

LXXXII Московская олимпиада школьников по химии

Заключительный этап

Теоретический тур

15.02.2026 г.

10 класс

Из предложенных шести задач, нужно выбрать пять!

Указание: — при расчетах значения атомных масс следует округлять до целых, кроме хлора ($A_r(\text{Cl}) = 35,5$)
— в решении задачи обязательно нужно привести необходимые расчёты и рассуждения, ответ без доказательств может быть оценен в 0 баллов

Задача 1. Анализ неизвестного вещества

Условие

Химик Колбочкин, проводя инвентаризацию в сейфе с взрывчатыми веществами, обнаружил белые кристаллы неорганической соли **A**, содержащей октаэдрический анион. При осторожном нагревании **A** в атмосфере азота при 360°C соль полностью разложилась, при этом в остатке образовалось только бесцветное вещество **B** (реакция 1). При его нагревании в атмосфере кислорода образуется бинарное соединение **C** (реакция 2), при этом масса вещества в лодочке увеличивается на 25,8 %. При охлаждении газовой смеси, полученной при разложении соли, от 360°C до 25°C её объём уменьшается в 7,77 раз при постоянном давлении. После охлаждения её пропустили через трубку с раскалёнными медными стружками, поглотившими две трети газа (реакция 3). Плотность образовавшегося индивидуального вещества оказалась на 101,7% больше, чем до пропускания через трубку.

1. Определите формулы веществ **A–C**, ответ подтвердите рассуждениями или расчётом. Ответ без расчёта или обоснования не оценивается.
2. Какие газообразные вещества образуются при термическом разложении соли **A**? Определите качественный и количественный состав образующейся смеси (в объёмных процентах).
3. Напишите уравнения реакций 1-3.
4. Какое вещество **D** выделится при обработке соли **A** с помощью олеума?

Рекомендации к решению

Согласно условию задачи, объём газовой смеси, полученной при термическом разложении соли, уменьшился в 7,77 раз при изменении температуры от 360°C до 25°C при постоянном давлении. Однако вклад изменения температуры в уменьшение объёма составляет лишь 2,12 раза. Это говорит о том, что часть газа конденсировалась в ходе данного процесса. Пусть общий объём смеси изначально составлял V л, тогда после охлаждения в отсутствие конденсации он должен составить $\frac{V}{2,12}$ л, а реально составил $\frac{V}{7,77}$ л. Следовательно, после охлаждения в газовой фазе осталось лишь $\frac{2,12}{7,77} = 0,27285$ от изначального количества вещества. Преобразуем данную десятичную дробь в правильную. Проще всего это можно сделать, рассчитав обратное число и сведя его к неправильной дроби с меньшим знаменателем:

$$0,27285^{-1} = 3,665 \approx \frac{11}{3}.$$

Следовательно, при конденсации в жидкость перешло 8/11 изначальной смеси, а 3/11 осталось в газовой фазе. Вероятно, сконденсировавшейся жидкостью является вода, что логично, ведь соль может быть кристаллогидратом. Полученная после охлаждения газовая смесь состоит из двух газообразных веществ в соотношении 2:1, при этом первый газ поглощается раскалённой медной стружкой, а второй представляет собой индивидуальное вещество. Логично предположить, что первым из них является кислород. Пусть молярная масса второго газа составляет $X \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, тогда средняя молярная масса смеси будет равна $\frac{X}{2,017} \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, поскольку молярная масса второго газа на 101,7% больше средней. Рассчитаем значение X и определим данное простое вещество:

$$X \cdot \frac{1}{3} + 32 \cdot \frac{2}{3} = \frac{X}{2,017},$$

$$X = 131,32.$$

Данной молярной массе соответствует ксенон Xe. Образовавшаяся при разложении соли **A** газовая смесь содержит 1 объём ксенона, 2 объёма кислорода и 8 объёмов водяного пара. Объёмное содержание газов в смеси в процентах составляет 9,09% Xe, 18,18% O₂ и 72,73% H₂O. Поскольку при разложении этой соли на 1 эквивалент ксенона приходится 2 эквивалента кислорода, то степень окисления ксенона в ней равна +8. Анион этой соли является октаэдрическим, то есть представляет собой XeO₆⁴⁻. Оставшиеся 4 валентные возможности, вероятно, занимают щелочной или щелочноземельный металл, поскольку при разложении этой соли образуется оксид, который далее переводится в пероксид или надпероксид действием кислорода. Рассмотрим вариант окисления оксида до пероксида:

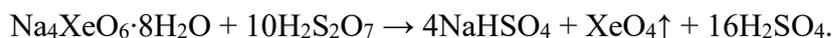


где n = 1 для щелочноземельного металла и n = 2 для щелочного. Исходя из увеличения массы рассчитаем молярную массу Y:

$$\frac{n \cdot Y + 2 \cdot 16}{n \cdot Y + 16} = 1,258,$$

$$n \cdot Y = 46.$$

Щелочноземельного металла с молярной массой 46 г/моль не существует, в то время как щелочной с молярной массой 23 г/моль — это натрий. Тогда **A** — Na₄XeO₆·8H₂O, **B** — Na₂O, а **C** — Na₂O₂. При обработке гидратированного перксената натрия с помощью олеума образуется высший оксид ксенона **D** — XeO₄:



Уравнения *реакций* 1-3:

1. Na₄XeO₆·8H₂O → 2Na₂O + Xe↑ + 2O₂↑ + 8H₂O↑
2. 2Na₂O + O₂ → 2Na₂O₂
3. 2Cu + O₂ → 2CuO

Критерии оценивания	
1. Определение формул веществ A–C <i>Если нет обоснований, формулы веществ оцениваются в 0 баллов</i>	по 1,5 балла
2. Определение газов, образовавшихся при разложении A <i>Если нет обоснований, формулы веществ оцениваются в 0 баллов</i> Расчёт объёмных долей газов в продуктах разложения A	по 1,5 балла по 1,5 балла
3. Уравнения <i>реакций 1-3</i>	по 1,5 балла
4. Определение вещества D	2 балла
Итого	20 баллов

Задача 2. Тонкости анализа органических веществ

Современный анализ органических веществ практически невозможно представить без двух лёгких бесцветных жидкостей — **A** и **B**. Для получения жидкости **A** используют следующий трёхстадийный процесс: на первом этапе бесцветный газ **C** пропускают через теплообменник с жидкостью **B**, а далее помещают в детандер — устройство, в котором газовая смесь охлаждается и расширяется, совершая механическую работу. Наконец, финальный третий этап представляет собой дросселирование смеси через расширительный клапан — вентиль Джоуля-Томсона — в камеру с низким давлением порядка одной атмосферы. При этом удаётся получить жидкость **A** с выходом порядка 20% за один цикл. Жидкости **A** и **B** ведут себя очень бурно при попадании в горячую воду, выделяя большое количество газообразных веществ **C** и **D** соответственно, последний из которых входит в состав воздуха. При этом на дне сосуда также возможно образование бесцветных кристаллов **E**. Только вдумайтесь, из 5,0 л жидкости **A** с плотностью $\rho = 135 \text{ кг/м}^3$ удаётся получить $3,778 \text{ м}^3$ газа **C** (при н.у.), что сопровождается увеличением объёма более, чем в 750 раз!

1. Установите формулы веществ **A–E**. Ответ обоснуйте или подтвердите расчётом.
Ответ без расчёта или обоснования не оценивается.
2. С какой целью используют жидкости **A** и **B** в анализе органических веществ?
3. Для проведения химического анализа органических веществ на одном ЯМР-спектрометре в течение месяца необходимо порядка 40 л **A** и 250 л **B**. Рассчитайте стоимость обслуживания прибора в течение одного года, если стоимость **A** и **B** составляет 3500 руб/л и 90 руб/л соответственно. Не забудьте учесть также энергопотребление прибора, составляющее порядка 192 кВт·ч за день. Стоимость 1 кВт·ч энергии составляет порядка 8 рублей.

Рекомендации к решению

При анализе условия задачи заметно, что получение жидкости **A** из газа **C** происходит без участия других реагентов. На первом этапе газ пропускают через теплообменник с жидкостью **B**, однако при этом происходит лишь передача теплоты от более горячего газа к более холодной жидкости. Второй и третий этапы представляют собой расширение газа с

совершением и без совершения механической работы. Таким образом, жидкость **A** и газ **C** представляют собой одно и то же химическое вещество, находящееся в разных агрегатных состояниях. Рассчитаем его молярную массу:

$$n(\text{C}) = \frac{V(\text{C})}{V_m} = \frac{3778 \text{ л}}{22,4 \frac{\text{л}}{\text{моль}}} = 168,66 \text{ моль},$$

$$n(\text{A}) = n(\text{C}) = 168,66 \text{ моль},$$

$$M(\text{A}) = \frac{m(\text{A})}{n(\text{A})} = \frac{\rho(\text{A}) \cdot V(\text{A})}{n(\text{A})} = \frac{135 \frac{\text{г}}{\text{л}} \cdot 5,0 \text{ л}}{168,66 \text{ моль}} = 4,002 \frac{\text{г}}{\text{моль}}.$$

Таким образом, вещества **A** и **C** представляют собой жидкий **A** — He_(ж.) и газообразный **C** — He_(г.) гелий соответственно. Жидкий гелий обладает очень низкой температурой кипения и является достаточно дорогим, поэтому для его охлаждения используют более дешёвую жидкость — жидкий азот **B** — N_{2(ж.)}. При помещении жидкого азота в горячую воду выделяется большое количество газообразного азота **D** — N_{2(г.)}, являющегося одним из компонентов воздуха. При взаимодействии жидких гелия и азота с водой происходит сильное охлаждение последней, при этом возможно образование кристалликов льда **E** — H_{2O(тв.)}.

Жидкий гелий используется в ЯМР-спектрометре для охлаждения мощного сверхпроводящего магнита, а жидкий азот — для охлаждения жидкого гелия и снижения скорости его испарения.

Рассчитаем стоимость годового обслуживания ЯМР-спектрометра, состоящую из затрат на жидкие азот и гелий, а также затрат на электричество:

$$P = P_{\text{газ}} + P_{\text{эл}} = \left(3500 \frac{\text{руб}}{\text{л}} \cdot 40 \frac{\text{л}}{\text{мес}} + 90 \frac{\text{руб}}{\text{л}} \cdot 250 \frac{\text{л}}{\text{мес}} \right) \cdot 12 \frac{\text{мес}}{\text{год}} + 192 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{день}} \cdot 8 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \cdot 365 \frac{\text{день}}{\text{год}} = 1\,950\,000 \frac{\text{руб}}{\text{год}} + 560\,640 \frac{\text{руб}}{\text{год}} = 2\,510\,640 \frac{\text{руб}}{\text{год}}.$$

Критерии оценивания	
1. Молекулярные формулы веществ A–E <i>Если ответ не обоснован и не подтверждён расчётом, оценка 0 баллов.</i>	по 3 балла
2. Применение веществ A и B в анализе органических веществ	по 1 баллу
3. Расчёт стоимости годового обслуживания ЯМР-спектрометра	3 балла
Итого	20 баллов

Задача 3. Растворяется или не растворяется?

Условие

Одной из важных характеристик, описывающих способность плохо растворимых веществ распадаться на ионы в водных растворах, является произведение растворимости K_s . Для

вещества ионного строения A_xB_y оно записывается в виде $K_s = [A^{y+}]^x[B^{x-}]^y$, где $[A^{y+}]$ и $[B^{x-}]$ — равновесные концентрации катиона и аниона соответственно, выраженные в моль/л.

1. Рассчитайте массовую растворимость (в г/л) сульфида ртути HgS в чистой дистиллированной воде. Протеканием побочных процессов пренебрегите. Произведение растворимости сульфида ртути равно $1,6 \cdot 10^{-52}$.

Однако при помещении соли в раствор кислоты её растворимость способна существенно повышаться за счёт связывания катиона или аниона в малодиссоциирующую частицу. Например, в кислой среде существенная доля сульфид-ионов оказывается связана в гидросульфид и сероводород. Мольная доля сульфид-иона может быть рассчитана по формуле:

$$\alpha(S^{2-}) = \frac{[S^{2-}]}{C_{\text{общ}}(S^{2-})} = \frac{K_{a_1} \cdot K_{a_2}}{[H^+]^2 + K_{a_1} \cdot [H^+] + K_{a_1} \cdot K_{a_2}}$$

где K_{a_1} и K_{a_2} — константы кислотности сероводородной кислоты, равные $1,0 \cdot 10^{-7}$ и $2,5 \cdot 10^{-13}$ соответственно.

2. Рассчитайте массовую растворимость (в г/л) сульфида ртути HgS в 0,50 М растворе хлорной кислоты. Считайте, что катион ртути присутствует в растворе только в форме Hg^{2+} .

В растворе иодоводородной кислоты, также являющейся комплексообразователем, катион двухвалентной ртути способен связываться в устойчивый комплекс $[HgI_4]^{2-}$, характеризующийся константой устойчивости

$$\beta_4 = \frac{[HgI_4^{2-}]}{[Hg^{2+}][I^-]^4} = 1,50 \cdot 10^{30}.$$

3. Получите выражение для зависимости мольной доли катиона ртути(II) $\alpha(Hg^{2+}) = \frac{[Hg^{2+}]}{C_{\text{общ}}(Hg^{2+})}$ от концентрации иодид-ионов $[I^-]$ в растворе. Считайте, что ртуть(II) в нём находится только в форме Hg^{2+} и $[HgI_4]^{2-}$.
4. Рассчитайте массовую растворимость (в г/л) сульфида ртути HgS в 0,50 М растворе иодоводородной кислоты.

Рекомендации к решению

Процесс растворения сульфида ртути описывается равновесием:



которое характеризуется константой равновесия $K_s = [Hg^{2+}][S^{2-}]$.

В первом случае, когда катион ртути и сульфид-ион не вступают в подобные процессы, выполняется соотношение $[Hg^{2+}] = C_{\text{общ}}(Hg^{2+}) = S_1$ и $[S^{2-}] = C_{\text{общ}}(S^{2-}) = S_1$. В таком случае мольная растворимость соли может быть рассчитана как квадратный корень из K_s , а массовая — как произведение мольной на молярную массу сульфида ртути, равную 232,66 г/моль.

$$K_s = [Hg^{2+}][S^{2-}] = S_1 \cdot S_1 = S_1^2,$$

$$S_1 = \sqrt{1,6 \cdot 10^{-52}} = 1,265 \cdot 10^{-26},$$

$$S_{m_1} = S_1 \cdot M = 1,265 \cdot 10^{-26} \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Л}} \cdot 232,66 \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}} = 2,94 \cdot 10^{-24} \frac{\text{Г}}{\text{Л}}$$

В растворе хлорной кислоты будет в побочные процессы будет вступать лишь сульфид-ион, а доля свободного S^{2-} может быть рассчитана по формуле из условия задачи:

$$\alpha(S^{2-}) = \frac{K_{a_1} \cdot K_{a_2}}{[H^+]^2 + K_{a_1} \cdot [H^+] + K_{a_1} \cdot K_{a_2}} = \frac{1,0 \cdot 10^{-7} \cdot 2,5 \cdot 10^{-13}}{0,50^2 + 1,0 \cdot 10^{-7} \cdot 0,50 + 1,0 \cdot 10^{-7} \cdot 2,5 \cdot 10^{-13}} = 1,0 \cdot 10^{-19}$$

В этом случае $[Hg^{2+}] = C_{\text{общ}}(Hg^{2+}) = S_2$, а $[S^{2-}] = \alpha(S^{2-}) \cdot C_{\text{общ}}(S^{2-}) = 1,0 \cdot 10^{-19} \cdot S_2$.

$$K_s = [Hg^{2+}][S^{2-}] = S_2 \cdot 1,0 \cdot 10^{-19} \cdot S_2 = 1,0 \cdot 10^{-19} \cdot S_2^2,$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-52}}{1,0 \cdot 10^{-19}}} = 4,0 \cdot 10^{-17},$$

$$S_{m_2} = S_2 \cdot M = 4,0 \cdot 10^{-17} \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Л}} \cdot 232,66 \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}} = 9,31 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Г}}{\text{Л}}$$

Получим выражение для мольной доли свободного катиона ртути в растворе, содержащем Hg^{2+} и HgI_4^{2-} :

$$\alpha(Hg^{2+}) = \frac{[Hg^{2+}]}{C_{\text{общ}}(Hg^{2+})} = \frac{[Hg^{2+}]}{[Hg^{2+}] + [HgI_4^{2-}]} = \frac{1}{1 + \beta_4 \cdot [I^-]^4}$$

Рассчитаем значение мольной доли Hg^{2+} в растворе HI концентрации 0,5 М. Мольная доля S^{2-} остаётся такой же, как и в случае 2:

$$\alpha(Hg^{2+}) = \frac{1}{1 + \beta_4 \cdot [I^-]^4} = \frac{1}{1 + 1,50 \cdot 10^{30} \cdot 0,50^4} = 1,07 \cdot 10^{-29}$$

В этом случае $[Hg^{2+}] = \alpha(Hg^{2+}) \cdot C_{\text{общ}}(Hg^{2+}) = 1,07 \cdot 10^{-29} \cdot S_3$, а $[S^{2-}] = \alpha(S^{2-}) \cdot C_{\text{общ}}(S^{2-}) = 1,0 \cdot 10^{-19} \cdot S_3$.

$$K_s = [Hg^{2+}][S^{2-}] = 1,07 \cdot 10^{-29} \cdot S_3 \cdot 1,0 \cdot 10^{-19} \cdot S_3 = 1,07 \cdot 10^{-48} \cdot S_3^2,$$

$$S_3 = \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-52}}{1,07 \cdot 10^{-48}}} = 1,22 \cdot 10^{-2},$$

$$S_{m_3} = S_3 \cdot M = 1,22 \cdot 10^{-2} \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Л}} \cdot 232,66 \frac{\text{Г}}{\text{МОЛЬ}} = 2,84 \frac{\text{Г}}{\text{Л}}$$

Критерии оценивания	
1. Расчёт массовой растворимости сульфида ртути в воде <i>Если размерность величины не указана или указана неверно – штраф 2 балла</i>	5 баллов
2. Расчёт массовой растворимости сульфида ртути в 0,5 М HClO ₄ <i>Если размерность величины не указана или указана неверно – штраф 2 балла</i>	5 баллов
3. Выражение для мольной доли Hg^{2+} в растворе <i>Если вывод не приведён – оценка 0 баллов</i>	5 баллов
4. Расчёт массовой растворимости сульфида ртути в 0,5 М HI <i>Если размерность величины не указана или указана неверно – штраф 2 балла</i>	5 баллов
Итого	20 баллов

Задача 4. Настоящая палитра красок

Серебристый металл **X** в настоящее время используется в большом количестве отраслей промышленности и даже в быту! Его обычно получают в ходе двухстадийного процесса из белого высшего оксида **A**, который сначала подвергают обработке углём и хлором при повышенной температуре, переводя в бесцветную жидкость **B** (реакция 1), а после её восстанавливают магнием до простого вещества (реакция 2). Металл **X** при нагревании способен растворяться в разбавленной серной кислоте с образованием фиолетового раствора соли **C** (реакция 3), которая в ходе одноэлектронного окисления под действием перманганата калия в сернокислой среде превращается бесцветную соль **D** (реакция 4), содержащую атомы металла **X** и кислорода в соотношении 1:5. Наконец, при нагревании хлорида **B** с аммиаком образуется золотистое бинарное соединение **E** (реакция 5), которое часто используют для создания твёрдых и прочных покрытий, имитирующих золото.

1. Установите состав соединений **A–E**. Ответ без обоснования не оценивается.
2. Напишите уравнения реакций 1-5.

Рекомендации к решению

Задача не содержит численных данных, поэтому в ходе решения приходится опираться лишь на окраску соединений. Подобное разнообразие проявляемых окрасок свидетельствует в пользу соединений переходного металла, образующего белый высший оксид и получаемый из него жидкий бесцветный высший хлорид. При растворении соответствующего металла в разбавленной серной кислоте образуется фиолетовый раствор соли, из которой в ходе одноэлектронного окисления образуется бесцветный раствор соли. Учитывая широкую применимость металла и его соединений, можно предположить, что речь идёт о металле первого переходного ряда (*3d*-). Образование жидких хлоридов обычно характерно для элементов в степени окисления +4, поэтому высшей степенью окисления металла является +4. Среди всех *3d*-металлов бесцветный тетрахлорид образует лишь титан, который также подходит и под остальные данные из условия задачи. Высший оксид титана **A** — TiO_2 встречается в природе в виде минерала рутила, который переводят в тетрахлорид **B** — TiCl_4 с помощью восстановительного хлорирования. Растворение титана в серной кислоте приводит к окрашенному в фиолетовый цвет сульфату титана(III) **C** — $\text{Ti}_2(\text{SO}_4)_3$, который далее окисляют до сульфата титанила **D** — TiOSO_4 . Наконец, золотистый нитрид титана имеет формулу **E** — TiN .

Уравнения реакций 1-5:

1. $\text{TiO}_2 + 2\text{C} + 2\text{Cl}_2 \rightarrow \text{TiCl}_4 + 2\text{CO}\uparrow$
2. $\text{TiCl}_4 + 2\text{Mg} \rightarrow \text{Ti} + 2\text{MgCl}_2$
3. $2\text{Ti} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Ti}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\uparrow$
4. $5\text{Ti}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{KMnO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 10\text{TiOSO}_4 + \text{K}_2\text{SO}_4 + 2\text{MnSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$
5. $6\text{TiCl}_4 + 32\text{NH}_3 \rightarrow 6\text{TiN} + 24\text{NH}_4\text{Cl} + \text{N}_2\uparrow$

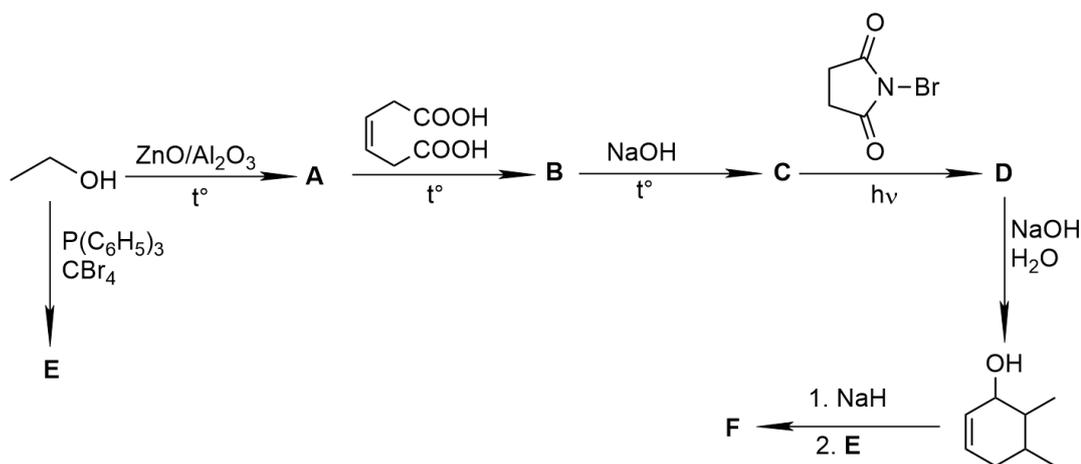
Критерии оценивания	
1. Установление формул соединений A–E , подтверждённое логическим обоснованием	по 2 балла

Если нет обоснований, формулы веществ оцениваются в 0 баллов	
2. Написание уравнений реакций 1-5 с верными коэффициентами Если коэффициенты расставлены неверно, оценка снижается до 1 балла. Если продукты или реагенты неверные, реакция не оценивается	по 2 балла
Итого	20 баллов

Задача 5. Как тебя зовут?

Условие

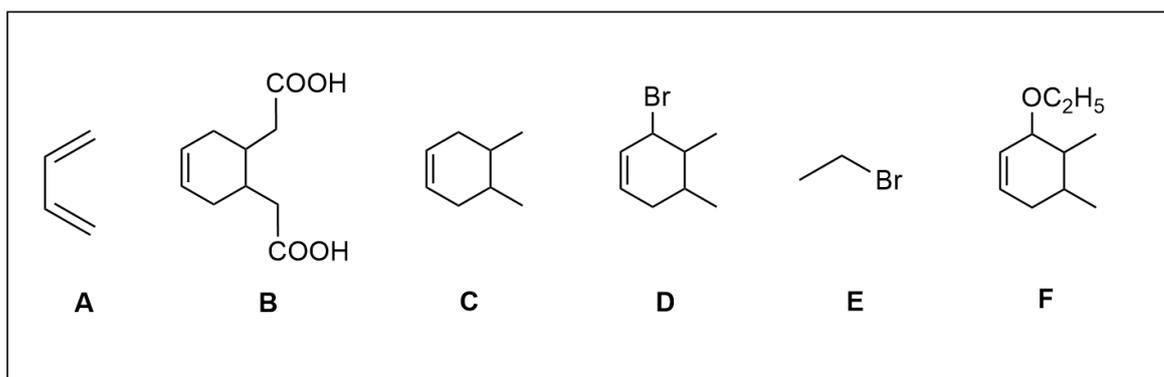
В органической химии известно большое число реакций, названных в честь видных деятелей науки. Их знание позволяет существенно упростить решение многих задач, поскольку по характерным условиям можно догадаться о тех или иных группах атомов, присутствующих в реагентах и продуктах. Цепочка превращений, представленная ниже, содержит ровно шесть «именных» реакций.



1. Установите структурные формулы соединений **A–F**.
2. Укажите названия не менее четырёх «именных» реакций, представленных на схеме.

Рекомендации к решению

При нагревании этанола на оксидном катализаторе, представляющем собой смесь ZnO и Al₂O₃, образуется бутadiен-1,4 (**A**). Его нагревание с гексен-3-диовой кислотой приводит к образованию циклической дикарбоновой кислоты **B**. При её прокаливании с гидроксидом натрия образуется соответствующий углеводород **C** — 3,4-диметилциклогексен. При его обработке *N*-бромсукцинимидом в ходе аллильного бромирования образуется 2-бром-3,4-диметилциклогексен (**D**). Последующее его взаимодействие с водным раствором гидроксида натрия позволяет получить соответствующий спирт, который на следующей стадии превращается в простой эфир **F**. Реагентом на ней является бромэтан, образующийся при действии на этанол смесью трифенилфосфина и CBr₄. Структурные формулы соединений **A–F** представлены на рисунке:



Представленная схема превращений содержит шесть именных реакций, из которых оцениваются любые четыре:

1. Реакция Лебедева (стадия $C_2H_5OH \rightarrow A$)
2. Реакция Дильса-Альдера (стадия $A \rightarrow B$)
3. Реакция Дюма (стадия $B \rightarrow C$)
4. Реакция Воля-Циглера (стадия $C \rightarrow D$)
5. Реакция Аппеля (стадия $C_2H_5OH \rightarrow E$)
6. Реакция Вильямсона (стадия циклический спирт $\rightarrow F$)

Критерии оценивания	
1. Определение структурных формул веществ А–F	по 2 балла
2. Названия четырёх «именных» реакций	по 2 балла
Итого	20 баллов

Задача 6. Быстро или медленно?

Условие

В живых организмах особое значение имеют ферментативные процессы, протекающие при участии биологических катализаторов. Зависимость скорости ферментативной реакции r от концентрации субстрата $C(S)$ и концентрации фермента $C(E)$ определяется уравнением Михаэлиса-Ментен:

$$r = kC_0(E) \frac{C(S)}{K_M + C(S)}$$

где k — константа скорости распада фермент-субстратного комплекса, а K_M — характеристика фермента, называемая константой Михаэлиса.

1. Определите общий порядок ферментативной реакции при предельно больших и предельно малых концентрациях субстрата. Общим порядком реакции называется сумма показателей степеней при концентрациях.
2. Постройте график зависимости скорости ферментативной реакции r от концентрации субстрата $C(S)$ и от общей концентрации фермента $C_0(E)$.
3. Скорость реакции, катализируемой ферментом, при увеличении концентрации субстрата от 14 мМ до 31 мМ увеличилась с 93 мМ/мин до 175 мМ/мин. Рассчитайте константу Михаэлиса и максимальную скорость данной ферментативной реакции при той же концентрации фермента.

4. К какому классу ферментов относится фермент алкогольдегидрогеназа? Какое превращение он катализирует?

Рекомендации к решению

При предельно больших концентрациях субстрата $C(S) \rightarrow \infty$ знаменатель дроби $K_M + C(S)$ окажется приблизительно равен $C(S)$, поэтому выражение может быть существенно упрощено:

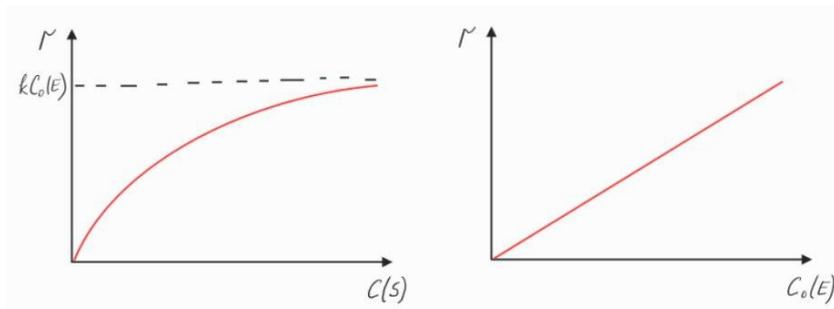
$$r_{\infty} = kC_0(E) \frac{C(S)}{C(S)} = kC_0(E).$$

При предельно малых концентрациях субстрата $C(S) \rightarrow 0$ знаменатель дроби $K_M + C(S)$ окажется приблизительно равен K_M , поэтому выражение может быть существенно упрощено:

$$r_0 = kC_0(E) \frac{C(S)}{K_M} = \frac{k}{K_M} C_0(E)C(S).$$

Общий порядок реакции при предельно больших $C(S)$ оказывается первым, а при предельно малых — вторым.

Зависимость r от $C(S)$ представляет собой участок гиперболы, стремящийся к асимптоте $kC_0(E)$, в то время как зависимость r от $C_0(E)$ — прямая пропорциональность.



Для удобства дальнейших расчётов приведём уравнение Михаэлиса-Ментен к линейному виду:

$$\frac{1}{r} = \frac{K_M}{kC_0(E)} \cdot \frac{1}{C(S)} + \frac{1}{kC_0(E)}.$$

Составим систему из двух уравнений при различных $C(S)$ и рассчитаем параметры модели — K_M и $kC_0(E)$:

$$\begin{cases} \frac{1}{93 \frac{\text{мМ}}{\text{мин}}} = \frac{K_M}{kC_0(E)} \cdot \frac{1}{14 \text{ мМ}} + \frac{1}{kC_0(E)}, \\ \frac{1}{175 \frac{\text{мМ}}{\text{мин}}} = \frac{K_M}{kC_0(E)} \cdot \frac{1}{31 \text{ мМ}} + \frac{1}{kC_0(E)}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{K_M}{kC_0(E)} = 0,12863 \text{ мин}, \\ \frac{1}{kC_0(E)} = 1,565 \cdot 10^{-3} \frac{\text{мин}}{\text{мМ}}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_M = 82,19 \text{ мМ}, \\ kC_0(E) = 639,0 \frac{\text{мМ}}{\text{мин}}. \end{cases}$$

Максимальная скорость ферментативной реакции возможна в случае, когда весь фермент связан с субстратом, то есть при предельно больших концентрациях субстрата. В этом случае она составляет $kC_0(E) = 639,0 \frac{\text{мМ}}{\text{мин}}$.

Фермент алкогольдегидрогеназа относится к классу оксидоредуктаз, катализируемых окислительно-восстановительные превращения. Он катализирует реакцию окисления первичных спиртов до альдегидов и обратную реакцию восстановления альдегидов до первичных спиртов.

Критерии оценивания	
1. Определение порядка реакции при предельно больших и предельно малых концентрациях	по 3 балла
2. Построение графиков зависимости r от $C(S)$ и r от $C_0(E)$	по 3 балла
3. Расчёт K_M и максимальной скорости реакции <i>Если размерность величины не указана или указана неверно – штраф 1 балл</i>	по 3 балла
4. Указание на субстрат и продукт реакции, катализируемой алкогольдегидрогеназой	2 балла
Итого	20 баллов