

**О. В. Архангельская, И. А. Тюльков., МГУ.**

Трудная задача. Начнем по порядку.

Для подбора коэффициентов в уравнениях окислительно-восстановительных реакциях существуют два метода:

- электронного баланса
- электронно-ионного баланса

Первый метод достаточно подробно рассмотрен в школьных учебниках и в методической литературе, поэтому на этом методе мы не будем останавливать внимания. Для подбора коэффициентов в уравнениях окислительно-восстановительных реакций, протекающих в водных растворах, наиболее приемлемым является метод электронно-ионного баланса или метод полу-реакций.

Преимущества этого метода заключаются в следующем:

1. Отсутствие необходимости определения степени окисления отдельных элементов, что особенно важно в случае органических соединений, в которых определение степени окисления отдельного элемента является подчас очень сложным.

2. В правой части уравнения можно или вообще не указывать продукты (если ученик знает особенности поведения окислителя и восстановителя в разных средах, например  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ,  $\text{MnSO}_4$ ,  $\text{CrCl}_2$ , или ограничиться указанием во что переходит окислитель и восстановитель. Остальные продукты комбинируются по ходу схемы уравнивания.

3. Вода, кислота или щелочь часто только указывают среду и даются для правильного определения продуктов реакции и нередко по ходу уравнивания могут или вообще исчезнуть или перейти слева направо или наоборот.

4. Не возникает трудности в тех случаях, когда исходное вещество является не только окислителем или восстановителем, но и солеобразователем (например, уравнение реакции взаимодействия азотной кислоты с металлами).

В полуреакциях реагенты и продукты записываются в виде ионов или молекул, как это делается в молекулярно-ионных уравнениях, описанных в любом учебнике химии.

Ниже рассматривается алгоритм подбора коэффициентов методом полуреакций.

Начнем по порядку.

**Задача 1.** Закончите следующее уравнение химической реакции:



Укажите условия проведения реакции. В окислительно-восстановительной реакции приведите схемы электронного или электронно-ионного баланса. (Факультет почвоведения МГУ, 1996 г.)

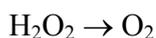
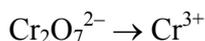
### Решение.

На этом примере разберем алгоритм уравнивания окислительно-восстановительных реакций.

1. Записываем две неполные полуреакции содержащие только окислитель и его восстановленную форму в которую он перешел в результате реакции и восстановитель и его окисленную форму. Для этого необходимо

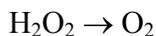
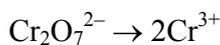
- правильно определить окислитель и восстановитель,
- знать, какие продукты образуются в результате окисления и восстановления в различных средах.

В данном случае окислитель – дихромат-ион. В кислой среде он восстанавливается до катиона  $\text{Cr}^{3+}$ . Восстановителем является пероксид водорода, при его окислении выделяется молекулярный кислород.

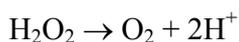
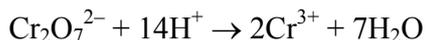


2. Подводим материальный баланс.

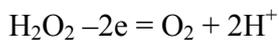
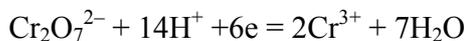
а) уравниваем все элементы, кроме кислорода и водорода:



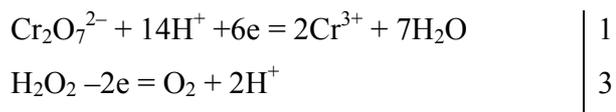
б) уравниваем атомы кислорода и водорода. В кислой среде это осуществляется с помощью  $\text{H}^+$  и  $\text{H}_2\text{O}$ :



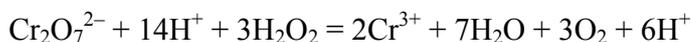
3. Уравниваем суммарный заряд слева и справа с помощью прибавления или вычитания электронов в левой части уравнения, т. е. подводим зарядовый баланс:



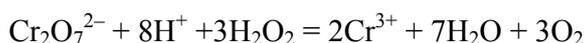
4. К полуреакциям подбираем коэффициенты так, чтобы число отданных и принятых электронов было бы одинаковым:



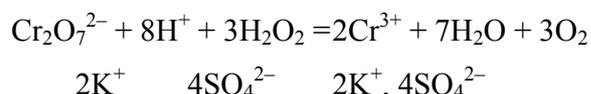
5. Складываем полуреакции с учетом подобранных в предыдущем пункте коэффициентов:



6. Сокращаем подобные члены (в данном случае это катионы водорода):



7. К каждому иону в левой части уравнения подбираем противоионы в нужном количестве, исходя из того, какие исходные вещества были даны. Точно такие же противоионы и в точно таком же количестве добавляем в правую часть уравнения



8. Соединяем ионы в молекулы. В левой части исходя из данных исходных веществ. В правой части, прежде всего, соединяем те противоионы, которые образуют малодиссоциирующее или малорастворимые электролиты. Остальные – в произвольном порядке:



**Задача 2.** Напишите уравнение между следующими веществами:

сульфатом хрома (III) и бромом в щелочной среде.

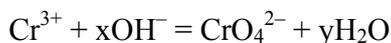
(Кузьменко Н. Е., Еремин В. В., Попков В. А. Начала химии. Современный краткий курс для поступающих в вузы. В 2 т. – М.: 1 Федеративная Книготорговая Компания. 1997, № 370 (6))

**Решение.**

В щелочной среде в полуреакциях уравниваем кислород и водород с помощью  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .  $\text{Br}_2$  является окислителем,  $\text{Cr}^{3+}$  – восстановителем.

В щелочной среде  $\text{Cr}^{3+}$  окисляется до хромат-иона  $\text{CrO}_4^{2-}$ .

Если возникают затруднения с расстановкой  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в левую или правую части уравнения или с подбором коэффициентов к этим частицам, можно воспользоваться составлением системы алгебраических уравнений с двумя неизвестными:

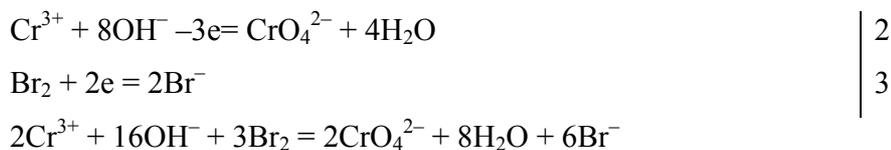


По кислороду:  $x = 4 + y$ ;

По водороду:  $x = 2y$ .

$$\begin{cases} x = 4 + y \\ x = 2y \end{cases}$$

Решая эту систему алгебраических уравнений, получаем:  $y = 4$ ,  $x = 8$ .



В молекулярном виде:



**Задача 3.** Напишите уравнение следующей реакции:

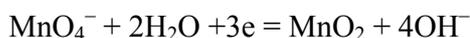


(Кузьменко Н. Е., Еремин В. В., Попков В. А. Начала химии. Современный краткий курс для поступающих в вузы. В 2 т. – М.: 1 Федеративная Книготорговая Компания. 1997, № 368 (2))

**Решение.**

Окислитель в данном примере – перманганат-ион. В нейтральной среде он восстанавливается чаще всего до оксида марганца (IV). Восстановитель –  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ; он окисляется до  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

Полуреакция восстановления:



В этой полуреакции получаются гидроксид-ионы, которыми мы воспользуемся для подведения материального баланса полуреакции окисления:

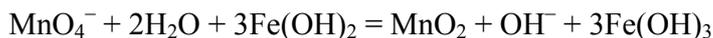


Гидроксиды железа (II) (III) – малорастворимые электролиты, поэтому в полуреакции записываем их в молекулярном виде.

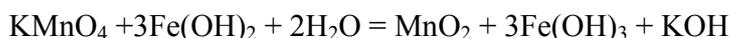
Суммарное молекулярно-ионное уравнение:



После сокращения подобных членов:



Молекулярное уравнение:

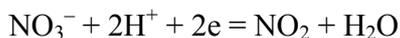


**Задача 4.**

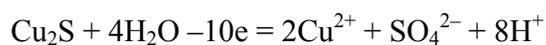
Напишите уравнение взаимодействия между сульфидом меди (I) и концентрированной азотной кислотой. Предложите вещество, которое может вступать в реакции со всеми продуктами этого взаимодействия (кроме воды) и напишите уравнения реакций. (Химический факультет МГУ, весна, 1997 г.)

**Решение.**

Нитрат-ион в кислой среде проявляет окислительные свойства. В этом примере  $\text{NO}_3^-$  восстановится до  $\text{NO}_2$  (свойства азотной кислоты и нитратов):



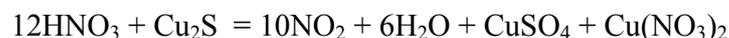
Сульфид меди (I) будет окисляться в данных условиях до  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ :



Суммарное молекулярно-ионное уравнение:

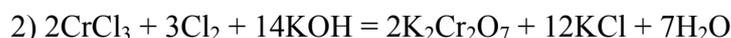


Приводим подобные слагаемые и получаем молекулярное уравнение:



Со всеми продуктами этой реакции может реагировать какая-либо щелочь, например, гидроксид калия. Напишите уравнения реакции взаимодействия гидроксида калия с продуктами этой реакции самостоятельно.

**Задача 5.** Обнаружьте и исправьте ошибки в приведенных ниже реакциях:



(Начала химии, №389 (1, 3))

**Решение.**

- 1) Концентрированная серная кислота является сильным окислителем, иодид-ион проявляет ярко выраженные восстановительные свойства. Поэтому эта реакция является окислительно-восстановительной, продуктами ее будут являться  $\text{I}_2$  и  $\text{SO}_2$ .
- 2) Подобная реакция была разобрана в задаче 3. В щелочной среде бихромат-ион не существует. В ходе этой реакции образуется хромат-ион  $\text{CrO}_4^{2-}$ .  
Запишите правильные уравнения реакций самостоятельно.

Подбор коэффициентов в окислительно-восстановительной реакции является прямой задачей. Сложнее решить обратную задачу, т. е. по продуктам реакции восстановить левую часть уравнения реакции. При анализе подобных задач в первую очередь надо опираться на знания свойств веществ. Давайте рассмотрим несколько примеров подобных заданий.

**Задача 6.** Какие вещества вступили в реакцию и при каких условиях, если в результате образовались следующие вещества (указаны продукты реакции без коэффициентов):



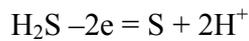
Напишите полное уравнение реакции. (Химический факультет МГУ, 1994 г.)

**Решение.**

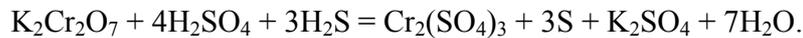
Ион хрома  $\text{Cr}^{3+}$  может быть получен при восстановлении дихромат-иона в кислой среде:



Восстановителем в данном процессе может выступать вещество, при окислении которого может быть получена сера. Этим условиям соответствуют либо сульфид-ион, либо сероводород. Разберем последний вариант:



Итоговое уравнение:



Напишите уравнение реакции с сульфид-ионом (например, сульфидом калия) самостоятельно.

**Задача 7.** Какие два вещества вступили в реакцию и при каких условиях, если в результате образовались следующие вещества (указаны все продукты реакции без коэффициентов):



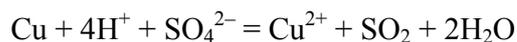
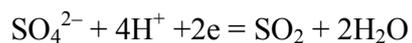
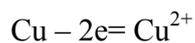
Напишите полное уравнение реакции. (Факультет почвоведения МГУ, 1997 г.)

**Решение.**

Ионы  $\text{Cu}^{2+}$  могут быть получены при окислении меди, соединений меди (I) или меди (II), например, сульфидов.

Поскольку среди продуктов есть  $\text{SO}_2$ , то окислителем, вероятнее всего, является концентрированная серная кислота.

Разберем вариант взаимодействия меди с концентрированным раствором серной кислоты:



Итоговое уравнение:



Условием протекания этого процесса является кипячение.

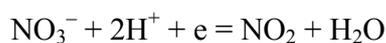
**Задача 8.** Какие два вещества вступили в реакцию и при каких условиях, если в результате образовались следующие вещества (указаны все продукты реакции без коэффициентов):



Напишите полные уравнения реакций. (Биологический факультет МГУ, 1993 г.)

**Решение.**

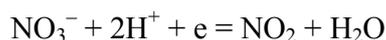
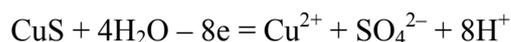
$\text{NO}_2$  получается при восстановлении нитрат-ионов в кислой среде:



В составе восстановителя должна быть медь и сера. Возможны варианты:  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CuS}$ ,  $\text{Cu}_2\text{SO}_3$ <sup>ii</sup>

Взаимодействие  $\text{Cu}_2\text{S}$  с концентрированным раствором азотной кислоты рассмотрено в задаче 4. Поскольку в результате этой реакции образуется  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ , сульфид меди (I) не подходит.

Разберем вариант с  $\text{CuS}$ :



**Задача 9.** Какие два вещества вступили в реакцию и при каких условиях, если в результате образовались следующие вещества (указаны все продукты реакции без коэффициентов):

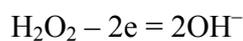


Напишите полное уравнение реакций. (Химический факультет, заочный экзамен, МГУ, 1994 г.)

**Решение.**

Одно из исходных веществ представляет соединение железа (II). Это не может быть оксид или соль железа (II), т. к. в этом случае продуктов реакции будет несколько. Возможно, это гидроксид железа (II). Тогда окислителем могут быть  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Если написать уравнения реакций, то среди реагирующих веществ будет вода. Окисление проходит в водной среде, поэтому можно принять первые два варианта за правильные.

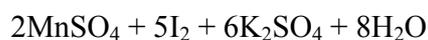
Разберем вариант с  $\text{H}_2\text{O}_2$ :



Суммарное уравнение:



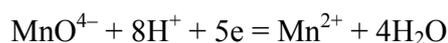
**Задача 10.** Восстановите левую часть уравнения:



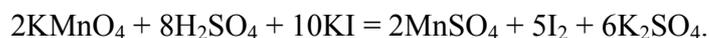
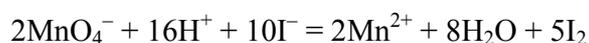
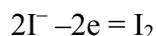
(Начала химии, №384 (1)).

**Решение.**

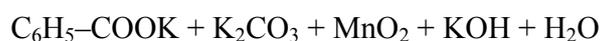
Ион  $\text{Mn}^{2+}$  может получиться при восстановлении перманганат-иона в кислой среде:



$\text{I}_2$  может получиться при окислении иодид-ионов:



**Задача 11.** Какие два вещества вступили в реакцию и при каких условиях, если в результате образовались следующие вещества (указаны все продукты реакции без коэффициентов):



Напишите полное уравнение реакции.

(Кузьменко Н. Е., Еремин В. В., Попков В. А. Начала химии. Современный краткий курс для поступающих в вузы. В 2 т. – М.: 1 Федеративная Книготорговая Компания. 1997, №968 (4))

**Решение.**

$\text{MnO}_2$  получается при восстановлении перманганат-иона в нейтральной среде.

Так как образовались анион бензойной кислоты и карбонат-ион, логично предположить, что окислению подвергся один из гомологов ряда аренов:  $\text{R-C}_6\text{H}_5$ .  $\alpha$ -атом углерода в цепи при бензольном кольце окисляется до карбоксильной группы. Остаток углеводородной цепи окисляется до соответствующей кислоты (или ее аниона в щелочной среде).

Толуол окисляется до бензойной кислоты (или бензоат-иона в щелочной среде).

Этилбензол – до бензойной кислоты и углекислого газа (муравьиная кислота подвергается дальнейшему окислению)(или бензоат-иона и карбонат-иона в щелочной среде).

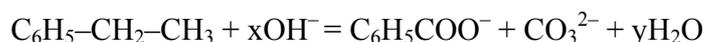
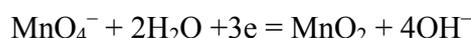
n-Пропилбензол – до бензойной кислоты и уксусной кислоты (или бензоат-иона и ацетат-иона).

Т. о. при окислении гомологов бензола с неразветвленной углеродной цепью, начиная с n-пропилбензола, продуктом окисления, кроме бензойной кислоты, будет карбоновая кислота.

Следовательно, чтобы образовались продукты, указанные в условии задачи, необходимо подвергать окислению в щелочной среде арены, у которого при  $\alpha$ -атоме углерода имеется одна или несколько метильных групп.

Разберем вариант окисления этилбензола перманганатом калия в нейтральной среде.

Запишем полуреакции:



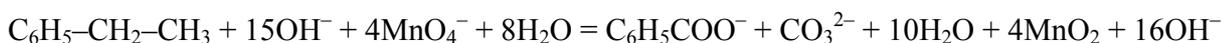
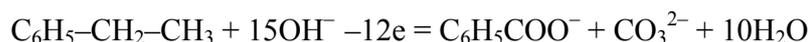
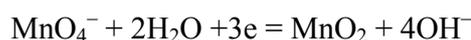
Для подведения материального баланса в этой полуреакции воспользуемся составлением системы алгебраических уравнений:

$$\text{по кислороду: } x = 2 + 3 + y$$

$$\text{по водороду: } 5 + 2 + 3 + x = 5 + 2y$$

Решая эту систему, находим  $x = 15$ ,  $y = 10$ .

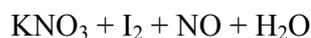
Итак:



При окислении изопропилбензола получается бензоат-ион и карбонат-ион в соотношении 1:2. Напишите уравнения реакций этих веществ перманганатом калия в нейтральной среде самостоятельно.

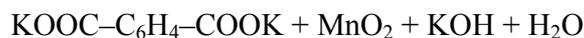
В заключении предлагаем читателям самостоятельно решить следующие задачи:

**Задача 12.** Какие два вещества вступили в реакцию и при каких условиях, если в результате образовались следующие вещества (указаны все продукты реакции без коэффициентов):



Напишите полное уравнение реакции. (Биологический факультет МГУ, 1993 г.)

**Задача 13.** Какие два вещества вступили в реакцию и при каких условиях, если в результате образовались следующие вещества (указаны все продукты реакции без коэффициентов):



Напишите полное уравнение реакции.

(Кузьменко Н. Е., Еремин В. В., Попков В. А. Начала химии. Современный краткий курс для поступающих в вузы. В 2 т. – М.: 1 Федеративная Книготорговая Компания. 1997, №968 (5))

Чтобы не вводить читателей в заблуждение, следует сказать, что в экзаменационных билетах в подобных заданиях рассматривается не одна, а несколько химических реакций.

<sup>i</sup> Не надо пугаться, если значения  $x$  и  $y$  получатся отрицательными. Если в уравнении какое-либо слагаемое перенести из одной части в другую, изменив его знак, то получится уравнение, равносильное данному. Исходя из этого, мы получим уравнение химической реакции с положительными коэффициентами.

<sup>ii</sup> О веществе  $\text{Cu}_2\text{SO}_3$  см. Леенсон И. А., Занимательная химия. 8–11 кл.: в 2 ч. Ч.1.–М.: Дрофа, 1996, с. 126.