

## 11 класс

### Решения и разбалловка Редакторы: Курамшин Б.К.

#### Задача 1. Ах, миллимоль, миллимоль!

(автор: Курамшин Б.К.)

№1. Количества газов, выделившихся из А и Б:

$$n = \frac{101325 \cdot 128.5 \cdot 10^{-6}}{8.314 \cdot (40 + 273.15)} = 0.005 \text{ моль} = 5 \text{ ммоль} - \text{из А}$$

$$n = \frac{101325 \cdot 102.8 \cdot 10^{-6}}{8.314 \cdot (40 + 273.15)} = 0.004 \text{ моль} = 4 \text{ ммоль} - \text{из Б}$$

Вероятно, выделяющийся газ –  $\text{SO}_2$ . Исходя из того, что А и Б содержат неметаллы из одной группы, но выделяют разные количества сернистого газа, логично предположить, что один из неметаллов – сера. Тогда А – сульфид меди.  $\text{CuS}$  выделяет 4 эквивалента  $\text{SO}_2$  при реакции с серной кислотой. Значит, А –  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Тогда Б –  $\text{Cu}_2\text{Se}$ .

Уравнения реакций:



№2. Молярная масса смеси газов после разложения равна  $0.759 \cdot 29 = 22.0$  г/моль. При охлаждении ниже  $100^\circ\text{C}$  конденсируется вода. Если объём уменьшается в 2.5 раза, то мольная доля воды в исходной смеси составляет 60%. Найдем молярную массу второго газа:

$$22 = 0.4M + 0.6 \cdot 18$$

$$M = 28 \text{ г/моль.}$$

Значит, второй компонент – вероятнее всего, азот (версии  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$  не терпят дальнейшей разработки). Смесь газов, таким образом, представляет собой  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в соотношении 2:3.

В твердом остатке содержится, таким образом, ещё один элемент. Рассчитаем молярную массу, приходящуюся на твердый остаток, в предположении, что его выделился 1 моль на 2 моль азота и 3 моль воды:

$$M = \frac{9.84}{100 - 9.84} \cdot (2 \cdot 28 + 3 \cdot 18) = 12 \text{ г/моль}$$

По-видимому, это углерод. Тогда реакция разложения В выглядит следующим образом:

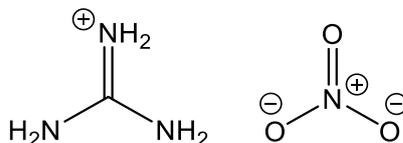


Брутто-состав В в таком случае:  $\text{CN}_4\text{H}_6\text{O}_3$ . Это ионное соединение. Версия, что катион – аммоний, трудно поддается анализу, так как в таком случае формула

аниона –  $\text{CN}_3\text{H}_2\text{O}_3$ . Однако если предположить, что анион – нитрат, то на катион приходится  $\text{CN}_3\text{H}_6$ , что соответствует катиону гуанидиния.



Структуры катиона и аниона:



**№3.** Количества воды и углекислого газа и соответствующие им количества атомов углерода и водорода:

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{0.645}{18.015} = 0.0358 \text{ моль} \Rightarrow n(\text{H}) = 0.0358 \cdot 2 = 0.0716 \text{ моль}$$

$$n(\text{CO}_2) = \frac{1.052}{44.01} = 0.0239 \text{ моль} \Rightarrow n(\text{C}) = 0.0239 \text{ моль}$$

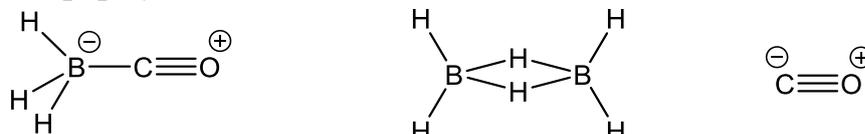
Соотношение  $n(\text{H}):n(\text{C}) = 3:1$ .

Рассчитаем молярную массу исходного Г в расчете на 1 фрагмент  $\text{CH}_3$ :

$$M = \frac{1}{0.0239} = 41.84 \text{ г/моль}$$

За вычетом 1 атома углерода и 3 атомов водорода остаётся 26.81 г/моль. Такая молярная масса не соответствует ни одному элементу по отдельности, но хорошо соответствует 1 атому бора и 1 атому кислорода в сумме. Тогда Г –  $\text{BH}_3 \cdot \text{CO}$ , Д и Е –  $\text{B}_2\text{H}_6$  и  $\text{CO}$ .

Структурные формулы:



**№4.** Решение таких угадаек «впрямую» - предположением конкретного типа версии, составлением уравнения в общем виде и перебором степеней окисления и т.д. – не представляется возможным. В таких угадках проявляется химическая интуиция и вдохновение решающего. Автор осознаёт, что такое заявление рискует разойтись на мемы (если не все отсылки в названиях задач всех классов распознаны – пусть у читающего будет хотя бы такой повод для улыбки).

Тем не менее, 46 эквивалентов  $\text{NO}_2$  (газа З) способно выделить далеко не любое вещество. Это соответствует отдаче 46 электронов при окислении. Легко было бы придумать версию на 48 электронов – молекула  $\text{S}_8$  при окислении 8 атомов серы до с.о. +6 отдавала бы именно столько электронов. 46 электронов – на 2 меньше, чем 48! Разницы в 2 электрона можно достичь введением в молекулу 1 атома кислорода. Молекула  $\text{S}_8\text{O}$  существует, а потому подходит нам в качестве решения.

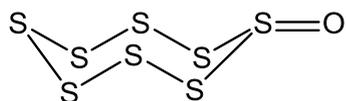
Если при проверке обнаружатся другие красивые (но здоровые и существующие!) решения, которые автору найти не удалось, они будут зачтены как верные.

Итак, Ж –  $\text{S}_8\text{O}$ , З –  $\text{NO}_2$ .

Уравнение реакции:



Структурные формулы (для  $\text{NO}_2$  достаточно одной резонансной структуры).



**№5.** После щелочного плавления выщелачивание даёт желтый раствор. Это хромат калия. При восстановлении иодидом каждый  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  выделяет 1.5 эквивалента  $\text{I}_2$ . Значит, в исходном соединении был 1 атом хрома. Запишем И как  $\text{CrY}_n$ , где Y – второй содержащийся в И элемент. Вероятно, это неметалл, который в щелочном плавлении переходит в калиевую соль.

С учетом данных о стехиометрии реакции, количества  $\text{CrY}_n$ ,  $\text{KClO}_3$ ,  $\text{KOH}$  соотносятся как 1:1.833:5 = 6:11:30. Тогда уравнение реакции имеет вид:



Из баланса по калию:  $41 = 12 + 11 + 6nx$ , то есть  $nx = 3$ ;

Из баланса по кислороду:  $33 + 30 = 24 + 15 + 6ny$ , то есть  $ny = 4$ .

Видно, что  $x = 3$ ,  $y = 4$ ,  $n = 1$ .

То есть формула соли-продукта –  $\text{K}_3\text{Y}_4\text{O}_4$ . Y – либо фосфор, либо мышьяк. Арсенаты окисляют иод в кислой среде, а фосфаты – нет, поэтому подходит только фосфор. Тогда **И – CrP!**

Уравнение реакции:



**Система оценивания:**

1. А и Б – по 1 баллу, у реакции – по 1 баллу. **Всего 4 балла.**
2. В – 2 балла, структуры аниона и катиона – по 1 баллу. **Всего 4 балла.**
3. Г, Д, Е – по 1 баллу, структуры Г, Д, Е – по 1 баллу. **Всего 6 баллов.**
4. Формула Ж – 3 балла, З – 1 балл. Реакция – 1 балл, структуры Ж и З – по 1 баллу. **Всего 7 баллов.**
5. Формула И – 3 балла. Уравнение реакции – 1 балл. **Всего 4 балла.**

**ИТОГО: 25 баллов.**

**Задача 2. В.И., а что такое палиндром?**

*(автор: Кузнецов Ф.)*

1. Чаще всего при растворении металлов в царской водке образуются кислоты, соответствующие комплексным хлоридосодержащим анионам (**X1**). Хлорид аммония обычно осаждает из них аммонийные соли этих анионов (**X2**), а пиролиз этих солей – чаще всего способ получить хлорид металла (**X3**). Прокаливание хлорида на воздухе – реакция менее тривиальная, однако несложно догадаться, что наиболее реакционноспособные компоненты воздуха – кислород и вода, значит в продукте, вероятно, должны содержаться атомы кислорода. Так как **X4** – бинарное, это должен быть оксид. Из соотношения координационных

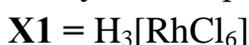
чисел находим стехиометрию:  $4:6 = 2:3 \Rightarrow \mathbf{X4} = \mathbf{M}_2\mathbf{O}_3$ . Молярную массу металла находим из кристаллохимических данных:

$$103.047 * 8.18 * 0.6022 = Z * (2M + 3 * 16) \Rightarrow M = \frac{253.8}{Z} - 24$$

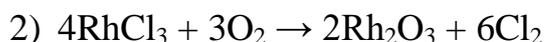
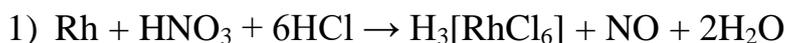
Z	M	Металл
1	229.8	–
2	102.9	<b>Rh</b>
3	60.6	–
4	39.45	–

Таким образом,  $\mathbf{X4} = \mathbf{Rh}_2\mathbf{O}_3$ ,  $Z = 2$ .

2. С учётом приведённых выше логических рассуждений, очевидно, что:



Уравнения реакций:



**В** должно быть сульфатом родия, однако по массовой доле безводный бинарный сульфат не подходит. Так как кристаллизация происходит из разбавленного раствора, самый вероятный продукт – кристаллогидрат. По массовой доле кислорода:  $\frac{16*(4*3+x)}{102.9*2+96*3+18x} = 0.5653 \Rightarrow x = 15$ , то есть  $\mathbf{B} = \mathbf{Rh}_2(\mathbf{SO}_4)_3*15\mathbf{H}_2\mathbf{O}$

3. Так как в **X5** родий находится в степени окисления отличной от 3, имеет чётное число валентных электронов (т.к. представить себе образование радикальных частиц в этой системе весьма тяжело), а система, в которой он образуется, является скорее восстановительной, чем окислительной, в этом соединении Rh должен содержаться в степени окисления +1. Простым подсчётом получим, что он имеет координационное число, равное четырём:  $(16-(9-2)-1)/2 = 4$ . Один из лигандов, вероятно, хлорид (электронейтральность), а остальные – трифенилфосфин (именно этот лиганд мы специально добавляем в раствор). Итого,  $\mathbf{X5} = \mathbf{Rh}(\mathbf{PPh}_3)_3\mathbf{Cl}$  – катализатор Уилкинсона.

В **X6** родий тоже находится в степени окисления, отличной от трёх, и среда вновь скорее восстановительная. В системе есть ацетат-ион, а значит продукт реакции, скорее всего, соль. Тогда в **X6** родий должен быть в степени окисления +2, скорее всего простейшая формула –  $\mathbf{Rh}(\mathbf{OAc})_2(\mathbf{MeOH})_n$ . Методика анализа

приводит к образованию оксида родия в качестве гравиметрического анализата. Используя эту информацию, вычислим молярную массу **X6** на один атом родия:

$$\frac{300 \cdot 0,5}{10 \cdot M(X_5)} = \frac{7,52 \cdot 2}{102,9 \cdot 2 + 16 \cdot 3} \Rightarrow M(X_5) = 253 \text{ г/моль.}$$

Вычтя из этого молярную массу родия и две – ацетата, получим молярную массу метанола:

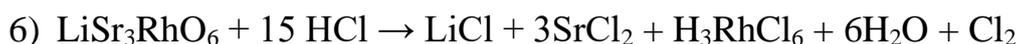
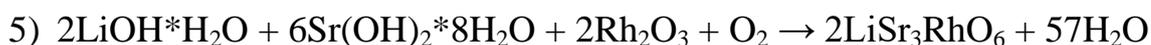
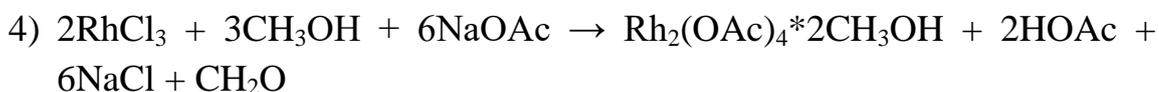
$$\frac{253 - 103 - 2 \cdot (12 + 3 + 12 + 32)}{12 + 3 + 16 + 1} = 1. \text{ Значит, простейшая формула } \mathbf{X6} -$$

$\text{Rh}(\text{OAc})_2(\text{MeOH})$ . Вспомнив о существовании ацетата хрома  $2+$ , можно понять, что истинная формула **X6** –  $\text{Rh}_2(\text{OAc})_4(\text{MeOH})_2$ .

В случае **X7** происходит уже окисление. Сильное нагревание обозначает необходимость полной дегидратации, значит самая общая формула **X7** –  $\text{Li}_x\text{Sr}_y\text{Rh}_z\text{O}_a$ . Снова рассчитаем молярную массу исходя из данных про оксид, получим 468.84 г/моль атомов родия. После вычитания родия остается 365.94 г/моль, в которые надо уместить целое количество атомов лития (6.94 г/моль), стронция (87.62 г/моль) и кислорода (16 г/моль). Подходят  $\text{Li}_2\text{Sr}_2\text{RhO}_{11}$ ,  $\text{LiSr}_3\text{RhO}_6$ . Степень окисления  $+5$  для родия более вероятна, чем  $+16$ , поэтому **X7** –  $\text{LiSr}_3\text{RhO}_6$ .

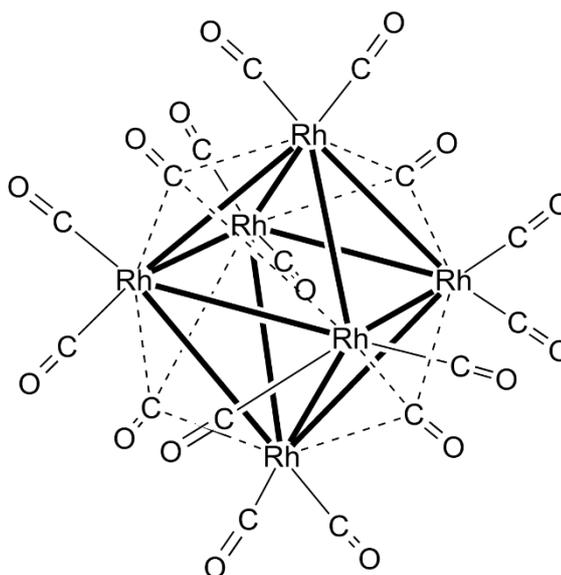
В условиях облучения лазером не слишком стабильная молекула  $\text{NF}_3$  должна распадаться с образованием атомарного фтора, то есть **X8** – некоторый фторид родия. Тогда потеря массы (с образованием, очевидно, другого фторида) будет выражаться формулой  $0.263 = \frac{19(n_1 - n_2)}{102.9 + 19n_1}$ ,  $n_1 > n_2 \geq 3$ . Кратким перебором получим  $n_1 = 6, n_2 = 3$ . Тогда **X8** =  $\text{RhF}_6$ .

Очевидно, что **X9** – карбонил родия. Потеря массы должна соответствовать отщеплению  $\text{CO}$ . Тогда соотношение атомов родия и молекул  $\text{CO}$  в **X9** равно  $\frac{1 - 0.421}{102.9} : \frac{0.421}{28} = 8 : 3$ . Так как позже спрашивается полиэдрическое строение этой молекулы, а три точки всегда лежат на одной плоскости, формулу необходимо удвоить до **X9** =  $\text{Rh}_6(\text{CO})_{16}$ .



4. Рассчитаем количество валентных электронов в  $\text{Rh}_6(\text{CO})_{16}$ :  $6 \cdot 9 + 16 \cdot 2 = 86 = 12 \cdot 6 + 2 \cdot (6 + 1)$ , то есть атомы родия будут расположены в вершинах октаэдра. Вероятно, молекула будет довольно симметрична, поэтому сначала можно попробовать расположить на каждом атоме родия столько  $\text{CO}$ , сколько поместится. Это соответствует 12 молекулам. Теперь для размещения ещё четырёх молекул  $\text{CO}$  с сохранением симметрии четвёртого порядка есть два варианта:

расположить их на четырех соседних гранях или на четырёх соседних рёбрах. На самом деле реализуется граневой вариант:



5. А роза упала на лапу Азора – название родия произошло от греческого  $\rho\acute{o}\delta\omicron\nu$  — роза.

**Система оценивания:**

1. Формула **X4** 2 балла, определение **Z** 1 балл – **3 балла**.
2. Определение веществ, уравнения реакций по 1 баллу – **6 баллов**.
3. За вещества по 2 балла, за реакции по 1 баллу – **14 баллов**.
4. За структуру, удовлетворяющую условиям – **2 балла**.

**ИТОГО: 25 баллов.**

**Задача 3. Гнусная семейка**

*(авторы: Кузнецов Ф.Н., Елистратов В.В.)*

1. Начать расшифровку комплексов стоит начать с прекурсоров. Из условия следует, что общая формулы для них –  $M_X(CH_3COO)_2 \cdot nH_2O$ ,  $M_Y(CH_3COO)_2 \cdot nH_2O$  и  $M_ZSO_4 \cdot nH_2O$ , соответственно. Для выведения Проведем перебор для целых значений  $n$ :

	$M(M_X)$ , г/моль	$M(M_Y)$ , г/моль	$M(M_Z)$ , г/моль
1	39.3	42.2	35
2	44.5	47.8	40.5
3	49.7	53.4	46
4	54.9	58.9	51.5
5			57
6			62.6

В этой таблице под  $M_X$ ,  $M_Y$ ,  $M_Z$  понимаются молярные массы катионов в солях-исходниках, получаемые при переборе.

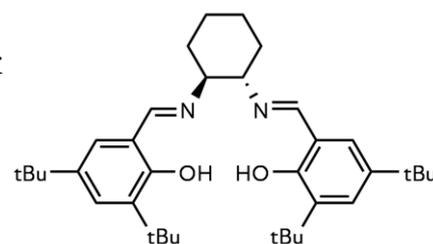
В случае **X** и **Y** мы быстро приходим к молярным массам марганца и кобальта (подтверждением служит информация об окраске прекурсоров). В случае **Z** мы не получаем адекватных вариантов. Есть несколько вариантов расширить круг поиска, один из которых – оксокатионы. Вспомнив про голубой цвет ванадила, находим тригидрат сульфата ванадила. Значит, мы имеем дело с комплексами марганца, кобальта и ванадия. Более того, в условиях проведения реакции указан кислород, а значит возможно повышение степени окисления металла. Расшифровать лиганд довольно просто – происходит конденсация с образованием основания Шиффа, о чем свидетельствует брутто-формула. В **Z** присутствует пик, соответствующий этильной группе. Единственное здравое объяснение – образование в условиях синтеза частицы  $\text{EtOSO}_3^-$ .

В дальнейшем, лиганд будем обозначать как salen. Тогда

**X** –  $\text{Mn}(\text{salen})\text{Cl}$ ;

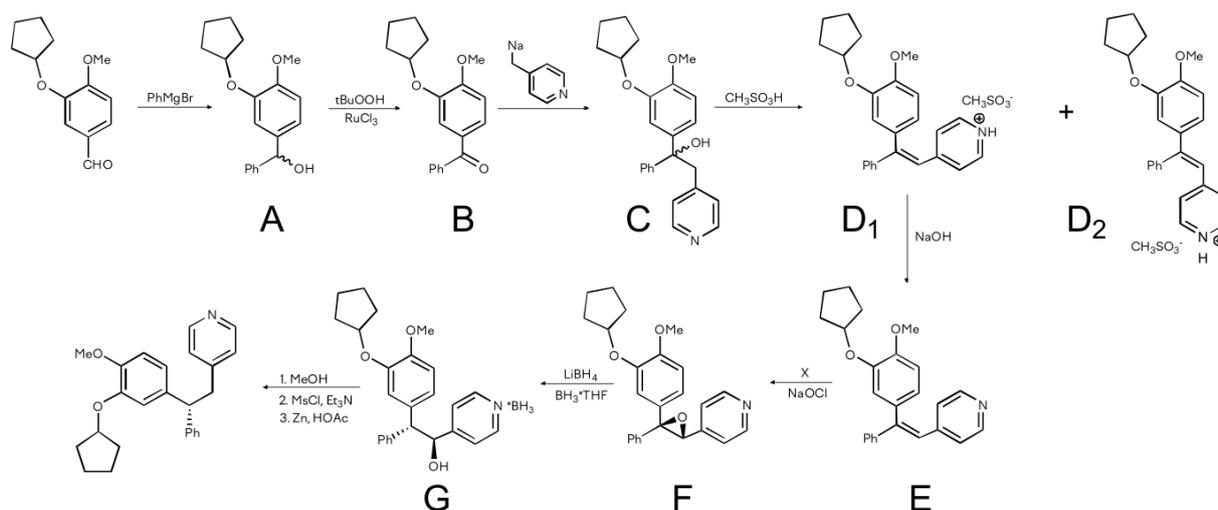
**Y** –  $\text{Co}(\text{salen})(\text{CH}_3\text{COO})$ ;

**Z** –  $[\text{VO}(\text{salen})(\text{H}_2\text{O})]\text{C}_2\text{H}_5\text{OSO}_3^-$ .



2. Данный амин является хиральным, а для разделения хиральных аминов иногда используют разделение с использованием солей хиральных кислот: сами амины являются энантиомерами с идентичными физическими свойствами, а соли хиральных кислот – диастереомерами, то есть их свойства должны различаться.

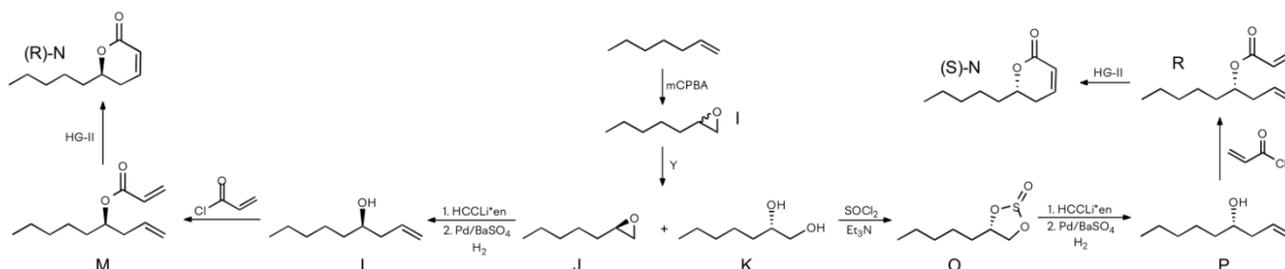
3. Первая схема превращений выглядит так:



На первой стадии происходит простая нуклеофильная атака по карбонильной группе вещества **A**. Далее, как можно догадаться по последующим превращениям и наличию среди реагентов органического пероксида, происходит окисление

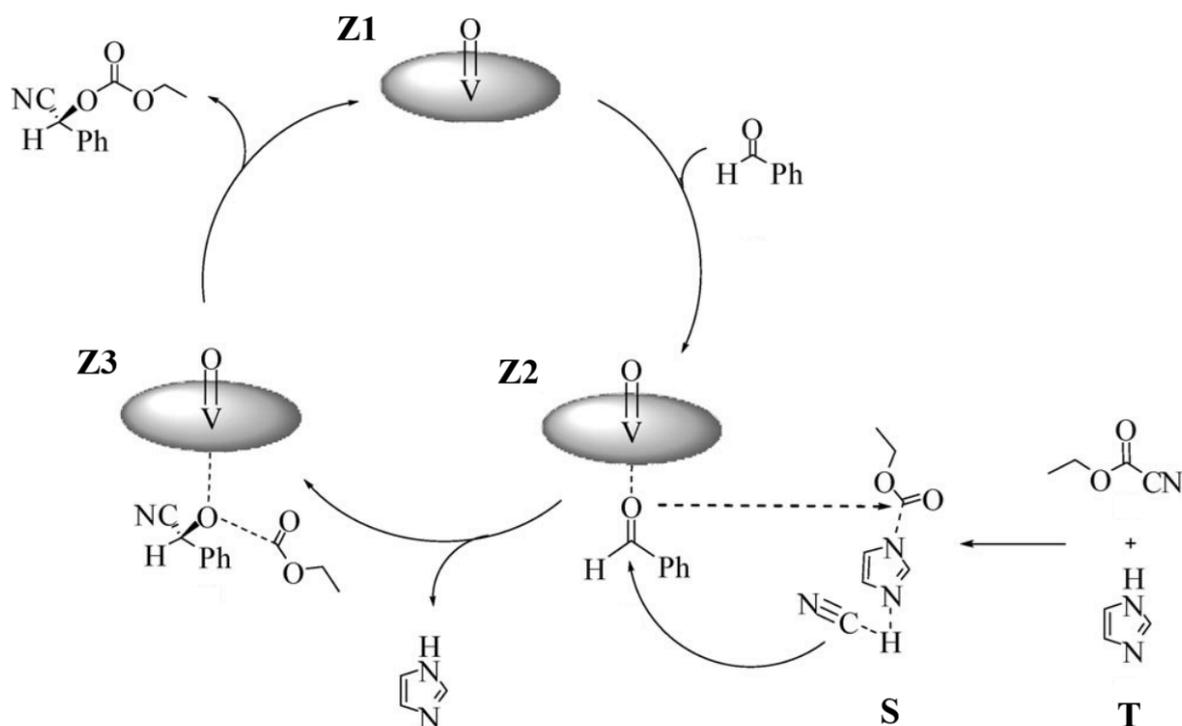
полученного спирта в карбонильную группу с образованием **V**. После ещё одной нуклеофильной атаки (с образованием вещества **C**) и элиминирования можно получить две изомерные пиридиновые соли **D<sub>1</sub>** и **D<sub>2</sub>**, при обработке щёлочью одной из которых можно получить соответствующий нейтральный пиридин (здесь выбор **D<sub>1</sub>** для дальнейших превращений не принципиален). С помощью ретросинтетического анализа можно догадаться, что стадия из **E** в **F** – реакция эпоксидирования. Боргидрид лития нуклеофильно раскрывает эпоксид с образованием спирта, а потребность в обработке метиловым спиртом в качестве отдельной стадии указывает на образование донорно-акцепторного аддукта с бораном **G**.

Вторая цепочка изображена ниже:

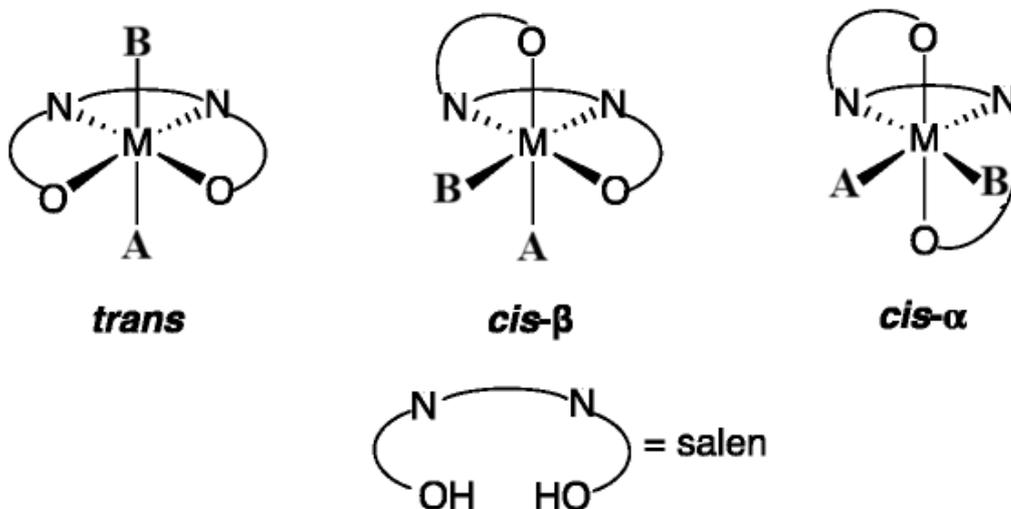


По брутто-формуле **O** можно определить вещество **K** ретросинтезом, а затем определить и само **O**. Оставшаяся часть цепи – нуклеофильные раскрытия эпоксидов металлоорганическими реагентами, восстановление на “отравленном” палладиевом катализаторе (о том, что катализатор отравлен, можно судить по проведению реакции метатезиса, для которой необходимо две двойные связи), ацилирование и метатезис алкенов.

4. Быстрым подсчётом по массовым долям получаем, что брутто-формула **T** –  $C_3H_4N_2$ . Наиболее удачно подходящий вариант – простой имидазол. Так как **S** имеет в некоторой степени ионное строение, логично предположить, что при его образовании разрывается связь сложноэфирной группы с нитрильной. Остальные превращения в цикле – нуклеофильные атаки в координационной сфере металла, усиливающего электрофильность некоторых центров в молекуле.



5. Формулы изомеров приведены ниже:



**Система оценивания:**

1. Формула лиганда 0.5 балла, комплексов по 2 балла – 7 баллов.
  2. Указание на диастереомерные соли – 1 балл.
  3. Вещества А–Е, G, I, L-R по 0.6 балла, F, J, K по 1 баллу – 12 баллов.
  4. T и S по 1 баллу, вещества Z1-Z3 и Продукт по 0.5 балла – 3 балла.
  5. Транс-изомер 0.6 балла, цис изомеры по 0.7 – 2 балла.
- ИТОГО: 25 баллов.**

#### Задача 4.

(автор: ... / ...)

1. Уменьшение энергии обусловлено благоприятным перекрыванием валентных оболочек атомов, сопровождающимся образованием химической связи. Последующий рост – слишком сильным сближением атомов и отталкиванием электронных оболочек.

2. Как следует из условия, минимум соответствует образованию молекулы. Поэтому соответствующее расстояние  $r_e$  можно интерпретировать как равновесную длину связи в молекуле. Увеличение этого расстояния до бесконечности соответствует распаду молекулы на индивидуальные атомы по реакции  $X_2 \rightarrow 2X$ . Сопровождающий этот процесс рост энергии можно связать с энергией диссоциации связи  $E_D$ . Тогда параметр уравнения  $D_e$  – энергия связи в молекуле.

3. Для ответа можно опираться как на энергетические (прочность связи), так и на структурные (длина связи) критерии. Несколько проще оперировать вторым. В ряду  $F_2, Cl_2, Br_2, I_2$  растёт размер атомов и, как следствие, растёт длина ковалентной связи. Поэтому 1 соответствует  $F_2$ , 2 –  $Cl_2$ , 3 –  $Br_2$ , 4 –  $I_2$ .

4. Как и выше, проще опираться на длину связи. В  $H_2$  она наименьшая, в  $Cl_2$  – наибольшая, в  $HCl$  – промежуточная. Тогда А –  $Cl_2$ , В –  $HCl$ , С –  $H_2$ .

5. Величины  $D_e$  необходимо перевести в энергии связи в кДж моль<sup>-1</sup>. Сделаем это домножением значений на  $1.602 \cdot 10^{-19}$  Дж эВ<sup>-1</sup>, на  $6.022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> и на  $10^{-3}$  (последнее соответствует приставке кило-). Получим величины  $E_D$  439 кДж моль<sup>-1</sup> для  $H_2$ , 241 кДж моль<sup>-1</sup> для  $Cl_2$  и 427 кДж моль<sup>-1</sup> для  $HCl$ . Тогда для реакции:



Изменение энтальпии будет иметь величину:  $0.5 \cdot 439 + 0.5 \cdot 241 - 427 = -87$  кДж моль<sup>-1</sup> (допустим расчёт на 2 молекулы  $HCl$ ).

6. Продифференцируем функцию Морзе по радиусу:

$$F(r) = -\frac{dU(r)}{dr} = -\frac{2D_e}{(1 - e^{-\alpha(r-r_e)})^3} \cdot (-(-\alpha)e^{-\alpha(r-r_e)}) = \frac{-2\alpha D_e e^{-\alpha(r-r_e)}}{(1 - e^{-\alpha(r-r_e)})^3}$$

Поскольку эта функция – производная исходной функции, стоит ожидать, что при  $r < r_e$  она будет иметь отрицательный знак (исходная функция убывает), а при  $r > r_e$  – положительный знак (исходная функция возрастает).

7. Для определения коэффициентов параболы вычислим три пары значений  $U(r) - (r - r_e)$  с использованием уравнения Морзе, а затем решим систему уравнений. Разумнее всего взять точки  $(r - r_e) = 0$  ( $U(r) = 0$ ), а также две точки, при которых  $U = D_e/4$ :

$$D_e / 4 = D_e (1 - e^{-\alpha(r-r_e)})^2$$

$$1/4 = (1 - e^{-\alpha(r-r_e)})^2$$

$$\pm 1/2 = 1 - e^{-\alpha(r-r_e)}$$

$$e^{-\alpha(r-r_e)} = 0.5 \text{ или } e^{-\alpha(r-r_e)} = 1.5$$

$$(r-r_e) = \frac{\ln 0.5}{-\alpha} = \frac{\ln 0.5}{-1.93} = 0.359 \text{ \AA}$$

$$(r-r_e) = \frac{\ln 1.5}{-\alpha} = \frac{\ln 0.5}{-1.93} = -0.210 \text{ \AA}$$

Энергия в каждой из этих точек равна  $4.55/4 = 1.38$  эВ.

Тогда система уравнений будет иметь вид:

$$0 = a + b \cdot 0 + c \cdot 0^2$$

$$1.38 = a + b \cdot 0.359 + c \cdot 0.359^2$$

$$1.38 = a - b \cdot 0.210 + c \cdot (-0.210)^2$$

Первое уравнение системы даёт  $a = 0$ ; вторые два в совокупности дают  $b = -2.73$  эВ  $\text{\AA}^{-1}$  и  $c = 18.305$  эВ  $\text{\AA}^{-2}$ . При выборе других исходных точек коэффициенты параболы могут отличаться.

Рассчитаем энергию по уравнению Морзе при  $r = 2r_e$ :

$$U(r) = 4.55(1 - e^{-1.93 \cdot 0.74})^2 = 2.63 \text{ эВ}$$

Рассчитаем эту энергию с использованием коэффициентов полинома:

$$U(r) = 0 - 2.73 \cdot 0.74 + 18.305 \cdot 0.74^2 = 8.01 \text{ эВ}$$

Относительную ошибку рассчитываем, считая 2.63 истинным значением:  $(8.01 - 2.63)/2.63 \cdot 100\% = 205\%$ . Видно, что при таких расстояниях парабола даёт заметную ошибку. В случае различий в ранее полученных коэффициентах параболы результаты расчёта в этом вопросе могут значительно отличаться от приведённых здесь.

### Система оценивания:

1. Объяснение падения энергии при уменьшении расстояния – **1 балл**. Объяснение роста энергии при небольших расстояниях – **1 балл**. Всего **2 балла**.

2. Объяснение физического смысла параметров  $r_e$  и  $D_e$  – **по 1 баллу**. Всего **2 балла**.

3. Верное соотнесение для четырёх молекул галогенов с обоснованием – **по 1 баллу (без обоснования – 0 баллов)**. Всего **4 балла**.

4. Верное соотнесение формула – обозначение для трёх веществ с обоснованием – **по 1 баллу (без обоснования – 0 баллов)**. Всего **3 балла**.

5. Величина энтальпии реакции – **2 балла**.

**6.** Аналитическое выражение для силы взаимодействия атомов – **4 балла**.  
Указания величин  $r$ , при которых преобладают притяжение и отталкивание – **по 1 баллу**. Всего **6 баллов**.

**7.** Расчёт трёх пар значений  $U(r) - (r - r_e)$  и вычисление с их помощью коэффициентов параболы  $a, b, c$  – **по 2 балла за коэффициент** (*оценивается логика расчёта, а не совпадение численных значений; отсутствие размерностей у коэффициентов  $b$  и  $c$  штрафуются половиной от максимального балла*). Расчёт относительной ошибки – **2 балла** (*оценивается логика расчёта, а не совпадение численных значений*). Всего **8 баллов**.

**Итого ..--- ..... баллов**