

## 11 класс

### Задача 1. О нелегких буднях синтетика

1. Формула малахита  $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$  (возможна и запись формулы в виде  $x\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot y\text{CuCO}_3$ ). Хорошо доступная соль А – это медный купорос,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Кристаллогидрат выветривается на воздухе (теряет воду) и из-за этого становится голубым, а не синим.

2. Исходя из массы исходного насыщенного при  $90^\circ\text{C}$  раствора можно определить массу соли в этом растворе:

$$m_{90}(\text{CuSO}_4) = m_{\text{раствора}90} \times \omega_{90}(\text{CuSO}_4) = 1000 \times 0,389 = 389 \text{ г}$$

Масса раствора уменьшается на массу выпавшего осадка, а массу оставшейся в растворе соли можно выразить через массу осадка и молярные массы безводной соли и пентагидрата. Тогда массовую долю в растворе после охлаждения можно выразить следующим образом:

$$\omega_{25}(\text{CuSO}_4) = \frac{m_{90}(\text{CuSO}_4) - \frac{M(\text{CuSO}_4)}{M(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})} \times m_{\text{осадка}}}{m_{\text{раствора}90} - m_{\text{осадка}}}$$

Подставляя известные из условия задачи и рассчитанные значения получается следующее:

$$0,187 = \frac{389 - \frac{159,61}{249,69} \times m_{\text{осадка}}}{1000 - m_{\text{осадка}}}$$

Решая получившееся уравнение можно получить массу осадка:

$$187 - 0,187 \times m_{\text{осадка}} = 389 - 0,639 \times m_{\text{осадка}}$$

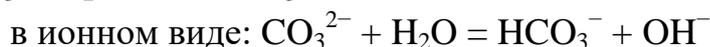
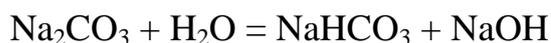
$$0,452 \times m_{\text{осадка}} = 202$$

$$m_{\text{осадка}} = 446,9 \text{ г}$$

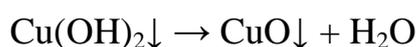
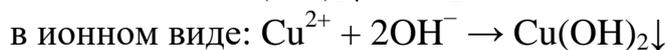
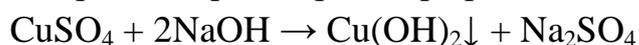
С учетом потерь, получится:

$$m_{\text{осадка}} = 446,9 \times (1 - 0,02) = 438,0 \text{ г}$$

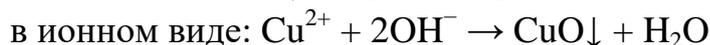
3. У Димы получился темный осадок из-за образования оксида меди(II). Раствор карбоната натрия имеет сильнощелочную среду из-за гидролиза, который усиливается при нагревании:



При вливании сульфата меди(II) в этот раствор образуется гидроксид меди(II), который в горячем растворе распадается:



Можно записать оба процесса в одном уравнении:

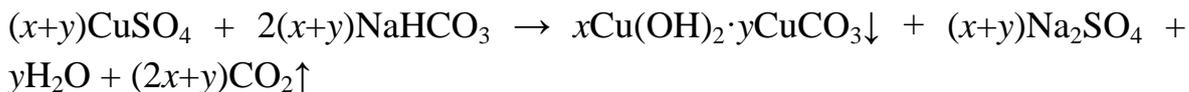


Нужно было приливать раствор карбоната натрия к раствору сульфата меди(II), чтобы исключить присутствие ионов меди(II) в сильнощелочной среде и тем самым предотвратить образование черного оксида меди(II).

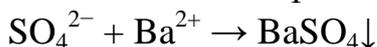
4. Уравнение реакции при синтезе:



или для осадка в виде  $x\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot y\text{CuCO}_3$ :



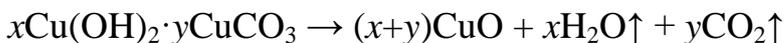
Осадок промывают для того, чтобы удалить примеси, которые сооседаются из раствора вместе с осадком. В данном случае это сульфаты натрия и меди(II). Хлоридом бария как раз и проверяют воды на отсутствие сульфат-ионов, т.к. при недостаточной промывке будет выпадать осадок:



Полученный гидроксокарбонат не рекомендуется сушить при температурах, выше  $100^\circ\text{C}$ , т.к. начинает протекать реакция его разложения:



или для осадка в виде  $x\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot y\text{CuCO}_3$ :



5. Прокаливание при температурах, не превышающих  $1000^\circ\text{C}$ , приводит к разложению гидроксокарбоната, причем в остатке остается только оксид меди(II) (см. уравнение разложения выше). Тогда можно составить следующую систему уравнений для массы осадка до прокаливания и после прокаливания:

$$\begin{cases} M(\text{Cu}(\text{OH})_2) \times n(\text{Cu}(\text{OH})_2) + M(\text{CuCO}_3) \times n(\text{CuCO}_3) = 0,5170 \\ M(\text{CuO}) \times (n(\text{Cu}(\text{OH})_2) + n(\text{CuCO}_3)) = 0,3580 \\ 97,56 \times n(\text{Cu}(\text{OH})_2) + 123,55 \times n(\text{CuCO}_3) = 0,5170 \\ 79,55 \times (n(\text{Cu}(\text{OH})_2) + n(\text{CuCO}_3)) = 0,3580 \end{cases}$$

Решением этой системы уравнений можно получить количества гидроксида и карбоната меди(II):

$$\begin{cases} 97,56 \times n(\text{Cu}(\text{OH})_2) + 123,55 \times n(\text{CuCO}_3) = 0,5170 \\ n(\text{Cu}(\text{OH})_2) = \frac{0,3580}{79,55} - n(\text{CuCO}_3) \\ 97,56 \times (0,004500 - n(\text{CuCO}_3)) + 123,55 \times n(\text{CuCO}_3) = 0,5170 \\ n(\text{Cu}(\text{OH})_2) = 0,004500 - n(\text{CuCO}_3) \\ 0,4390 - 97,56 \times n(\text{CuCO}_3) + 123,55 \times n(\text{CuCO}_3) = 0,5170 \\ n(\text{Cu}(\text{OH})_2) = 0,004500 - n(\text{CuCO}_3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 25,99 \times n(\text{CuCO}_3) = 0,0780 \\ n(\text{Cu}(\text{OH})_2) = 0,004500 - n(\text{CuCO}_3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} n(\text{CuCO}_3) = 0,003001 \\ n(\text{Cu}(\text{OH})_2) = 0,001499 \end{cases}$$

Откуда можно записать, что состав полученного осадка  $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{CuCO}_3$ .

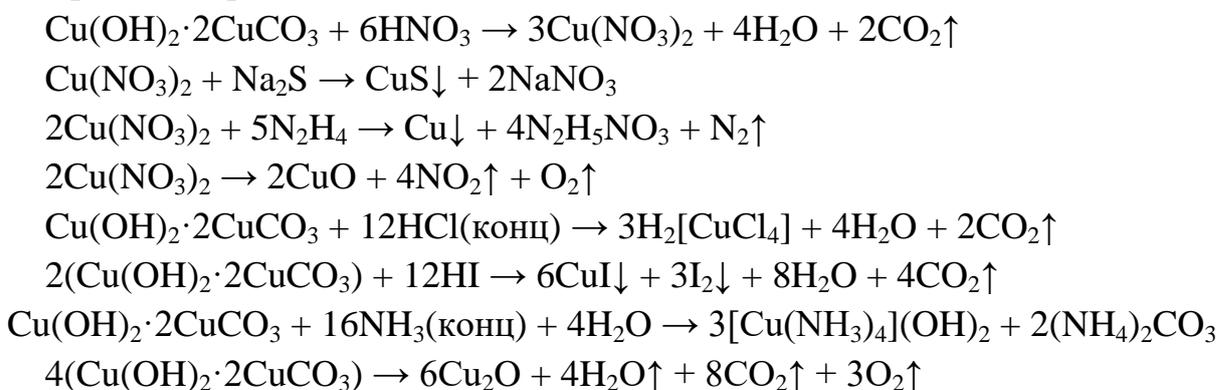
6. Исходя из полученной массы осадка и его состава можно рассчитать его выход:

$$\eta = \frac{3 \times n(\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{CuCO}_3)}{n(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})} = \frac{3 \times m(\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{CuCO}_3) \times M(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})}{M(\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{CuCO}_3) \times m(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})}$$

$$\eta = \frac{3 \times 11,18 \times 249,69}{344,67 \times 25,00} = 0,9719$$

Т.о. реальный выход полученного Димой осадка составил 97,19%.

7. Уравнения реакций:



### Система оценивания:

1. Формула малахита 1 балл, формула и название соли А по 0,5 балла, причина голубого цвета 0,5 балла – **2,5 балла**.

2. Правильный расчет массы А – **2,5 балла**.

3. Объяснение образования темного осадка, подтвержденное уравнениями реакций 2 балла, порядок сливания растворов с объяснением 1 балл – **3 балла**.

4. Уравнение реакции, происходящей при синтезе, 1 балл, объяснение промывки и проверки хлоридом бария по 0,5 балла, объяснение про высокую температуру и происходящий при этом процесс 1 балл – **3 балла**.

5. Состав осадка, подтвержденный расчетом – **4,5 балла**.

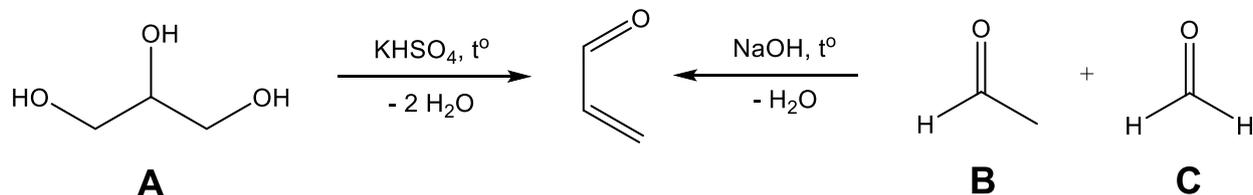
6. Расчет выхода – **1,5 балла**.

7. Уравнения восьми реакций по 1 баллу (засчитываются уравнения как с веществом X, так и при отсутствии определения последнего с малахитом) – **8 баллов**.

**ИТОГО: 25 баллов.**

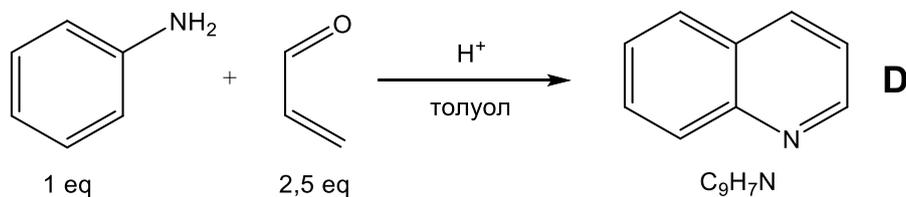
## Задача 2. Непредсказуемая химия

1. Акролеин можно получить различными способами, наиболее простыми является дегидратация глицерина и конденсация альдегидов: уксусного и муравьиного.

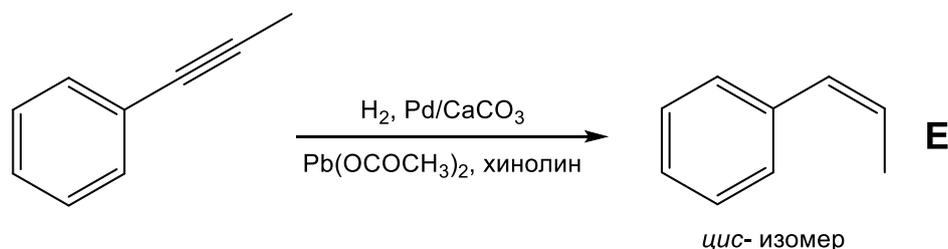


Основными компонентами жира в пище являются триглицериды жирных кислот, в результате избыточной термической обработки происходит разрушение триглицеридов, в общей массе продуктов разложения появляется и глицерин, дегидратирующийся под действием высокой температуры до акролеина. В зачет идет любой ответ, совпадающий по смыслу.

2. Жидкое вещество, использующееся для повышения селективности катализатора Линдлара – хинолин. Подсказкой выступает брутто-формула, сообщающая, что молекула акролеина реагирует в соотношении 1:1, а значит избыток взят для подавления побочных процессов. Также из брутто-формулы можно увидеть крайне малое количество атомов водорода, что наталкивает на мысль об ароматической структуре неизвестного соединения. Единственный возможный вариант, удовлетворяющий всем условиям – хинолин.



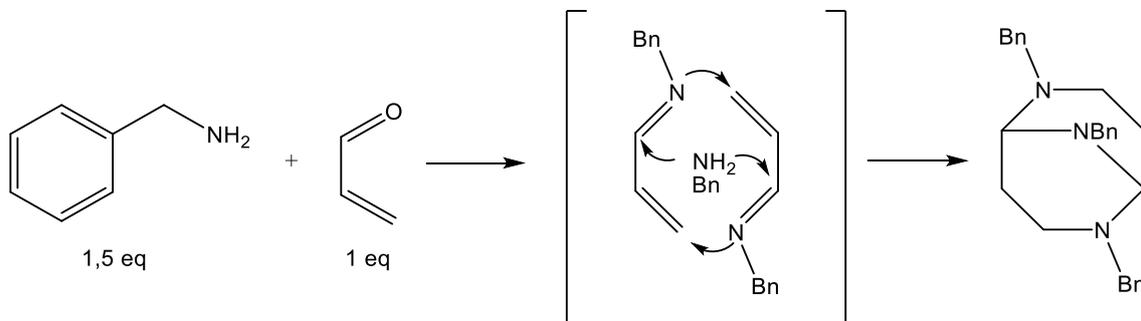
Катализатор Линдлара – отравленный солями свинца или сульфидами палладиевый катализатор, использующийся для селективного получения *цис*-алкенов из алкинов:



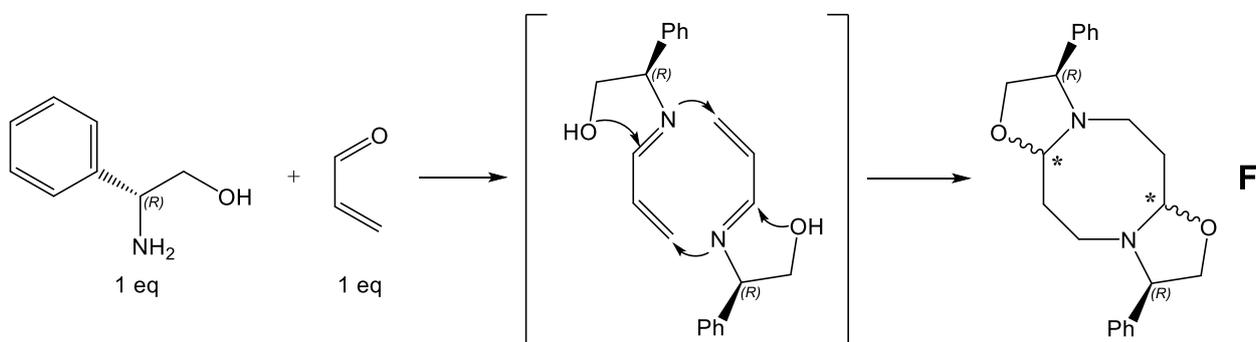
3. В условии задачи даны две главные подсказки. Первая – структурная формула продукта реакции акролеина и бензиламина, вторая – что реакция идет через промежуточное образование продукта присоединения –

$\alpha,\beta$ -ненасыщенного имина, опираясь на них будет восстанавливать структуры следующих соединений.

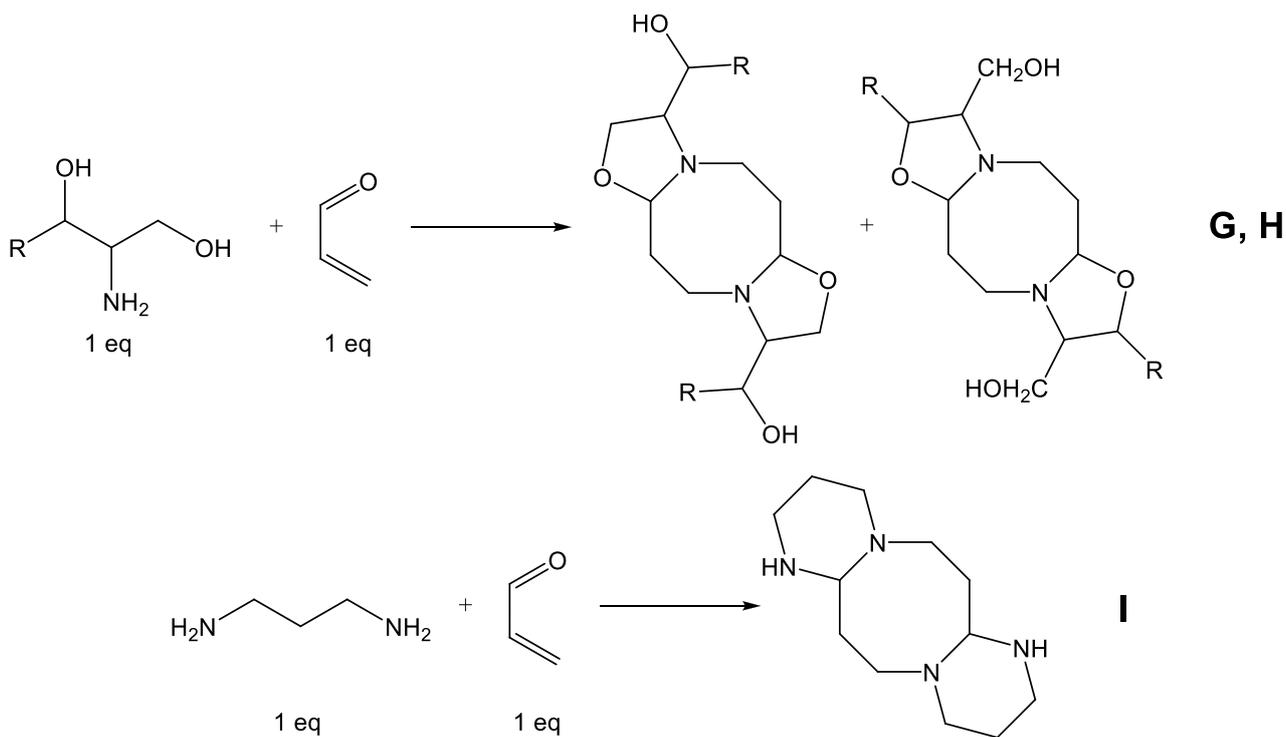
В упрощенном виде схему присоединения можно описать так (полный механизм реакции включает в себя множество стадий, но для решения данной задачи, нам не нужно его знать):



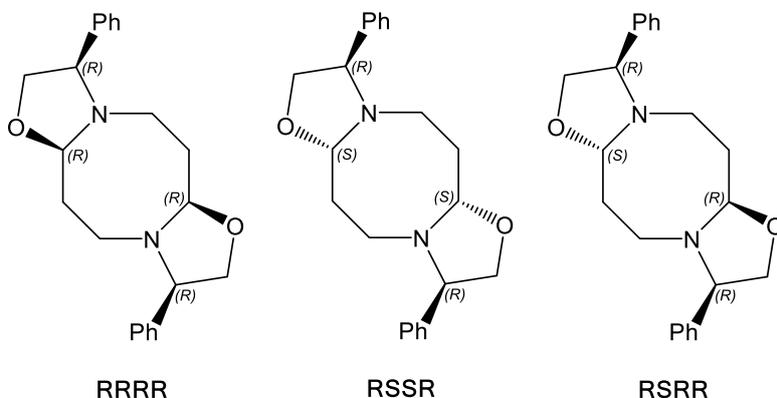
Как видно, для протекания данной реакции, необходимо наличие избытка бензиламина, который создает мостик между положениями 2 и 6 восьмичленного цикла. Поскольку в следующей реакции используется соотношение 1:1 и избытка нет, следовательно «заполнение» валентных возможностей 2го и 6го атомов углерода будет происходить с помощью «хвостов» молекул: в первых двух случаях – гидроксильных, а в третьем за счет свободных аминогрупп, что в итоге и приведет к трициклическим (без учета фенильных групп) структурам:



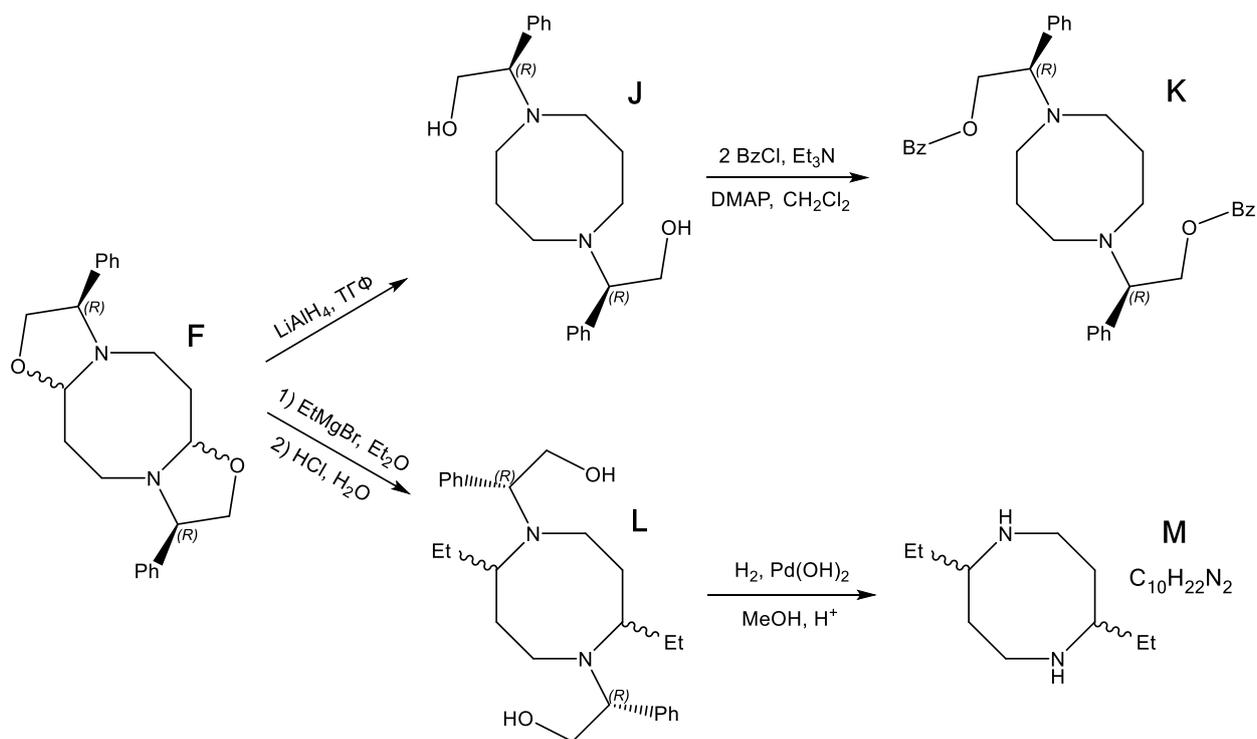
Поскольку в условии было сказано, что структуры **G** и **H** имеют симметричное строение, а оптическую изомерию учитывать не нужно, то продукты могут иметь только следующее строение:



4. Звездочкой (\*) отмечены новообразующиеся хиральные центры, так как хиральный центр аминспирта не затрагивается в данной реакции, то он остается без изменений. Продукт реакции существует в виде трех диастереомеров RRRR, RSSR и RSRR (то же самое, что и RRSR):

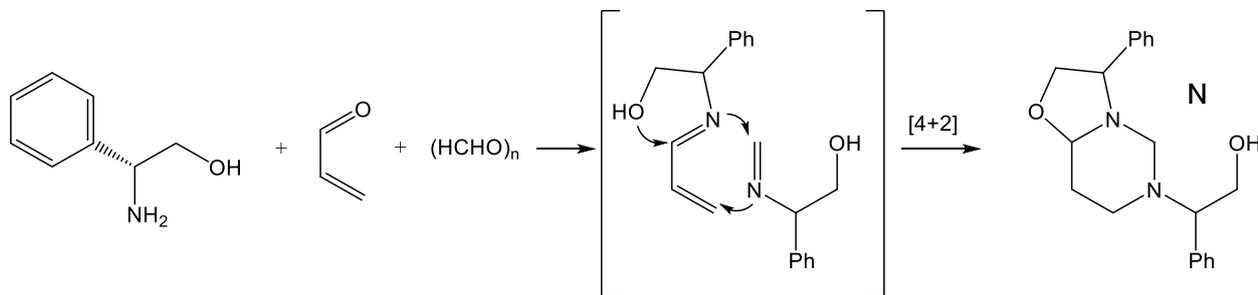


5. Далее нас встречает цепочка превращений соединение F.  $\text{LiAlH}_4$  – восстанавливающий агент, однако, на первый взгляд нет очевидной группы, которую можно восстановить, в этом случае нам поможет цепочка с этилмагнийбромидом.  $\text{EtMgBr}$  – нуклеофил и будет атаковать атомы углерода с наибольшим  $\delta^+$  на углероде, таких положений два. Получив структуру алкилированного продукта, становится очевидной и структура продукта восстановления.



Последняя реакция в первой цепочке – обычно ацилирования спиртовой группы, а второй – гидрогенолиз – это селективная каталитическая реакция, в ходе которой происходит разрыв связи Вп-Х (бензил-гетероатом), где Х любой атом кроме углерода, таких фрагментов два. На продукт этой реакции также намекает брутто-формула.

**6.** В задании нас встречают несколько подсказок: первая – параформальдегид – источник формальдегида, вторая – реакция идет по типу [4+2] присоединения. Вспоминаем как протекает реакция в отсутствие формальдегида, а именно присоединение по «голова к хвосту» двух  $\alpha,\beta$ -ненасыщенных иминов, имеющих по две двойные связи. Отсюда вывод, что необходим промежуточный продукт с одной двойной связью, который как раз образуется из аминспирта и формальдегида, присоединение также протекает по типу «голова к хвосту»:



### Система оценивания:

**1.** Структуры А-С по 1 баллу, объяснение получения акролеина при жарке 1 балл – **4 балла.**

2. Структура **D** 1 балл, структура **E** 0,5 балла, указание на *цис*-изомер 0,5 балла – **2 балла**.

3. Структуры **F-I** по 2 балла – **8 баллов**.

4. Указание количества диастереомеров 0,5 балла, «RS» обозначение изомеров со структурами по 0,5 балла – **2 балла**.

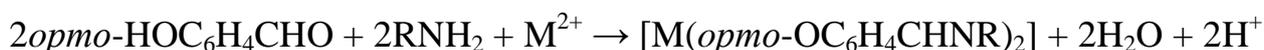
5. Структуры **J-M** по 1,5 балла – **6 баллов**.

6. Структура **N** – **3 балла**.

**ИТОГО: 25 баллов.**

### Задача 3. Темплатный синтез

1. В приведенном в задаче уравнении не дописаны вода и ионы водорода (можно записать в виде ионов гидроксония). Таким образом, уравнение синтеза комплексных соединений **K<sub>1</sub>–K<sub>4</sub>** выглядит следующим образом:



2. Исходя из приведенной в задаче формулы комплексных соединений **K<sub>1</sub>–K<sub>4</sub>** каждый лиганд содержит по одному атому азота и кислорода, а сами комплексы содержат по два одинаковых лиганда. На основе этого можно рассчитать молярные массы комплексных соединений и атомные веса металлов:

$$M(\mathbf{K}_i) = \frac{2 \times 14,007}{\omega_i(\text{N})} \text{ или } M(\mathbf{K}_i) = \frac{2 \times 16,00}{\omega_i(\text{O})}$$

$$A(\mathbf{M}_i) = M(\mathbf{K}_i) \times (1 - \omega_i(\text{C}) - \omega_i(\text{H}) - \omega_i(\text{O}) - \omega_i(\text{N}))$$

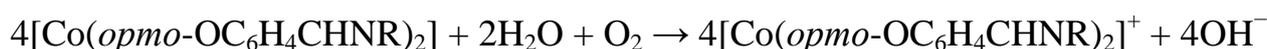
Число атомов углерода в алкильных радикалах можно рассчитать, исходя из молярных масс комплексов и массовых долей углерода в них:

$$n_i(\text{C}) = \left( \frac{M(\mathbf{K}_i) \times \omega_i(\text{C})}{A(\text{C})} - 14 \right) \div 2$$

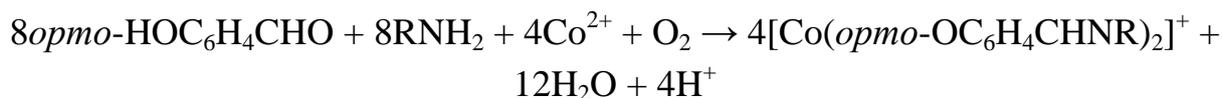
Полученные данные представлены ниже в виде таблицы:

Комплекс	$M(\mathbf{K}_i)$ , г/моль	$n_i(\text{C})$ в R	R	$A(\mathbf{M}_i)$ , г/моль	$\mathbf{M}_i$
<b>K<sub>1</sub></b>	361,99	2	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	65,48	Zn
<b>K<sub>2</sub></b>	387,88	3	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub>	63,50	Cu
<b>K<sub>3</sub></b>	355,16	2	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	58,71	Ni
<b>K<sub>4</sub></b>	411,31	4	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub>	58,90	Co

3. Некоторые комплексные соединения кобальта(II) на воздухе склонны к окислению (на последний факт наталкивает и упоминание о более темной окраске получающегося раствора):



Можно записать уравнение суммарного процесса темплатного синтеза с одновременным окислением:



4. Исходя из схемы реакции можно сделать вывод о том, что в комплексе  $\mathbf{K}_5$  содержится шесть атомов азота (по два на каждый лиганд). Тогда можно рассчитать молярную массу комплекса:

$$M(\mathbf{K}_5) = \frac{6 \times 14,007}{0,1499} = 560,65 \text{ г/моль}$$

Кроме того, в условии задачи сказано, что алкильный радикал  $\mathbf{R}$  в дикетоне и амине один и тот же. Значит, каждый лиганд в образующемся комплексе будет содержать по четыре таких радикала. Тогда можно записать соотношение между атомным весом металла  $\mathbf{M}_5$  и составом алкильного радикала  $\mathbf{R}$  ( $n$  – число атомов углерода в одном алкильном радикале):

$$A(\mathbf{M}_5) = M(\mathbf{K}_5) - A(\text{N}) \times 6 - A(\text{C}) \times 6 - A(\text{C}) \times 12n - A(\text{H}) \times 12(2n + 1)$$

$$A(\mathbf{M}_5) = 560,65 - 84,04 - 72,06 - 12,01 \times 12n - 1,01 \times 12(2n + 1)$$

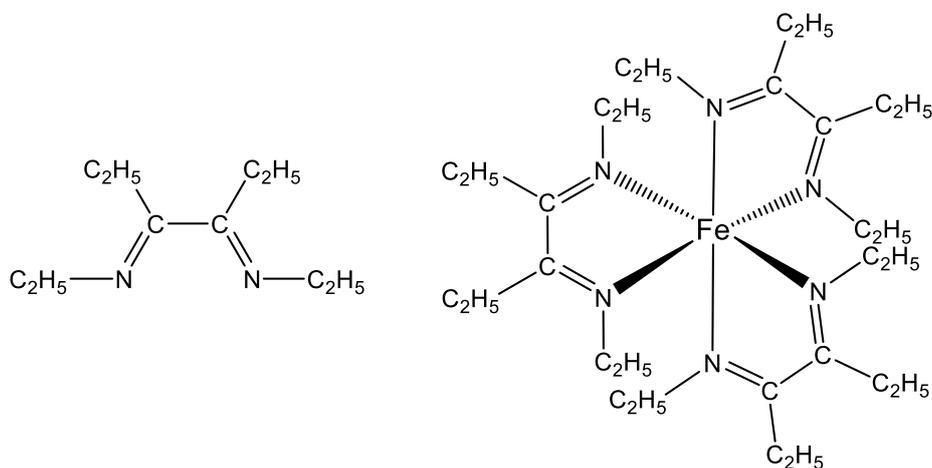
$$A(\mathbf{M}_5) = 392,43 - 168,36n$$

Далее перебором  $n$  можно установить состав радикала  $\mathbf{R}$  и металл  $\mathbf{M}_5$ :

$n$	$A(\mathbf{M}_5)$ , г/моль	$\mathbf{M}_5$
1	224,07	-
2	55,71	Fe

Число  $n$  равное трем дает уже отрицательную массу металла. Таким образом, металл  $\mathbf{M}_5$  – это железо, а алкильный радикал  $\mathbf{R}$  содержит два атома углерода. Состав лиганда  $\mathbf{L}$  можно представить как  $(\text{C}_2\text{H}_5)\text{NC}(\text{C}_2\text{H}_5)\text{C}(\text{C}_2\text{H}_5)\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)$  или  $\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{N}_2$ .

Структуры лиганда и комплексного катиона  $\mathbf{K}_5$  (комплексобразователь имеет октаэдрическое окружение, комплексный катион может существовать в виде двух оптических изомеров, но последнее в задаче не учитывается):



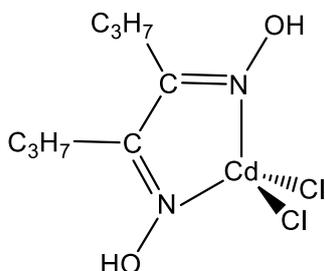
5. Исходя из условия задачи можно сделать вывод, что в получающемся комплексе **K**<sub>6</sub> лигандом является HONC(C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)C(C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)NOH (который имеет молярную массу 172,22 г/моль). В состав образующегося комплекса также входит хлор. Можно выразить атомный вес металла через число атомов хлора *k* и число органических лигандов *l*:

$$A(M) = \frac{k \times A(Cl)}{\omega(Cl)} - k \times A(Cl) - l \times M(L)$$

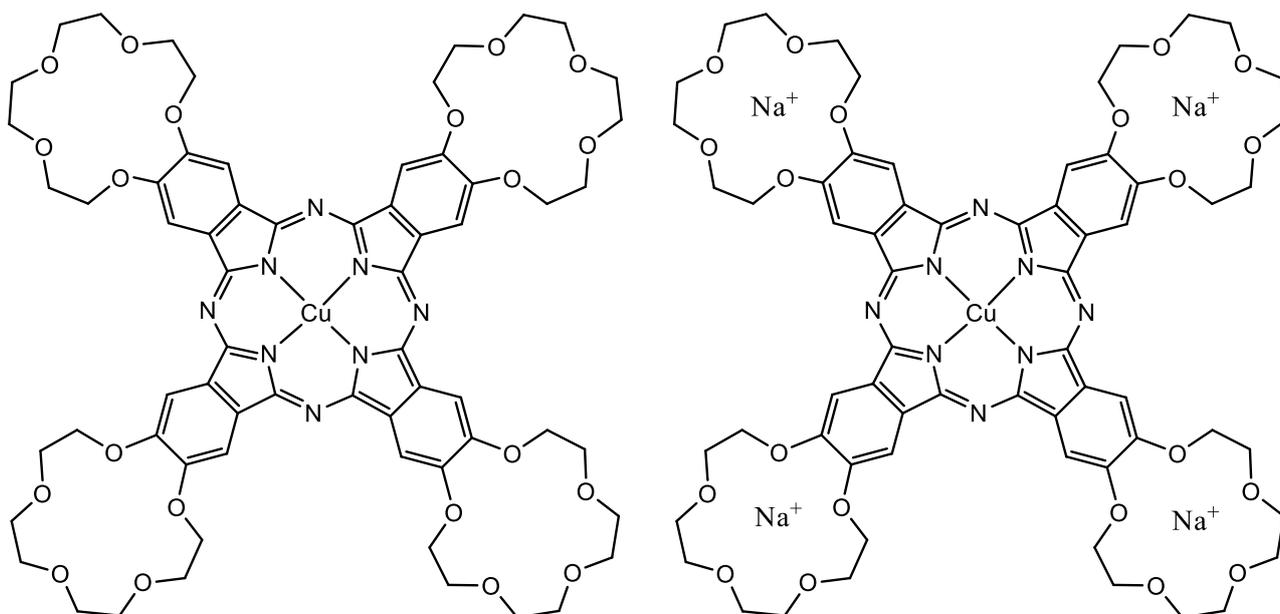
$$A(M) = \frac{k \times 35,45}{0,1994} - k \times 35,45 - l \times 172,22$$

<i>k</i>	<i>l</i>	A(M), г/моль	металл
1	1	-29,89	-
2	1	112,44	Cd
2	2	-59,77	-
3	1	254,78	-
3	2	82,56	-
3	3	-89,65	-
4	1	397,11	-
4	2	224,89	-
4	3	52,67	-
4	4	-119,54	-

Таким образом, формула комплекса **K**<sub>6</sub> Cd(HONC(C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)C(C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)NOH)Cl<sub>2</sub>, а соль **A** CdCl<sub>2</sub>. Структура комплекса **K**<sub>6</sub> (комплексообразователь имеет тетраэдрическое окружение):



6. В задаче упомянуты порфирины и родственные структуры и сказано, что в приведенной реакции кроме комплекса **K**<sub>7</sub> не образуется других соединений, на основании чего можно сделать вывод о том, что четыре приведенных молекулы соединяются в один лиганд. Катионы щелочных металлов образуют комплексы с краун-эфирами. С учетом того, что образующийся лиганд содержит четыре таких фрагмента, а катион **K**<sub>8</sub> является четырехзарядным, можно заключить, что к комплексу **K**<sub>7</sub> координируются четыре катиона натрия. Таким образом, структуры комплекса **K**<sub>7</sub> и катиона **K**<sub>8</sub> выглядят следующим образом:



### Система оценивания:

1. Законченное уравнение синтеза комплексных соединений  $K_1$ – $K_4$  – **1 балл**.
2. Определение состава алкильных радикалов R и металлов  $M_1$ – $M_4$  (подтвержденное расчетом или объяснением) для каждого из комплексов по 1,5 балла – **6 баллов**.
3. Происходящий процесс 0,5 балла, уравнение процесса 1 балл (засчитывается любое из двух приведенных в решении задачи уравнений) – **1,5 балла**.
4. Определение металла  $M_5$  и состава лиганда L в комплексе  $K_5$  2 балла, структура лиганда L 1 балл, структура комплекса  $K_5$  2,5 балла – **5,5 баллов**.
5. Определение соли A 1 балл, определение состава комплекса  $K_6$  2,5 балла, структура комплекса  $K_6$  2,5 балла – **6 баллов**.
6. Структуры комплекса  $K_7$  и катиона  $K_8$  по 2,5 балла – **5 баллов**.

**ИТОГО: 25 баллов.**

### Задача 4. Самый важный синтез

1. Энтальпия образования аммиака соответствует реакции  $0.5N_2 + 1.5H_2 \rightarrow NH_3$ . Тогда энтальпия реакции  $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$  равна  $-45.9 \cdot 2 = -91.8$  кДж/моль.

Энтальпия реакции равна разности энергий связей в реагентах и в продуктах:

$$-91.8 = E(N_2) + 3E(H_2) - 6E(N-H)$$

$$E(N-H) = (945 + 3 \cdot 435 + 91.8) / 6 = \mathbf{390.3 \text{ кДж/моль}}$$

2. Переведем энтальпию адсорбции N в кДж/моль:

$$\Delta H_{\text{адс}}(\text{N}) = -5.87 \cdot 96485 = -566.4 \text{ кДж/моль}$$

Представим процесс диссоциативной адсорбции двухстадийным:



$$\text{тогда } \Delta H = E(\text{N}_2) + 2\Delta H_{\text{адс}}(\text{N}) = 945 - 566.4 \cdot 2 = -187.8 \text{ кДж/моль.}$$

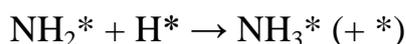
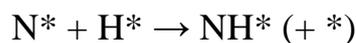
3. Это обратная задача.

$$-119 = E(\text{H}_2) + 2\Delta H_{\text{адс}}(\text{H})$$

$$\Delta H_{\text{адс}}(\text{H}) = (-119 - 435)/2 = -277 \text{ кДж/моль} = -2.87 \text{ эВ.}$$

Поскольку энтальпия адсорбции атомов азота более отрицательная, то прочнее поверхностью рутения удерживаются **атомы азота**.

4. На поверхности после стадий диссоциативной адсорбции есть адсорбированные атомарный водород ( $\text{H}^*$ ) и азот ( $\text{N}^*$ ). 3 стадии на поверхности – образование трех связей  $\text{N}-\text{H}$ , а последняя стадия – быстра десорбция молекулы аммиака с поверхности. Проверяется только сам механизм (в скобках указаны высвобождающиеся центры адсорбции, **их указывать участникам не обязательно**, однако при изображении таких механизмов это принято):



5. Каждая элементарная ячейка имеет объём  $V_{\text{яч}} = a^3 = (11.027 \cdot 10^{-8} \text{ см})^3 = 1.341 \cdot 10^{-21} \text{ см}^3$ . Один моль элементарных ячеек имеет объём  $V = N_A V_{\text{яч}} = 807.17 \text{ см}^3$ . Поскольку каждая элементарная ячейка содержит 16 формульных единиц вещества, то 1 моль ячеек содержит 16 моль, то есть имеет массу  $16M$ . С другой стороны,  $m = 807.17 \cdot 9.48 = 7652 \text{ г} = 16M$ .

$$M = 7652/16 = 478.2 \text{ г/моль.}$$

Нитрид содержит кобальт, молибден и азот. В тексте есть важная подсказка о том, что из  $\text{CoMoO}_4$  из металл-содержащих продуктов получился только этот нитрид. Значит, соотношение  $\text{Co} : \text{Mo} = 1 : 1$  сохраняется и в нитриде.

Будем вычитать последовательно молярную массу фрагмента  $\text{CoMo}$ , то есть  $154.9 \text{ г/моль}$ :

$$478.2 - 154.9 = 323.2 \text{ г/моль (или 23.09 атомов азота)}$$

$$323.2 - 154.9 = 168.3 \text{ г/моль (или 12.02 атомов азота)}$$

$$168.3 - 154.9 = 13.4 \text{ г/моль (или 0.96 атомов азота)}$$

Получили два варианта:  $\text{Co}_2\text{Mo}_2\text{N}_{12}$  или  $\text{Co}_3\text{Mo}_3\text{N}$ . Первый вариант не является простейшей формулой, а подобные нитриды обычно представляют в виде простейшей формулы. Итак, **X –  $\text{Co}_3\text{Mo}_3\text{N}$** .



(Уравнение реакции в случае  $\text{Co}_2\text{Mo}_2\text{N}_{12}$  выглядело бы так:  $2\text{CoMoO}_4 + 12\text{NH}_3 \rightarrow \text{Co}_2\text{Mo}_2\text{N}_{12} + 8\text{H}_2\text{O} + 10\text{H}_2$ ).

6. Если аммиак является легкодоступным, а реакция его разложения – легко осуществимой, то разложение аммиака – простой способ получения водорода (а сам аммиак, поскольку он фактически переносит водород из промышленности к адресату тогда является своеобразным контейнером для водорода). Зачет по упоминанию **получения водорода** или использования аммиака в качестве **контейнера для хранения водорода**.

Поскольку равновесие в реакции разложения аммиака при нагревании смещается в сторону азота и водорода, реакцию разложения аммиака (в отличие от синтеза) проводят при повышенных температурах, при которых металлическое железо, как и большинство металлов окисляется азотом и перестает выполнять функции катализатора. Зачет по упоминанию **высокой температуры для разложения аммиака и взаимодействия железа с азотом**.

7. Скорость дана в специальных единицах, принятых для гетерогенного катализа – в расчете на грамм катализатора. Значит, ее можно перевести в привычные единицы, умножив на массу катализатора:

$$r = 652 \cdot 1.25 = 815 \text{ мкмоль/ч} = 8.15 \cdot 10^{-4} \text{ моль/ч} = 8.15 \cdot 10^{-4} / 3600 \text{ моль/с} = 2.264 \cdot 10^{-7} \text{ моль/с.}$$

Это скорость образования аммиака по реакции  $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$ . За каждую реакцию тратится 4 молекулы реагента и образуется 2 молекулы аммиака, то есть при образовании 1 молекулы аммиака общее количество вещества в смеси уменьшается на 1 молекулу, поэтому скорость уменьшения количества газов в смеси тоже равна  $r = 2.264 \cdot 10^{-7} \text{ моль/с}$ .

Количество вещества превратим в давление по уравнению Менделеева-Клапейрона.

$$p = \frac{nRT}{V} = \frac{2.264 \cdot 10^{-7} \cdot 8.314 \cdot (400 + 273)}{10^{-3}} = 1.27 \text{ Па}$$

Скорость уменьшения давления равна **1.27 Па/с**.

#### **Система оценивания:**

1. Энергия связи в молекуле  $\text{NH}_3$  – **2 балла**.

**Оценивается только верное решение.**

2. Энтальпия диссоциативной адсорбции  $\text{N}_2$  – **3 балла**.

**Оценивается только верное решение**

3. Энтальпия адсорбции атомов водорода – **3 балла** (если не переведено в эВ – **2 балла**)

Выбор азота – **1 балл**

4. 4 стадии механизма – **по 0.5 балла**.

5. Молярная масса  $X$  – **3 балла**

Формула  $\text{Co}_3\text{Mo}_3\text{N}$  – 3 балла (за  $\text{Co}_2\text{Mo}_2\text{N}_{12}$  – 1 балл)

Уравнение реакции – 2 балла (за верное уравнение реакции для  $\text{Co}_2\text{Mo}_2\text{N}_{12}$  – 1 балл)

6. Использование разложения аммиака – 1 балл

Указание на высокую температуру разложения аммиака и взаимодействие железа с азотом – по 1 баллу

7. Верный перевод в Па/с – 3 балла.

(Если неверен перевод в мкмоль/с, но верен перевод в мкмоль/ч – 1 балл)

Если ответ неверен, но верен перевод в мкмоль/с – 2 балла)

**ИТОГО: 25 баллов.**