

Решаем сложную задачу. О применении метода электронно-ионного баланса для составления уравнений окислительно-восстановительных реакций

Ирина Аниковна Украинцева
МАОУ лицей № 17, Калининград, Россия
klark_2001@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматриваются примеры применения метода электронно-ионного баланса для расстановки коэффициентов в окислительно-восстановительных реакциях с участием органических и неорганических соединений. Автор статьи предлагает использовать данный метод для решения заданий с участием окислительно-восстановительных реакций, в которых продукты реакции сложно определяемы. Обращается особое внимание на то, что использование электронно-ионного баланса позволяет успешно составлять полные уравнения окислительно-восстановительных реакций, особенно с участием органических соединений. В статье приводятся образцы полуреакций с наиболее часто используемыми в органической химии окислителями — перманганатом калия и дихроматом калия в различных средах; рассмотрен алгоритм составления полуреакций с участием органических и неорганических соединений. Использование метода электронно-ионного баланса позволяет решать трудные задачи при выполнении экзаменационных заданий, сократить временные затраты на решение этого типа заданий и определить продукты реакций.

Метод полуреакций практически не используется в школьном курсе химии, однако его простота и доступность может стать полезным при решении сложных задач, особенно в ситуациях временных ограничений при решении заданий ЕГЭ по химии, а также решении олимпиадных задач. Использование разнообразных способов решения поставленных задач расширяет кругозор школьника и знакомит его с многообразием химических знаний, которые не ограничиваются страницами школьного учебника.

Ключевые слова: ЕГЭ по химии, метод электронно-ионного баланса, степень окисления, окислительно-восстановительные реакции, органические соединения, неорганические соединения.

Solving a complex task. Application of the electron-ion balance method to formulate redox reaction equations

Irina A. Ukraintseva

Lyceum No. 17, Kaliningrad, Russia

Abstract. *This article reviews examples of using the electron-ion balance method to assign coefficients in redox reactions involving organic and inorganic compounds. The author proposes using this method to solve tasks involving redox reactions in which the reaction products are difficult to identify. Particular attention is paid to the fact that using electron-ion balance allows to set up successfully complete equations for redox reactions, especially with organic compounds. The article provides examples of half-reactions involving the most commonly used oxidizing agents in organic chemistry — potassium permanganate and potassium dichromate — in various environments. An algorithm for formulating half-reactions involving organic and inorganic compounds is also discussed. Using the electron-ion balance method allows to solve difficult exam tasks, reduce the time spent on this type of task, and determine the reaction products.*

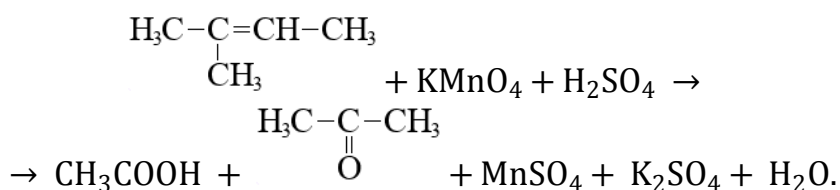
The half-reaction method is rarely used in school Chemistry classes, but its simplicity and accessibility can be useful for solving complex tasks, especially under time limits when solving Chemistry Unified State Exam assignments, as well as when solving Olympiad tasks. Using a variety of problem-solving methods broadens students' horizons and makes them aware of a wide range of chemical knowledge that extends beyond the pages of a school textbook.

Keywords: *Chemistry Unified State Exam, electron-ion balance method, oxidation state, redox reactions, organic compounds, inorganic compounds.*

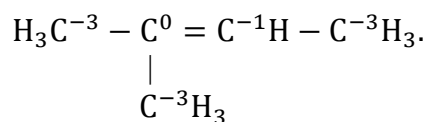
Одну из самых известных химических форм движения материи представляют окислительно-восстановительные реакции (далее — ОВР). Они широко распространены в природе [1]. Знакомство с данным типом реакций в школьном курсе химии начинается в 8-м классе. Обучающиеся овладевают умением определять окислитель и восстановитель, рассчитывать степени окисления атомов химических элементов в соединениях, расставлять коэффициенты в уравнениях окислительно-восстановительных реакций с помощью метода электронного баланса. При изучении химии в 9-м классе эти навыки совершенствуются, по крайней мере, у тех школьников, которые выбирают химию в качестве экзамена. В 11-м классе происходит обобщение, систематизация и углубление знаний об ОВР. Основным методом расстановки коэффициентов в ОВР, изучаемый в школе, — метод электронного баланса [2]. Однако в нем используются не реально существующие частицы вещества (например, ионы MnO_4^- , NO_3^-), а атомы элементов в определенных степенях окисления из соответствующих формульных единиц (например, Mn^{+7} , N^{+5}). На данный аспект метода электронного баланса обращается внимание в 11-м классе, но он все равно является основным для школьников при решении ОВР уравнений, соответствующих заданий в ОГЭ и ЕГЭ по химии.

Курс органической химии, который изучается в 10-м классе, стоит особняком и иррационально считается у школьников сложным. С данным фактом приходится считаться при знакомстве детей с огромным миром органических соединений. ОВР в органической химии встречаются не реже, чем в курсе неорганической химии, однако выделить отдельно часы на изучение особенностей ОВР с участием органических соединений не предоставляется возможным. При изучении органической химии в 10-м классе внимание обучающихся обращается на особенности определения степени окисления атомов углерода в органических соединениях. Для определения и расстановки коэффициентов в ОВР используется все тот же электронный баланс.

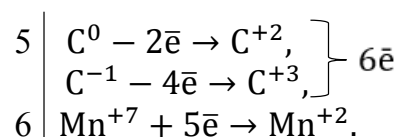
Особенностью ОВР с участием органических веществ является то, что выпускникам необходимо предварительно определить степени окисления каждого атома углерода в органическом соединении. Важно помнить о том, что разные атомы углерода в одном органическом соединении могут иметь разные степени окисления [4]. Степень окисления атома углерода может быть разной и в одном соединении, например, как в 2-метилбутене-2, который окисляется в присутствии перманганата калия в кислой среде до уксусной кислоты и ацетона.



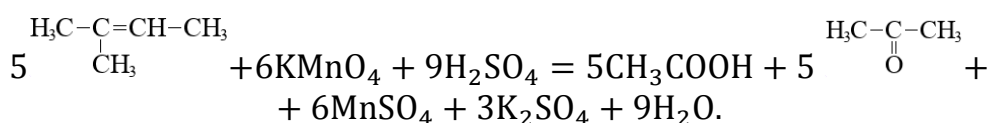
В 2-метилбутене-2 атомы углерода находятся в разных степенях окисления:



В ОВР принимают участие второй и третий атомы углерода (нумерация атома углерода слева направо). В продуктах реакций степень окисления атома углерода в карбоксильной группе уксусной кислоты +3, атома углерода в карбонильной группе в молекуле ацетона +2. Электронный баланс имеет следующий вид:



В уравнении один окислитель и два восстановителя. После расстановки коэффициентов уравнение реакции имеет вид:



При решении данного уравнения учащиеся сталкиваются с несколькими проблемными ситуациями: во-первых, им нужно правильно определить степени окисления атомов углерода, осознать, что в данной реакции участвуют два восстановителя и один окислитель; во-вторых, необходимо найти и расставить коэффициенты перед формулами веществ, формально не участвующих в окислительно-восстановительном процессе (серная кислота, вода, сульфат калия). Все это требует определенных временных затрат, что в ситуации нехватки времени на выполнение заданий ЕГЭ может стать фатальной ошибкой или, в случае неправильного определения коэффициентов, привести к потере баллов за выполненную работу.

В школьном курсе химии метод электронно-ионного баланса (метод полуреакций) для расстановки коэффициентов в ОВР практически не рассматривается. В задании № 32 в ЕГЭ по химии на генетическую связь между классами органических соединений одно из уравнений в цепочке превращений всегда является ОВР. При выполнении данного задания необходимо не только расставить коэффициенты, но и правильно определить продукты реакций. Метод электронно-ионного баланса при решении таких реакций с участием органических соединений позволяет сделать это быстро и однозначно. С помощью этого метода можно не только определить коэффициенты в ОВР, но и правильно указать

продукты реакций. При решении задания по стехиометрии ОВР с участием органических веществ метод полуреакций может выступать альтернативным путем решения. В разработке этого метода для ОВР органических соединений с трудно определяемой степенью окисления углерода принимал активное участие академик Николай Серафимович Зефилов (1935–2017), 90-летие со дня рождения которого отмечается в 2025 году [1].

Рассмотрим реакцию окисления 2-метилбутена-2 с использованием метода электронно-ионного баланса. При использовании этого метода необходимо помнить следующее.

1. Метод электронно-ионного баланса позволяет не только расставить коэффициенты, но и составить ОВР, правильно определив продукты реакции.

2. В полуреакциях записывают только реально существующие частицы:

- для слабых электролитов — молекулы;
- для сильных электролитов — необходимо учитывать диссоциацию и записать ионы, содержащие элемент, изменяющий степень окисления [4].

Практически все органические соединения (кроме растворимых солей органических кислот) являются слабыми электролитами и в полуреакциях записываются в молекулярной форме.

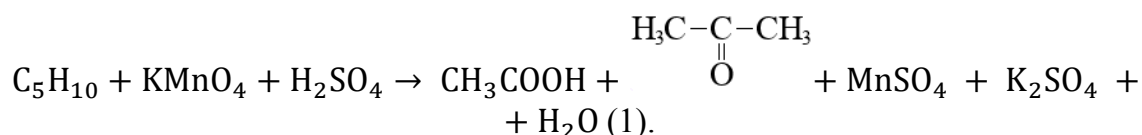
3. Уравнения полуреакций зависят от среды раствора.

В качестве окислителей в ОВР с органическими веществами чаще всего применяется перманганат калия или дихромат калия. Такие реакции в большинстве своем протекают в кислой или нейтральной, реже в щелочной средах раствора. Схемы полуреакций с участием окислителей приведены в таблице 1.

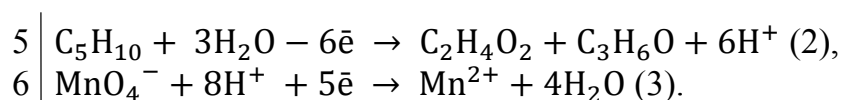
Таблица 1 — Схемы полуреакций с участием окислителей

Тип среды	Перманганат калия KMnO_4	Дихромат калия $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
Кислая среда	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5\text{e}^- = \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- = 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$
Нейтральная среда	$\text{MnO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- = \text{MnO}_2 + 4\text{OH}^-$	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + \text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- = 2\text{Cr}(\text{OH})_3$
Щелочная среда	$\text{MnO}_4^- + \text{e}^- = \text{MnO}_4^{2-}$	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 2\text{OH}^- = 2\text{CrO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$

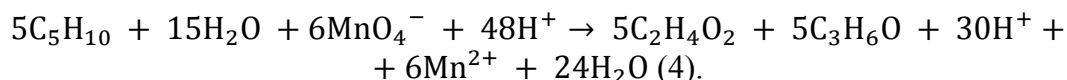
Расставим коэффициенты в уравнении окисления 2-метилбутена-2 перманганатом калия в кислой среде (1). Органическое соединение в левой части уравнения реакции запишем в молекулярной форме.



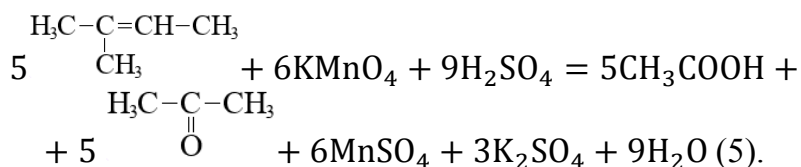
Далее составим уравнения полуреакций для процессов окисления (2) и восстановления (3):



В реакции окисления (2) и восстановления (3) наименьшее общее кратное для числа электронов, участвующих в реакциях, равно 30. Сложение уравнения (2) и (3) с учетом множителей (5 и 6) приводит к промежуточному уравнению (4):



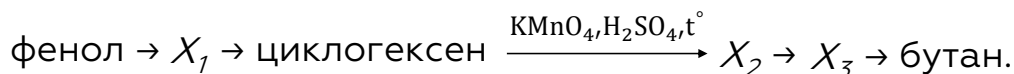
Выражение (4) является промежуточным. Сокращением одинаковых формульных единиц в уравнении (4) (30H^+ и $18\text{H}_2\text{O}$) и добавлением ионов K^+ и SO_4^{2-} в левую и правую части уравнения (с учетом коэффициентов) получаем окончательное уравнение: окисление 2-метилбутена-2 перманганатом калия в кислой среде (5).



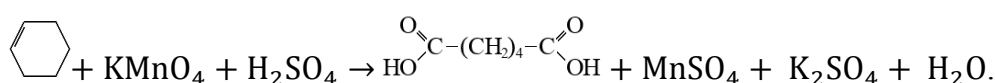
Использование метода полуреакций позволяет не только расставить коэффициенты, но и определить продукты реакции.

Рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих применение электронно-ионного метода для составления окислительно-восстановительных реакций с участием органических соединений [3].

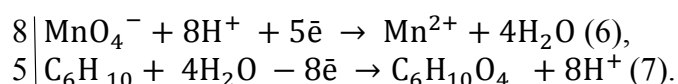
Задание 1. Необходимо написать уравнения реакций, с помощью которых можно осуществить следующие превращения:



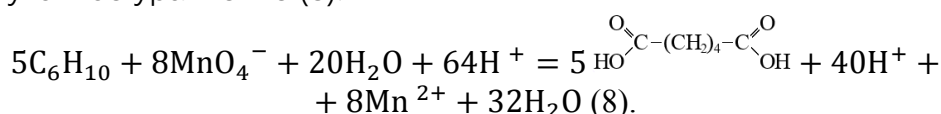
Рассмотрим реакцию 3 (циклогексен \rightarrow X2). При окислении циклогексена перманганатом калия в кислой среде происходит жесткое окисление до раскрытия цикла и образования гексационовой кислоты (адипиновой кислоты).



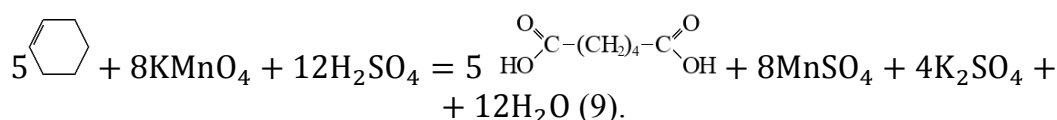
Полуреакции имеют вид:



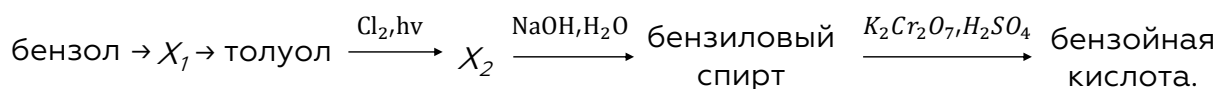
Промежуточное уравнение (8):



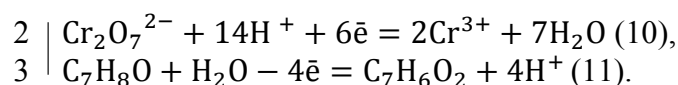
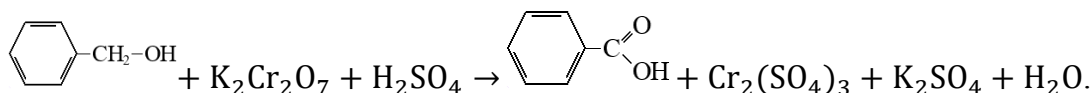
Окончательное уравнение (9) имеет вид:



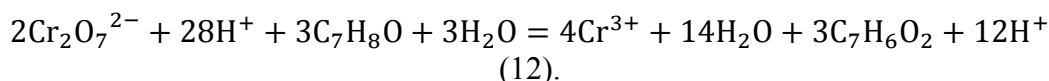
Задание 2. Дана цепочка превращений:



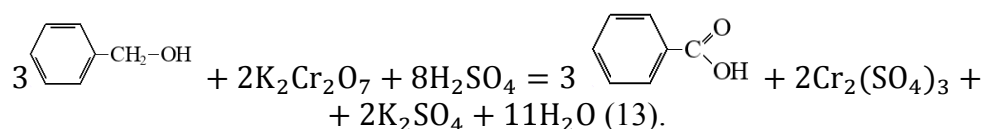
Рассмотрим процесс окисления бензинового спирта до бензойной кислоты в кислой среде дихроматом калия (реакция 5).



Промежуточное уравнение (12) имеет вид:



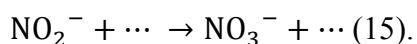
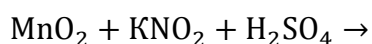
После сокращения одинаковых формульных единиц в уравнении (12), добавления формул ионов K^+ и SO_4^{2-} в левую и правую часть уравнения с учетом коэффициентов получаем окончательное уравнение (13) окисления бензилового спирта до бензойной кислоты дихроматом калия в кислой среде.



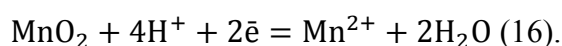
Доступность, простота и формализм данного метода делают возможным расставить коэффициенты в ОВР не только с участием органических соединений, но и в ОВР с неорганическими веществами, а также позволяют предсказывать продукты реакции. Например, в задании № 29 ЕГЭ по химии необходимо составить ОВР, отвечающую тому или иному условию. Рассмотрим несколько примеров.

Задание 3. Из следующего перечня веществ: оксид фосфора (V), оксид марганца (IV), гидрокарбонат аммония, аммиак, серная кислота, нитрит калия выберите окислитель и восстановитель, реакция между которыми в соответствующей среде приводит к образованию раствора двух солей [3].

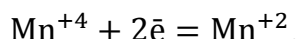
Согласно условию задания в продуктах реакции должны образоваться растворимые соли, возможная реакция происходит между оксидом марганца (IV) и нитратом калия, среда раствора — кислотная (в перечне веществ есть серная кислота).



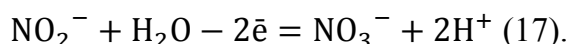
В схеме (14) атом марганца изменяет степень окисления, в схеме (15) степень окисления изменяет атом азота. Для установления материального баланса используем молекулы воды и ионы H^+ :



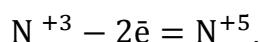
Уравнение (16) отражает реакцию восстановления атома марганца в оксиде марганца (IV), что эквивалентно выражению:



Составление уравнения процесса окисления с участием нитрит-иона на основе материального баланса и баланса зарядов имеет вид:



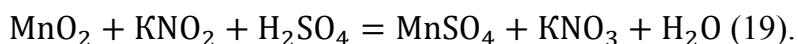
Полученное выражение (17) эквивалентно электронному уравнению:



Сложение выражений (16) и (17) с учетом соответствующих множителей (1 и 1) дает выражение (18):



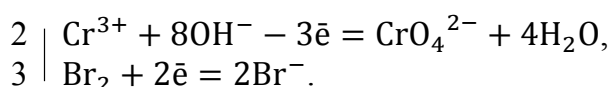
Сокращение подобных формульных единиц (2H^+ и H_2O) и добавление формул ионов K^+ и SO_4^{2-} в левую и правую части уравнения с учетом коэффициентов дает окончательное уравнение реакции (19):



Полученные соли MnSO_4 и KNO_3 являются растворимыми, что отвечает условию задания.

Задание 4. Даны вещества — хлороводород, перманганат натрия, хлорид хрома (III), гидроксид калия, бром, нитрат аммония. Выберите три вещества, ОВР между которыми протекает с образованием желтого раствора. Ни осадка, ни газа при этом не образуется [Там же].

Появление желтого окрашивания раствора при вступлении в реакцию перечисленных веществ происходит при окислении хлорида хрома (III) в щелочной среде сильным окислителем, которым в данном перечне является бром [5]. Образующий в ходе реакции хромат-ион CrO_4^{2-} и придает растворам желтую окраску.



Окончательное уравнение:



Применение метода электронно-ионного баланса позволяет не только уравнивать, но и одновременно составлять ОВР. Этот метод прост, доступен и особенно эффективен при составлении ОВР с участием органических соединений. Преимуществами использования метода полуреакций является то, что при его применении нет необходимости рассчитывать степени окисления каждого из атомов углерода, побочные продукты определяются по полуреакциям. Безусловно, обучающимся необходимо уверенно владеть навыками устного счета и помнить таблицу умножения.

В практике преподавания химии в школе метод электронно-ионного баланса практически не рассматривается, ознакомительное изучение встречается на отдельных курсах по выбору. Большинство обучающихся используют электронный баланс для расстановки коэффициентов в ОВР. Мир химии более многообразен, чем картина, представленная на страницах школьного учебника. Введение разнообразных методов решения учебных задач способствует повышению мотивации школьников к изучению предмета и расширению представлений о подходах решения химических задач.

Список литературы

1. Захаров, А. Н. Электронно-ионный баланс в школьном курсе химии / А. Н. Захаров, Т. И. Шабатина // Химия в школе. — 2025. — № 1. — С. 35–39.
2. Обобщение знаний об окислительно-восстановительных реакциях / Е. Я. Аршанский, И. С. Борисевич, А. А. Белохвостов, Л. А. Конорович // Химия в школе. — 2022. — № 9. — С. 19–23.
3. Открытый банк заданий ЕГЭ. Химия [Электронный ресурс] // ФГБНУ «ФИПИ». — URL: <https://ege.fipi.ru/bank/index.php?proj=EA45D8517ABEB35140D0D83E76F14A41> (дата обращения: 11.07.2025).
4. Тригубчак, И. В. Электронно-ионный баланс в курсе органической химии средней школы. Выступление на IX Московском марафоне учебных предметов 31 марта 2010 г. / И. В. Тригубчак // Журнал «Химия» (издательский дом «Первое сентября»). — 2010. — № 15 (805). — С. 6–9.
5. Химия: 11 класс: углубленный уровень: Учебник / В. В. Еремин [и др.] — 12-е изд. — М.: Просвещение, 2025. — 482 с.

Информация об авторе

Ирина Аниковна Украинцева

Заместитель директора, учитель химии,
МАОУ лицей № 17

Information about the author

Irina A. Ukraintseva

Deputy Director, Chemistry teacher, Lyceum
No. 17

Статья поступила в редакцию 04.08.2025;
одобрена после рецензирования 26.09.2025;
принята к публикации 23.12.2025.

The article was submitted 04.08.2025;
approved after reviewing 26.09.2025;
accepted for publication 23.12.2025.