

Муниципальное учреждение дополнительного образования «Малая академия»  
муниципального образования город Краснодар

**МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА  
«РАСЧЕТЫ ПО ХИМИЧЕСКИМ ФОРМУЛАМ. УСТАНОВЛЕНИЕ  
ФОРМУЛЫ ХИМИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ»**

Клочкова Татьяна Владимировна,  
педагог дополнительного образования

г. Краснодар, 2022

Решение олимпиадных химических задач требует от учащихся достаточно высокого уровня теоретической подготовки по предмету, умения пользоваться на практике приобретенными знаниями. Усложненные и нестандартные задачи входят в раздел «задания высокого уровня сложности» Единого государственного экзамена, в контрольно-измерительные материалы дополнительных вступительных испытаний Московского государственного университета и других высококонкурсных вузов на профильные факультеты.

Для качественной подготовки учащихся к этим испытаниям целесообразно организовать образовательный процесс наиболее эффективным образом. Учащимся необходим навык качественно иной мыслительной работы: не вспоминать алгоритм решения типовых заданий, а в результате рассуждений, используя ограниченный объем информации из текста задачи, смоделировать вариант задачи с некоторыми допущениями, привлекая дополнительные знания из других предметных областей, например, физики и математики. Такой навык может быть сформирован на основе постоянных занятий в форме практикума-тренинга, с применением заданий из архива химических олимпиад различных уровней, интеллектуальных соревнований и заданий вступительных экзаменов в высококонкурсные вузы.

Особое место в этой работе выделяется самостоятельной работе учащихся в формате КСР (контролируемой самостоятельной работы). Самостоятельная работа учащихся планируется по тематическим блокам (модулям), на выполнение которой отводится от двух до четырех недель в зависимости от объема темы. К каждому тематическому блоку предлагается методическая разработка, которая включает подробный разбор 15-20 задач с применением разных подходов и алгоритмов решения, а также задачи для самостоятельного решения из архива химических олимпиад.

Предлагаемая методическая разработка адресована учащимся первого года обучения и включает подборку задач по теме «Установление формулы вещества».

Умение решать сложные задачи приобретается единственно возможным путем. Это путь настойчивого и неустанного применения на практике тех закономерностей и технологических приемов, которые составляют «копилку» настоящих олимпиадников. Давно на практике доказано, что рецепт «ежедневно по 2-3 задачи», а в особо сложных случаях «ежедневно до 10 задач» срабатывает обязательно у тех, кто упорно следует к поставленной цели.

Несомненно, педагог-наставник может рекомендовать своему подопечному для самостоятельной работы до десятка современных задачников. За последние годы их опубликовано и выложено в электронном виде немало. Только в этих задачниках тематические подборки в логике «от простого к сложному» с подробным разбором каждого решения встречаются нечасто. Такой пробел предлагается восполнить, причем для некоторых задач приводятся решения, которые предлагали в различные годы сами учащиеся [1].

Итак, с чего начнем? Конечно, с теории!

Всякое чистое химическое соединение, не зависимо от места и способа его получения, имеет постоянный качественный и количественный состав (Закон постоянства вещества, Ж.-Л. Пруст, 1799 г.).

Качественный состав показывает, из каких элементов состоит вещество. Количественный состав сложного вещества определяется отношением атомов в молекуле, а также массовой долей элемента в веществе.

Массовая доля элемента  $\omega(\text{Э})$  – это отношение массы данного элемента  $m(\text{Э})$  во всякой порции вещества к массе этой порции вещества. Массовую долю элемента выражают в долях от единицы или в процентах:

$$\omega(\text{Э}) = \frac{m(\text{Э})}{m(\text{в} - \text{ва})}; \quad \omega\%(\text{Э}) = \frac{m(\text{Э}) \cdot 100\%}{m(\text{в} - \text{ва})}.$$

Для бинарного вещества  $A_xB_y$ :

$$\omega(A) = \frac{m(A)}{m(A_xB_y)} = \frac{x \cdot M(A)}{M(A_xB_y)}; \quad \omega(B) = \frac{m(B)}{m(A_xB_y)} = \frac{y \cdot M(B)}{M(A_xB_y)};$$

$$x = \frac{\omega(A) \cdot M(\text{в} - \text{ва})}{M(A)}; \quad y = \frac{\omega(B) \cdot M(\text{в} - \text{ва})}{M(B)}.$$

Для начала вспомним, как вычисляют массовые доли химических элементов в сложном соединении на примере первой задачи.

**1. Вычислите массовые доли каждого элемента в составе малахита  $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$  (в долях от единицы по химической формуле).**

**Решение:** Массовая доля элемента определяется по расчетной формуле:

$$\omega(\text{Э}) = \frac{x \cdot M(\text{Э})}{M(\text{в} - \text{ва})}.$$

Молярная масса основного карбоната меди:  $M(\text{в} - \text{ва}) = 222$  г/моль.

Вычисляем массовую долю каждого элемента:

$$\omega(\text{Cu}) = \frac{2 \cdot M(\text{Cu})}{M(\text{CuOH})_2\text{CO}_3} = \frac{2 \cdot 64}{222} = 0,5766;$$

$$\omega(\text{H}) = \frac{2 \cdot M(\text{H})}{M(\text{CuOH})_2\text{CO}_3} = \frac{2 \cdot 1}{222} = 0,0090;$$

$$\omega(\text{O}) = \frac{5 \cdot M(\text{O})}{M(\text{CuOH})_2\text{CO}_3} = \frac{5 \cdot 16}{222} = 0,3604;$$

$$\omega(\text{C}) = \frac{1 \cdot M(\text{C})}{M(\text{CuOH})_2\text{CO}_3} = \frac{1 \cdot 12}{222} = 0,0544.$$

**Ответ:**  $\omega(\text{Cu}) = 0,5766$ ;  $\omega(\text{H}) = 0,0090$ ;  $\omega(\text{O}) = 0,3604$ ;  $\omega(\text{C}) = 0,0544$ .

Теперь перейдем к расчету количественного состава бинарного вещества известного класса и определенной массы, если известна масса одного из элементов.

**2. Определите простейшую формулу оксида, если 16 г его содержит 6,4 г серы.**

**Решение:** Формула оксида  $S_xO_y$ . Количество вещества серы в этом оксиде определяется по формуле:  $\nu(\text{S}) = \frac{m}{M} = \frac{6,4}{32} = 0,2$  (моль).

Масса кислорода в этом оксиде:  $m(\text{O})$  составляет  $16 - 6,4 = 9,6$  г.

$$\nu(\text{O}) = \frac{m}{M} = \frac{9,6}{16} = 0,6 \text{ (моль)}.$$

Отношение количества вещества элементов позволяет установить соотношение числа атомов в молекуле бинарного соединения:  $x : y = \nu(\text{S}) : \nu(\text{O}) = 0,2 : 0,6 = 1 : 3$ .

**Ответ:**  $\text{SO}_3$  – формула искомого оксида серы.

Решение задач, в условии которых указана массовая доля известного элемента в бинарном соединении с неким другим элементом с известной валентностью решаются простым способом, через нахождение молярной массы бинарного вещества по формуле нахождения массовой доли одного из элементов. Прежде такие задачи рекомендовалось решать по закону эквивалентов в его традиционном варианте.

**3. Массовая доля хлора в хлориде 0,655. Определите элемент, если он трехвалентен.**

**Решение:** В соответствии с условием задачи формула хлорида  $\text{ЭCl}_3$ .

Массовая доля хлора определяется по формуле:  $\omega(\text{Cl}) = \frac{3 \cdot M(\text{Cl})}{M(\text{ЭCl}_3)}$ .

Обозначим молярную массу неизвестного элемента через  $x$ :

$$M(\text{ЭCl}_3) = (x + 106,5) \text{ г/моль}.$$

Составим уравнение материального баланса:

$$0,655 = \frac{106,5}{x + 106,5}; \quad 106,5 = 0,655(x + 106,5);$$

$$0,655x = 36,70; \quad x = 56 \text{ г/моль (Fe)}.$$

**Ответ:** железо.

Когда в условии задачи валентность искомого элемента не указана, решение задачи сводится к подбору степени окисления. Порой задача осложняется тем обстоятельством, что при подборе обнаруживается несколько вариантов, близких по значению молярной массы.

**4. Массовая доля металла в оксиде 0,694. Определите металл.**

**Решение:** По условию задачи валентность металла неизвестна, тогда представим его степень окисления как  $+n$ . Степень окисления кислорода в оксиде  $-2$ . Формула оксида  $\text{Э}_x\text{O}_y$  или  $\text{Э}_2^{+n}\text{O}_n$ . Массовая доля кислорода составляет:  $1 - 0,694 = 0,306$ .

Согласно формуле:  $\frac{x \cdot M(\text{Э})}{M(\text{O})} = \frac{\omega(\text{Э})}{\omega(\text{O})}$ .

Составим уравнение материального баланса:

$$\frac{2 \cdot M(\text{Э})}{n \cdot 16} = \frac{0,694}{0,301}; \quad M(\text{Э}) = \frac{n \cdot 16 \cdot 0,694}{2 \cdot 0,301} = 18,445n \text{ (г/моль)}.$$

Далее применим «метод перебора». Составим таблицу зависимости молярной массы элемента от валентности:

n	M(Э)	Э	M
1	18,445	-	
2	36,80	-	
3	55,33	Fe(?)	55,847

4	73,82	Ge(?)	72,59
5	92,225	Nb(?)	92,906

Расхождение в значении вычисленных молярных масс с табличными значениями составляет для железа 1,02%, для германия 1,68%, для ниобия всего 0,72 %, таким образом приходим к выводу, что искомый элемент – ниобий [2].

**Ответ:** ниобий.

Классическим примером решения задач, в которых необходимо установить некоторый элемент, входящий в состав сложного вещества, если массовые доли каждого элемента известны, является задача из популярного задачника Н.Е. Кузьменко [3]. Надо заметить, что некогда эта задача была предложена абитуриентам МГУ на вступительных экзаменах.

**5. Определите формулу соединения, если известно, что оно содержит 28% металла, 24% серы и 48% кислорода по массе.**

**Решение:** Предположим, что данное вещество относится к классу солей и найдем мольные соотношения элементов серы и кислорода на основании известных массовых долей этих элементов.  $v(S) : v(O) = 24/32 : 48/16 = 0,75 : 3 = 1 : 4$ . Полученное соотношение дает основание утверждать, что вещество является сульфатом некоторого металла с неизвестной валентностью, причем в порции соли массой 100 г на 28 г этого металла приходится 72 г кислотного остатка (0,75 моль сульфат -аниона). Далее можно выполнить несколько несложных расчетов, чтобы определить молярную массу металла. Для 1 валентного металла на 0,75 моль кислотного остатка приходится 1,5 моль металла, тогда  $M_{(Me)} = m/v = 28 \text{ г} / 1,5 \text{ моль} = 18,67 \text{ г/моль}$ . Металла с такой атомной массой нет. Для металла с валентностью равной II количество вещества кислотного остатка равно количеству вещества металла, т.е. 0,75 моль. В таком случае  $M_{(Me)} = m/v = 28 \text{ г} / 0,75 \text{ моль} = 37,33 \text{ г/моль}$ , что опять не соответствует реальному элементу. Если считать, что металл проявляет валентность равную трем, тогда формула соли содержит на 2 моль металла 3 моль кислотного остатка, или  $2 : 3 = X : 0,75$ . Отсюда  $x = 0,5 \text{ моль}$ ,  $M_{(Me)} = m/v = 28 \text{ г} / 0,5 \text{ моль} = 56 \text{ г/моль}$ . Металл с такой молярной массой и валентностью равной трем – это железо.

**Ответ:** Формула соединения  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ .

Следующая задача заимствована из пособия Г.П. Хомченко [4]. Решение этой задачи можно осуществить исключительно алгебраическим методом, составив систему уравнений с двумя неизвестными.

**6. Некоторые элементы X и Y образуют соединения  $X_2Y_2O_3$  (массовая доля кислорода равна 25,26%) и  $X_2YO_4$  (массовая доля кислорода равна 36,78%). Определите элементы X и Y.**

**Решение:** Используя значение массовой доли кислорода в данных соединениях, выразим и рассчитаем молярные массы.  $M_1 = 3 \cdot 16 / 0,2526 = 190 \text{ г/моль}$ ;  $M_2 = 4 \cdot 16 / 0,3678 = 174 \text{ г/моль}$ .

Обозначим молярные массы элемента X как  $M(X)$ , элемента Y как  $M(Y)$ .

Составим и решим систему уравнений:

$$2M(X) + 2M(Y) + 48 = 190$$

$$2M(X) + M(Y) + 64 = 174, \text{ отсюда } M(X) = 39 \text{ (калий); } M(Y) = 32 \text{ (сера).}$$

**Ответ:** Формулы соединений  $K_2S_2O_3$  и  $K_2SO_4$ .

Довольно распространенными задачами являются задачи, в которых необходимо установить формулу кристаллогидратов. Приведем примеры наиболее распространенных типов этих задач и предложим способы их решения.

7. Медный купорос, который является кристаллогидратом сульфата двухвалентной меди, содержит 12,82 % серы. Определите формулу медного купороса [5].

**Решение:** Зная, как определяются массовые доли элементов, можем преобразовать формулу, для вычисления молярной массы кристаллогидрата.

$$\omega(S) = \frac{M(S)}{M(CuSO_4 \cdot nH_2O)} = \frac{32}{160 + n18} = 0,1282;$$

$$0,1282(160 + 18n) = 32; 160 + 18n = 250.$$

$$M(CuSO_4 \cdot nH_2O) = \frac{32}{0,1282} = 250 \text{ (г/моль)}; n = \frac{250 - 160}{18} = 5.$$

**Ответ:** Формула медного купороса (пентагидрата сульфата меди)  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ .

8. Кристаллогидрат сульфата натрия содержит 55,90 % кристаллизационной воды. Определите формулу кристаллогидрата [6].

**Решение:** Формула соли имеет вид  $Na_2SO_4 \cdot nH_2O$ . Молярная масса кристаллогидрата может быть рассчитана по формуле:

$$\omega_1 = \frac{nM(H_2O)}{M(Na_2SO_4 \cdot nH_2O)}; \omega_2 = \frac{nM(Na_2SO_4)}{M(Na_2SO_4 \cdot nH_2O)}.$$

Вычислим массовую долю безводной соли:  $100 - 55,90 = 44,10 \%$ .

$$M(Na_2SO_4 \cdot nH_2O) = \frac{M(Na_2SO_4)}{\omega_2} = \frac{142}{0,441};$$

$$M(Na_2SO_4 \cdot nH_2O) = 322 \text{ г/моль.}$$

$$n = \frac{M(Na_2SO_4 \cdot nH_2O) - M(Na_2SO_4)}{M(H_2O)} = \frac{322 - 142}{18}; n = 10.$$

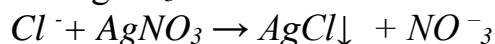
**Ответ:** Декагидрат сульфата натрия  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  (глауберова соль, мирабилит).

Еще одна группа задач посвящена установлению формулы природного минерала. При решении таких задач приходится применять нестандартные подходы и новые принципы составления алгебраических выражений (например, «принцип электронейтральности молекул», задача 16).

9. Качественный анализ некоторого минерала показал, что он содержит ионы калия, магния и хлора. После прокаливания 0,9852 г образца этого минерала его масса уменьшилась на 0,3832 г. Прокаленный образец растворили в воде и обработали небольшим избытком раствора  $AgNO_3$  в результате чего выпал осадок массой 1,5246 г. Определите формулу и название минерала и вычислите состав минерала в массовых долях [7].

**Решение:** Уменьшение массы после прокаливания соли свидетельствует о том, что удаляется кристаллизационная вода:  $v_{H_2O} = \frac{0,3832г}{18,013г / моль} = 0,0213 моль$ .

В результате взаимодействия с  $AgNO_3$ :



$$v_{AgCl} = \frac{1,5246г}{143,5г / моль} = 0,0106 моль, \text{ что значит}$$

$$m_{\text{ионов металлов}} = 0,9852 - 0,3832 - 35,5 \cdot 0,0106 = 0,2248г.$$

Пусть  $x$  моль  $KCl$  содержат  $x$  моль  $K^+$ , а  $y$  моль  $MgCl_2$  содержат  $y$  моль  $Mg^{2+}$ .

Тогда  $39x + 24y = 0,2248$  г, соответственно  $35,5x + 2y \cdot 35,5 = 35,5 \cdot 0,0106$ , т.е.

$$x + 2y = 0,0106. \text{ Т.о. } \begin{cases} 39x + 24y = 0,2248 \\ x = 0,0106 - 2y \end{cases}$$

Решим систему уравнений и получим:  $y = 0,0034$   $x = 0,0038$ . Состав минерала:  $xKCl \cdot yMgCl_2 \cdot nH_2O \Rightarrow x : y : n = 0,0038 : 0,0034 : 0,0213 = 1 : 1 : 6 \Rightarrow$

**$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$  - карналлит**

**Ответ:**  $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$  - карналлит

**10.** Навеску природного минерала каинита массой 57,16 г растворили в воде. При действии на полученный раствор избытка раствора хлорида бария выпал белый кристаллический осадок массой 53,59 г. Дальнейший анализ минерала показал, что при прокаливании идет уменьшение массы образца на 21,73%, а массовая доля хлора в образце после прокаливания составила 18,25%. Установите формулу минерала [8].

**Решение:** При прокаливании минерала выделяется кристаллизационная вода:  $v_{H_2O} = \frac{(0,2173 \cdot 57,16)г}{18г / моль} = \frac{12,42г}{18} = 0,69 моль$ . Масса минерала после

прокаливания:

$$m_1 = 57,16 - 12,42 = 44,74г. m(Cl) \text{ в составе минерала} = 0,1825 \cdot 44,74 =$$

$$8,17г \quad v_{Cl} = \frac{8,17г}{35,5г / моль} = 0,23 моль. \text{ Масса оставшейся «соли» без воды и хлорид -}$$

$$\text{иона: } m_2 = 44,74 - 8,17 = 36,57г.$$

Т.к. водный раствор минерала дает белый кристаллический осадок с хлоридом бария, то в минерале содержится группа  $SO_4^{2-}$ . По известной массе выпавшего осадка рассчитаем количество вещества сульфат-аниона:

$v(SO_4^{2-}) = v(BaSO_4) = \frac{53,59 г}{233 г/моль} = 0,23 моль$ . Чтобы найти катионы в составе минерала предположим, что остаток массой 36,57 г содержит пропорциональные количества сульфат-иона и некоторых катионов.

$$\text{Составим пропорцию: } \frac{36,57}{x \text{ г/моль}} = \frac{8,17}{35,5} \Rightarrow x = \frac{35,5 \cdot 36,57}{8,17} = 159г / моль$$

$M_{\text{без } SO_4^{2-}} = 159 - 96 = 63 г/моль$ . Это масса двух металлов:  $K$  (39) и  $Mg$  (24).

Масса сульфат-катиона составляет  $= 0,23 моль \cdot 96 г/моль = 22,08 г$ .

Масса двух металлов соответственно равна  $36,57 \text{ г} - 22,08 \text{ г} = 14,49 \text{ г}$ .

Допустим, что  $0,23$  моль сульфат-иона связывают  $0,23$  моль ионов магния, а  $0,23$  моль хлорид-ионов связаны с таким же количеством вещества ионов калия. Тогда  $m(\text{K}^+) = 0,23 \text{ моль} \cdot 39 \text{ г/моль} = 8,97 \text{ г}$ ,

а масса  $m(\text{Mg}^{2+}) = 0,23 \cdot \text{моль} \cdot 24 \text{ г/моль} = 5,52 \text{ г}$ . Сумма этих значений совпадает с вычисленной массой двух металлов  $8,97 + 5,52 = 14,49 \text{ г}$ . Значит наше предположение было верным, в ином случае массы могли не совпасть.

Минерал каинит имеет формулу  $0,23 \text{ моль} (\text{MgSO}_4) : 0,23 \text{ моль} (\text{KCl}) : 0,69 \text{ моль} (\text{H}_2\text{O}) = 1:1:3$

**Ответ:**  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

**11.** Минерал блёдит имеет следующий состав: натрия –  $13,77\%$ , магния –  $7,18\%$ , кислорода –  $57,48\%$ , водорода –  $2,39\%$ , а остальное приходится на элемент, который Вам предстоит установить. Выведите брутто-формулу блёдита и установите его химическую природу [9].

Формулу минерала условно обозначим  $\text{Na}_x\text{Mg}_y\text{O}_z\text{H}_n\text{Э}_m$ . Массовая доля неизвестного элемента  $19,18\%$ , молярная масса  $A$ , степень окисления  $a$ . Рассчитаем мольные соотношения элементов в составе этого минерала  $x:y:z:n:m = 13,77/23 : 7,18/24 : 57,48/16 : 2,39/1 : 19,18/A =$

$0,6 : 0,3 : 3,6 : 2,4 : 19,18/A$ . Из условия электронейтральности молекул составим алгебраическое уравнение:

$$0,6(+1) + 0,3(+2) + 3,6(-2) + 2,4(+1) + 19,18a/A = 0.$$

Решая уравнение относительно  $A$ , получим:  $A = 5,33$  а. Что бы найти значение  $A$ , выполняем действие подбора значения  $a$  от  $+1$  до  $+7$ . При  $a=6$  получаем  $A = 32$ , что соответствует молярной массе элемента серы. Находим:  $\nu(\text{S}) = 19,18/32 = 0,6$  моль. Подставляем полученное значение в мольные соотношения элементов в составе минерала и приводим их к целочисленным значениям

$0,6 : 0,3 : 3,6 : 2,4 : 0,6 = 2 : 1 : 12 : 8 : 2$ . Молекулярная формула имеет вид  $\text{Na}_2\text{Mg}_1\text{O}_{12}\text{H}_8\text{S}_2$ .

Логично предположить, что минерал представляет собой кристаллогидрат двойной соли  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

**Ответ:**  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .



## Список литературы

1. Сборник олимпиадных задач по химии с решениями/Сост. Е.М. Покровская, Т.В. Ключкова, З.М. Ахрименко. Кубан. гос. ун-т. – Краснодар, 1999. – 234 с.
2. Лидин Р.А., Молочко В.А., Андреева Л.Л. Химические свойства неорганических веществ. Учеб. пособие для вузов. 3-е изд., испр./Р. А. Лидин, В. А. Молочко, Л. Л. Андреева; под ред. Р. А. Лидина. – М.: Химия, 2000. 480 с.
3. Кузьменко Н.Е. 2500 задач по химии с решениями для поступающих в вузы: учебное пособие/ Н.Е. Кузьменко, В.В. Еремин. – М. Издательство «Экзамен», 2006. – 638 с.
4. Хомченко Г.П. Пособие по химии для поступающих в вузы. – М.: «Новая волна», 2018, 480 с.
5. Хомченко Г.П., Хомченко И.Г. Сборник задач по химии для поступающих в вузы. – 4-е изд. – М.: «Издательство Новая Волна», 2002. – 278 с.
6. Кузьменко Н.Е. Химия. Для школьников старших классов и поступающих в вузы: учебное пособие / Кузьменко Н.Е., Еремин В.В., Попков В.А. – Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2015. – 472 с.
7. Николаенко В.К. Сборник задач повышенной трудности: учебное пособие для средних учебных заведений/Под ред. проф. Г.В. Лисичкина. – М.: РОСТ, МИРОС, 1996. – 192.
8. Кузьменко Н.Е., Еремин В.В., Чуранов С.С. Сборник конкурсных задач по химии для школьников и абитуриентов. – М.: Экзамен: Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2001.
9. Химия: Задачи с ответами и решениями. Учеб. – метод. Пособие/ П.А. Оржековский, Ю.Н. Медведев, А.В. Чураков, С.С. Чуранов. Под ред. проф. Г.В. Лисичкина. М.: ООО «Издательство АСТ»: ООО «Издательство Астрель», 2004.