

Задача 1. Аналитическая химия (9 баллов)

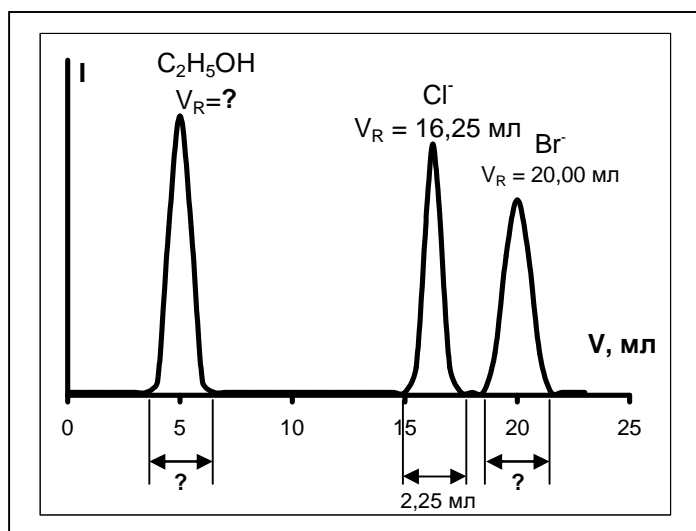
Автор – А.В.Гармаш

Хроматографическая колонка заполнена сильноосновным анионообменником в OH^- форме. Объем неподвижной фазы (ионит) $V_S = 10,00$ мл, объем подвижной фазы (жидкость между частицами ионита) $V_m = 5,00$ мл, удельная емкость колонки (*в расчете на 1 мл неподвижной фазы*) $S = 15,0$ мкмоль/мл.

1. Изобразите пример функциональной ионогенной группы, привитой к матрице ионита, которым заполнена эта колонка.



На вершину колонки поместили малый объем водного раствора, содержащего NaCl , NaBr и $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, после чего через колонку начали с постоянной скоростью пропускать $0,015$ М раствор NaOH . Ниже изображена хроматограмма исследуемой смеси в виде зависимости сигнала детектора (I) от *объема подвижной фазы*, пропущенной через колонку (V). Объем, соответствующий максимуму пика, называется *удерживаемым объемом* (V_R). *Масштаб на рисунке не выдержан.*



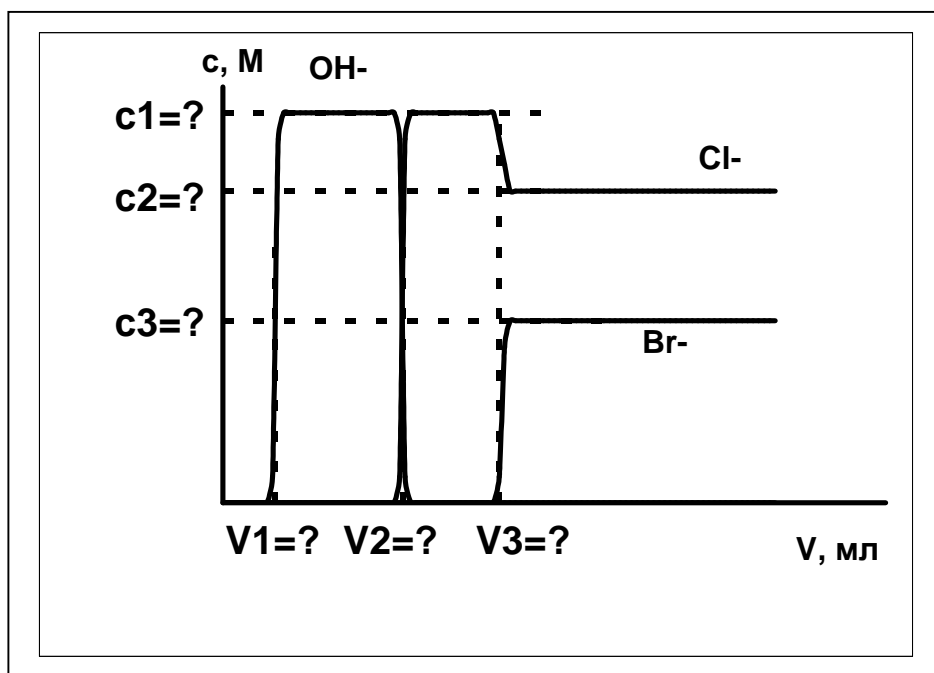
- а) Рассчитайте число теоретических тарелок колонки N .
- б) Чему равен удерживаемый объем этанола $V_R(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})$?
- в) Рассчитайте ширину (мл) пика этанола.
- г) Рассчитайте ширину (мл) пика Br^- .
- д) Рассчитайте фактор разделения $\alpha(\text{Br}^-/\text{Cl}^-)$.
- е) Чему будет равна ширина пика Cl^- (мл), если длину колонки увеличить в 3 раза?
- ж) Какую физическую величину I может измерять детектор хроматографа, чтобы зарегистрировать хроматограмму, изображенную выше на рисунке? Отметьте возможные варианты.

оптическую плотность

- электропроводность
- показатель преломления
- силу тока
- интенсивность люминесценции
- разность потенциалов

2. Можно показать, что фактор разделения α двух ионов (рассчитанный в п. 2, д) **равен константе равновесия ионного обмена с участием этих ионов**. Используя это утверждение, ответьте на следующие вопросы.

Колонку, характеристики которой указаны в условии задачи, промыли раствором NaOH, затем водой, а затем стали пропускать через нее с постоянной скоростью водный раствор, содержащий 0,010 М NaCl и 0,005 М NaBr. На рисунке приведены **выходные кривые** – зависимости концентраций ионов на выходе из колонки от **объема подвижной фазы**, пропущенной через колонку. **Масштаб на рисунке не выдержан**.



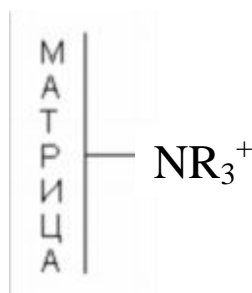
- а) Чему равно значение концентрации c_1 (М)?
- б) Чему равно значение концентрации c_2 (М)?
- в) Чему равно значение концентрации c_3 (М)?
- г) Чему равна концентрация бромид-иона $[RBr]$ в **фазе ионита** (моль/л ионита) в условиях равновесия с пропускаемым через колонку раствором?
- д) Чему равно значение объема V_1 (мл)?
- е) Чему равно значение объема V_2 (мл)?
- ж) Чему равно значение объема V_3 (мл)?
- з) Обозначим символом $K(X/Y)$ константу равновесия между ионитом в Y-форме и ионом X в растворе. Какие из утверждений справедливы по отношению к системе, рассматриваемой в задаче?

- 1. $K(OH/Cl) > 1$, $K(OH/Br) > 1$

2. $K(\text{OH}^-/\text{Cl}^-) < 1$, $K(\text{OH}^-/\text{Br}^-) > 1$
3. $K(\text{OH}^-/\text{Cl}^-) > 1$, $K(\text{OH}^-/\text{Br}^-) < 1$
4. $K(\text{OH}^-/\text{Cl}^-) < 1$, $K(\text{OH}^-/\text{Br}^-) < 1$
5. ни одно из утверждений 1-4 не противоречит условиям задачи

Решение

1.



- а) $N = 16(V_R/W)^2 = 16(16,25/2,25)^2 = 835$
- б) $V_R(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = V_m = \mathbf{5,00 \text{ мл}}$
- в) $N = 16(V_R/W)^2 \rightarrow W = 4V_R/N^{1/2} = 4 \cdot 5,0/835^{1/2} = 0,69 \text{ мл}$
- г) $W = 4V_R/N^{1/2} = 4 \cdot 20,0/835^{1/2} = 2,77 \text{ мл}$
- д) $\alpha = (V_R(\text{Br}^-) - V_R(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})) / (V_R(\text{Cl}^-) - V_R(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})) = (20,00 - 5,00) / (16,25 - 5,00) = 1,33$
- е) $V_R = 3 \cdot 16,25 = 48,75 \text{ мл}$
 $N = 3 \cdot 835 = 2505$
 $W = 4V_R/N^{1/2} = 4 \cdot 48,75/2505^{1/2} = 3,90 \text{ мл}$

ж) показатель преломления

2.

- а) $c_1 = [\text{Cl}^-] + [\text{Br}^-] = \mathbf{0,015 \text{ M}}$
- б) $c_2 = [\text{Cl}^-] = \mathbf{0,010 \text{ M}}$
- в) $c_3 = [\text{Br}^-] = \mathbf{0,005 \text{ M}}$
- г) $K(\text{Br}^-/\text{Cl}^-) = [\text{RBr}][\text{Cl}^-]/[\text{RCl}][\text{Br}^-] = \alpha(\text{Br}^-/\text{Cl}^-) = 1,33$
 $[\text{RBr}] + [\text{RCl}] = S = 15 \text{ мкмоль/мл} = 0,015 \text{ моль/л (ионита)} \rightarrow$
 $[\text{RBr}]/[\text{RCl}] = \alpha[\text{Br}^-]/[\text{Cl}^-] = 1,33 \cdot 0,005/0,010 = 0,665;$
 $[\text{RBr}] = 0,015/(1+1/0,665) = 0,006 \text{ M}$
- д) $V_1 = V_m = \mathbf{5,00 \text{ мл}}$
- е) $(V_2 - V_1)c_1 = SV_S \rightarrow V_2 = SV_S/c_1 + V_1 =$

$$= 15 \text{ (мкмоль/мл = ммоль/л)} \cdot 10,0 \text{ (мл)} / 0,015 \text{ (моль/л = ммоль/мл)} \cdot 0,001 \text{ (л/мл)} \\ + 5,00 \text{ (мл)} = \mathbf{15,00 \text{ (мл)}}$$

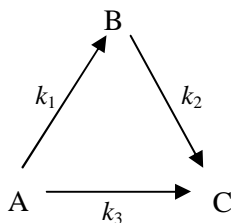
ж) $(V_3 - V_2)[\text{Br}^-] = V_5[\text{RBr}] \rightarrow$
 $V_3 = V_2 + V_5[\text{RBr}]/[\text{Br}^-] = 15,00 + 10,00 \cdot 0,006 / 0,005 = \mathbf{22,00 \text{ (мл)}}$

з) $K(\text{OH}/\text{Cl}) < 1, K(\text{OH}/\text{Br}^-) < 1$

Задача 2. Химическая кинетика (9 баллов)

Автор – А.С.Белов

Вещество А в водных растворах претерпевает следующие превращения:



Значения констант скорости при разных температурах приведены в таблице:

	20 °C	60 °C
$k_1, \text{M}\cdot\text{c}^{-1}$	$3.40 \cdot 10^{-2}$	0.244
k_2, c^{-1}	$1.85 \cdot 10^{-2}$	2.33
k_3, c^{-1}	$8.15 \cdot 10^{-3}$	0.799

В начальный момент времени в растворе присутствует только вещество А. $[A]_0 = 1.5 \text{ M}$.

1. Запишите кинетические уравнения для веществ А, В и С.
2. Постройте (качественно) графики зависимостей $[A]$ и $[B]$ от времени
3. Решение кинетического уравнения для вещества А имеет вид:

$$[A] = \left([A]_0 + \frac{k_1}{k_3} \right) \cdot e^{-k_3 t} - \frac{k_1}{k_3}.$$

Запишите зависимость периода полураспада вещества А от $[A]_0$.

Постройте (качественно) график зависимости $\tau_{1/2}(A)$ от $[A]_0$.

4. Определите кинетические параметры А и Е в уравнениях Аррениуса для k_1 , k_2 и k_3 .
5. Какой механизм реакции будет преобладающим в кипящем растворителе? Докажите расчетом скоростей реакций.
6. Скорость какой реакции будет наибольшей при температуре, близкой к температуре замерзания растворителя? Докажите расчетом.
7. Основываясь на ответах на вопросы 5 и 6, назовите:

Продукт термодинамического контроля

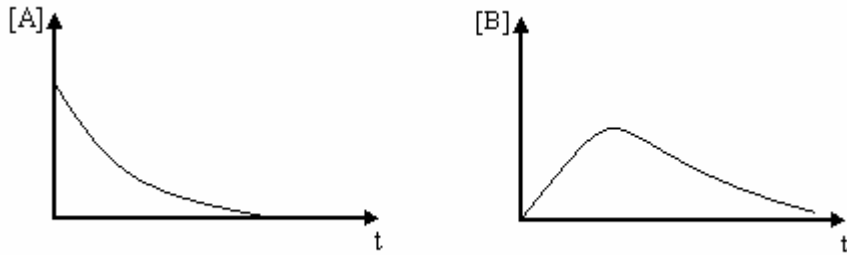
Продукт кинетического контроля

(Считайте все реакции термодинамически выгодными.)

Решение

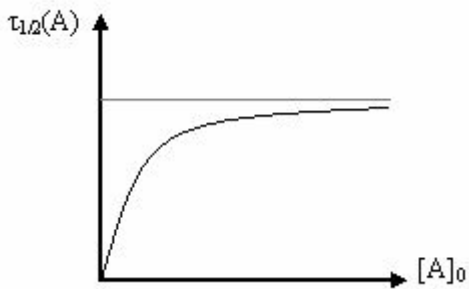
1. $\frac{d[A]}{dt} = -k_1 - k_3[A]$, $\frac{d[B]}{dt} = k_1 - k_2[B]$, $\frac{d[C]}{dt} = k_3[A] + k_2[B]$

2.



Концентрация А достигает нуля за **конечное** время.

$$3. \tau_{1/2}(A) = \frac{1}{k_3} \ln \frac{[A]_0 + \frac{k_1}{k_3}}{\frac{[A]_0}{2} + \frac{k_1}{k_3}}$$



4. $A_1 = 4.6 \cdot 10^5 \text{ M} \cdot \text{c}^{-1}$ $E_1 = 40 \text{ кДж/моль}$
 $A_2 = 5.5 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ $E_2 = 98 \text{ кДж/моль}$
 $A_3 = 3.1 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$ $E_3 = 93 \text{ кДж/моль}$
5. $r_1 = 1.15 \text{ M} \cdot \text{c}^{-1}$
 $r_2 = 104 \text{ c}^{-1} \cdot 1.5 \text{ M} = 156 \text{ M} \cdot \text{c}^{-1}$
 $r_3 = 29.3 \text{ c}^{-1} \cdot 1.5 \text{ M} = 44.0 \text{ M} \cdot \text{c}^{-1}$

Преобладающий механизм $A \rightarrow C$

6. $r_1 = 0.0102 \text{ M} \cdot \text{c}^{-1}$
 $r_2 = 0$
 $r_3 = 4.97 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1} \cdot 1.5 \text{ M} = 7.48 \cdot 10^{-4} \text{ M} \cdot \text{c}^{-1}$

Наибольшая скорость - r_1

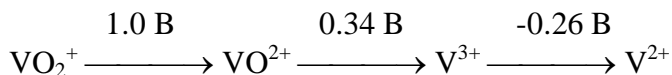
7. Продукт термодинамического контроля - **С**

Продукт кинетического контроля – **В**

Задача 3. Неорганическая химия (8 баллов)

Автор – А.А.Дроздов

(а) Используя диаграмму Латимера (рН = 0)



определите термодинамическую возможность окисления V^{2+} до VO^{2+} при рН = 2 хлоридом гидразина в растворе, если $E^0(\text{N}_2\text{H}_5^+/\text{NH}_4^+) = 1.27 \text{ В}$ (рН = 0). Ответ подтвердите расчетом ЭДС реакции и константы равновесия. Напишите уравнение реакции в ионной форме. Активности всех ионов, кроме H^+ , считайте равными 1.

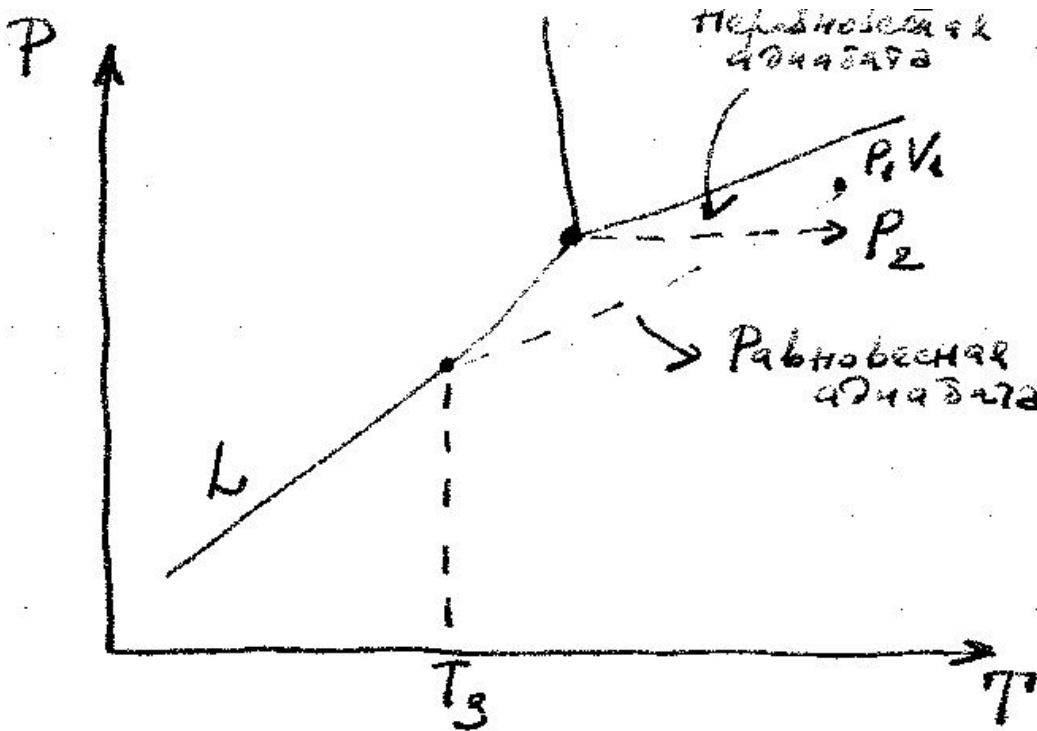
(б) Кристаллические вещества голубого **В** и сиреневого **С** цвета, полученные хлорированием сплава **А** двух металлов, обработали водой. При этом раствор **Д** окрасился в розовый цвет, а сиреневые кристаллы **С** остались нерастворившимися. Осадок **С** отделили от раствора и сплавляли с хлоратом и гидроксидом калия. При взаимодействии полученного при сплавлении вещества **Е** желтого цвета с 24%-ным раствором соляной кислоты образуются оранжево-красные кристаллы **Ф**. При нагревании кристаллов **С** в токе аммиака образуется черное вещество **Л**. Насыщением раствора **Д** аммиаком и хлоридом аммония в отсутствие окислителей получают раствор вещества **Г**. Если через раствор **Г** пропустить ток воздуха, то цвет раствора изменяется на малиновый, и при охлаждении выпадают такого же цвета кристаллы **Н**. Взаимодействие раствора **Г** с 30%-ным раствором пероксида водорода в присутствии активированного угля приводит к образованию желто-коричневых кристаллов **И**. При добавлении бромата калия и гидроксида калия к розовому раствору **Д** выпадает темно-коричневый осадок **К**. Напишите уравнения реакций, назовите неизвестные вещества.

Задача 4. Термодинамика (7 баллов)

Автор – М.В.Коробов

Вещество А существует в твердом, жидком и газообразном состоянии. В газообразном состоянии оно подчиняется уравнению Клапейрона-Менделеева.

- (1) Один моль идеального газа А при давлении $p_1 = 1.2$ атм и объеме $V_1 = 35$ литров расширяют неравновесно адиабатически против внешнего давления $p_2 = 0.9$ атм. Процесс заканчивается установлением равновесия в тройной точке.
- (2) Если из начального состояния газ расширяют адиабатически и равновесно, то такая адиабата пересекает линию L при температуре $T_3 = 230$ К.



- 1) Определите координаты тройной точки.
- 2) Определите работу неравновесного адиабатического сжатия газа в процессе, описанном в пункте (1).
- 3) Оцените энтальпию сублимации вещества А (в Дж/моль). Считайте, что $C_v = 3/2 R$.

Решение

Найдем температуру в начальной точке: $T_1 = 512.2$ К (по уравнению М-К).

Найдем конечную температуру неравновесного адиабатического расширения:

$$C_v (T_2 - T_1) = -p (V_2 - V_1); (C_v + R) T_2 = p_2 V_1 + C_v T_1; T_2 = (p_2 V_1 + C_v T_1) / (C_v + R)$$

$T_2 = 461$ К. Это и есть по условию тройная точка. Ее координаты: $T_2 = 461$ К, $p_2 = 0.9$ атм

Работа неравновесного изотермического процесса:

$$C_v (T_2 - T_1) = -639 \text{ Дж.}$$

Найдем давление на равновесной адиабате при температуре T_3 :

$$p_3 = (T_3/T_1)^{5/2} * p_1 = 0.16 \text{ атм.}$$

Тройная точка и точка (3) лежат на линии равновесия твердое – пар, поэтому

$$\ln (p_2/p_3) = - \Delta H/R (1/T_2 - 1/T_3); \text{ откуда } \Delta H = 6.5 \text{ кДж/моль.}$$

Ответы:

Координаты тройной точки : $T_2 = 461\text{К}$, $p_2 = 0.9 \text{ атм}$

Работа неравновесного изотермического процесса: $W = -639 \text{ Дж.}$

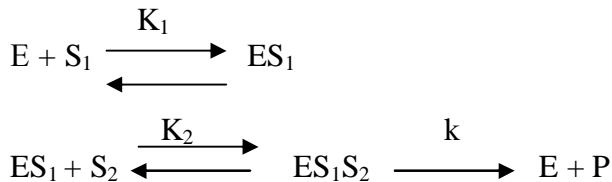
Энтальпия сублимации A , $\Delta H = 6.5 \text{ кДж/моль}$

Задача 5. Биохимия (9 баллов)

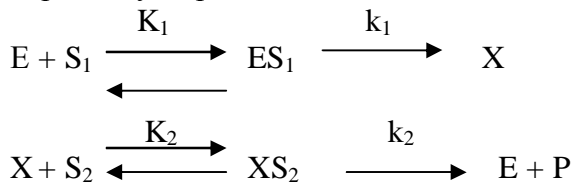
Автор – А.К.Гладилин

I. Ферменты часто катализируют двухсубстратные реакции. Такие ферментативные процессы могут протекать по одному из двух приведенных ниже механизмов:

а) механизму упорядоченного образования тройного комплекса:



б) механизму пинг-понг, заключающемуся в том, что второй субстрат взаимодействует с ферментом, который претерпел некое необратимое изменение в результате взаимодействия с первым субстратом:



где E - фермент, ES_1 - комплекс фермента с первым субстратом, ES_1S_2 - тройной комплекс, X - необратимо измененный фермент, XS_2 - комплекс необратимо измененного фермента со вторым субстратом, P - продукт, K_1 и K_2 - константы диссоциации соответствующих комплексов, k, k_1 и k_2 - константы скоростей соответствующих стадий.

I-1. Выведите выражение для стационарной скорости реакции, протекающей по механизму упорядоченного образования тройного комплекса, в предположении, что начальные концентрации субстратов много больше начальной концентрации фермента ($S_{1,0}$ и $S_{2,0} \gg E_0$), а все равновесия в системе установились.

I-2. Выведите выражение для стационарной скорости реакции, протекающей по механизму пинг-понг, в предположении, что начальные концентрации субстратов много больше начальной концентрации фермента ($S_{1,0}$ и $S_{2,0} \gg E_0$), а все равновесия в системе установились. Примите также, что в системе выполняется условие стационарности по X и XS_2 .

Дискриминацию механизмов двухсубстратных ферментативных реакций проводят, анализируя экспериментальные данные в двойных обратных координатах. Для этого изучают зависимость обратной скорости от обратной концентрации одного из субстратов при постоянной концентрации другого субстрата.

I-3. Запишите уравнение зависимости обратной скорости реакции, протекающей по механизму упорядоченного образования тройного комплекса, от обратных концентраций субстратов.

I-4. Запишите уравнение зависимости обратной скорости реакции, протекающей по механизму пинг-понг, от обратных концентраций субстратов.

I-5. Для реакции, протекающей по механизму упорядоченного образования тройного комплекса, изобразите схематически зависимости

А) обратной скорости от обратной концентрации S_1 при трех различных постоянных концентрациях S_2 , равных с, 2с и 3с (здесь и далее на графике укажите, какой постоянной концентрации субстрата какая зависимость соответствует).

Б) обратной скорости от обратной концентрации S_2 при трех различных постоянных концентрациях S_1 , равных с, 2с и 3с.

I-6. Для реакции, протекающей по механизму пинг-понг, изобразите схематически зависимости

А) обратной скорости от обратной концентрации S_1 при трех различных постоянных концентрациях S_2 , равных c , $2c$ и $3c$.

Б) обратной скорости от обратной концентрации S_2 при трех различных постоянных концентрациях S_1 , равных c , $2c$ и $3c$.

I-7. Для обоих механизмов выведите выражение для наблюдаемой каталитической константы $k_{\text{кат}}$ (равной V_{max}/E_0) при насыщающих концентрациях обоих субстратов ($S_{1,0}, S_{2,0} \gg K_1, K_2$).

II. Бутлеров и Лев предложили метод синтеза сахаров, заключающийся в образовании в щелочной среде полуацетальной связи между альдегидной группой одного соединения и гидроксильной группой другого соединения. Пусть в качестве исходных реагентов в среде присутствуют дигидроксиацетон и гликолевый альдегид. Рассмотрим образующуюся смесь гептулоз с кето-группой в положении 2 в следующих случаях:

А) Образование полуацетальной связи идет полностью нестереоспецифично.

II-1. Сколько стереоизомеров гептулоз образуется в данном случае?

II-2. Сколько диастериомерных пар энантиомеров образуется в данном случае?

Б) образуются только трео-формы продуктов относительно полуацетальной связи.

II-3. Сколько стереоизомеров гептулоз образуется в данном случае?

II-4. Сколько диастериомерных пар энантиомеров образуется в данном случае?

Задача 6. Органическая химия (9 баллов)

Автор – А.В.Чепраков

Простое производное этилена **A** с брутто-формулой $C_{10}H_{24}N_4$ обладает рядом совершенно необычных свойств.

Имеет единственный сигнал (узкий синглет) в ПМР спектре.

*На влажном воздухе **A** светится ярким сине-зеленым светом (хемилюминесцирует), а после затухания свечения в остатке обнаруживается тетраметилмочевина. В отсутствие воздуха **A** медленно реагирует с водой с выделением водорода.*

A реагирует с нитратом серебра с выделением металлического серебра и образованием соли состава $A(NO_3)_2$.

A реагирует с бромом с образованием соли **X**.

Большинство органических соединений реагирует с фтором даже при низких температурах очень бурно и неселективно с образованием множества продуктов полифторирования и разложения. Но **A** в растворе ацетонитрила реагирует с фтором легко и дает единственный продукт. При добавлении в этот раствор после завершения реакции с фтором бромистого метила образуется соль **X** и фтористый метил.

A реагирует с другим производным этилена **C** (брутто-формула C_6N_4) с образованием соли состава AC_2 .

***A** реагирует с фуллереном C_{60} с образованием одного из немногих известных органических ферромагнетиков.*

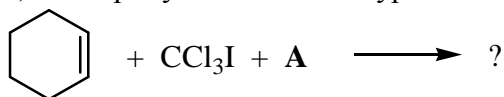
Вопросы:

- Какова структура соединения **A**?
- Напишите уравнения всех упомянутых реакций. *Внимание: предложения, набранные курсивом, даны только для информации и не требуют отражения в ответах.*
- Изобразите структуру катиона в соли **X** с помощью проекции Ньюмена. В чем причина легкого образования этого катиона?

Для синтеза новых лекарственных препаратов в молекулы органических соединений часто вводят трифторметильные группы. Но и литийорганические соединения, и реактивы Гриньяра с полифторированными группами типа CF_3Li или CF_3MgBr неустойчивы. Из этого тупика есть выход. Было найдено, что смесь **A** и CF_3I можно успешно использовать в синтезе как заменитель этих металлоорганических реагентов.

Вопросы:

- напишите уравнение реакции бензальдегида со смесью **A** и CF_3I
- и попробуйте закончить уравнение реакции:



Задача 7. Квантовая химия (9 баллов)

Автор – В.В.Еремин

Молекула вещества X содержит 10 π -электронов. Для описания ее электронных свойств можно использовать модель двумерного потенциального ящика с размерами 0.8 нм \times 0.4 нм.

1) Изобразите диаграмму заполненных энергетических уровней с указанием квантовых чисел n_x, n_y .

2) В основном электронном состоянии молекула X

парамагнитна

диамагнитна

Обведите правильное утверждение

3) Рассчитайте максимальную длину волны света (нм), который может привести к переходу X из основного электронного состояния в возбужденное.

4) Сколько максимумов имеет плотность вероятности в высшей(их) заполненной(ых) орбитали(ях)?

Введем координаты следующим образом: $0 \leq x \leq 0.8$ нм, $0 \leq y \leq 0.4$ нм.

5) Что собой представляют узлы волновой(ых) функции(й) высшей(их) заполненной(ых) орбитали(ей)? Опишите их форму и приведите соответствующие уравнения.

6) Изобразите (качественно) сечения волновой функции низшей вакантной орбитали вдоль линий: а) $y = 0.1$ нм; б) $y = 0.2$ нм.

7) Рассчитайте дисперсии скорости электрона ($v = p / m$) по координатам x и y на низшей из всех занятых орбиталей:

Справочные данные:

Масса электрона 9.11×10^{-31} кг

$$\Delta E = hc / \lambda$$

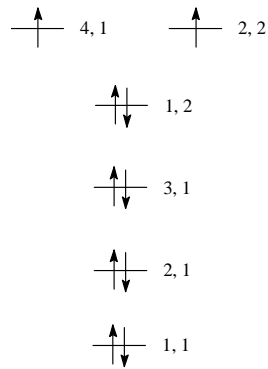
$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Для одномерного ящика длиной l : $E_n = \frac{h^2 n^2}{8ml^2}$, $\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi n x}{l}\right)$, $n = 1, 2, \dots$

Решение

1):

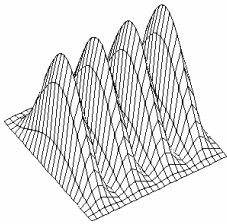


2) Молекула парамагнитна

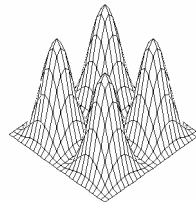
$$3) \Delta E = E_{3,2} - E_{2,2} = \frac{h^2}{8ml_x^2} (3^2 - 2^2) = \frac{(6.63 \cdot 10^{-34})^2 \cdot 5}{8 \cdot 9.11 \cdot 10^{-31} \cdot (0.8 \cdot 10^{-9})^2} = 4.71 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{4.71 \cdot 10^{-19}} = 4.22 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 422 \text{ нм}$$

4)



– 4 максимума,

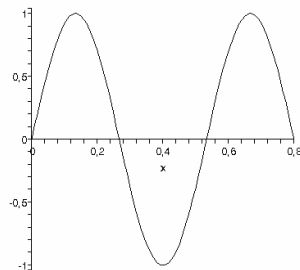


– 4 максимума

5) Орбиталь (4, 1) – 3 линии: $x = 0.2, x = 0.4, x = 0.6$.
 Орбиталь (2, 2) – 2 линии: $x = 0.4, y = 0.2$.

6) Низшая вакантная орбиталь – (3,2): $\Psi_{3,2}(x, y) \sim \sin\left(\frac{3\pi x}{0.8}\right) \sin\left(\frac{2\pi y}{0.4}\right)$

$$\Psi_{3,2}(x, y = 0.1) \sim \sin\left(\frac{3\pi x}{0.8}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{3\pi x}{0.8}\right)$$



$$\Psi_{3,2}(x, y = 0.2) \sim \sin\left(\frac{3\pi x}{0.8}\right) \sin(\pi) = 0 \text{ – это узел.}$$

$$7) \langle v_x \rangle = -\frac{i\hbar}{m} \int_0^{l_x} \Psi(x) \Psi'(x) dx = -i\hbar \Psi(x)^2 \Big|_0^{l_x} = 0.$$

Вклад каждой координаты в полную энергию равен кинетической энергии по данной коор-

динате: $E_{n_x} = \frac{h^2 n_x^2}{8ml_x^2} = \frac{m \langle v_x^2 \rangle}{2}$, откуда $\langle v_x^2 \rangle = \frac{h^2 n_x^2}{4m^2 l_x^2}$.

$$\Delta v_x = \left(\langle v_x^2 \rangle - \langle v_x \rangle^2 \right)^{1/2} = \frac{hn_x}{2ml_x}$$

Для низшей по энергии орбитали $n_x = 1$,

$$\Delta v_x = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 1}{2 \cdot 9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 0.8 \cdot 10^{-9}} = 4.55 \cdot 10^5 \text{ м/с} = 455 \text{ км/с}$$

Аналогично, для $n_y = 1$,

$$\Delta v_y = \frac{hn_y}{2ml_y} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 1}{2 \cdot 9.11 \cdot 10^{-31} \cdot 0.4 \cdot 10^{-9}} = 9.10 \cdot 10^5 \text{ м/с} = 910 \text{ км/с}$$