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{ZnSO}_4) = m(\text{ZnSO}_4) : M(\text{ZnSO}_4) = 3,22 \text{ г} : 161 \text{ г/моль} = 0,02 \text{ моля}.$$

Определим неизвестный металл двумя способами.

Способ I.

Предположим, атомная масса неизвестного металла Me равна x .

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль металла Me осаждается на пластинке, 1 моль цинка Zn растворяется с образованием 1 моля сульфата цинка ZnSO_4 . Следовательно, 0,02 моля Me осадилось на пластинке, 0,02 моля Zn растворилось с образованием 0,02 моля ZnSO_4 .

Определим массы металлов (растворившегося и осажденного):

$$A_r(\text{Zn}) = 65;$$

$$m(\text{Zn}) = v(\text{Zn}) \cdot M(\text{Zn}) = 0,02 \text{ моля} \cdot 65 \text{ г/моль} = 1,3 \text{ г};$$

$$A_r(\text{Me}) = x;$$

$$m(\text{Me}) = v(\text{Me}) \cdot M(\text{Me}) = 0,02 \text{ моля} \cdot x \text{ г/моль} = 0,02x \text{ г}.$$

Изменение массы пластинки равно массе осажденного на пластинку металла за вычетом массы растворившегося металла пластинки (в нашем случае цинк):

$$\Delta m = m(\text{Me}) - m(\text{Zn}) = (0,02x - 1,3) = 1,08 \text{ г}.$$

Решим полученное уравнение:

$$0,02x - 1,3 = 1,08;$$

$$0,02x = 2,38;$$

$$x = 119.$$

Металлом с такой атомной массой является олово Sn . Описанные превращения соответствуют его химическим свойствам.

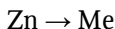
Способ II.

Воспользуемся понятиями «количество молей реакции» и «молярная масса реакции».

ПРИМЕЧАНИЕ

Прием уже был использован при рассмотрении альтернативного способа (II) решения задачи 6 в разд. 2.1. Советую повторить решение этой задачи.

Для пластинки можно записать следующую схему превращений:



Количество реакции равно:

$$\nu = 0,02 \text{ моля (найдено выше).}$$

Изменение массы остатка равно:

$$\Delta m = m(\text{Me}) - m(\text{Zn}) = \nu = 1,08 \text{ г.}$$

Найдем изменение молярной массы реакции:

$$\Delta M = \Delta m : \nu = 1,08 \text{ г} - 0,02 \text{ моля} = 54 \text{ г/моляр.}$$

Это означает, что молярная масса металла на 54 г/моляр больше молярной массы цинка.

Изменение молярной массы остатка равно:

$$\Delta M = M(\text{Me}) - M(\text{Zn}) = 54 \text{ г/моляр.}$$

Следовательно, молярная масса неизвестного металла равна:

$$M(\text{Me}) = \Delta M + M(\text{Zn}) = 54 + 65 = 119 \text{ г/моляр.}$$

Металлом с такой атомной массой является олово Sn. Описанные превращения соответствуют его химическим свойствам.

ПРИМЕЧАНИЕ

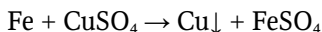
Задачи 16–20, 22–26, 28–30, 32–36 и 49 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 27

- ☉ Сколько граммов железа должно прореагировать с 300 г 32%-го раствора сульфата меди, чтобы массовая доля сульфата железа (II) в 2 раза превысила массовую долю оставшегося сульфата меди?

🕒 Решение.

В данном случае железо вытесняет медь из сульфата (медь окисляет железо, восстанавливаясь до металла и осаждаясь на железной пластинке):



Предположим, x молей железа прореагировало с x молями сульфата меди с образованием x молей сульфата железа и x молей меди.

Массовая доля сульфата железа (II) в 2 раза превысила массовую долю оставшегося сульфата меди, это равноценно тому, что масса образованного сульфата железа (II) в 2 раза больше массы оставшегося сульфата меди. Выразим через переменную массы сульфатов железа и меди:

$$M(\text{FeSO}_4) = 56 + 32 + 4 \cdot 16 = 152 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{FeSO}_4) = \nu(\text{FeSO}_4) \cdot M(\text{FeSO}_4) = x \text{ молей} \cdot 152 \text{ г/моль} = 152x \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m_{\text{исх}}(\text{CuSO}_4) &= m(\text{р-ра CuSO}_4) \cdot W(\text{CuSO}_4) : 100 \% = \\ &= 300 \text{ г} \cdot 32 \% : 100 \% = 96 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{CuSO}_4) = 64 + 32 + 4 \cdot 16 = 160 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} m_{\text{прореаг}}(\text{CuSO}_4) &= \nu(\text{CuSO}_4) \cdot M(\text{CuSO}_4) = \\ &= x \text{ молей} \cdot 160 \text{ г/моль} = 160x \text{ г}; \end{aligned}$$

$$m_{\text{конеч}}(\text{CuSO}_4) = m_{\text{исх}}(\text{CuSO}_4) - m_{\text{прореаг}}(\text{CuSO}_4) = (96 - 160x) \text{ г}.$$

Используя тот факт, что масса образованного сульфата железа (II) в 2 раза больше массы оставшегося сульфата меди, составим уравнение:

$$m(\text{FeSO}_4) = 2 \cdot m_{\text{конеч}}(\text{CuSO}_4);$$

$$152x = 2(96 - 160x);$$

$$152x = 192 - 320x;$$

$$472x = 192;$$

$$x = 0,407 \text{ моля}.$$

Определим массу прореагировавшего железа:

$$A_r(\text{Fe}) = 56;$$

$$m(\text{Fe}) = \nu(\text{Fe}) \cdot M(\text{Fe}) = 0,407 \text{ моля} \cdot 56 \text{ г/моль} = 22,8 \text{ г.}$$

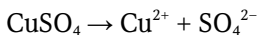
Таким образом, чтобы массовая доля сульфата железа (II) в 2 раза превысила массовую долю оставшегося сульфата меди, должно прореагировать 22,8 г железа.

Задача 31

⊕ В раствор сульфата меди погрузили две медные пластинки массой 16 г каждая и провели электролиз. Через некоторое время пластинку, которая служила анодом, растворили в концентрированной азотной кислоте, в результате чего образовался нитрат меди. При термическом разложении последнего получилось 2,8 л газовой смеси. Какой объем газа выделится, если катод после электролиза растворить в разбавленной азотной кислоте?

Ⓜ Решение.

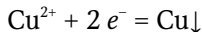
В водном растворе сульфат меди диссоциирует на сульфат-ионы и ионы меди:



Составим схему электролиза.

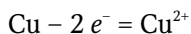
Катод К(-).

Медь относится к третьей группе металлов ($\varphi^0\text{Me}^{n+} / \text{Me} > 0 \text{ В}$), поэтому восстанавливаются только ее ионы при электролизе водного раствора:



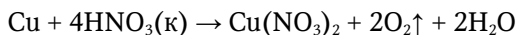
Анод А(+).

Поскольку анод является медным, то он сам растворяется, при этом окисляется медь, в раствор переходят ионы меди:

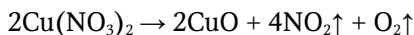


Итак, при электролизе водного раствора сульфата меди на катоде медь восстанавливается, а на аноде окисляется. Таким образом, раствор изменений не претерпевает, а медь с анода переходит на катод.

После электролиза анод растворили в концентрированной азотной кислоте:



Полученный в результате реакции нитрат меди прокалили:



Объем газовой смеси составил 2,8 л. Определим количество смеси газов:

$$v(\text{смеси}) = V : V_M = 2,8 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,125 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 2 молей нитрата меди образуется 5 молей газов. Составим пропорцию:

из 2 молей $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ образуются 5 молей газов;

из x молей $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ образуется 0,125 моля газов;

$$x = 0,125 \cdot 2 : 5 = 0,05.$$

0,05 моля нитрата меди в свою очередь образовались из 0,05 моля меди растворенного анода. Определим его массу:

$$A_r(\text{Cu}) = 64;$$

$$m(\text{Cu на аноде}) = v(\text{Cu}) \cdot M(\text{Cu}) = 0,05 \text{ моля} \cdot 64 \text{ г/моль} = 3,2 \text{ г.}$$

Итак, масса анода после электролиза составила 3,2 г.

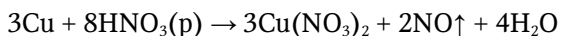
Известно, что медь с анода переходила на катод. При этом суммарная масса электродов не изменялась и равна:

$$m(\text{Cu}) = m(\text{A}+) + m(\text{K}-) = 16 + 16 = 32 \text{ г.}$$

Следовательно, масса катода после электролиза равна:

$$m(\text{K}-) = m(\text{Cu}) - m(\text{A}+) = 32 - 3,2 = 28,8 \text{ г.}$$

Определим, какой объем газа выделится, если катод после электролиза растворить в разбавленной азотной кислоте. Запишем уравнение реакции меди с разбавленной азотной кислотой:



Определим количество меди, участвующей в реакции:

$$\nu(\text{Cu}) = m(\text{Cu}) : M(\text{Cu}) = 28,8 \text{ г} : 64 \text{ г/моль} = 0,45 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при растворении 3 молей меди образуется 2 моля монооксида азота. Составим пропорцию:

при растворении 3 молей Cu образуется 2 моля NO;

при растворении 0,45 моля Cu образуется y молей NO;

$$y = 0,45 \cdot 2 : 3 = 0,3.$$

Определим объем выделившегося монооксида азота:

$$V(\text{NO}) = \nu \cdot V_M = 0,3 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 6,72 \text{ л.}$$

Таким образом, если катод после электролиза растворить в разбавленной азотной кислоте, выделится 6,72 л газа.

ПРИМЕЧАНИЕ



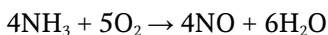
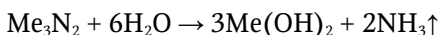
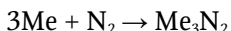
Задачи 37–39, 44 и 53 решаются с помощью простой пропорции по молярным массам веществ и рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 40

60 г металла второй группы периодической системы элементов при взаимодействии с азотом образуют нитрид, при гидролизе которого получается гидроксид соответствующего металла и аммиак. При каталитическом окислении выделившегося аммиака образуется 21,96 л оксида азота (II) с 98%-м выходом. Определить исходный металл.

Решение.

Запишем уравнения описанных превращений (при этом неизвестный металл обозначим как Me):



Определим теоретическое количество оксида азота (II):

$$V_{\text{теор}} = V_{\text{практ}} : \eta \cdot 100 \% = 21,96 \text{ л} : 98 \% \cdot 100 \% = 22,4 \text{ л};$$

$$v(\text{NO}) = V : V_M = 22,4 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 1 \text{ моль}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции окисления аммиака, из 1 моля аммиака образуется 1 моль монооксида азота.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции гидролиза нитрида, из 1 моля нитрида образуется 2 моля аммиака. Составим пропорцию:

из 1 моля Me_3N_2 образуется 2 моля NH_3 ;

из x молей Me_3N_2 образуется 1 моль NH_3 ;

$$x = 1 \cdot 1 : 2 = 0,5.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции образования нитрида, из 3 молей металла образуется 1 моль нитрида. Составим пропорцию:

из 3 молей Me образуется 1 моль Me_3N_2 ;

из y молей Me образуется 0,5 моля Me_3N_2 ;

$$y = 0,5 \cdot 3 : 1 = 1,5.$$

Итак, исходное количество металла равно 1,5 моля.

Определим молярную массу металла:

$$M(\text{Me}) = m(\text{Me}) : v(\text{Me}) = 60 \text{ г} : 1,5 \text{ моля} = 40 \text{ г/моль}.$$

Металлом с такой молярной массой является кальций Ca. Он действительно находится во второй группе периодической системы элементов, и описанные превращения соответствуют его химическим свойствам.

Таким образом, исходным металлом является кальций Ca.

Задача 48

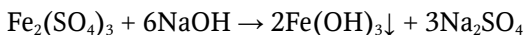
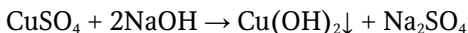
☉ К раствору, содержащему 1 моль сульфата меди (II), прилили определенное количество сульфата железа (III). Смесь обработали холодным разбавленным раствором щелочи, осадок отделили и прокалили.

Массовая доля элемента меди в полученном сухом остатке составляет 50 %. Сколько молей сульфата железа (III) было прилито?

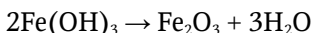
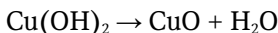
🕒 Решение.

Предположим, к раствору сульфата меди (II) прилили x молей сульфата железа (III).

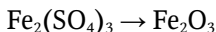
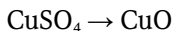
При обработке холодным разбавленным раствором щелочи протекали реакции:



При прокаливании гидроксидов образуются соответствующие оксиды металлов:



Схему описанных превращений можно записать следующим образом:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, из 1 моля CuSO_4 образуется 1 моль CuO , а из 1 моля $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ образуется 1 моль Fe_2O_3 , следовательно, из x молей $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ образуется x молей Fe_2O_3 .

Сухой остаток состоит из 1 моля CuO и x молей Fe_2O_3 .

Таким образом, количество прилитого сульфата железа (III) равно количеству образовавшегося в результате превращений оксида железа (III).

Известно, что массовая доля элемента меди в полученном сухом остатке составляет 50 %. Определим массу оксида меди и меди в его составе:

$$M(\text{CuO}) = 64 + 16 = 80 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CuO}) = \nu(\text{CuO}) \cdot M(\text{CuO}) = 1 \text{ моль} \cdot 80 \text{ г/моль} = 80 \text{ г};$$

$$m(\text{Cu}) = \nu(\text{Cu}) \cdot M(\text{Cu}) = 1 \text{ моль} \cdot 64 \text{ г/моль} = 64 \text{ г}.$$

Отсюда можем определить массу сухого остатка:

$$m(\text{остатка}) = m(\text{Cu}) : W(\text{Cu}) \cdot 100 \% = 64 \text{ г} : 50 \% \cdot 100 \% = 128 \text{ г.}$$

Определим массу и количество оксида железа:

$$m(\text{Fe}_2\text{O}_3) = m(\text{остатка}) - m(\text{CuO}) = 128 \text{ г} - 80 \text{ г} = 48 \text{ г};$$

$$M(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 2 \cdot 56 + 3 \cdot 16 = 160 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{Fe}_2\text{O}_3) = m(\text{Fe}_2\text{O}_3) : M(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 48 \text{ г} : 160 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля.}$$

Количество прилитого сульфата железа (III) равно количеству образовавшегося в результате превращений оксида железа (III), то есть 0,3 моля.

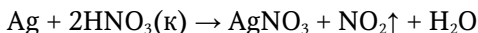
Задача 50

☉ При растворении серебра в 53 % концентрированной азотной кислоте массовая доля кислоты уменьшилась до 46 %. В полученном концентрированном растворе кислоты растворили медь, в результате чего массовая доля кислоты уменьшилась до 39 %. Вычислить в процентах массовые доли солей в полученном растворе.

☪ Решение.

При решении используем уже опробованный (задача 2 в разд. 2.1 (водород)) прием. Примем исходную массу раствора азотной кислоты, равной 100 г, так как очевидно, что данное значение никоим образом не повлияет на конечное решение.

Запишем уравнение растворения серебра в концентрированной азотной кислоте:



Предположим, что количество растворенного серебра равно x молей.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль серебра реагирует с 2 молями азотной кислоты, образуются 1 моль нитрата серебра и 1 моль диоксида азота. Следовательно, x молей серебра реагирует с $2x$ молями азотной кислоты, образуется x молей нитрата серебра и x молей диоксида азота.

Определим массы вступивших в реакцию серебра и азотной кислоты и образовавшихся нитрата серебра и диоксида азота:

$$M(\text{Ag}) = 108 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Ag}) = \nu(\text{Ag}) \cdot M(\text{Ag}) = x \text{ молей} \cdot 108 \text{ г/моль} = 108x \text{ г};$$

$$M(\text{HNO}_3) = 63 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HNO}_3) = \nu(\text{HNO}_3) \cdot M(\text{HNO}_3) = 2x \text{ молей} \cdot 63 \text{ г/моль} = 126x \text{ г};$$

$$M(\text{AgNO}_3) = 108 + 62 = 170 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{AgNO}_3) = \nu(\text{AgNO}_3) \cdot M(\text{AgNO}_3) = x \text{ молей} \cdot 170 \text{ г/моль} = 170x \text{ г};$$

$$M(\text{NO}_2) = 108 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{NO}_2) = \nu(\text{NO}_2) \cdot M(\text{NO}_2) = x \text{ молей} \cdot 46 \text{ г/моль} = 46x \text{ г}.$$

Масса раствора (после добавления серебра) равна:

$$\begin{aligned} m(\text{р-ра}) &= m_{\text{нач}}(\text{р-ра}) + m(\text{Ag}) - m(\text{NO}_2) = \\ &= 100 + 108x - 46x = (100 + 62x) \text{ г}. \end{aligned}$$

Начальная масса азотной кислоты в растворе:

$$\begin{aligned} m(\text{HNO}_3) &= m_{\text{нач}}(\text{р-ра}) \cdot W_{\text{нач}}(\text{HNO}_3) : 100 \% = \\ &= 100 \text{ г} \cdot 53 \% : 100 \% = 53 \text{ г}. \end{aligned}$$

Масса азотной кислоты в растворе стала равной:

$$m(\text{HNO}_3) = m_{\text{нач}}(\text{HNO}_3) - m_{\text{прореаг}}(\text{HNO}_3) = (53 - 126x) \text{ г}.$$

Эту же массу можно выразить другим способом:

$$\begin{aligned} m(\text{HNO}_3) &= m(\text{р-ра}) \cdot W(\text{HNO}_3) : 100 \% = \\ &= (100 + 62x) \text{ г} \cdot 46 \% : 100 \% = (46 + 28,52x) \text{ г}. \end{aligned}$$

Приравняем эти значения и решим полученное уравнение:

$$53 - 126x = 46 + 28,52x;$$

$$154,52x = 7;$$

$$x = 0,0453.$$

Определим массы компонентов полученного раствора и массу самого раствора:

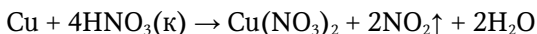
$$m(\text{HNO}_3) = 53 - 126x = 53 - 126 \cdot 0,0453 = 47,3 \text{ г};$$

$$m(\text{AgNO}_3) = 170x = 170 \cdot 0,0453 = 7,70 \text{ г};$$

$$m(\text{р-ра}) = 100 + 62x = 100 + 62 \cdot 0,0453 = 102,8 \text{ г}.$$

Этот же алгоритм применим и для второго процесса.

Запишем уравнение растворения меди в концентрированной азотной кислоте:



Предположим, количество растворенной меди равно y молей.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль меди реагирует с 4 молями азотной кислоты, образуется 1 моль нитрата меди и 2 моля диоксида азота. Следовательно, y молей меди реагирует с $4y$ молями азотной кислоты, образуется y молей нитрата меди и $2y$ молей диоксида азота.

Определим массы вступивших в реакцию меди и азотной кислоты и образовавшихся нитрата меди и диоксида азота:

$$M(\text{Cu}) = 64 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{Cu}) = \nu(\text{Cu}) \cdot M(\text{Cu}) = y \text{ молей} \cdot 64 \text{ г/моль} = 64y \text{ г};$$

$$m(\text{HNO}_3) = \nu(\text{HNO}_3) \cdot M(\text{HNO}_3) = 4y \text{ молей} \cdot 63 \text{ г/моль} = 252y \text{ г};$$

$$M(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2) = 64 + 2 \cdot 62 = 170 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} m(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2) &= \nu(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2) \cdot M(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2) = \\ &= y \text{ молей} \cdot 170 \text{ г/моль} = 170y \text{ г}; \end{aligned}$$

$$m(\text{NO}_2) = \nu(\text{NO}_2) \cdot M(\text{NO}_2) = 2y \text{ молей} \cdot 46 \text{ г/моль} = 92y \text{ г}.$$

Конечная масса раствора (после добавления меди) равна:

$$\begin{aligned} m_{\text{кон}}(\text{р-ра}) &= m(\text{р-ра}) + m(\text{Cu}) - m(\text{NO}_2) = \\ &= 102,8 + 64y - 92y = (102,8 - 28y) \text{ г}. \end{aligned}$$

Масса азотной кислоты в растворе стала равной:

$$m_{\text{кон}}(\text{HNO}_3) = m(\text{HNO}_3) - m_{\text{проpear}}(\text{HNO}_3) = (47,3 - 252y) \text{ г.}$$

Эту же массу можно выразить другим способом:

$$\begin{aligned} m_{\text{кон}}(\text{HNO}_3) &= m_{\text{кон}}(\text{р-ра}) \cdot W_{\text{кон}}(\text{HNO}_3) : 100 \% = \\ &= (102,8 - 28y) \text{ г} \cdot 39 \% : 100 \% = (40,09 - 10,92y) \text{ г.} \end{aligned}$$

Приравняем эти значения и решим полученное уравнение:

$$47,3 - 252y = 40,09 - 10,92y;$$

$$241,08y = 7,21;$$

$$y = 0,03.$$

Определим массы солей в полученном растворе и массу самого раствора:

$$m(\text{AgNO}_3) = 7,70 \text{ г};$$

$$m(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2) = 188y = 188 \cdot 0,03 = 5,64 \text{ г};$$

$$m_{\text{кон}}(\text{р-ра}) = 102,8 - 28y = 102,8 - 28 \cdot 0,03 = 102 \text{ г.}$$

Определим массовые доли солей в полученном растворе:

$$W(\text{AgNO}_3) = m(\text{AgNO}_3) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% =$$

$$= 7,7 \text{ г} : 102 \text{ г} \cdot 100 \% = 7,5 \%;$$

$$W(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2) = m(\text{Cu}(\text{NO}_3)_2) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% =$$

$$= 5,64 \text{ г} : 102 \text{ г} \cdot 100 \% = 5,5 \%;$$

$$W(\text{Cu}) = m(\text{Cu}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 1,6 \text{ г} : 8 \text{ г} \cdot 100 \% = 20 \%.$$

Таким образом, конечный раствор, кроме 39 % азотной кислоты, содержит также 7,5 % нитрата серебра и 5,5 % нитрата меди.

ХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

3.1. УГЛЕВОДОРОДЫ

Углеводороды — органические соединения, в состав которых входят только два элемента: углерод и водород.

В общем виде углеводороды можно представить формулой C_xH_y . Однако в решении задач используются другие общие формулы, которые учитывают особенности строения углеводорода.

В зависимости от строения углеродной цепи углеводороды подразделяют на две группы:

- ациклические, или алифатические, то есть «жирные» (от греч. «алеифар» — «жир», так как впервые структуры с длинными углеродными цепями были обнаружены в составе жиров);
- циклические.

Открытая (незамкнутая) цепь алифатических углеводородов может быть неразветвленной или разветвленной. Углеводороды с неразветвленной углеродной цепью называют нормальными (н-) углеводородами.

Среди циклических углеводородов выделяют:

- алициклические (то есть алифатические циклические);
- ароматические (арены).

В этом случае классификационным признаком служит строение цикла.

К ароматическим углеводородам относят соединения, содержащие один или несколько бензольных циклов C_6H_6 (формула бензола).

По степени насыщенности различают:

- насыщенные (предельные) углеводороды (алканы и циклоалканы), в которых имеются только простые связи C—C и отсутствуют кратные связи;

- ненасыщенные (непредельные), содержащие наряду с одинарными связями С—С двойные и/или тройные связи (алкены, алкадиены, алкины, циклоалкены, циклоалкины).

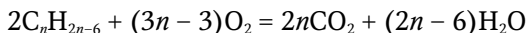
Следует заметить, что, хотя по составу бензол C_6H_6 формально соответствует ненасыщенным циклическим углеводородам (его молекулу часто изображают как шестичленный цикл с тремя двойными связями), по свойствам это соединение резко отличается от ненасыщенных веществ из-за делокализации кратных связей. Поэтому соединения ряда бензола относят к самостоятельной группе ароматических углеводородов (аренов).

Очень часто в условии задач фигурируют углеводороды неизвестного состава и/или строения. Для удобного манипулирования исходными данными часто используют общие формулы углеводородов, в которых количество атомов углерода и водорода выражается переменными величинами. При этом часто переменной (обычно n) обозначают количество атомов углерода в соединении, и, в случае если из условия ясно, к какому классу относится углеводород, количество атомов водорода также выражают этой переменной.

Приведем общие формулы для основных классов углеводородов:

- ациклические:
 - предельные — C_nH_{2n+2} (алканы);
 - непредельные — C_nH_{2n} (алкены), C_nH_{2n-2} (алкадиены и алкины);
- циклические:
 - алициклические — C_nH_{2n} (циклоалканы), C_nH_{2n-2} (циклоалкены);
 - ароматические — C_nH_{2n-6} (арены).

Полученные формулы используются наравне с обычными, перед ними уравниваются коэффициенты, которые также могут быть выражены при помощи переменных. Например, общее уравнение горения аренов:



Прием записи формул в общем виде характерен в целом для органической химии, а не только для углеводородов.

Еще одна особенность органических соединений — наличие структурных изомеров. При решении задачи часто недостаточно привести молекулярную формулу. Необходимо проанализировать, какие из изомеров удовлетворяют всем требованиям исходных условий задачи.

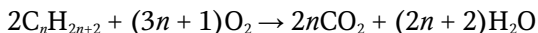
Решение задач

Задача 1

⌚ При сжигании 3,6 г алкана выделилось 5,6 л CO_2 . Вычислить объем затраченного кислорода.

⌚ Решение.

Запишем общее уравнение горения для всех алканов:



Определим количество выделившегося углекислого газа:

$$v(\text{CO}_2) = V : V_M = 5,6 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,25 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль алкана при сгорании образует n молей углекислого газа. Составим пропорцию:

1 моль $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ образует n молей CO_2 ;

x молей $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ образует 0,25 моля CO_2 ;

$$x = 0,25 \cdot 1 : n = (0,25 : n).$$

Количество алкана равно $(0,25 : n)$ молей, масса алкана равна 3,6 г, определим его молярную массу:

$$\begin{aligned} M(\text{C}_n\text{H}_{2n+2}) &= m(\text{C}_n\text{H}_{2n+2}) : v(\text{C}_n\text{H}_{2n+2}) = \\ &= 3,6 \text{ г} : (0,25 : n) \text{ моль} = 14,4n \text{ г/моль.} \end{aligned}$$

Молярная масса любого алкана также равна:

$$M(\text{C}_n\text{H}_{2n+2}) = n \cdot 12 + (2n + 2) \cdot 1 = (14n + 2) \text{ г/моль.}$$

Приравняем полученные различными способами выражения молярной массы неизвестного алкана и решим полученное уравнение:

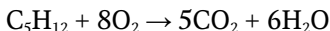
$$14,4n = 14n + 2;$$

$$0,4n = 2;$$

$$n = 5.$$

Следовательно, формула неизвестного углеводорода — C_5H_{12} . Это пентан.

Вычислим объем затраченного кислорода. Запишем уравнение горения пентана:



Количество сожженного пентана равно $(0,25 : n)$ молей = 0,05 моля.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, для сжигания 1 моля пентана необходимо 8 молей кислорода. Составим пропорцию:

для сжигания 1 моля C_5H_{12} необходимо 8 молей O_2 ;

для сжигания 0,05 моля C_5H_{12} необходимо y молей O_2 ;

$$y = 0,05 \cdot 8 : 1 = 0,4 \text{ моля.}$$

Рассчитаем объем затраченного кислорода:

$$V(\text{O}_2) = \nu \cdot V_M = 0,4 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 8,96 \text{ л.}$$

Таким образом, при сжигании данной навески пентана C_5H_{12} было затрачено 8,96 л кислорода.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 3, 26 и 27 имеют аналогичное решение. Задачи 2, 4, 11, 12, 14 и 28 решаются простой пропорцией. Все задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 7

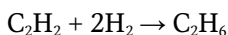
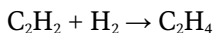
При гидрировании 672 мл ацетиленов получили смесь этана и этена, которая обесцветила 40 г 4%-го раствора бромной воды. В полученной смеси вычислить в процентах массовые доли углеводородов.

🔊 Решение.

Определим количество исходной порции ацетиленов:

$$\nu(\text{C}_2\text{H}_2) = V : V_M = 0,672 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,03 \text{ моля.}$$

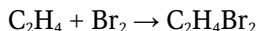
При его гидрировании образуются этен (этилен) и этан по реакциям:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций гидрирования, при гидрировании 1 моля ацетиленов образуется 1 моль этена или 1 моль этана. Следовательно, при гидрировании 0,03 моля ацетиленов образовалось 0,03 моля смеси этена и этана:

$$v(\text{C}_2\text{H}_4) + v(\text{C}_2\text{H}_6) = v(\text{C}_2\text{H}_2) = 0,03 \text{ моля.}$$

Из полученных продуктов гидрирования только непредельный этен реагирует с бромом:



Определим количество прореагировавшего брома:

$$m(\text{Br}_2) = m(\text{бромной воды}) \cdot W(\text{Br}_2) : 100 \% =$$

$$= 40 \text{ г} \cdot 4 \% : 100 \% = 1,6 \text{ г};$$

$$M(\text{Br}_2) = 2 \cdot 80 = 160 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{Br}_2) = m(\text{Br}_2) : M(\text{Br}_2) = 1,6 \text{ г} : 160 \text{ г/моль} = 0,01 \text{ моль.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции этена с бромом, 1 моль этена реагирует с 1 молеком брома. Следовательно, 0,01 моля этена прореагировало с 0,01 моля брома, то есть в смеси после гидрирования присутствовало 0,01 моля этена:

$$v(\text{C}_2\text{H}_4) = 0,01 \text{ моля.}$$

Тогда количество этана равно:

$$v(\text{C}_2\text{H}_6) = 0,03 - v(\text{C}_2\text{H}_4) = 0,03 - 0,01 = 0,02 \text{ моля.}$$

Определим массы этена, этана и их смеси:

$$M(\text{C}_2\text{H}_4) = 2 \cdot 12 + 4 \cdot 1 = 28 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_2\text{H}_4) = v(\text{C}_2\text{H}_4) \cdot M(\text{C}_2\text{H}_4) = 0,01 \text{ моля} \cdot 28 \text{ г/моль} = 0,28 \text{ г};$$

$$M(\text{C}_2\text{H}_6) = 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 = 30 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_2\text{H}_6) = v(\text{C}_2\text{H}_6) \cdot M(\text{C}_2\text{H}_6) = 0,02 \text{ моля} \cdot 30 \text{ г/моль} = 0,6 \text{ г};$$

$$m(\text{смеси}) = m(\text{C}_2\text{H}_4) + m(\text{C}_2\text{H}_6) = 0,28 + 0,6 = 0,88 \text{ г.}$$

Определим массовые доли углеводородов в смеси после гидрирования:

$$W(C_2H_4) = m(C_2H_4) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,28 \text{ г} : 0,88 \text{ г} \cdot 100 \% = 31,8 \%;$$

$$W(C_2H_6) = m(C_2H_6) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 0,6 \text{ г} : 0,88 \text{ г} \cdot 100 \% = 68,2 \%.$$

Таким образом, образованная после гидрирования ацетиленовая смесь углеводородов состоит на 31,8 % из этена и на 68,2 % из этана.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 5, 6, 9, 19, 21, 24 и 32 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 8

☉ Для гидрирования 5 г углеводорода, имеющего формулу C_3H_4 , потребовалось 2,8 л водорода. Написать структурную формулу этого углеводорода и назвать его.

☉ Решение.

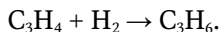
Определим количество углеводорода и водорода, потребовавшегося для его гидрирования:

$$M(C_3H_4) = 3 \cdot 12 + 4 \cdot 1 = 40 \text{ г/моль};$$

$$\nu(C_3H_4) = m(C_3H_4) : M(C_3H_4) = 5 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,125 \text{ моль};$$

$$\nu(H_2) = V : V_M = 2,8 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,125 \text{ моль}.$$

Итак, молярное отношение реагирующих веществ C_3H_4 и H_2 равно 1 : 1. Следовательно, 1 молекула C_3H_4 реагирует с 1 молекулой H_2 и уравнение реакции будет выглядеть следующим образом:



Поскольку при данных условиях полученный продукт реакции C_3H_6 дальше не гидрируется, можно заключить, что данное соединение является циклическим, то есть циклоалканом, а исходное вещество C_3H_4 — циклоалкеном.



Циклопропен

Реакция его гидрирования будет выглядеть следующим образом:



ПРИМЕЧАНИЕ



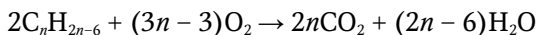
При определенных условиях и катализаторе (платина Pt) циклопропан довольно легко гидрируется с раскрытием цикла и образованием пропана. Этот факт обусловлен очень высоким напряжением в цикле (вместо 109,28 в циклопропане угол 60°).

Задача 10

☉ При сжигании 5,3 г гомолога бензола получили 8,96 л оксида углерода (IV). Определить формулу углеводорода и число его изомеров. Представить их структурные формулы.

☉ Решение.

Запишем общее уравнение горения для всех гомологов бензола:



Определим количество выделившегося углекислого газа:

$$\nu(\text{CO}_2) = V : V_M = 8,96 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,4 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль углеводорода при сгорании образует n молей углекислого газа. Составим пропорцию:

1 моль $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$ образует n молей CO_2 ;

x молей $\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$ образуют 0,4 моля CO_2 ;

$$x = 0,4 \cdot 1 : n = 0,4 : n.$$

Количество углеводорода равно (0,4 : n) молям, масса углеводорода равна 5,3 г, определим его молярную массу:

$$\begin{aligned} M(\text{C}_n\text{H}_{2n-6}) &= m(\text{C}_n\text{H}_{2n-6}) : \nu(\text{C}_n\text{H}_{2n-6}) = \\ &= 5,3 \text{ г} : (0,4 : n) \text{ молей} = 13,25n \text{ г/моль.} \end{aligned}$$

Молярная масса любого гомолога бензола также равна:

$$M(C_nH_{2n-6}) = n \cdot 12 + (2n - 6) \cdot 1 = (14n - 6) \text{ г/моль.}$$

Приравняем полученные различными способами выражения молярной массы неизвестного гомолога бензола и решим полученное уравнение:

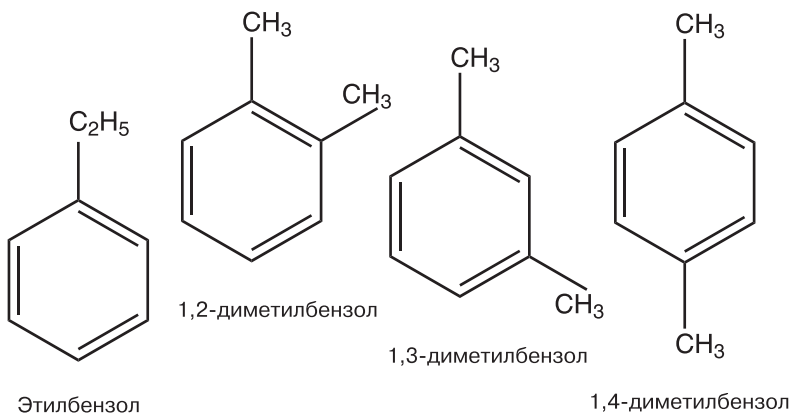
$$13,25n = 14n - 6;$$

$$0,75n = 6;$$

$$n = 8.$$

Следовательно, формула неизвестного углеводорода — C_8H_{10} . Поскольку исходное соединение — гомолог бензола, то в его структуре обязательно присутствует бензольное кольцо. Поэтому данную формулу можно представить в другом виде: $C_6H_5-C_2H_5$ (монозамещенное производное бензола) или $C_6H_4-(CH_3)_2$ (дизамещенное производное бензола).

Таким образом, возможные формулы неизвестного соединения таковы:



Общее количество изомеров — четыре.

Задача 13

⊙ Углеводород C_8H_8 , содержащий бензольное кольцо, обесцвечивает бромную воду. При каталитическом гидрировании этого углеводо-

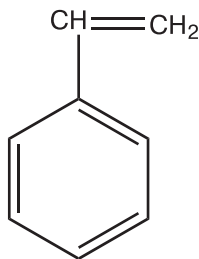
рода образуется этилциклогексан. Определить строение этого углеводорода. Сколько литров водорода потребуется для гидрирования 52 г этого углеводорода, если реакция протекает с 80%-м выходом?

🕒 Решение.

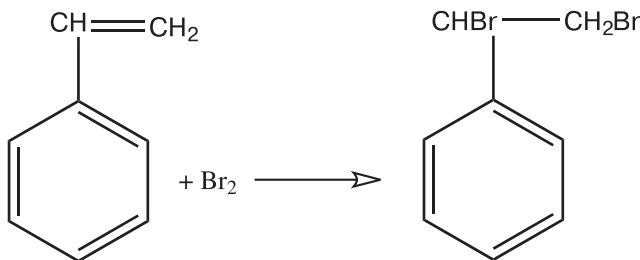
Известно, что углеводород обесцвечивает бромную воду, следовательно, кроме бензольного кольца он содержит еще и заместитель, в составе которого есть ненасыщенная связь.

Поскольку исходное соединение — гомолог бензола, и в его структуре присутствует бензольное кольцо, данную формулу можно представить в другом виде: $C_6H_5-C_2H_3$.

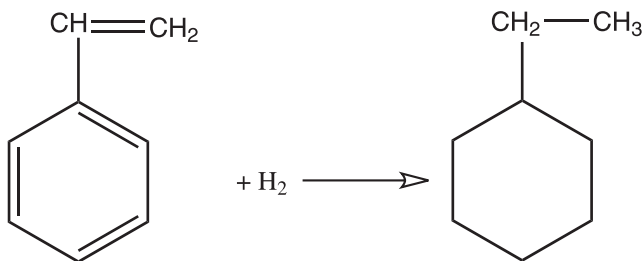
Это винилбензол.



Винильный радикал содержит двойную связь, за счет которой соединение вступает в реакции присоединения. Он может присоединить молекулу брома, при этом обесцвечивается бромная вода:



При каталитическом гидрировании винилбензола действительно образуется этилциклогексан:



Определим, какой объем потребуется для гидрирования 52 г винилбензола с 80%-м выходом.

Рассчитаем количество винилбензола:

$$M(\text{C}_8\text{H}_8) = 8 \cdot 12 + 8 \cdot 1 = 104 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{C}_8\text{H}_8) = m(\text{C}_8\text{H}_8) : M(\text{C}_8\text{H}_8) = 52 \text{ г} : 104 \text{ г/моль} = 0,5 \text{ моля}.$$

Однако все количество винилбензола не вступит в реакцию, так как она протекает с 80%-м выходом:

$$\begin{aligned} v_{\text{прореаг}}(\text{C}_8\text{H}_8) &= v(\text{C}_8\text{H}_8) \cdot \eta : 100 \% = \\ &= 0,5 \text{ моля} \cdot 80 \% : 100 \% = 0,4 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Итак, в реакцию гидрирования вступило 0,4 моля винилбензола.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции гидрирования, для гидрирования 1 моля винилбензола необходимо 4 моля водорода. Составим пропорцию:

для гидрирования 1 моля C_8H_8 необходимо 4 моля H_2 ;

для гидрирования 0,4 моля C_8H_8 необходимо x молей H_2 ;

$$x = 0,4 \cdot 4 : 1 = 1,6.$$

Таким образом, для гидрирования потребовалось 1,6 моля водорода. Найдем его объем:

$$V(\text{H}_2) = v \cdot V_M = 1,6 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 36,84 \text{ л}.$$

Для гидрирования 52 г винилбензола с 80%-м выходом потребовалось 36,84 л водорода.

ПРИМЕЧАНИЕ

Задачи 15, 17, 18, 22 и 23 являются обычными задачами на смеси, типовые решения данного типа задач рассмотрены в разд. 1.4. Все задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

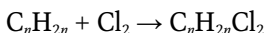
Задача 16

- ⊖ Какой объем водорода требуется для гидрирования 16,8 л газовой смеси, состоящей из дивинила и этиленового углеводорода, имеющего цис- и трансизомеры? Известно, что этиленовый углеводород может присоединять 5,6 л хлора с образованием 31,75 г дихлорида. Определить строение алкена.

- Ⓛ Решение.

Определим неизвестный этиленовый углеводород (или, другими словами, алкен). Общая формула алкенов — C_nH_{2n} .

Запишем общее уравнение присоединения хлора для всех алкенов:



Рассчитаем количество присоединенного хлора:

$$v(Cl_2) = V : V_M = 5,6 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,25 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль алкена присоединяет 1 моль хлора с образованием 1 моля дихлорида алкена. Следовательно, 0,25 моля алкена присоединяет 0,25 моля хлора с образованием 0,25 моля дихлорида алкена.

Количество дихлорида алкена $C_nH_{2n}Cl_2$ равно 0,25 моля, масса его равна 31,75 г, вычислим его молярную массу:

$$\begin{aligned} M(C_nH_{2n}Cl_2) &= m(C_nH_{2n}Cl_2) : v(C_nH_{2n}Cl_2) = \\ &= 31,75 \text{ г} : 0,25 \text{ моля} = 127 \text{ г/моль.} \end{aligned}$$

Молярная масса любого дихлорида алкена также равна:

$$M(C_nH_{2n}Cl_2) = n \cdot 12 + 2n \cdot 1 + 2 \cdot 35,5 = (14n + 71) \text{ г/моль.}$$

Приравняем полученные различными способами выражения молярной массы неизвестного дихлорида алкена и решим полученное уравнение:

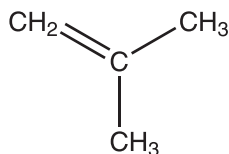
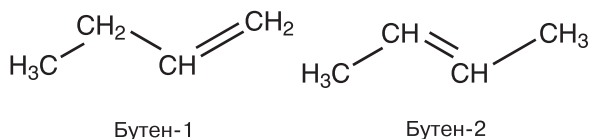
$$14n + 71 = 127;$$

$$14n = 56;$$

$$n = 4.$$

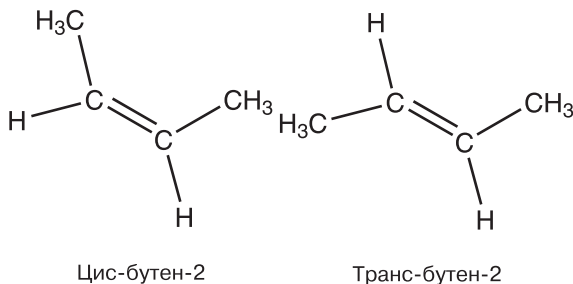
Следовательно, формула неизвестного углеводорода – C_4H_8 .

Он имеет 3 структурных изомера:



2-метилпропен-2

Лишь один из них – бутен-2 – имеет цис- и трансизомеры:



Определим количество исходной газовой смеси дивинила C_4H_6 и бутена-2 C_4H_8 :

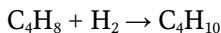
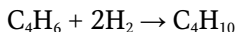
$$v(\text{смеси}) = V : V_M = 16,8 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,75 \text{ моля.}$$

При этом известно, что количество бутена-2 равно 0,25 моля (най-
дено выше).

Тогда количество дивинила равно:

$$v(\text{C}_4\text{H}_6) = v(\text{смеси}) - v(\text{C}_4\text{H}_8) = 0,75 - 0,25 = 0,5 \text{ моля.}$$

Запишем реакции гидрирования дивинила и бутена-2:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции гидрирования дивинила, 1 моль дивинила реагирует с 2 молями водорода. Следовательно, 0,5 моля дивинила реагирует с 1 молем водорода.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции гидрирования бутена-2, 1 моль бутена-2 реагирует с 1 молем водорода. Следовательно, 0,25 моля бутена-2 реагирует с 0,25 моля водорода.

Общее количество водорода, необходимое для гидрирования исходной смеси ненасыщенных соединений, равно $1 + 0,25 = 1,25$ моля. Рассчитаем его объем:

$$V(\text{H}_2) = v \cdot V_M = 1,25 \text{ моля} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 28 \text{ л.}$$

Итак, для гидрирования 16,8 л газовой смеси дивинила и бутена-2 требуется 28 л водорода.

Задача 20

- ⊙ 33,6 л метана подвергли термическому разложению. Образовавшуюся газовую смесь пропустили через избыток аммиачного раствора оксида серебра, в результате чего объем образовавшейся смеси уменьшился на 20 %. Сколько литров метана превратилось в ацетилен и сколько моль этанала можно получить из такого количества ацетилена, если учесть, что выход реакции составляет 70 %?

- ⊙ Решение.

При термическом разложении метана образуются ацетилен и водород по реакции



Пусть разложилось x молей метана.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при разложении 2 молей метана образуется 1 моль ацетилена и 3 моля водорода. Составим пропорцию:

при разложении 2 молей CH_4 образуется 1 моль C_2H_2 и 3 моля H_2 ;

при разложении x молей CH_4 образуется y молей C_2H_2 и z молей H_2 ;

$$y = x \cdot 1 : 2 = 0,5x;$$

$$z = x \cdot 3 : 2 = 1,5x.$$

Таким образом, разложилось x молей метана, образовалось $0,5x$ молей ацетилена и $1,5x$ молей водорода.

Начальное количество метана равно:

$$v(\text{CH}_4) = V : V_M = 33,6 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 1,5 \text{ моля.}$$

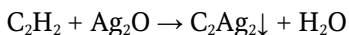
После термической обработки количество метана составило:

$$v(\text{CH}_4) = (1,5 - x) \text{ моля.}$$

Общее количество образованной газовой смеси равно:

$$\begin{aligned} v(\text{смеси}) &= v(\text{CH}_4) + v(\text{C}_2\text{H}_2) + v(\text{H}_2) = 1,5 - x + 0,5x + 1,5x = \\ &= (1,5 + x) \text{ молей.} \end{aligned}$$

Образовавшуюся газовую смесь пропустили через избыток аммиачного раствора оксида серебра, в результате чего содержащийся в смеси ацетилен поглотился вследствие реакции с оксидом серебра:



При этом объем смеси уменьшился на 20 %, следовательно, количество смеси также уменьшилось на 20 % и составило 80 % от исходного:

$$v_{\text{конеч}}(\text{смеси}) = v_{\text{конеч}}(\text{смеси}) = (1,5 + x) \cdot 80 \% : 100 \% = (1,2 + 0,8x) \text{ молей.}$$

Конечная смесь содержит лишь метан и водород:

$$v_{\text{конеч}}(\text{смеси}) = v(\text{CH}_4) + v(\text{H}_2) = 1,5 - x + 1,5x = (1,5 + 0,5x) \text{ моль.}$$

Приравняем полученные различными способами выражения количества газовой смеси и решим полученное уравнение:

$$1,2 + 0,8x = 1,5 + 0,5x;$$

$$0,3x = 0,3;$$

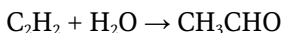
$$x = 1.$$

Следовательно, разложился 1 моль метана, образовалось 0,5 моля ацетилена и 1,5 моля водорода.

Объем превратившегося в ацетилен метана равен:

$$V(\text{H}_2) = \nu \cdot V_M = 1 \text{ моль} \cdot 22,4 \text{ л/моль} = 22,4 \text{ л.}$$

Образованный из метана 0,5 моля ацетилена при гидратации в присутствии солей ртути образуют этаналь (ацетальдегид):



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из 1 моля ацетилена образуется 1 моль этанала.

Следовательно, из 0,5 моля ацетилена образуется 0,5 моля этанала.

Однако реакция протекает с 70%-м выходом:

$$\begin{aligned} \nu_{\text{практ}}(\text{CH}_3\text{CHO}) &= \nu_{\text{теор}}(\text{CH}_3\text{CHO}) \cdot \eta : 100 \% = \\ &= 0,5 \text{ моля} \cdot 70 \% : 100 \% = 0,35 \text{ моля.} \end{aligned}$$

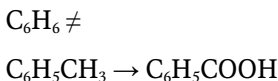
Таким образом, в результате превращений 22,4 л метана превратилось в ацетилен, из которого можно получить 0,35 моля этанала при 70%-м выходе реакции гидратации.

Задача 25

- ⊙ При окислении смеси равного количества бензола и толуола образовалось 9,76 г одноосновной кислоты. При взаимодействии полученной кислоты с гидрокарбонатом натрия выделился газ, объем которого в 24 раза меньше объема кислорода, израсходованного на сжигание первоначальной смеси. Вычислить в процентах массовую долю бензола в исходной смеси.

🔊 Решение.

Из исходной смеси ароматических соединений лишь толуол подвергается окислению до кислот. При этом образуется бензойная кислота:

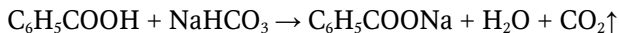


Определим ее количество:

$$\begin{aligned} M(\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}) &= 7 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 122 \text{ г/моль}; \\ \nu(\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}) &= m(\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}) : M(\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}) = \\ &= 9,76 \text{ г} : 122 \text{ г/моль} = 0,08 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Значит, согласно схеме, исходное количество толуола, из которого была образована бензойная кислота, также равно 0,08 моля.

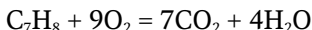
При взаимодействии бензойной кислоты с гидрокарбонатом натрия образуется бензоат натрия и выделяется углекислый газ:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при действии 1 моля бензойной кислоты образуется 1 моль углекислого газа. Следовательно, при действии 0,08 моля бензойной кислоты образуется 0,08 моля углекислого газа. Это в 24 раза меньше количества кислорода, израсходованного на сжигание первоначальной смеси. Значит, количество кислорода, затраченного на сжигание исходной смеси, равно:

$$\nu(\text{O}_2) = 0,08 \cdot 24 = 1,92 \text{ моля}.$$

Определим количество кислорода, затраченного на сжигание 0,08 моля толуола. Запишем уравнение горения толуола:

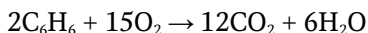


Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, для сгорания 1 моля толуола требуется 9 молей кислорода. Составим пропорцию:

$$\begin{aligned} \text{для сгорания 1 моля } \text{C}_7\text{H}_8 &\text{ требуется 9 молей } \text{O}_2; \\ \text{для сгорания 0,08 моля } \text{C}_7\text{H}_8 &\text{ требуется } x \text{ молей } \text{O}_2; \\ x &= 0,08 \cdot 9 : 1 = 0,72. \end{aligned}$$

Итак, для сжигания исходной смеси требуется 1,92 моля кислорода, из которых 0,72 моля необходимо для сжигания толуола. Следовательно, для сжигания бензола необходимо $1,92 - 0,72 = 1,2$ моля кислорода.

Запишем уравнение горения бензола:



Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, для сгорания 2 молей бензола требуется 15 молей кислорода. Составим пропорцию:

для сгорания 2 молей C_6H_6 требуется 15 молей O_2 ;

для сгорания y молей C_6H_6 требуется 1,2 моля O_2 ;

$$y = 1,2 \cdot 2 : 15 = 0,16.$$

Итак, мы определили, что количество бензола в исходной смеси ароматических соединений равно 0,16 моля.

Вычислим массы компонентов исходной смеси:

$$M(\text{C}_6\text{H}_6) = 6 \cdot 12 + 6 \cdot 1 = 78 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_6\text{H}_6) = \nu(\text{C}_6\text{H}_6) \cdot M(\text{C}_6\text{H}_6) = 0,16 \text{ моля} \cdot 78 \text{ г/моль} = 12,48 \text{ г};$$

$$M(\text{C}_7\text{H}_8) = 7 \cdot 12 + 8 \cdot 1 = 92 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_7\text{H}_8) = \nu(\text{C}_7\text{H}_8) \cdot M(\text{C}_7\text{H}_8) = 0,08 \text{ моль} \cdot 92 \text{ г/моль} = 7,36 \text{ г}.$$

Масса смеси равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{C}_6\text{H}_6) + m(\text{C}_7\text{H}_8) = 12,48 + 7,36 = 19,84 \text{ г}.$$

Определим массовую долю бензола в исходной смеси:

$$\begin{aligned} W(\text{C}_6\text{H}_6) &= m(\text{C}_6\text{H}_6) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = \\ &= 12,48 \text{ г} : 19,84 \text{ г} \cdot 100 \% = 62,9 \%. \end{aligned}$$

Таким образом, содержание бензола в исходной смеси ароматических соединений составляло 62,9 % по массе.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 29–31 и 33 являются обычными задачами на газовые смеси и рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

3.2. КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Существует огромное количество органических соединений, в состав которых, наряду с углеродом и водородом, входит кислород. Атом кислорода содержится в различных функциональных группах, определяющих принадлежность соединения к определенному классу.

Приведем основные классы кислородсодержащих соединений:

- содержащие гидроксильную группу:
 - спирты — $C_nH_{2n+1}OH$;
 - фенолы — $C_nH_{2n-7}OH$;
- содержащие карбонильную группу:
 - альдегиды — $C_nH_{2n+1}CHO$;
 - кетоны — $(C_nH_{2n+1})(C_mH_{2m+1})CO$;
- содержащие карбоксильную группу:
 - карбоновые кислоты — $C_nH_{2n+1}COOH$.

Соединения каждого класса образуют различные производные. Например, к производным спиртов относятся простые эфиры ROR' , к производным карбоновых кислот — сложные эфиры $RCOOR'$, амиды $RCONH_2$, ангидриды $(RCO)_2O$, хлорангидриды $RCOCl$ и т. д.

Кроме того, большую группу составляют гетерофункциональные соединения, содержащие различные функциональные группы:

- гидроксальдегиды $HO-C_nH_{2n}-CHO$,
- гидроксикетоны $HO-C_nH_{2n}-CO-R'$,
- гидроксикислоты $HO-C_nH_{2n}-COOH$ и т. п.

К важнейшим гетерофункциональным кислородсодержащим соединениям относятся углеводы $C_x(H_2O)_y$, молекулы которых включают гидроксильные, карбонильные и производные от них группы.

Спирты — соединения алифатического ряда, содержащие одну или несколько гидроксильных групп. Общая формула спиртов с одной гидроксигруппой имеет вид $R-OH$. Фенолы — гидроксисоединения, в молекулах которых OH -группы связаны непосредственно с бензольным ядром. В зависимости от числа OH -групп различают одноатомные фенолы (например, вышеприведенные фенол и крезолы) и многоатомные.

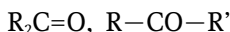
Альдегиды и кетоны относятся к карбонильным органическим соединениям. Карбонильными соединениями называют органические вещества, в молекулах которых имеется группа $>C=O$ (карбонил или оксогруппа).

Общая формула карбонильных соединений: $RCOX$.

Альдегиды — органические соединения, в молекулах которых атом углерода карбонильной группы (карбонильный углерод) связан с атомом водорода. Общая формула: $R-CH=O$. Функциональная группа $-CH=O$ называется альдегидной.

Кетоны — органические вещества, молекулы которых содержат карбонильную группу, соединенную с двумя углеводородными радикалами.

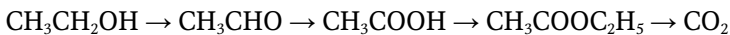
Общие формулы:



Карбоновые кислоты — органические соединения, содержащие одну или несколько карбоксильных групп $-COOH$, связанных с углеводородным радикалом. Карбоксильная группа содержит две функциональные группы — карбонил $>C=O$ и гидроксил $-OH$, непосредственно связанные друг с другом.

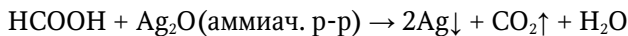
Углеводы (сахара) — органические вещества, состав которых выражается формулой $C_x(H_2O)_y$, где x и $y > 3$. По способности к гидролизу углеводы делятся на простые — моносахариды и сложные — олигосахариды и полисахариды. Моносахариды не гидролизуются с образованием более простых углеводов. Сложные углеводы гидролизуются до моносахаридов.

В задачах, связанных с кислородсодержащими органическими соединениями, часто демонстрируется взаимосвязь классов кислородсодержащих соединений. Например, первоначально присутствующий спирт через несколько стадий окисления превращается в сложный эфир:



Необходимо помнить о том, что соединение, которое номинально относится к определенному классу соединений, обладает свойствами других классов.

Яркий представитель — муравьиная кислота НСООН . Являясь кислотой, она при определенных условиях проявляет свои свойства как альдегида НО—СНО :



Особенно внимательно нужно относиться к соединениям с несколькими функциональными группами — оксикислотам, углеводам, α, β -ненасыщенным карбонильным соединениям.

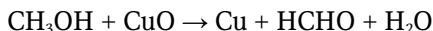
Спирты. Решение задач

Задача 10

☞ 11 г смеси паров этанола и метанола пропустили через 32 г оксида меди (II). 8 г оксида не вступило в реакцию. Вычислить массовую долю метанола в исходной смеси.

🕒 Решение.

Спирты восстанавливают оксид меди до свободной меди, окисляясь при этом до карбонильных соединений:



Решим задачу при помощи системы из двух уравнений.

Пусть количества спиртов равны:

$$v(\text{CH}_3\text{OH}) = x \text{ молей};$$

$$v(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = y \text{ молей}.$$

Определим массы компонентов исходной смеси спиртов:

$$M(\text{CH}_3\text{OH}) = 12 + 4 \cdot 1 + 16 = 32 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CH}_3\text{OH}) = v(\text{CH}_3\text{OH}) \cdot M(\text{CH}_3\text{OH}) = x \text{ молей} \cdot 32 \text{ г/моль} = 32x \text{ г};$$

$$M(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 16 = 46 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = v(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) \cdot M(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = y \text{ молей} \cdot 46 \text{ г/моль} = 46y \text{ г}.$$

Масса смеси равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{CH}_3\text{OH}) + m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 32x + 46y = 11 \text{ г}.$$

Получено первое уравнение.

Рассчитаем количество вступившего в реакцию оксида меди:

$$m_{\text{прореаг}}(\text{CuO}) = m_{\text{исх}}(\text{CuO}) - m_{\text{кон}}(\text{CuO}) = 32 - 8 = 24 \text{ г};$$

$$M(\text{CuO}) = 64 + 16 = 80 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{CuO}) = m(\text{CuO}) : M(\text{CuO}) = 24 \text{ г} : 80 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моль}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций окисления спиртов, 1 моль оксида меди окисляет 1 моль любого спирта. Следовательно, 0,3 моля оксида меди окисляет 0,3 моля смеси спиртов.

Теперь нам известно общее количество спиртов:

$$v(\text{смеси}) = v(\text{CH}_3\text{OH}) + v(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = x + y = 0,3 \text{ моля}.$$

Получено второе уравнение.

Решим полученную систему уравнений:

$$32x + 46y = 11;$$

$$x + y = 0,3.$$

Умножим второе уравнение на 32 и вычтем из первого:

$$32x - 32x + 46y - 32y = 11 - 9,6;$$

$$14y = 1,4;$$

$$y = 0,1;$$

$$x = 0,3 - 0,1 = 0,2.$$

Определим массы компонентов исходной смеси спиртов:

$$m(\text{CH}_3\text{OH}) = 32x = 6,4 \text{ г};$$

$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 46y = 4,6 \text{ г}.$$

Масса смеси равна 11 г. Вычислим массовую долю метанола в исходной смеси:

$$\begin{aligned} W(\text{CH}_3\text{OH}) &= m(\text{CH}_3\text{OH}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = \\ &= 6,4 \text{ г} : 11 \text{ г} \cdot 100 \% = 58,2 \%. \end{aligned}$$

Таким образом, содержание метанола в исходной смеси спиртов составило 62,9 % по массе.

ПРИМЕЧАНИЕ



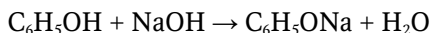
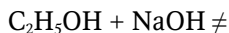
Задачи 6, 9, 17 и 20 решаются по общим уравнениям, приведенным в теоретической части разд. 1.1. Задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 11

- ☉ Для нейтрализации смеси фенола и этанола потребовалось 50 мл 18%-го раствора гидроксида натрия с плотностью, равной 1,2 г/мл. Такое же количество смеси взаимодействует с 9,2 г металлического натрия. Вычислить в процентах массовые доли компонентов исходной смеси.

- 🕒 Решение.

Фенолы, в отличие от спиртов, обладают более сильными кислотными свойствами и вступают в реакции с гидроксидами, образуя феноляты:



Определим количество необходимого для нейтрализации фенола гидроксида натрия:

$$m(\text{р-ра NaOH}) = \rho \cdot V = 1,2 \text{ г/мл} \cdot 50 \text{ мл} = 60 \text{ г};$$

$$m(\text{NaOH}) = m(\text{р-ра NaOH}) \cdot W(\text{NaOH}) : 100 \% =$$

$$= 60 \text{ г} \cdot 18 \% : 100 \% = 10,8 \text{ г};$$

$$M(\text{NaOH}) = 23 + 1 + 16 = 40 \text{ г/моль};$$

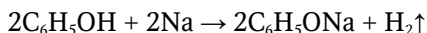
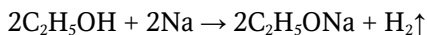
$$v(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) =$$

$$= 10,8 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,27 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации, 1 моль гидроксида натрия нейтрализует 1 моль фенола. Следовательно, 0,27 моля гидроксида натрия нейтрализует 0,27 моля фенола.

Итак, количество фенола нам известно — 0,27 моля.

С металлическим натрием реагируют все органические гидроксильные соединения:



Количество вступившего в реакцию натрия равно:

$$M(\text{Na}) = 23 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{Na}) = m(\text{Na}) : M(\text{Na}) = 9,2 \text{ г} : 23 \text{ г/моль} = 0,4 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, и спирт, и фенол реагируют с натрием в мольном отношении 1 : 1. Следовательно, количество прореагировавшей смеси фенола и этанола также равно 0,4 моля.

При этом количество фенола нам известно. По разнице определим количество метанола:

$$\nu(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = \nu(\text{смеси}) - \nu(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}) = 0,4 - 0,27 = 0,13 \text{ моля.}$$

Рассчитаем массы компонентов исходной смеси гидроксильных соединений:

$$M(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 16 = 46 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = \nu(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) \cdot M(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 0,13 \text{ моль} \cdot 46 \text{ г/моль} = 5,98 \text{ г};$$

$$M(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}) = 6 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 16 = 94 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}) = \nu(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}) \cdot M(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}) = 0,27 \text{ моль} \cdot 94 \text{ г/моль} = 25,38 \text{ г.}$$

Масса смеси равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) + m(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}) = 5,98 + 25,38 = 31,36 \text{ г.}$$

Определим массовые доли фенола и этанола в исходной смеси:

$$\begin{aligned} W(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) &= m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = \\ &= 5,98 \text{ г} : 31,36 \text{ г} \cdot 100 \% = 19,1 \%; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}) &= m(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = \\ &= 25,38 \text{ г} : 31,36 \text{ г} \cdot 100 \% = 80,9 \%. \end{aligned}$$

Таким образом, исходная смесь гидроксильных соединений содержала по массе 19,1 % этанола и 80,9 % фенола.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 1, 2, 5, 7, 8, 13–15 и 19 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 12

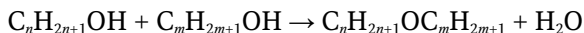
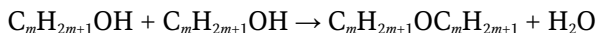
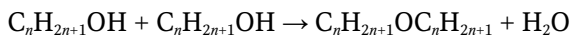
- ☉ При количественной межмолекулярной дегидратации смеси двух одноатомных спиртов неизвестного строения выделилось 10,8 г воды и образовалось 36 г смеси трех, принадлежащих к одному и тому же классу органических соединений в равных молярных соотношениях. Каким будет строение исходных спиртов?

- Ⓛ Решение.

При межмолекулярной дегидратации одноатомных спиртов образуются простые эфиры:



В случае же смеси двух одноатомных спиртов возможны комбинации простых эфиров различного строения. Запишем уравнения в общем виде:



Определим количество выделившейся в результате дегидратации воды:

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{H}_2\text{O}) = m(\text{H}_2\text{O}) : M(\text{H}_2\text{O}) = 10,8 \text{ г} : 18 \text{ г/моль} = 0,6 \text{ моля}.$$

Поскольку эфиры образовались в равных молярных соотношениях, а реакции идентичны, то можно сделать вывод, что во всех реакциях образовалось одинаковое количество воды, то есть $0,6 : 3 = 0,2$ моля.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, 1 моль одного спирта реагирует с 1 молеком другого, образуя при этом 1 моль простого эфира и 1 моль воды. Следовательно, во всех реакциях реагировало по 0,2 моля спиртов и образовывалось 0,2 моля эфира и 0,2 моля воды. Следовательно, исходное количество каждого из спиртов равно:

$$\nu(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}) = \nu(\text{C}_m\text{H}_{2m+1}\text{OH}) = 0,2 + 0,2 + 0,2 = 0,6 \text{ моля.}$$

Выразим массы спиртов через переменные n и m :

$$M(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}) = n \cdot 12 + (2n + 2) \cdot 1 + 16 = (14n + 18) \text{ г/моль;}$$

$$m(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}) = \nu \cdot M =$$

$$= 0,6 \text{ моля} \cdot (14n + 18) \text{ г/моль} = (8,4n + 10,8) \text{ г;}$$

$$M(\text{C}_m\text{H}_{2m+1}\text{OH}) = m \cdot 12 + (2m + 2) \cdot 1 + 16 = (14m + 18) \text{ г/моль;}$$

$$m(\text{C}_m\text{H}_{2m+1}\text{OH}) = \nu \cdot M =$$

$$= 0,6 \text{ моля} \cdot (14m + 18) \text{ г/моль} = (8,4m + 10,8) \text{ г;}$$

$$m(\text{смеси}) = m(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}) + m(\text{C}_m\text{H}_{2m+1}\text{OH}) =$$

$$= 8,4n + 10,8 + 8,4m + 10,8 = (8,4(n + m) + 21,6) \text{ г.}$$

Масса реакционной смеси постоянная, следовательно, масса исходной смеси спиртов равна сумме масс смеси эфиров и воды:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}) + m(\text{C}_m\text{H}_{2m+1}\text{OH}) = 36 + 10,8 = 46,8 \text{ г.}$$

Приравняем полученные различными способами выражения массы смеси спиртов и решим полученное уравнение:

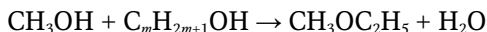
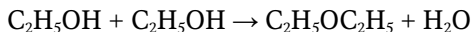
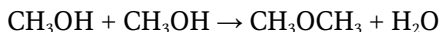
$$8,4(n + m) + 21,6 = 46,8;$$

$$8,4(n + m) = 25,2;$$

$$n + m = 3,$$

n и m — это количество атомов углерода в двух спиртах. Поскольку эти переменные могут принимать лишь целые положительные значения (то есть натуральные числа), следовательно, они должны быть равны 1 и 2.

Таким образом, исходная смесь представляла собой смесь метанола CH_3OH и этанола $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, а при их межмолекулярной дегидратации протекали реакции:



ПРИМЕЧАНИЕ



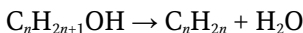
Задача 4 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом к книге диске. Задачи 16 и 21 являются обычными задачами на смеси, типовые решения данного типа задач рассмотрены в разд. 1.4. Все задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 18

☉ При взаимодействии 50 г насыщенного одноатомного спирта с концентрированной серной кислотой выделился газ, выход которого составит 67 %. Он полностью поглотился 1000 г 5 %-го раствора перманганата калия. Образовалось 26,1 г осадка. Определить молекулярную формулу данного спирта.

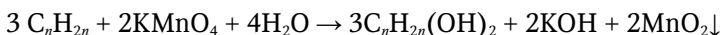
☪ Решение.

При взаимодействии насыщенных одноатомных спиртов с концентрированной серной кислотой происходит их дегидратация. Запишем уравнение в общем виде:



Поскольку образующийся алкен является газообразным веществом, можно сделать вывод, что он и, следовательно, исходный спирт содержат небольшое количество атомов углерода.

При поглощении алкена раствором перманганата калия происходит его окисление до диола:



При этом выпадает бурый осадок диоксида марганца.

Вычислим его количество:

$$M(\text{MnO}_2) = 55 + 2 \cdot 16 = 87 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{MnO}_2) = m(\text{MnO}_2) : M(\text{MnO}_2) = 26,1 \text{ г} : 87 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, при окислении 3 молей алкена выделяется 2 моля диоксида марганца. Составим пропорцию:

при окислении 3 молей C_nH_{2n} выделяется 2 моля MnO_2 ;

при окислении x молей C_nH_{2n} выделяется 0,3 моля MnO_2 ;

$$x = 0,3 \cdot 3 : 2 = 0,45.$$

Известно, что выход алкена составил 67 %. Определим его теоретическое количество:

$$\begin{aligned} \nu_{\text{теор}}(\text{C}_n\text{H}_{2n}) &= \nu_{\text{практ}}(\text{C}_n\text{H}_{2n}) : \eta \cdot 100 \% = \\ &= 0,45 \text{ моля} : 67 \% \cdot 100 \% = 0,67 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Таким образом, из 50 г спирта должно было образоваться 0,67 моля алкена.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции дегидратации спирта, из 1 моля спирта образуется 1 моль алкена. Следовательно, из 0,67 моля спирта образуется 0,67 моля алкена, то есть количество исходного спирта также равно 0,67 моля.

Рассчитаем молярную массу спирта:

$$\begin{aligned} M(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}) &= m(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}) : \nu(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}) = \\ &= 50 \text{ г} : 0,67 \text{ г/моль} = 74 \text{ г/моль}. \end{aligned}$$

Выразим молярную массу спирта через n и приравняем к найденному значению:

$$M(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}) = n \cdot 12 + (2n + 2) \cdot 1 + 16 = (14n + 18) = 74 \text{ г/моль};$$

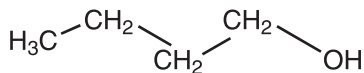
$$14n + 18 = 74;$$

$$14n = 56;$$

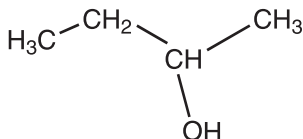
$$n = 4.$$

Следовательно, исходный спирт – бутанол C_4H_9OH .

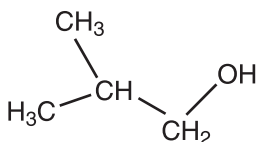
В задаче не требуется устанавливать структурную формулу, однако все же следует рассмотреть, какие изомеры бутанола удовлетворяют условию задачи. У бутанола существует четыре изомера:



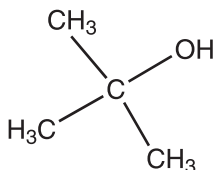
Бутанол-1 (н-бутанол)



Бутанол-2 (втор-бутанол)



2-метилпропанол-1 (изо-бутанол)



2-метилпропанол-2 (трет-бутанол)

2-метилпропанол-2 является третичным спиртом и не образует алкенов при обработке концентрированной серной кислотой. Остальные изомеры являются первичными и вторичными спиртами, образующими алкены при дегидратации.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 3 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом к книге диске.

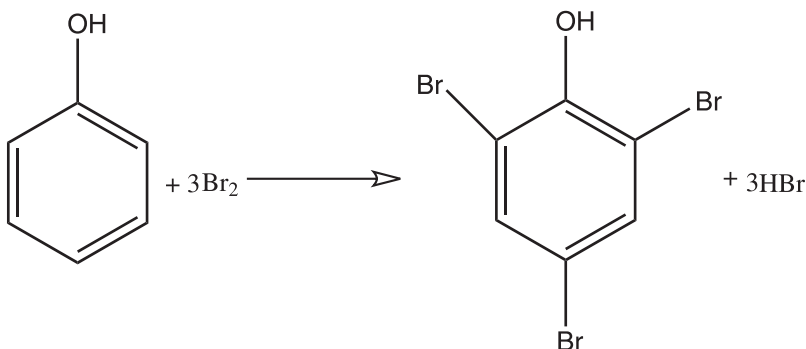
Фенолы. Решение задачи

Задача 2

☉ Смесь бензойной кислоты и фенола полностью провзаимодействовала с 1,5 кг 3,2%-го раствора бромной воды. После этого полученные продукты нейтрализовали. На нейтрализацию потратилось 180,2 л 10 %-го раствора гидроксида натрия, плотность которого 1,11 г/мл. Вычислить количество взятых веществ в первоначальной смеси.

☉ Решение.

Фенол, в отличие от бензойной кислоты, достаточно легко вступает в реакции электрофильного замещения благодаря тому, что в его составе находится электронодонорная гидроксильная группа (в составе бензойной кислоты, наоборот, — электроноакцепторная карбоксильная группа). При этом замещаются все три активных положения в бензольном кольце:



Вычислим количество затраченного на реакцию брома:

$$m(\text{Br}_2) = m(\text{бромной воды}) \cdot W(\text{Br}_2) : 100 \% =$$

$$= 1500 \text{ г} \cdot 3,2 \% : 100 \% = 48 \text{ г};$$

$$M(\text{Br}_2) = 2 \cdot 80 = 160 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{Br}_2) = m(\text{Br}_2) : M(\text{Br}_2) = 48 \text{ г} : 160 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля}.$$

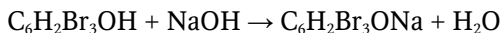
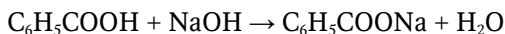
Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции с бромной водой, 1 моль фенола реагирует с 3 молями брома.

Составим пропорцию:

$$\begin{aligned} 1 \text{ моль фенола реагирует с } 3 \text{ молями брома;} \\ x \text{ молей фенола реагируют с } 0,3 \text{ моля брома;} \\ x = 0,3 \cdot 1 : 3 = 0,1. \end{aligned}$$

Следовательно, в исходной смеси присутствовало 0,1 моля фенола.

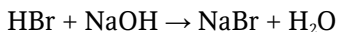
И бензойная кислота, и образованный трибромфенол реагируют с гидроксидом натрия:



ВНИМАНИЕ



Не следует забывать о том, что в реакционной смеси присутствует бромоводородная кислота, образованная при обесцвечивании бромной воды, которая также будет реагировать с гидроксидом натрия. Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции фенола с бромной водой, количество образованной бромоводородной кислоты равно 0,3 моля.



Вычислим количество затраченного на нейтрализацию гидроксида натрия:

$$m(\text{р-ра NaOH}) = \rho \cdot V = 1,11 \text{ г/мл} \cdot 180,2 \text{ мл} = 200 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{NaOH}) &= m(\text{р-ра NaOH}) \cdot W(\text{NaOH}) : 100 \% = \\ &= 200 \text{ г} \cdot 10 \% : 100 \% = 20 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{NaOH}) = 40 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) = 20 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,5 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам всех реакций нейтрализации, 1 моль щелочи нейтрализует 1 моль вещества. Следовательно, 0,3 моля щелочи нейтрализует 0,3 моля бромоводородной кислоты, 0,1 моля щелочи нейтрализует 0,1 моля трибромфенола. Оставшееся количество щелочи, которое нейтрализует бензойную кислоту, равно:

$$v(\text{NaOH для нейтр. C}_6\text{H}_5\text{COOH}) = 0,5 - 0,3 - 0,1 = 0,1 \text{ моля.}$$

Такое же количество требуется и самой бензойной кислоты.

Таким образом, в исходной смеси присутствовало 0,1 моля фенола и 0,1 моля бензойной кислоты.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 1, 3 и 4 решаются простой пропорцией по молярным массам веществ и рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

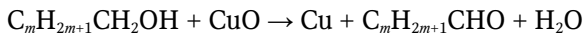
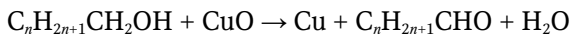
Карбонильные соединения. Решение задач

Задача 5

5,3 г равномолярной смеси двух насыщенных одноатомных спиртов количественно были окислены, для чего потребовалось 8 г оксида меди (II). Полученные альдегиды при взаимодействии с аммиачным раствором оксида серебра образовали 32,4 г осадка. Какие спирты были взяты?

Решение.

Как уже было упомянуто в задаче 1 разд. 3.1, спирты восстанавливают оксид меди до свободной меди, окисляясь при этом до карбонильных соединений. Запишем уравнения реакций для двух различных насыщенных одноатомных спиртов в общем виде:



В данном случае n или m может принимать значение 0.

Определим количество вступившего в реакцию оксида меди:

$$M(CuO) = 80 \text{ г/моль};$$

$$\nu(CuO) = m(CuO) : M(CuO) = 8 \text{ г} : 80 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля.}$$

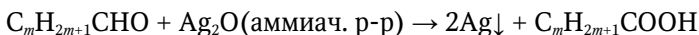
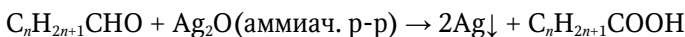
Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций окисления спиртов 1 моль оксида меди окисляет 1 моль любого спирта. Следовательно, 0,1 моля оксида меди окисляет 0,1 моля смеси спиртов.

Известно, что смесь спиртов равномолярна, то есть

$$\nu(C_nH_{2n+1}CH_2OH) = \nu(C_mH_{2m+1}CH_2OH) = 0,1 : 2 = 0,05 \text{ моля.}$$

При этом количества образованных в реакции альдегидов также равны 0,05 моля.

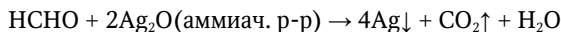
Полученные альдегиды при взаимодействии с аммиачным раствором оксида серебра образуют кислоты, при этом осаждается металлическое серебро:



ВНИМАНИЕ



Данная реакция называется реакцией «серебряного зеркала». Это распространенная качественная реакция на карбонильные соединения. В данном случае существует важное исключение. Единственный альдегид с двумя равноценными атомами водорода — ацетальдегид $HCNO$ — способен окисляться оксидом серебра до углекислого газа. При этом стехиометрические коэффициенты другие:



Определим количество образованного в результате реакции осадка серебра:

$$M(Ag) = 108 \text{ г/моль};$$

$$v(Ag) = m(Ag) : M(Ag) = 32,4 \text{ г} : 108 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам общей реакции окисления альдегидов, при окислении 1 моля альдегида образуется 2 моля серебра. Составим пропорцию:

при окислении 1 моля $C_nH_{2n+1}CHO$ образуется 2 моля Ag ;

при окислении 0,05 моля $C_nH_{2n+1}CHO$ образуется x молей Ag ;

$$x = 0,05 \cdot 2 : 1 = 0,1.$$

Таким образом, при окислении 0,05 моля каждого альдегида должно было образоваться по 0,1 моля серебра, то есть в сумме — 0,2 моля осадка серебра.

Однако фактически выпало 0,3 моля серебра, значит, мы имеем дело с исключением и один из альдегидов является формальдегидом, который был образован окислением метанола CH_3OH ($n = 0$).

Итак, формула одного из спиртов известна — CH_3OH .

Определим формулу второго спирта.

Найдем массу метанола:

$$M(\text{CH}_3\text{OH}) = 12 + 4 \cdot 1 + 16 = 32 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CH}_3\text{OH}) = \nu(\text{CH}_3\text{OH}) \cdot M(\text{CH}_3\text{OH}) = 0,05 \text{ моля} \cdot 32 \text{ г/моль} = 1,6 \text{ г.}$$

Массу второго ацетальдегида рассчитаем по разнице:

$$m(\text{C}_m\text{H}_{2m+1}\text{CH}_2\text{OH}) = m(\text{смеси}) - m(\text{CH}_3\text{OH}) = 5,3 - 1,6 = 3,7 \text{ г.}$$

Масса и количество второго спирта известны, вычислим его молярную массу:

$$M(\text{C}_m\text{H}_{2m+1}\text{CH}_2\text{OH}) = m : \nu = 3,7 \text{ г} : 0,05 \text{ г/моль} = 74 \text{ г/моль.}$$

Выразим молярную массу спирта через n и приравняем к найденному значению:

$$M(\text{C}_m\text{H}_{2m+1}\text{CH}_2\text{OH}) = (m + 1) \cdot 12 + (2m + 4) \cdot 1 + 16 =$$

$$= (14m + 32) = 74 \text{ г/моль};$$

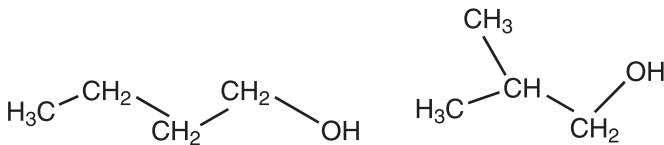
$$14m + 32 = 74;$$

$$14m = 42;$$

$$m = 3.$$

Следовательно, второй спирт из смеси — бутанол $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$.

В данном случае по условию задачи подходят только первичные спирты, так как только при их окислении образуются альдегиды:



Бутанол-1 (н-бутанол)

2-метилпропанол-1 (изо-бутанол)

Первый же спирт из смеси, как уже было найдено, — метанол.

Таким образом, были взяты метанол CH_3OH и бутанол (бутанол-1 либо 2-метилпропанол-1) $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$.

ПРИМЕЧАНИЕ

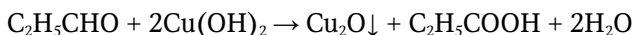
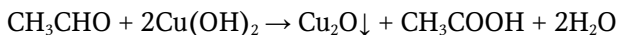
Задача 4 имеет аналогичное решение. Задачи 1 и 2, касающиеся восстановления оксида серебра карбонильными соединениями, и задача 3 решаются простой пропорцией. Все задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 6

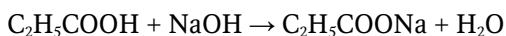
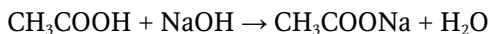
- ☉ Смесь уксусного и пропионового альдегидов, содержащую 8,4 моля протонов, окислили гидроксидом меди (II). Полученные кислоты нейтрализовали гидроксидом натрия. Образовалось 27,7 г смеси солей. Все реакции идут со 100%-м выходом. Определить концентрацию ацетата натрия в растворе, полученном растворением 27,7 г смеси солей в 12 молях воды.

- 🕒 Решение.

Альдегиды восстанавливают гидроксид меди до окиси меди (I) Cu_2O , окисляясь при этом до кислот. Запишем уравнения реакций для уксусного и пропионового альдегидов:



Полученные органические одноосновные кислоты нейтрализовали гидроксидом натрия:



Решим задачу при помощи системы из двух уравнений.

Пусть количества альдегидов равны:

$$v(\text{CH}_3\text{CHO}) = x \text{ молей};$$

$$v(\text{C}_2\text{H}_5\text{CHO}) = y \text{ молей}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций окисления альдегидов, из 1 моля альдегида образуется 1 моль кислоты, из ко-

торой после нейтрализации образуется 1 моль натриевой соли, следовательно, количество образовавшихся солей равны:

$$v(\text{CH}_3\text{COONa}) = x \text{ молей};$$

$$v(\text{C}_2\text{H}_5\text{COONa}) = y \text{ молей}.$$

Определим количество протонов в 1 моле этанала и 1 моле пропанала.

Количество протонов равно заряду ядра, то есть порядковому номеру элемента:

$$z(\text{H}) = 1;$$

$$z(\text{C}) = 6;$$

$$z(\text{O}) = 8.$$

Количество протонов в молекуле этанала и молекуле пропанала:

$$N(\text{CH}_3\text{CHO}) = 2 \cdot 6 + 4 \cdot 1 + 8 = 24;$$

$$N(\text{C}_2\text{H}_5\text{CHO}) = 3 \cdot 6 + 6 \cdot 1 + 8 = 32.$$

Следовательно, количество молей протонов в x молях этанала и y молях пропанала равно $(24x + 32y)$ или 8,4 моля.

Получено первое уравнение: $24x + 32y = 8,4$.

Рассчитаем массы натриевых солей полученных кислот:

$$M(\text{CH}_3\text{COONa}) = 23 + 2 \cdot 12 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 82 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CH}_3\text{COONa}) = v \cdot M = x \text{ молей} \cdot 82 \text{ г/моль} = 82x \text{ г};$$

$$M(\text{C}_2\text{H}_5\text{COONa}) = 23 + 3 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 96 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{COONa}) = v \cdot M = y \text{ молей} \cdot 96 \text{ г/моль} = 96y \text{ г}.$$

Масса смеси солей равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{CH}_3\text{OH}) + m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = (82x + 96y) = 27,7 \text{ г}.$$

Решим полученную систему уравнений:

$$24x + 32y = 8,4;$$

$$82x + 96y = 27,7.$$

Умножим первое уравнение на 3 и вычтем его из второго:

$$82x - 72x + 96y - 96y = 27,7 - 25,2;$$

$$10x = 2,5;$$

$$x = 0,25;$$

$$32y = 8,4 - 24 \cdot 0,25;$$

$$32y = 2,4;$$

$$y = 0,075.$$

Масса образованного ацетата натрия равна:

$$m(\text{CH}_3\text{COONa}) = 82x = 20,5 \text{ г.}$$

Масса воды в растворе смеси солей равна:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = \nu(\text{H}_2\text{O}) \cdot M(\text{H}_2\text{O}) = 12 \text{ молей} \cdot 18 \text{ г/моль} = 216 \text{ г.}$$

Получим массу раствора:

$$m(\text{р-ра}) = m(\text{смеси солей}) + m(\text{воды}) = 27,7 + 216 = 243,7 \text{ г.}$$

Определим массовую долю ацетата натрия в полученном растворе:

$$\begin{aligned} W(\text{CH}_3\text{COONa}) &= m(\text{CH}_3\text{COONa}) : m(\text{р-ра}) \cdot 100 \% = \\ &= 20,5 \text{ г} : 243,7 \text{ г} \cdot 100 \% = 8,4 \%. \end{aligned}$$

Таким образом, содержание ацетата натрия в полученном после растворения солей растворе составило 8,4 % по массе.

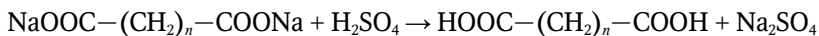
Кислоты. Решение задач

Задача 2

- ⊕ 28,5 г динатриевой соли двухосновной карбоновой кислоты взаимодействуют с избытком разбавленной серной кислоты с образованием 21,3 г сульфата натрия. Выход — 100 %. Определить число метиленовых групп в данной кислоте.

⊕ Решение.

Запишем в общем виде уравнение реакции динатриевой соли двухосновной карбоновой кислоты с серной кислотой (переменной n обозначим число метиленовых групп в соответствующей кислоте):



Определим молярные массы динатриевой соли двухосновной карбоновой кислоты (выразим через n) и образованного из нее сульфата натрия:

$$M(\text{NaOOC}-(\text{CH}_2)_n-\text{COONa}) =$$

$$= 2 \cdot 23 + (n + 2) \cdot 12 + 2n \cdot 1 + 4 \cdot 16 = (14n + 134) \text{ г/моль};$$

$$M(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 2 \cdot 23 + 32 + 4 \cdot 16 = 142 \text{ г/моль}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из $(14n + 134)$ г динатриевой соли двухосновной карбоновой кислоты образуется 142 г сульфата натрия. Составим пропорцию:

из $(14n + 134)$ г $\text{NaOOC}-(\text{CH}_2)_n-\text{COONa}$ образуется 142 г Na_2SO_4 ;

из 28,5 г $\text{NaOOC}-(\text{CH}_2)_n-\text{COONa}$ образуется 21,3 г Na_2SO_4 ;

$$21,3(14n + 134) = 28,5 \cdot 142;$$

$$298,2n + 2854,2 = 4047;$$

$$298,2n = 1192,8;$$

$$n = 4.$$

Таким образом, число метиленовых групп в двухосновной карбоновой кислоте равно четырем, и формулу кислоты можно записать следующим образом:



ПРИМЕЧАНИЕ



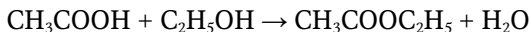
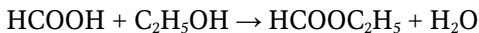
Задача 10 имеет аналогичное решение. Задачи 1, 4, 5, 6 и 11 решаются при помощи уравнений реакций простой пропорцией. Все задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 3

- ⊖ 13,6 г смеси муравьиной и уксусной кислот нагрели с избытком этанола в присутствии концентрированной серной кислоты. Получилось 20,6 г смеси эфиров. Сколько граммов муравьиной кислоты вступило в реакцию?

🕒 Решение.

В кислой среде спирты и кислоты образуют сложные эфиры:



Решим задачу при помощи системы из двух уравнений.

Пусть количества кислот равны:

$$\nu(\text{HCOOH}) = x \text{ молей};$$

$$\nu(\text{CH}_3\text{COOH}) = y \text{ молей}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций образования сложных эфиров, из 1 моля кислоты образуется 1 моль эфира, следовательно, количества образовавшихся эфиров равны:

$$\nu(\text{HCOOC}_2\text{H}_5) = x \text{ молей};$$

$$\nu(\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5) = y \text{ молей}.$$

Определим массы исходных кислот и образовавшихся из них сложных эфиров:

$$M(\text{HCOOH}) = 1 \cdot 12 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 46 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HCOOH}) = \nu \cdot M = x \text{ молей} \cdot 46 \text{ г/моль} = 46x \text{ г};$$

$$M(\text{CH}_3\text{COOH}) = 2 \cdot 12 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 60 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CH}_3\text{COOH}) = \nu \cdot M = y \text{ молей} \cdot 60 \text{ г/моль} = 60y \text{ г};$$

$$m(\text{смеси}) = m(\text{HCOOH}) + m(\text{CH}_3\text{COOH}) = 46x + 60y = 13,6 \text{ г}.$$

Получено первое уравнение: $46x + 60y = 13,6$.

$$M(\text{HCOOC}_2\text{H}_5) = 3 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 74 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HCOOC}_2\text{H}_5) = \nu \cdot M = x \text{ моль} \cdot 74 \text{ г/моль} = 74x \text{ г};$$

$$M(\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5) = 4 \cdot 12 + 8 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 88 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5) = \nu \cdot M = y \text{ моль} \cdot 88 \text{ г/моль} = 88y \text{ г};$$

$$m(\text{смеси}) = m(\text{HCOOC}_2\text{H}_5) + m(\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5) = 74x + 88y = 20,6 \text{ г}.$$

Получено второе уравнение:

$$74x + 88y = 20,6.$$

Решим полученную систему уравнений:

$$46x + 60y = 13,6;$$

$$74x + 88y = 20,6.$$

Умножим первое уравнение на 11, а второе на 7,5 и вычтем из второго первое:

$$506x + 660y = 149,6;$$

$$555x + 660y = 154,5;$$

$$555x - 506x + 660y - 660y = 154,5 - 149,6;$$

$$49x = 4,9;$$

$$x = 0,1;$$

$$60y = 13,6 - 46 \cdot 0,1;$$

$$60y = 9;$$

$$y = 0,15.$$

Масса муравьиной кислоты, вступившей в реакцию, равна:

$$m(\text{HCOOH}) = 46x = 4,6 \text{ г.}$$

ПРИМЕЧАНИЕ



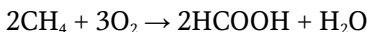
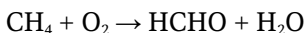
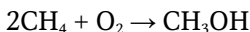
Задача 7 имеет аналогичное решение. Задача 8 является обычной задачей на смеси, типовые решения данного типа задач приводятся в разд. 1.4. Все задачи рассмотрены на прилагаемом диске.

Задача 9

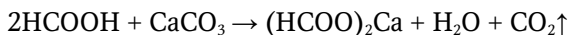
- ☉ При каталитическом окислении метана получена смесь трех органических соединений, содержащих кислород. 12,5 г этой смеси обработали избытком аммиачного раствора оксида серебра. Образовалось 43,2 г осадка. Такое же количество смеси было обработано карбонатом кальция. Выделилось 1,12 л газа. Вычислить в процентах массовую долю метанола в смеси, полученной после окисления метана.

🔊 Решение.

При каталитическом окислении метана получены три кислородсодержащих органических соединения — спирт (метанол), альдегид (формальдегид) и кислота (муравьиная). Запишем реакции их образования:



При обработке полученной смеси карбонатом кальция единственная кислота в смеси реагирует с карбонатом с выделением углекислого газа:



Метанол и формальдегид в реакцию не вступают.

Определим количество выделившегося углекислого газа:

$$v(\text{CO}_2) = V : V_M = 1,12 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,05 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, 1 моль углекислого газа выделяется при действии на карбонат кальция 2 молей муравьиной кислоты. Составим пропорцию:

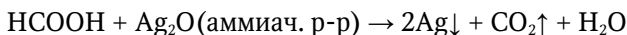
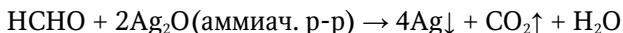
1 моль CO_2 выделяется при действии 2 молей HCOOH ;

0,05 моля CO_2 выделяется при действии x молей HCOOH ;

$$x = 0,05 \cdot 2 : 1 = 0,1.$$

Таким образом, количество муравьиной кислоты в смеси равно 0,1 моля.

Альдегиды и муравьиная кислота при взаимодействии с аммиачным раствором оксида серебра окисляются до углекислого газа, при этом осаждается металлическое серебро:



Метанол в реакцию не вступает.

Рассчитаем количество образованного в результате реакции осадка серебра:

$$M(\text{Ag}) = 108 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{Ag}) = m(\text{Ag}) : M(\text{Ag}) = 43,2 \text{ г} : 108 \text{ г/моль} = 0,4 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции окисления муравьиной кислоты, при окислении 1 моля кислоты образуется 2 моля серебра. Составим пропорцию:

при окислении 1 моля НСООН образуется 2 моля Ag ;

при окислении 0,1 моля НСООН образуется y молей Ag ;

$$y = 0,1 \cdot 2 : 1 = 0,2.$$

Таким образом, при окислении 0,1 моля муравьиной кислоты образовалось 0,2 моля серебра, следовательно, еще 0,2 моля серебра образовалось при окислении формальдегида.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции окисления формальдегида, 4 моля серебра образуется при окислении 1 моля формальдегида. Составим пропорцию:

4 моля Ag образуется при окислении 1 моля НСНО ;

0,2 моля Ag образуется при окислении z молей НСНО ;

$$z = 0,2 \cdot 1 : 4 = 0,05.$$

Таким образом, количество формальдегида в смеси равно 0,05 моля.

Определим массы формальдегида и муравьиной кислоты в смеси:

$$M(\text{НСНО}) = 12 + 2 \cdot 1 + 16 = 30 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{НСНО}) = v(\text{НСНО}) \cdot M(\text{НСНО}) = 0,05 \text{ моля} \cdot 30 \text{ г/моль} = 1,5 \text{ г};$$

$$M(\text{НСООН}) = 12 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 46 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{НСООН}) = v(\text{НСООН}) \cdot M(\text{НСООН}) = 0,1 \text{ моля} \cdot 46 \text{ г/моль} = 4,6 \text{ г.}$$

Массу метанола найдем по разности:

$$\begin{aligned} m(\text{CH}_3\text{OH}) &= m(\text{смеси}) - m(\text{НСНО}) - m(\text{НСООН}) = \\ &= 12,5 - 1,5 - 4,6 = 6,4 \text{ г.} \end{aligned}$$

Вычислим массовую долю метанола в полученной смеси:

$$W(\text{CH}_3\text{OH}) = m(\text{CH}_3\text{OH}) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = \\ = 6,4 \text{ г} : 12,5 \text{ г} \cdot 100 \% = 51,2 \%$$

Таким образом, содержание метанола в смеси, полученной после окисления метана, составило 51,2 % по массе.

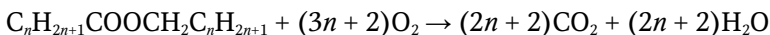
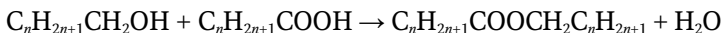
Эфиры. Решение задач

Задача 3

1 моль насыщенного спирта количественно окислили до соответствующей кислоты. Кислота с исходным спиртом образует эфир с 50%-м выходом. При сжигании последнего образуется 67,2 л оксида углерода (IV). Определить число изомерных эфиров, учитывая, что его углеводородный скелет не имеет разветвления.

Решение.

Запишем уравнения превращений в общем виде:



ПРИМЕЧАНИЕ



Обозначение [O] в уравнениях реакций обозначает окислительный агент. Естественно, коэффициент перед ним не ставится.

Согласно стехиометрическим коэффициентам первых двух реакций, 1 моль спирта образует при окислении 1 моль кислоты, затем 1 моль одного спирта и 1 моль кислоты образуют 1 моль сложного эфира.

Однако реакция этерификации протекает с 50%-м выходом:

$$v_{\text{практ}}(\text{эфира}) = v_{\text{теор}}(\text{эфира}) \cdot \eta : 100 \% = \\ = 1 \text{ моль} \cdot 50 \% : 100 \% = 0,5 \text{ моля.}$$

На практике образовалось лишь 0,5 моля сложного эфира.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции горения сложного эфира, 1 моль сложного эфира образует при горении $(2n + 2)$ молей углекислого газа.

Определим количество выделившегося углекислого газа:

$$v(\text{CO}_2) = V : V_M = 67,2 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 3 \text{ моля.}$$

Составим пропорцию:

1 моль эфира образует $(2n + 2)$ молей CO_2 ;

0,5 моля эфира образует 3 моля CO_2 ;

$$0,5(2n + 2) = 1 \cdot 3;$$

$$n + 1 = 3;$$

$$n = 2.$$

Итак, исходным соединением был пропиловый спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{CH}_2\text{OH}$. При окислении из него образовалась пропионовая кислота $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$. При этерификации пропионовой кислоты пропиловым спиртом образовался пропилпропионат $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOCH}_2\text{C}_2\text{H}_5$.

Общей формулой $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$ обладают 5 изомерных сложных эфиров с учетом того, что их углеводородный скелет не имеет разветвления:

- $\text{HCOOC}_5\text{H}_{11}$ (амиловый эфир муравьиной кислоты (амилформиат));
- $\text{CH}_3\text{COOC}_4\text{H}_9$ (бутиловый эфир уксусной кислоты (бутилацетат));
- $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOC}_3\text{H}_7$ (пропиловый эфир пропионовой кислоты (пропилпропионат));
- $\text{C}_3\text{H}_7\text{COOC}_2\text{H}_5$ (этиловый эфир масляной кислоты (этилбутират));
- $\text{C}_4\text{H}_9\text{COOCH}_3$ (метилвый эфир валериановой кислоты (метилвалерат)).

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 2, 4 и 11 имеют аналогичное решение. Задачи 5, 9 и 10, касающиеся гидролиза эфиров, и задачи 1 и 8 решаются простой пропорцией. Все задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 6

☉ Кислотным числом жира называется число миллиграммов гидроксида калия, необходимое для нейтрализации свободных жирных кислот, содержащихся в одном грамме жира. Найти кислотное число образца жира, для нейтрализации 10 г которого потребовалось 2 мл 5 %-го раствора гидроксида натрия с плотностью, равной 1,05 г/мл.

☉ Решение.

Рассчитаем количество гидроксида натрия, необходимого для нейтрализации свободных жирных кислот в образце жира:

$$m(\text{р-ра NaOH}) = \rho \cdot V = 1,05 \text{ г/мл} \cdot 2 \text{ мл} = 2,1 \text{ г};$$

$$\begin{aligned} m(\text{NaOH}) &= m(\text{р-ра NaOH}) \cdot W(\text{NaOH}) : 100 \% = \\ &= 2,1 \text{ г} \cdot 5 \% : 100 \% = 0,105 \text{ г}; \end{aligned}$$

$$M(\text{NaOH}) = 23 + 1 + 16 = 40 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} \nu(\text{NaOH}) &= m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) = \\ &= 0,105 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,002625 \text{ моля}. \end{aligned}$$

Определим, сколько граммов гидроксида калия потребовалось бы для нейтрализации свободных жирных кислот в данном образце жира.

$$\nu(\text{KOH}) = \nu(\text{NaOH}) = 0,002625 \text{ моля};$$

$$M(\text{KOH}) = 39 + 1 + 16 = 56 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{KOH}) = \nu(\text{KOH}) \cdot M(\text{KOH}) = 0,002625 \text{ моля} \cdot 56 \text{ г/моль} = 0,147 \text{ г}.$$

Кислотное число жира выражается количеством гидроксида калия, необходимого для нейтрализации свободных жирных кислот, содержащихся в одном грамме жира, а не в десяти. Составим пропорцию:

для нейтрализации 10 г жира требуется 0,147 г KOH;

для нейтрализации 1 г жира требуется x г KOH;

$$x = 0,147 \cdot 1 : 10 = 0,0147.$$

Итак, для нейтрализации свободных жирных кислот, содержащихся в одном грамме жира, требуется 0,0147 г или 14,7 мг гидроксида калия, следовательно, кислотное число данного образца жира — 14,7.

ПРИМЕЧАНИЕ

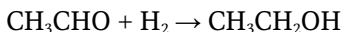
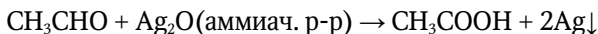
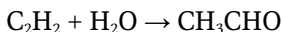
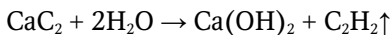
Задача 7 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом к книге диске.

Задача 12

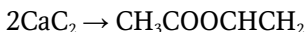
- ☉ После соответствующих превращений со 100%-м выходом из 70,7 г карбида кальция было получено 17,6 г этилацетата и 12,9 г винулацетата. Определить степень чистоты карбида кальция в процентах.

- 🕒 Решение.

Запишем уравнения описанной цепочки превращений:



В описанных реакциях не теряются атомы углерода, поэтому схему превращений можно свести к следующей:



Иными словами, при 100%-м выходе на всех стадиях из 2 молей карбида кальция образуется 1 моль смеси этилацетата и винулацетата. Рассчитаем количество каждого из этих эфиров и их суммарное значение:

$$M(\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3) = 4 \cdot 12 + 8 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 88 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3) = m : M = 17,6 \text{ г} : 88 \text{ г/моль} = 0,2 \text{ моля};$$

$$M(\text{CH}_3\text{COOCH}=\text{CH}_2) = 4 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 86 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{CH}_3\text{COOCH}=\text{CH}_2) = m : M = 12,9 \text{ г} : 86 \text{ г/моль} = 0,15 \text{ моля};$$

$$v(\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_3) + v(\text{CH}_3\text{COOCH}=\text{CH}_2) = 0,2 + 0,15 = 0,35 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, 0,35 моля смеси этилацетата и винулацетата образуется из $2 \cdot 0,35 = 0,7$ моля карбида кальция.

Найдем массу карбида кальция в навеске:

$$M(\text{CaC}_2) = 40 + 2 \cdot 12 = 64 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CaC}_2) = \nu(\text{CaC}_2) \cdot M(\text{CaC}_2) = 0,7 \text{ моля} \cdot 64 \text{ г/моль} = 44,8 \text{ г}.$$

Масса навески равна 70,7 г.

Определим массовую долю карбида кальция в навеске (степень чистоты):

$$\begin{aligned} W(\text{CaC}_2) &= m(\text{CaC}_2) : m(\text{навески}) \cdot 100 \% = \\ &= 44,8 \text{ г} : 70,7 \text{ г} \cdot 100 \% = 63,4 \%. \end{aligned}$$

Таким образом, степень чистоты используемого технического карбида кальция равна 63,4 %.

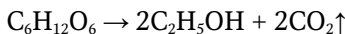
Углеводы. Решение задач

Задача 3

☉ При нагревании смеси глюкозы и формальдегида с аммиачным раствором оксида серебра выделилось 54 г металла. При спиртовом брожении такой же массы исходной смеси выделилось 2,24 л газа. Вычислить процентное содержание глюкозы в исходной смеси.

☐ Решение.

Сначала рассмотрим процесс спиртового брожения, которому из исходной смеси подвергается только глюкоза. При этом ферментативном процессе образуется этиловый спирт и выделяется углекислый газ:



Определим количество выделившегося углекислого газа:

$$\nu(\text{CO}_2) = V : V_M = 2,24 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, 1 моль глюкозы при брожении образует 2 моля углекислого газа.

Составим пропорцию:

1 моль $C_6H_{12}O_6$ образует 2 моля CO_2 ;

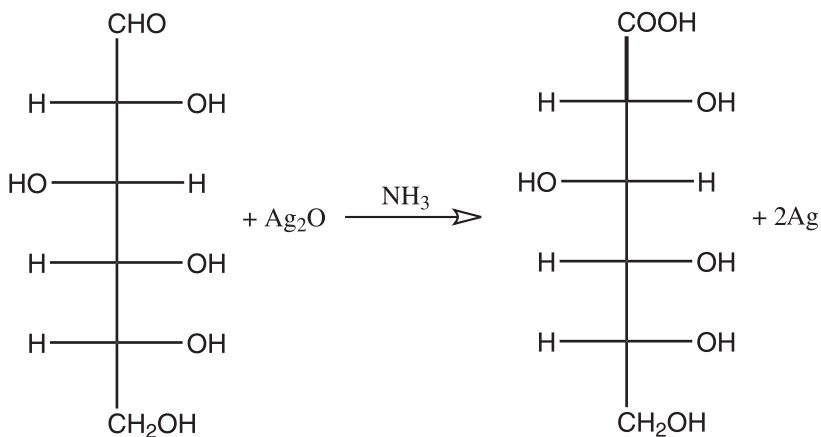
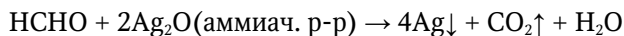
x молей $C_6H_{12}O_6$ образует 0,1 моля CO_2 ;

$$x = 0,1 \cdot 1 : 2 = 0,05.$$

Итак, нам известно количество глюкозы в смеси:

$$\nu(C_6H_{12}O_6) = 0,05 \text{ моля.}$$

Поскольку и формальдегид, и глюкоза содержат в своей структуре альдегидную группу, то при нагревании их смеси с аммиачным раствором оксида серебра происходит выпадение осадка серебра (в случае глюкозы эта реакция часто используется как отличительная от углеводов, не содержащих свободной альдегидной группы):



Определим количество образованного в результате реакции осадка серебра:

$$M(Ag) = 108 \text{ г/моль};$$

$$\nu(Ag) = m(Ag) : M(Ag) = 54 \text{ г} : 108 \text{ г/моль} = 0,5 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции окисления глюкозы, при окислении 1 моля глюкозы образуется 2 моля серебра.

Составим пропорцию:

при окислении 1 моля $C_6H_{12}O_6$ образуется 2 моля Ag;

при окислении 0,05 моля $C_6H_{12}O_6$ образуется y молей Ag;

$$y = 0,05 \cdot 2 : 1 = 0,1.$$

Таким образом, при окислении 0,05 моля глюкозы образовалось 0,1 моля серебра, следовательно, еще 0,4 моля серебра образовалось при окислении формальдегида.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции окисления формальдегида, 4 моля серебра образуется при окислении 1 моля формальдегида. Составим пропорцию:

4 моля Ag образуется при окислении 1 моля HCHO;

0,4 моля Ag образуется при окислении z молей HCHO;

$$z = 0,4 \cdot 1 : 4 = 0,1.$$

Таким образом, количество формальдегида в смеси равно 0,1 моля.

Рассчитаем массы формальдегида и глюкозы в смеси:

$$M(\text{HCHO}) = 12 + 2 \cdot 1 + 16 = 30 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{HCHO}) = \nu(\text{HCHO}) \cdot M(\text{HCHO}) = 0,1 \text{ моля} \cdot 30 \text{ г/моль} = 3 \text{ г};$$

$$M(C_6H_{12}O_6) = 6 \cdot 12 + 12 \cdot 1 + 6 \cdot 16 = 180 \text{ г/моль};$$

$$m(C_6H_{12}O_6) = \nu(C_6H_{12}O_6) \cdot M(C_6H_{12}O_6) = 0,05 \text{ моля} \cdot 180 \text{ г/моль} = 9 \text{ г}.$$

Масса исходной смеси формальдегида и глюкозы равна:

$$m(\text{смеси}) = m(\text{HCHO}) + m(C_6H_{12}O_6) = 3 + 9 = 12 \text{ г}.$$

Определим массовую долю глюкозы в исходной смеси:

$$W(C_6H_{12}O_6) = m(C_6H_{12}O_6) : m(\text{смеси}) \cdot 100 \% = 9 \text{ г} : 12 \text{ г} \cdot 100 \% = 75 \%.$$

Таким образом, содержание глюкозы в исходной смеси составляло 75 % по массе.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задача 4, касающаяся нитрования углеводов, решается простой пропорцией и рассмотрена на прилагаемом к книге диске.

Задача 6

Ⓒ Некоторую массу глюкозы подвергли брожению, образовалась смесь продуктов спиртового и молочнокислого брожения. При обработке этой смеси металлическим натрием выделилось 15,68 л газа. Для нейтрализации молочной кислоты, находящейся в смеси, потребовалось 100 мл 20%-го раствора едкого натрия с плотностью, равной 1,2 г/мл. Вычислить исходную массу глюкозы в граммах.

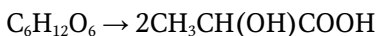
Ⓓ Решение.

Глюкоза может подвергаться двум типам брожения (спиртовому и молочнокислому):

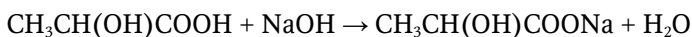
При спиртовом брожении образуется этиловый спирт и выделяется углекислый газ:



При молочнокислом брожении образуется молочная кислота:



Определим количество молочной кислоты по результатам титрования при помощи едкого натра:



Рассчитаем количество гидроксида натрия, необходимого для нейтрализации молочной кислоты:

$$m(\text{р-ра NaOH}) = \rho \cdot V = 1,2 \text{ г/мл} \cdot 100 \text{ мл} = 120 \text{ г};$$

$$m(\text{NaOH}) = m(\text{р-ра NaOH}) \cdot W(\text{NaOH}) : 100 \% =$$

$$= 120 \text{ г} \cdot 20 \% : 100 \% = 24 \text{ г};$$

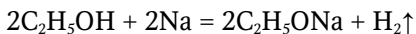
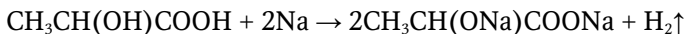
$$M(\text{NaOH}) = 23 + 1 + 16 = 40 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) = 24 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,6 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации, 1 моль едкого натра нейтрализует 1 моль молочной кислоты. Следовательно, 0,6 моля едкого натра нейтрализует 0,6 моля молочной кислоты.

Итак, при брожении образовалось 0,6 моля молочной кислоты.

При обработке этой смеси молочной кислоты и этанола металлическим натрием выделяется водород, при этом в молочной кислоте замещаются на натрий 2 атома водорода:



Определим количество выделившегося водорода:

$$v(\text{H}_2) = V : V_M = 15,68 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,7 \text{ моля.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции натрия с молочной кислотой, 1 моль молочной кислоты образует 1 моль водорода. Тогда 0,6 моля молочной кислоты образует 0,6 моля водорода.

Из 0,7 моля водорода 0,06 моля образовано молочной кислотой, значит, еще 0,01 моля водорода образовано этанолом.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции натрия с этанолом, 2 моля этанола образуют 1 моль водорода. Следовательно, 0,2 моля этанола образуют 0,1 моля водорода.

Итак, при брожении образовалось 0,6 моля молочной кислоты и 0,2 моля этанола.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций брожения, 1 моль глюкозы образует 2 моля этанола или 2 моля молочной кислоты. Следовательно, 0,6 моля молочной кислоты образовалось из 0,3 моля глюкозы, а 0,2 моля этанола образовалось из 0,1 моля глюкозы.

Общее исходное количество глюкозы равно:

$$v(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = 0,3 + 0,1 = 0,4 \text{ моля.}$$

Вычислим исходную массу глюкозы:

$$M(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = 6 \cdot 12 + 12 \cdot 1 + 6 \cdot 16 = 180 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = v(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) \cdot M(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) = 0,4 \text{ моля} \cdot 180 \text{ г/моль} = 72 \text{ г.}$$

Исходная масса глюкозы составляла 72 г.

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 1, 2, 5 и 7 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

3.3. АЗОТСОДЕРЖАЩИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Амины

Амины — органические производные аммиака NH_3 , в молекуле которого один, два или три атома водорода замещены на углеводородные радикалы:

- RNH_2 ;
- R_2NH ;
- R_3N .

Амины классифицируют по двум структурным признакам:

- по количеству радикалов, связанных с атомом азота, различают первичные, вторичные и третичные амины;
- по характеру углеводородного радикала амины подразделяются на алифатические (жирные), ароматические и смешанные (или жирноароматические).

Таким образом, приведем основные классы аминов:

- алифатические:
 - первичные — $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{NH}_2$;
 - вторичные — $(\text{C}_n\text{H}_{2n+1})_2\text{NH}$;
 - третичные — $(\text{C}_n\text{H}_{2n+1})_3\text{N}$;
- ароматические:
 - первичные — $\text{C}_n\text{H}_{2n-7}\text{NH}_2$;
 - вторичные — $(\text{C}_n\text{H}_{2n-7})_2\text{NH}$;
 - третичные — $(\text{C}_n\text{H}_{2n-7})_3\text{N}$;
- смешанные:
 - вторичные — $(\text{C}_n\text{H}_{2n+1})\text{NH}(\text{C}_n\text{H}_{2n-7})$;
 - третичные — $(\text{C}_n\text{H}_{2n+1})_2\text{N}(\text{C}_n\text{H}_{2n-7})$.

Кроме того, к аминам относятся азотсодержащие циклы, в которых атом азота связан с углеродными атомами.

В задачах в основном затрагиваются темы основных свойств аминов, образования третичных солей или их гидролиза.

Кроме того, существуют задачи и на горение аминов, особенностью которых является то, что один из продуктов горения — азот — газ с очень низкой реакционной способностью.

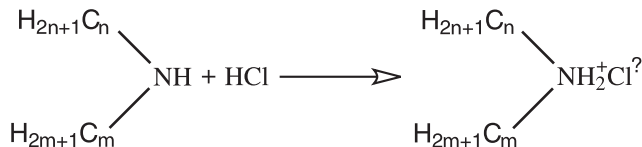
Решение задач

Задача 3

☉ Определить молярную массу вторичного амина, если известно, что его хлороводородная соль содержит 43,55 % хлора.

☉ Решение.

Амины, обладая основными свойствами, легко образуют соли с минеральными кислотами. Запишем уравнение реакции в общем виде:



Молярная масса хлороводородной соли неизвестного вторичного амина, выраженная через переменные n и m , равна:

$$M[\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{NH}_2^+(\text{C}_m\text{H}_{2m+1})\text{Cl}^-] = (n+m) \cdot 12 + (2n+2m+4) \cdot 1 + 14 + 35,5 = \\ = (14n + 14m + 53,5) \text{ г/моль.}$$

Молярная масса всего хлора в данном соединении равна:

$$M(\text{Cl}^-) = 35,5 \text{ г/моль.}$$

Известно, что хлороводородная соль амина содержит 43,55 % хлора. Составим пропорцию:

100 г соединения содержит 43,55 г хлора;

$(14n + 14m + 53,5)$ г соединения содержит 35,5 г хлора;

$$43,55(14n + 14m + 53,5) = 35,5 \cdot 100;$$

$$609,7(n + m) + 2329,925 = 3550;$$

$$609,7(n + m) = 1220,075;$$

$$n + m = 2.$$

Поскольку n и m — натуральные числа, очевидно, что $n = m = 1$. Следовательно, неизвестный вторичный амин — диметиламин $(\text{CH}_3)_2\text{NH}$, и его молярная масса равна:

$$M((\text{CH}_3)_2\text{NH}) = 2 \cdot 12 + 7 \cdot 1 + 14 = 45 \text{ г/моль.}$$

ПРИМЕЧАНИЕ



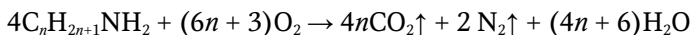
Задача 6 имеет аналогичное решение. Задачи 5 и 8, касающиеся бромирования анилина, решаются простой пропорцией по молярным массам веществ. Все задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 7

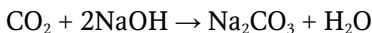
0,9 г первичного амина сожгли, а продукты, полученные в результате сжигания, пропустили через концентрированный раствор щелочи. 224 мл газа не поглотилось. Найти химическую формулу этого амина.

Решение.

Запишем уравнение реакции горения первичного амина в общем виде:



При поглощении продуктов сжигания углекислый газ реагирует со щелочью, образуя карбонат:



Газообразный азот не поглощается раствором щелочи, следовательно, его объем равен 0,244 л. Определим количество азота, образованного при сжигании амина:

$$v(\text{N}_2) = V : V_M = 0,224 \text{ л} : 22,4 \text{ л/моль} = 0,01 \text{ моля.}$$

По стехиометрическим коэффициентам реакции горения амина, 4 моля амина при сжигании образуют 2 моля азота. Составим пропорцию:

$$\begin{aligned} 4 \text{ моля амина при сжигании образуют } 2 \text{ моля азота;} \\ x \text{ молей амина при сжигании образуют } 0,01 \text{ моля азота;} \\ z = 0,01 \cdot 4 : 2 = 0,02. \end{aligned}$$

Таким образом, исходное количество амина равно 0,02 моля.

Вычислим его массу, выраженную через переменную n , и приравняем к 0,9 г:

$$M(C_nH_{2n+1}NH_2) = n \cdot 12 + (2n + 3) \cdot 1 + 14 = (14n + 17) \text{ г/моль};$$

$$m(C_nH_{2n+1}NH_2) = \nu \cdot M = 0,02 \text{ моля} \cdot (14n + 17) \text{ г/моль} = \\ = (0,28n + 0,34) = 0,9 \text{ г}.$$

Решим полученное уравнение:

$$0,28n + 0,34 = 0,9;$$

$$0,28n = 0,56;$$

$$n = 2.$$

Таким образом, неизвестный амин — этиламин $C_2H_5NH_2$.

ПРИМЕЧАНИЕ



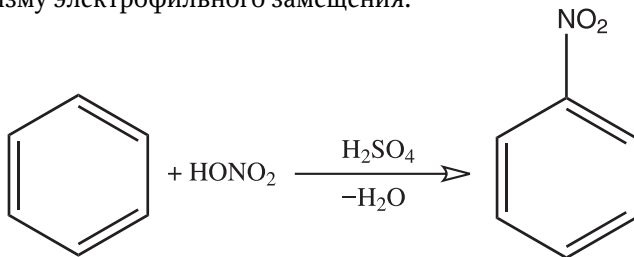
Задачи 1, 2 и 4 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 9

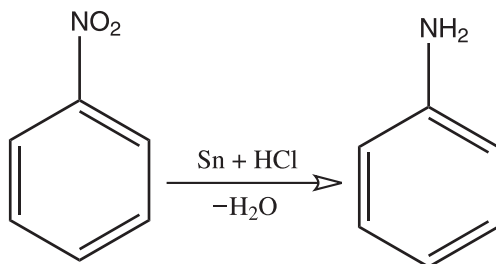
- ⊙ 390 г бензола обработали смесью концентрированной азотной и серной кислот. С 75%-м выходом получили азотсодержащее вещество. Восстановлением последнего водородом с 80%-м выходом получили другое соединение. Какое это соединение и сколько граммов его образовалось?

- ⊙ Решение.

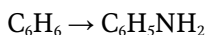
При обработке бензола смесью концентрированной азотной и серной кислот протекает реакция нитрования бензольного кольца по механизму электрофильного замещения:



При восстановлении полученного нитробензола образуется анилин



Общая схема синтеза выглядит следующим образом:



Вычислим исходное количество бензола:

$$M(\text{C}_6\text{H}_6) = 6 \cdot 12 + 6 \cdot 1 = 78 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{C}_6\text{H}_6) = m(\text{C}_6\text{H}_6) : M(\text{C}_6\text{H}_6) = 390 \text{ г} : 78 \text{ г/моль} = 5 \text{ молей.}$$

Согласно схеме синтеза, из 1 моля бензола получается 1 моль анилина. Определим теоретическую массу анилина (массу, которую можно получить при выходе 100 % на всех стадиях синтеза):

$$M(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) = 6 \cdot 12 + 7 \cdot 1 + 14 = 93 \text{ г/моль.}$$

$$\begin{aligned} m_{\text{теор}}(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) &= \nu(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) \cdot M(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) = \\ &= 5 \text{ молей} \cdot 93 \text{ г/моль} = 465 \text{ г.} \end{aligned}$$

Итак, при данной производственной схеме и при выходе, равном 100 %, должно образоваться 465 г анилина. Однако на практике в производстве всегда существуют потери, в результате чего практический выход снижается. В данном случае нитрование протекает с 75%-м выходом, а восстановление нитропроизводного до анилина — с 80%-м выходом.

Рассчитаем суммарный выход производственной схемы из двух реакций. Он представляет собой произведение выходов, выраженных в долях единицы, для всех стадий. Известно, что выход на первой стадии равен 0,75, на второй — 0,8.

$$\eta_{\text{сумм}} = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,75 \cdot 0,8 = 0,6.$$

Итак, суммарный выход производственной схемы равен 0,6 или 60 %.

Найдем практическое количество полученного анилина:

$$\begin{aligned} m_{\text{практ}}(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) &= m_{\text{теор}}(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) \cdot \eta : 100 \% = \\ &= 465 \text{ г} \cdot 60 \% : 100 \% = 279 \text{ г}. \end{aligned}$$

Таким образом, в данной производственной схеме получено 279 г анилина $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$.

ПРИМЕЧАНИЕ



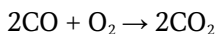
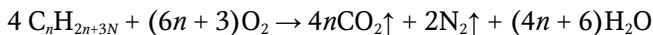
Задача 14 имеет аналогичное решение. Задачи 10, 11, 15, 16 и 20 являются обычными задачами на смеси, типовые решения данного типа задач приведены в разд. 1.4. Все задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 13

- ☉ Смесь насыщенного амина и оксида углерода (II) определенного объема сожгли в необходимом количестве кислорода, которого было столько, сколько амина и CO вместе. Вычислить формулу амина, если его объемная доля в смеси составляет 28,57 %.

- ☉ Решение.

Запишем уравнения сгорания насыщенного амина и оксида углерода (II) в кислороде (при этом реакцию горения амина запишем в общей форме):



Поскольку результат не зависит от конкретного объема смеси (мы не ограничены условием по конкретному количеству какого-либо из компонентов).

Положим, объем исходной смеси амина и оксида углерода (II) равен 100 л.

Определим объемы компонентов исходной газовой смеси:

$$\begin{aligned} V(\text{C}_n\text{H}_{2n+3}\text{N}) &= \varphi(\text{C}_n\text{H}_{2n+3}\text{N}) \cdot V(\text{смеси}) : 100 \% = \\ &= 28,57 \% \cdot 100 \text{ л} : 100 \% = 28,57 \text{ л}; \end{aligned}$$

$$V(\text{CO}) = V(\text{смеси}) - V(\text{C}_n\text{H}_{2n+3}\text{N}) = 100 - 28,57 = 71,43 \text{ л.}$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции горения амина, для сжигания 4 молей амина необходимо $(6n + 3)$ молей кислорода. Составим пропорцию:

для сжигания 4 молей амина необходимо $(6n + 3)$ молей O_2 ;

для сжигания 28,57 л амина необходимо x л O_2 ;

$$x = 28,57 \cdot (6n + 3) : 4 = 42,86n + 21,43.$$

Итак, для сжигания амина потребовалось $(42,86n + 21,43)$ л кислорода.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции горения оксида углерода (II), для сжигания 2 молей оксида углерода необходим 1 моль кислорода. Составим пропорцию:

для сжигания 2 молей CO необходим 1 моль O_2 ;

для сжигания 71,43 моля CO необходимо y молей O_2 ;

$$y = 71,43 \cdot 1 : 2 = 35,72.$$

Итак, для сжигания оксида углерода (II) потребовалось 35,72 л кислорода.

Известно, что кислорода было столько, сколько амина и CO вместе, то есть также 100 л. Отсюда:

$$42,86n + 21,43 + 35,72 = 100;$$

$$42,86n = 42,86;$$

$$n = 1.$$

Таким образом, неизвестный амин — метиламин CH_3NH_2 .

ПРИМЕЧАНИЕ



Задачи 12, 17–19, 21 и 22 имеют аналогичное решение и рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

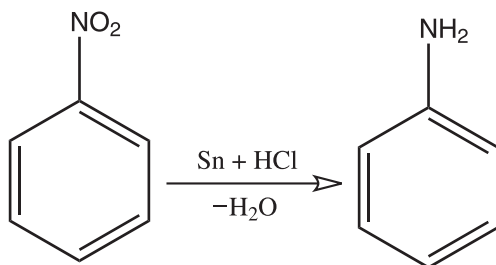
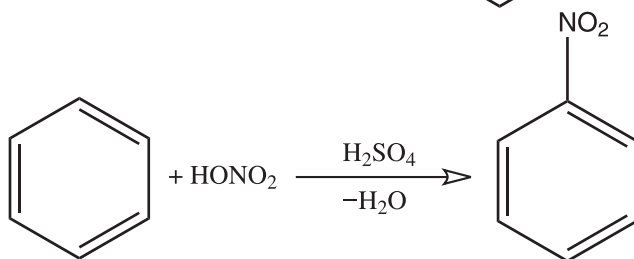
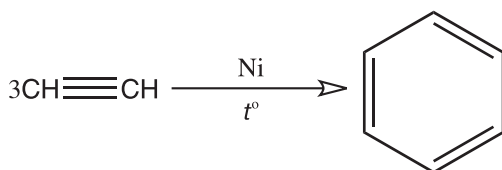
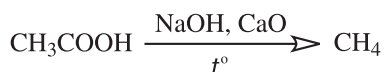
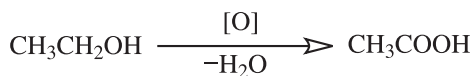
Задача 24

- Ⓢ Написать схему синтеза анилина из этилового спирта. Какое количество этилового спирта потребуется для получения 18,6 г анилина,

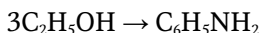
если известно, что на стадии получения бензола выход — 30 %, остальные стадии протекают с 80%-м выходом?

🕒 Решение.

Запишем уравнения реакций, которые описывают процесс получения анилина из этилового спирта:



Общую шестистадийную схему можно записать следующим образом:



Вычислим количество анилина, которое требуется получить:

$$M(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) = 6 \cdot 12 + 7 \cdot 1 + 14 = 93 \text{ г/моль};$$

$$\begin{aligned} v(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) &= m(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) : M(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) = \\ &= 18,6 \text{ г} : 93 \text{ г/моль} = 0,2 \text{ моля.} \end{aligned}$$

Итак, при данной производственной схеме образовалось 0,2 моля анилина. Однако в производстве всегда существуют потери, в результате чего практический выход снижается. Другими словами, при 100%-м выходе количество анилина должно быть больше.

Определим суммарный выход производственной схемы из шести реакций. Он представляет собой произведение выходов, выраженных в долях единицы, для всех стадий. Известно, что выход на стадии образования бензола равен 0,3, на всех остальных стадиях — 0,8.

$$\eta_{\text{сумм}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,3 \cdot 0,8 \cdot 0,8 = 0,0983.$$

Таким образом, суммарный выход производственной схемы равен 0,0983, или 9,83 %.

Итак, теоретическое количество (количество, которое получилось бы при 100%-м выходе) полученного анилина равно:

$$v_{\text{теор}}(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) = v_{\text{практ}}(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2) : \eta_{\text{сумм}} = 0,2 \text{ моля} : 0,0983 = 2,035 \text{ моля.}$$

Именно из этого теоретического значения нам необходимо рассчитывать расход реактивов.

Согласно схеме синтеза, 1 моль анилина получается из 3 молей этилового спирта. Составим пропорцию:

1 моль $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ получается из 3 молей $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$;

2,035 моля $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ получается из x молей $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$;

$$x = 2,035 \cdot 3 : 1 = 6,1.$$

Итак, для того чтобы в конечном итоге получить 0,2 моля анилина, первоначально необходимо взять 6,1 моля этилового спирта.

Определим его массу:

$$M(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 16 = 46 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = \nu(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) \cdot M(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 6,1 \text{ моля} \cdot 46 \text{ г/моль} = 280,6 \text{ г}.$$

Таким образом, чтобы при данной технологической схеме и условиях получить 18,6 г анилина, необходимо 280,6 г этилового спирта.

ПРИМЕЧАНИЕ



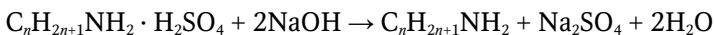
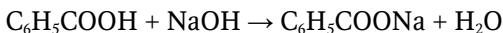
Задача 23 имеет аналогичное решение и рассмотрена на прилагаемом к книге диске.

Задача 25

⊙ Для взаимодействия 38,7 г смеси бензойной кислоты с сульфатом первичного амина потребовалось 144 мл 10 %-го водного раствора гидроксида натрия с плотностью 1,11 г/мл. Определить, сульфат какого амина находился в смеси, если при обработке такого же количества исходной смеси с избытком водного раствора хлорида бария должно выделиться 23,3 г осадка.

Ⓛ Решение.

Запишем уравнения описанных в условии реакций (при этом реакции сульфата первичного амина запишем в общей форме):



Начнем с анализа последней реакции. Выпавший осадок — это сульфат бария. Найдём его количество:

$$M(\text{BaSO}_4) = 137 + 32 + 4 \cdot 16 = 233 \text{ г/моль};$$

$$\nu(\text{BaSO}_4) = m(\text{BaSO}_4) : M(\text{BaSO}_4) = 23,3 \text{ г} : 233 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции с хлоридом бария, 1 моль сульфата амина образует 1 моль осадка сульфата бария. Следовательно, 0,1 моля осадка сульфата бария образует 0,1 моля сульфата амина.

Итак, количество сульфата амина в исходной смеси равно 0,1 моля.

При его реакции со щелочью расходуется 2 моля гидроксида натрия на 1 моль сульфата амина или 0,2 моля гидроксида натрия на 0,1 моля сульфата амина.

Определим количество гидроксида натрия, необходимое для нейтрализации исходной смеси:

$$m(\text{р-ра NaOH}) = \rho \cdot V = 1,11 \text{ г/мл} \cdot 144 \text{ мл} = 159,84 \text{ г};$$

$$m(\text{NaOH}) = m(\text{р-ра NaOH}) \cdot W(\text{NaOH}) : 100 \% =$$

$$= 159,84 \text{ г} \cdot 10 \% : 100 \% = 16 \text{ г};$$

$$M(\text{NaOH}) = 23 + 1 + 16 = 40 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) = 16 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,4 \text{ моля}.$$

Как мы уже определили, 0,2 моля гидроксида натрия расходуется на нейтрализацию 0,1 моля сульфата амина, еще 0,2 моля расходуется на нейтрализацию бензойной кислоты. Поскольку взаимодействуют они в эквимольных соотношениях, то количество бензойной кислоты также равно 0,2 моля.

Рассчитаем массу бензойной кислоты в смеси:

$$M(\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}) = 7 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 122 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}) = v \cdot M = 0,2 \text{ моля} \cdot 122 \text{ г/моль} = 24,4 \text{ г}.$$

Поскольку масса смеси известна, можно определить массу сульфата амина по разнице:

$$m(\text{амина}) = m(\text{смеси}) - m(\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}) = 38,7 - 24,4 = 14,3 \text{ г}.$$

Нам известно количество данного вещества — 0,1 моля.

Вычислим его массу, выраженную через переменную n , и приравняем к 14,3 г:

$$M(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4) = n \cdot 12 + (2n + 5) \cdot 1 + 14 + 96 =$$

$$= (14n + 115) \text{ г/моль};$$

$$m(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4) = v \cdot M = 0,1 \text{ моля} \cdot (14n + 101) \text{ г/моль} =$$

$$= 1,4n + 11,5 = 14,3 \text{ г}.$$

Решим полученное уравнение:

$$1,4n + 11,5 = 14,3;$$

$$1,4n = 2,8;$$

$$n = 2.$$

Таким образом, неизвестное вещество — сульфат этиламина $C_2H_5NH_2 \cdot H_2SO_4$.

Аминокислоты

Аминокислоты — органические бифункциональные соединения, в состав которых входят карбоксильные группы —COOH и аминогруппы —NH₂.

Это замещенные карбоновые кислоты, в молекулах которых один или несколько атомов водорода углеводородного радикала заменены аминогруппами.

Простейший представитель — аминоксусная кислота H_2N-CH_2-COOH (глицин).

Аминокислоты классифицируют по двум структурным признакам.

- В зависимости от взаимного расположения amino- и карбоксильной групп аминокислоты подразделяют на α -, β -, γ -, δ -, ϵ - и т. д.
- По характеру углеводородного радикала различают алифатические (жирные) и ароматические аминокислоты. Приведенные выше аминокислоты относятся к жирному ряду. Примером ароматической аминокислоты может служить пара-аминобензойная кислота.
- Строение α -аминокислот, образующих белки в организме человека, следует твердо знать, так как подавляющее большинство задач касается лишь этих аминокислот.

Решение задач

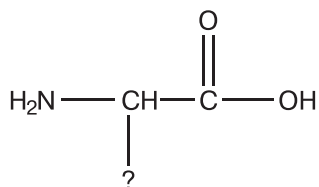
Задача 5

- ⊙ Аминокислота, которая входит в состав белка, в одинаковом количестве взаимодействует с разными соединениями: в первом случае — с 6,9 г натрия; во втором случае — с 6 г гидроксида натрия; в третьем случае — с 5,475 г хлористого водорода. Вычислить молярную мас-

су этой аминокислоты, если при сжигании ее в количестве 1 моля образуется 3 моля оксида углерода (IV).

🕒 Решение.

Аминокислота, которая входит в состав белка, должна быть α -аминокислотой.



Кроме одной аминогруппы, кислота может содержать еще одну аминогруппу, карбоксильную или гидроксильную группу. Основанием для утверждения о наличии или отсутствии таковых могут быть результаты реакций с различными соединениями.

Определим количества натрия, гидроксида натрия и хлористого водорода, с которыми реагирует данная аминокислота:

$$M(\text{Na}) = 23 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{Na}) = m(\text{Na}) : M(\text{Na}) = 6,9 \text{ г} : 23 \text{ г/моль} = 0,3 \text{ моля};$$

$$M(\text{NaOH}) = 23 + 1 + 16 = 40 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) : M(\text{NaOH}) = 6 \text{ г} : 40 \text{ г/моль} = 0,15 \text{ моля};$$

$$M(\text{HCl}) = 1 + 35,5 = 36,5 \text{ г/моль};$$

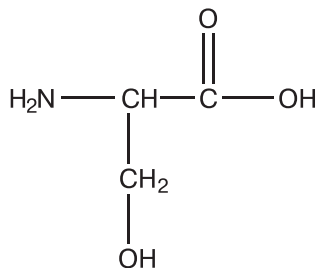
$$v(\text{HCl}) = m(\text{HCl}) : M(\text{HCl}) = 5,475 \text{ г} : 36,5 \text{ г/моль} = 0,15 \text{ моля}.$$

Количество хлористого водорода равно количеству гидроксида натрия, что говорит об одинаковом количестве карбоксильных и аминогрупп. А так как данная кислота содержит всего три атома углерода (на основании того, что при сжигании ее в количестве 1 моля образуется 3 моля углекислого газа), то можно с уверенностью сказать, что неизвестная кислота является моноаминомонокарбоновой кислотой.

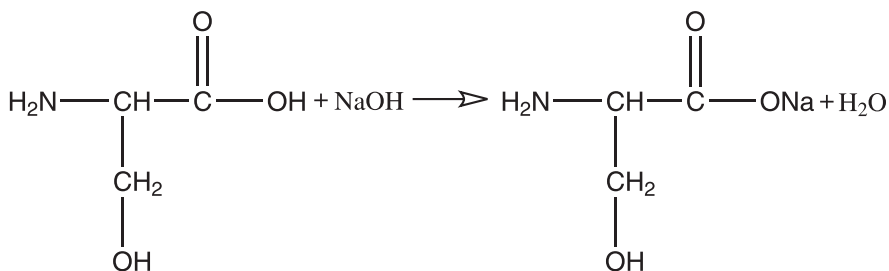
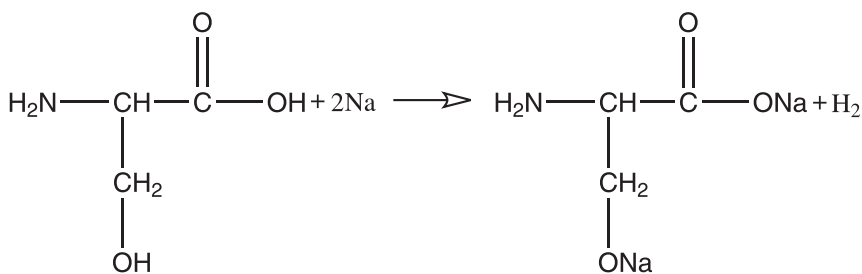
В два раза большее количество прореагировавшего натрия по сравнению с гидроксидом натрия говорит о наличии дополнительной

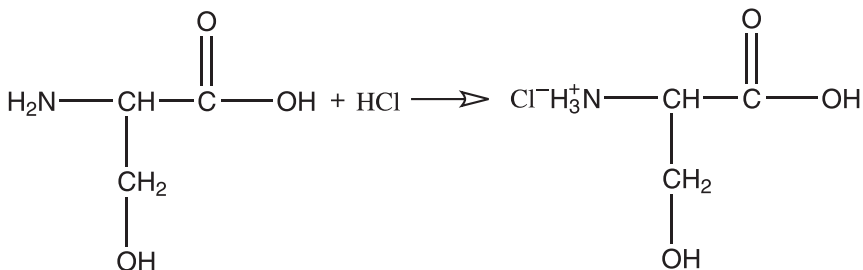
мишени для реакции замещения атома водорода — одной гидроксильной группы. В структуре свободен лишь один атом углерода (β -положение), следовательно, у этого атома и располагается гидроксильная группа.

Итак, исследуемая аминокислота — α -амино- β -гидроксипропановая кислота, то есть серин:



Запишем реакции серина с натрием, гидроксидом натрия и хлористым водородом:





Молярная масса этой аминокислоты равна:

$$\begin{aligned} M(\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}) &= 3 \cdot 12 + 7 \cdot 1 + 14 + 3 \cdot 16 = \\ &= 105 \text{ г/моль.} \end{aligned}$$

Таким образом, неизвестная аминокислота — глицин. Ее молярная масса равна 105 г/моль.

ПРИМЕЧАНИЕ



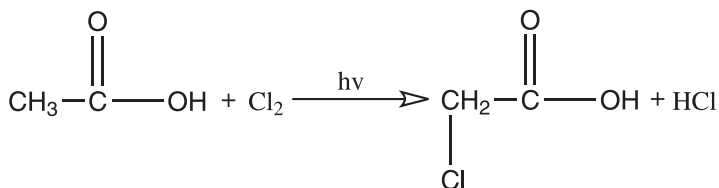
Задача 1 решается по схеме превращений. Задачи 2, 6 и 8, касающиеся реакций аминокислот со щелочью, решаются простой пропорцией. Задачи 3, 4 и 7 решаются по общим уравнениям, приведенным в теоретической части разд. 1.1. Задача 9 является обычной задачей на смеси, типовые решения данного типа задач приведены в разд. 1.4. Все задачи рассмотрены на прилагаемом к книге диске.

Задача 10

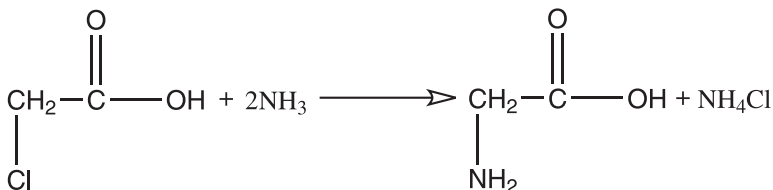
30 г аминокусусной кислоты получено двухстадийным синтезом из уксусной кислоты. Для нейтрализации избытка уксусной кислоты его отделили от продуктов реакции и нейтрализовали с 25 мл 19%-го раствора гидроксида калия с плотностью равной 1,18 г/мл. Сколько граммов уксусной кислоты было взято, если при синтезе вещества каждая стадия протекала с 80%-м выходом?

Решение.

При получении аминокусусной кислоты (глицин) из уксусной на первой стадии проводится реакция хлорирования уксусной кислоты в α -положение:



Затем следует реакция аминирования образованной хлоруксусной кислоты:



Рассчитаем количество полученной аминоксусной кислоты:

$$M(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}) = 2 \cdot 12 + 5 \cdot 1 + 14 + 2 \cdot 16 = 75 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{глицин}) = m(\text{глицин}) : M(\text{глицин}) = 30 \text{ г} : 75 \text{ г/моль} = 0,4 \text{ моля.}$$

Определим суммарный выход производственной схемы из двух реакций. Он представляет собой произведение выходов, выраженных в долях единицы, для всех стадий. Известно, что выход на каждой стадии равен 0,8.

$$\eta_{\text{сумм}} = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0,8 \cdot 0,8 = 0,64.$$

Суммарный выход производственной схемы равен 0,64, или 64 %.

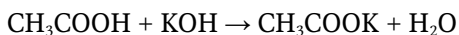
Найдем теоретическое количество полученного глицина (такое количество глицина, которое должно было образоваться при выходе 100 %):

$$\begin{aligned} v_{\text{теор}}(\text{глицин}) &= v_{\text{практ}}(\text{глицин}) : \eta \cdot 100 \% = \\ &= 0,4 \text{ моля} : 64 \% \cdot 100 \% = 0,625 \text{ моля.} \end{aligned}$$

Таким образом, в данной производственной схеме должно было быть получено 0,625 моля глицина. Смысл данной операции в том, что уксусная кислота добавлялась из расчета на это количество.

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакций, из 1 моля уксусной кислоты образуется 1 моль глицина. Следовательно, из 0,625 моля уксусной кислоты образуется 0,625 моля глицина. Таким образом, общее количество взятой уксусной кислоты равно 0,625 моля плюс избыток, оттитрованный гидроксидом калия.

Запишем уравнение нейтрализации уксусной кислоты гидроксидом калия:



Найдем количество гидроксида калия, необходимое для нейтрализации избытка уксусной кислоты:

$$m(\text{р-ра KOH}) = \rho \cdot V = 1,18 \text{ г/мл} \cdot 25 \text{ мл} = 29,5 \text{ г};$$

$$m(\text{KOH}) = m(\text{р-ра KOH}) \cdot W(\text{KOH}) : 100 \% =$$

$$= 29,5 \text{ г} \cdot 19 \% : 100 \% = 5,6 \text{ г};$$

$$M(\text{KOH}) = 39 + 1 + 16 = 56 \text{ г/моль};$$

$$v(\text{KOH}) = m(\text{KOH}) : M(\text{KOH}) = 5,6 \text{ г} : 56 \text{ г/моль} = 0,1 \text{ моля}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции нейтрализации, 1 моль уксусной кислоты нейтрализуется 1 молеми щелочи. Следовательно, 0,1 моля щелочи нейтрализуется 0,1 моля уксусной кислоты.

Итак, общее количество взятой уксусной кислоты равно:

$$v(\text{CH}_3\text{COOH}) = v_{\text{прореаг}} + v_{\text{избыток}} = 0,625 + 0,1 = 0,725 \text{ моля}.$$

Определим ее массу:

$$M(\text{CH}_3\text{COOH}) = 2 \cdot 12 + 4 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 60 \text{ г/моль};$$

$$m(\text{CH}_3\text{COOH}) = v(\text{CH}_3\text{COOH}) \cdot M(\text{CH}_3\text{COOH}) =$$

$$= 0,725 \text{ моля} \cdot 60 \text{ г/моль} = 43,5 \text{ г}.$$

Таким образом, при синтезе глицина было взято 43,5 г уксусной кислоты.

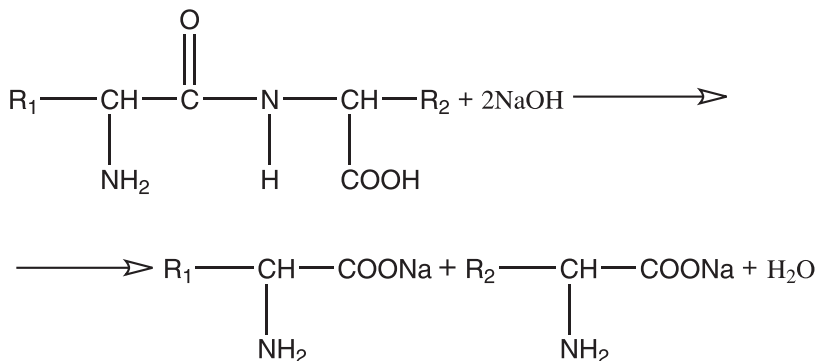
Задача 11

- ☉ 73 г дипептида прокипятили с необходимым для реакции количеством гидроксида натрия, затем выпарили до получения сухого

остатка. Получили 104 г сухого остатка. Какие моноаминоодноосновные кислоты входят в состав дипептида?

🔍 Решение.

Запишем в общем виде реакцию щелочного гидролиза дипептида, состоящего из моноаминоодноосновных кислот. Остатки аминокислот обозначим как R_1 и R_2 , а их молярные массы как x и y г/моль соответственно:



В результате получим смесь двух солей, которые и составляют сухой остаток после выпаривания.

Выразим через переменные молярные массы дипептида и полученных натриевых солей аминокислот:

$$M(\text{дипептида}) = 4 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 14 + 3 \cdot 16 + x + y =$$

$$= (130 + x + y) \text{ г/моль};$$

$$M(R_1\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COONa}) = 23 + 2 \cdot 12 + 3 \cdot 1 + 14 + 2 \cdot 16 + x =$$

$$= (96 + x) \text{ г/моль};$$

$$M(R_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COONa}) = 23 + 2 \cdot 12 + 3 \cdot 1 + 14 + 2 \cdot 16 + y =$$

$$= (96 + y) \text{ г/моль}.$$

Согласно стехиометрическим коэффициентам реакции, из $(130 + x + y)$ г дипептида образуется $(192 + x + y)$ г солей аминокислот.

Составим пропорцию:

из $(130 + x + y)$ г дипептида образуется $(192 + x + y)$ г солей;

из 73 г дипептида образуется 104 г солей;

$$73(192 + x + y) = 104(130 + x + y);$$

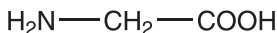
$$73(x + y) + 14016 = 104(x + y) + 13520;$$

$$31(x + y) = 496;$$

$$x + y = 16.$$

Сумма молярных масс остатков равна 16. Минимальные значения, которые могут принимать молярные массы остатков, — 1 г/моль (водород) и 15 г/моль (метильная группа). Следовательно, R_1 и R_2 — это H и CH_3 .

Таким образом, моноаминоодноосновные кислоты, входящие в состав пептида, — глицин и аланин. Их структурные формулы приведены ниже:



Глицерин



Аланин

Некрашевич Игорь Васильевич
Школьный репетитор. Химия. 8–11 класс
(+CD с мультимедийной обучающей системой)

Заведующий редакцией	<i>Д. Гурский</i>
Ведущий редактор	<i>Е. Крикунова</i>
Художник	<i>С. Шутов</i>
Корректоры	<i>Т. Кончик, В. Субот</i>
Верстка	<i>Д. Коришук</i>

Подписано в печать 27.08.07. Формат 60×90/16. Усл. п. л. 19. Тираж 3900. Заказ
ООО «Питер Пресс», 198206, Санкт-Петербург, Петергофское шоссе, 73, лит. А29.
Налоговая льгота — общероссийский классификатор продукции ОК 005-93, том 2;
95 3005 — литература учебная.

Отпечатано с готовых диапозитивов в ООО «Типография Правда 1906».
191126, Санкт-Петербург, Киришская ул., 2.