

IChO 1970

Теоретические задачи и решения · Будапешт, Венгрия · 6 теоретических задач с полными решениями

eulersolve.org/icho/1970/

Задача 1: Строение газа по продуктам его сгорания

При сгорании 23 г газа (плотность $\rho = 2.05 \text{ g dm}^{-3}$ при нормальных условиях) образуются 44 г углекислого газа и 27 г воды.

Вопрос:

Какова структурная формула газа (соединения)?

Условие переведено с официального английского текста.

Ответы

1. Диметиловый эфир (метоксиметан), $\text{CH}_3\text{—O—CH}_3$, с молекулярной формулой $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$. SMILES: `COC`.

Решение

1. Определим состав и молекулярную формулу.

Продукты сгорания — углекислый газ ($\text{O}=\text{C}=\text{O}$) и вода (O). Используя общепринятые значения атомных масс 12, 1 и 16 для углерода, водорода и кислорода, получаем:

$$n(\text{CO}_2) = \frac{44 \text{ g}}{44 \text{ g mol}^{-1}} = 1.0 \text{ mol},$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{27 \text{ g}}{18 \text{ g mol}^{-1}} = 1.5 \text{ mol}.$$

Таким образом, образец содержит 1.0 mol атомов углерода и $2(1.5) = 3.0 \text{ mol}$ атомов водорода, что соответствует 12 g углерода и 3 g водорода.

Оставшаяся масса приходится на кислород:

$$m_{\text{O}} = 23 - 12 - 3 = 8 \text{ g}, \quad n_{\text{O}} = \frac{8 \text{ g}}{16 \text{ g mol}^{-1}} = 0.50 \text{ mol}.$$

Следовательно, соотношение числа атомов равно

$$n_{\text{C}} : n_{\text{H}} : n_{\text{O}} = 1.0 : 3.0 : 0.50 = 2 : 6 : 1,$$

что даёт простейшую формулу $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, которой соответствует молярная масса 46 g mol^{-1} .

Используя молярный объём идеального газа при общепринятых нормальных условиях, $V_m = 22.4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}$, получаем

$$M = \rho V_m = (2.05 \text{ g dm}^{-3})(22.4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}) = 45.9 \text{ g mol}^{-1}.$$

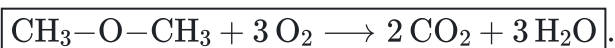
Это значение согласуется с молярной массой, соответствующей простейшей формуле, поэтому молекулярная формула — $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$.

Существуют два структурных изомера:

- **Диметиловый эфир**, $\text{CH}_3\text{—O—CH}_3$, SMILES сос.
- **Этанол**, $\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—OH}$, SMILES ссо.

Диметиловый эфир при нормальных условиях является газом, тогда как этанол — жидкостью. Следовательно, указанное газообразное состояние позволяет определить, что это **диметиловый эфир**, атом кислорода в котором связан с двумя метильными группами.

Уравнение его сгорания в молекулярном кислороде ($\text{O}=\text{O}$) с расставленными коэффициентами имеет вид



Действительно, 23 g диметилового эфира составляют 0.50 mol, при сгорании которых образуются 1.0 mol (44 g) углекислого газа и 1.5 mol (27 g) воды.

Решение проверено по официальному решению.

Задача 2: Кристаллизационная вода в двух образцах кристаллической соды

Образец кристаллической соды (А) массой 1.287 г обработали избытком соляной кислоты; при этом выделилось 100.8 cm^3 газа (объём измерен при нормальных условиях).

Другой образец иной кристаллической соды (В) массой 0.715 г разложили действием 50 cm^3 0.2 н. серной кислоты.

После полного разложения соды избыток серной кислоты нейтрализовали, на что потребовалось 50 cm^3 0.1 н. раствора гидроксида натрия (при титровании с индикатором метиловым оранжевым).

Вопросы:

2.1 Сколько молекул воды приходится на одну молекулу Na_2CO_3 в первом образце соды?

2.2 Одинаков ли состав обоих образцов соды?

Относительные атомные массы: $A_r(\text{Na}) = 23$; $A_r(\text{H}) = 1$; $A_r(\text{C}) = 12$; $A_r(\text{O}) = 16$.

Условие переведено с официального английского текста.

Ответы

- **2.1** Образец А содержит **10 молекул воды** (SMILES o) на одну формульную единицу Na_2CO_3 . Это **декагидрат карбоната натрия**, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$; SMILES компонентов: $[\text{Na}+] \cdot [\text{Na}+] \cdot [\text{O}-]\text{C}(=\text{O})[\text{O}-] \cdot \text{O} \cdot \text{O} \cdot \text{O} \cdot \text{O} \cdot \text{O} \cdot \text{O} \cdot \text{O} \cdot \text{O} \cdot \text{O} \cdot \text{O}$.
- **2.2 Да.** Оба образца имеют состав $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$.

SMILES гидрата указывает входящие в его состав ионы и молекулы воды; он не отражает их расположение в кристаллической решётке.

Решение

2.1

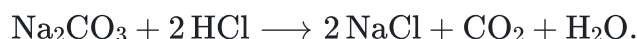
Запишем состав образца А как $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$. Из приведённых атомных масс получаем

$$\begin{aligned} M(\text{Na}_2\text{CO}_3) &= 2(23) + 12 + 3(16) = 106 \text{ g mol}^{-1}, \\ M(\text{H}_2\text{O}) &= 2(1) + 16 = 18 \text{ g mol}^{-1}. \end{aligned}$$

Таким образом, молярная масса гидрата равна

$$M_A = (106 + 18x) \text{ g mol}^{-1}.$$

Карбонатная составляющая реагирует с соляной кислотой согласно уравнению



Кристаллизационная вода переходит в раствор. Выделяющийся газ — **диоксид углерода**, причём из одного моля гидрата образуется один моль CO_2 .

Используя общепринятое значение молярного объёма газа при нормальных условиях, $22.4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}$, получаем

$$n(\text{CO}_2) = \frac{0.1008 \text{ dm}^3}{22.4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}} = 4.50 \times 10^{-3} \text{ mol}.$$

Следовательно,

$$M_A = \frac{1.287 \text{ g}}{4.50 \times 10^{-3} \text{ mol}} = 286 \text{ g mol}^{-1},$$

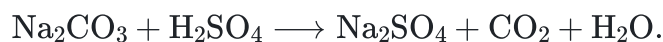
и

$$106 + 18x = 286 \implies \boxed{x = 10}.$$

Таким образом, образец А представляет собой $\boxed{\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}}$.

2.2

Карбонатная составляющая образца В реагирует с серной кислотой:



Затем избыток серной кислоты нейтрализуют:



Нормальность выражает количество эквивалентов реагирующего вещества в одном литре раствора. Исходное количество кислоты в эквивалентах составляло

$$E_{\text{initial}} = (0.2 \text{ eq L}^{-1})(0.050 \text{ L}) = 0.010 \text{ eq.}$$

По расходу раствора гидроксида натрия при титровании определяем количество оставшейся кислоты:

$$E_{\text{excess}} = (0.1 \text{ eq L}^{-1})(0.050 \text{ L}) = 0.0050 \text{ eq.}$$

Таким образом, образец В израсходовал

$$E_B = 0.010 - 0.0050 = 0.0050 \text{ eq.}$$

Каждый моль карбоната натрия расходует два эквивалента кислоты, поэтому

$$n_B(\text{Na}_2\text{CO}_3) = \frac{0.0050 \text{ eq}}{2 \text{ eq mol}^{-1}} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ mol.}$$

Записав состав образца В как $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot y \text{H}_2\text{O}$, получаем его молярную массу:

$$M_B = \frac{0.715 \text{ g}}{2.5 \times 10^{-3} \text{ mol}} = 286 \text{ g mol}^{-1}.$$

Отсюда

$$y = \frac{286 - 106}{18} = 10.$$

Следовательно, **оба образца имеют одинаковый состав**, $\boxed{\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}}$.

Названия и SMILES остальных веществ, участвующих в реакциях:

Вещество	Формула	SMILES
Карбонат натрия	Na_2CO_3	<chem>[Na+] . [Na+] . [O-]C(=O)[O-]</chem>
Хлороводород, используемый в виде водного раствора — соляной кислоты	HCl	<chem>Cl</chem>
Хлорид натрия	NaCl	<chem>[Na+] . [Cl-]</chem>
Диоксид углерода	CO_2	<chem>O=C=O</chem>
Вода	H_2O	<chem>O</chem>
Серная кислота	H_2SO_4	<chem>OS(=O)(=O)O</chem>
Сульфат натрия	Na_2SO_4	<chem>[Na+] . [Na+] . [O-]S(=O)(=O)[O-]</chem>
Гидроксид натрия	NaOH	<chem>[Na+] . [OH-]</chem>

Решение проверено по официальному решению.

Задача 3: Равновесная смесь, полученная из монооксида углерода и водяного пара

Монооксид углерода смешали с водяным паром, объём которого в 1.5 раза превышал объём монооксида углерода. Каков будет состав (в массовых и объёмных %) газовой смеси в состоянии равновесия, если 80 % монооксида углерода превращается в диоксид углерода?

Условие переведено с официального английского текста.

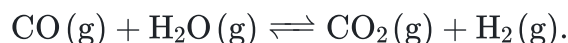
Ответы

- **Задача 3:** Равновесная смесь имеет следующий состав с учётом оставшегося водяного пара:

Компонент	Массовые %	Объёмные %
Монооксид углерода, CO, [C-]#[O+]	10.2	8.0
Водяной пар, H ₂ O, o	22.9	28.0
Диоксид углерода, CO ₂ , o=C=O	64.0	32.0
Водород, H ₂ , [H][H]	2.9	32.0
Итого	100.0	100.0

Решение

Уравнение равновесной реакции с расставленными коэффициентами имеет вид



При одинаковых температуре и давлении объёмы идеальных газов пропорциональны количествам вещества в молях. Принимая начальный объём водяного пара равным 1.5 объёма монооксида углерода, выберем для расчёта следующие начальные количества вещества:

$$n_0(\text{CO}) = 1.00 \text{ mol}, \quad n_0(\text{H}_2\text{O}) = 1.50 \text{ mol}.$$

Поскольку в реакцию вступает 80% монооксида углерода, израсходованное количество вещества составляет

$$n_{\text{reacted}}(\text{CO}) = 0.80(1.00 \text{ mol}) = 0.80 \text{ mol}.$$

В ходе реакции расходуется такое же количество вещества воды и образуется по 0.80 mol диоксида углерода и водорода.

Используем общепринятые значения молярных масс 28, 18, 44, 2 g mol⁻¹ соответственно:

Вещество	Начальное количество вещества / моль	Изменение / моль	Равновесное количество вещества / моль	Масса в состоянии равновесия / г
CO	1.00	-0.80	0.20	5.60
H ₂ O	1.50	-0.80	0.70	12.60

Вещество	Начальное количество вещества / моль	Изменение / моль	Равновесное количество вещества / моль	Масса в состоянии равновесия / г
CO ₂	0	+0.80	0.80	35.20
H ₂	0	+0.80	0.80	1.60
Итого	2.50	0	2.50	55.00

Массовые доли в процентах рассчитываются по формуле

$$\text{Массовая доля в процентах компонента } i = \frac{m_i}{55.00 \text{ g}} \times 100\%.$$

Таким образом, в порядке CO, H₂O, CO₂, H₂,

$$\frac{(5.60, 12.60, 35.20, 1.60)}{55.00} \times 100\% \approx (10.2, 22.9, 64.0, 2.9)\%.$$

Объёмные доли в процентах равны мольным долям в процентах:

$$\text{Объёмная доля в процентах компонента } i = \frac{n_i}{2.50 \text{ mol}} \times 100\%.$$

Следовательно, в том же порядке,

$$\frac{(0.20, 0.70, 0.80, 0.80)}{2.50} \times 100\% = (8.0, 28.0, 32.0, 32.0)\%.$$

Решение проверено по официальному решению.

Задача 4: Сплав рубидия с другим щелочным металлом

Сплав состоит из рубидия и одного из других щелочных металлов. При взаимодействии образца сплава массой 4.6 г с водой выделяется 2.241 дм³ водорода при нормальных условиях.

Вопросы:

4.1 Какой щелочной металл входит в состав сплава?

4.2 Каков состав сплава в массовых процентах?

Относительные атомные массы:

$$A_r(\text{Li}) = 7; \quad A_r(\text{Na}) = 23; \quad A_r(\text{K}) = 39; \quad A_r(\text{Rb}) = 85.5; \quad A_r(\text{Cs}) = 133$$

Условие переведено с официального английского текста.

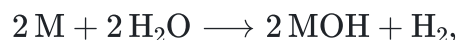
Ответы

- **4.1:** Литий, Li.
- **4.2:** Приблизительно **24.2% лития** и **75.8% рубидия** по массе.

Решение

4.1 — Определение второго металла

Все щелочные металлы реагируют с водой согласно уравнению



где M обозначает щелочной металл. Таким образом, из двух молей атомов металла образуется один моль водорода.

Используя общепринятое значение молярного объёма при нормальных условиях

$V_m \approx 22.4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}$, получаем

$$n(H_2) = \frac{2.241 \text{ dm}^3}{22.4 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}} = 0.10004 \text{ mol}.$$

Следовательно, суммарное количество вещества металлов равно

$$n_{\text{металлов}} = 2n(H_2) = 0.20009 \text{ mol}.$$

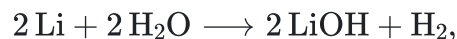
Средняя молярная масса атомов металлов в сплаве равна

$$\overline{M} = \frac{4.6 \text{ g}}{0.20009 \text{ mol}} \approx 22.99 \text{ g mol}^{-1}.$$

Это среднее значение молярных масс двух металлов, взвешенное по их мольным долям.

Молярная масса рубидия составляет 85.5 g mol^{-1} , поэтому молярная масса другого металла должна быть **меньше** 22.99 g mol^{-1} . Из перечисленных щелочных металлов этому условию удовлетворяет только **литий**, для которого $M = 7 \text{ g mol}^{-1}$.

Уравнения реакций:



Молекулярные вещества — вода O и водород $[\text{H}][\text{H}]$. Продукты реакций — гидроксид лития $[\text{Li}^+][\text{OH}^-]$ и гидроксид рубидия $[\text{Rb}^+][\text{OH}^-]$, находящиеся в воде в виде ионов в результате диссоциации.

4.2 — Массовый состав

Пусть x — масса лития. Масса рубидия равна $4.6 \text{ g} - x$. Из суммарного количества вещества металлов получаем

$$\frac{x}{7 \text{ g mol}^{-1}} + \frac{4.6 \text{ g} - x}{85.5 \text{ g mol}^{-1}} = 0.200089 \text{ mol}.$$

Решая уравнение и сохраняя дополнительные значащие цифры в промежуточных вычислениях, получаем

$$m(\text{Li}) = 1.11533 \text{ g}, \quad m(\text{Rb}) = 3.48467 \text{ g}.$$

Следовательно, массовые доли в процентах равны

$$w(\text{Li}) = \frac{1.11533}{4.6} \times 100\% \approx \boxed{24.2\%},$$

$$w(\text{Rb}) = \frac{3.48467}{4.6} \times 100\% \approx \boxed{75.8\%}.$$

Решение проверено по официальному решению.

Задача 5: Кристаллизация пентагидрата сульфата меди(II)

20 г оксида меди(II) обработали стехиометрическим количеством тёплого 20%-ного раствора серной кислоты, получив раствор сульфата меди(II).

Задача:

Сколько граммов кристаллического сульфата меди(II) ($\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$) выкристаллизовалось при охлаждении раствора до 20°C ?

Относительные атомные массы: $A_r(\text{Cu}) = 63.5$; $A_r(\text{S}) = 32$; $A_r(\text{O}) = 16$; $A_r(\text{H}) = 1$

Растворимость CuSO_4 при 20°C : $s = 20.9$ г CuSO_4 в 100 г H_2O .

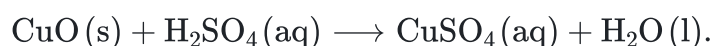
Условие переведено с официального английского текста.

Ответы

- **Задача 5:** Выкристаллизовывается $\boxed{32.9 \text{ g}}$ пентагидрата сульфата меди(II), $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$. SMILES: [Cu+2].[O-]S(=O)(=O)[O-].O.O.O.O.O.

Решение

Оксид меди(II) ([Cu+2].[O-2]) реагирует с серной кислотой (OS(=O)(=O)O) с образованием сульфата меди(II) ([Cu+2].[O-]S(=O)(=O)[O-]) и воды (O):



Записи SMILES для ионных соединений задают состав формульных единиц; они не кодируют кристаллические решётки или координационную геометрию.

Используя заданные атомные массы, получаем следующие молярные массы:

$$M(\text{CuO}) = 79.5 \text{ g mol}^{-1},$$

$$M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98 \text{ g mol}^{-1},$$

$$M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g mol}^{-1},$$

$$M(\text{CuSO}_4) = 159.5 \text{ g mol}^{-1},$$

$$M(\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}) = 159.5 + 5(18) = 249.5 \text{ g mol}^{-1}.$$

Количество вещества оксида меди(II) составляет

$$n = \frac{20 \text{ g}}{79.5 \text{ g mol}^{-1}} = 0.251572 \text{ mol}.$$

В реакции расходуется такое же количество вещества серной кислоты и образуется по такому же количеству вещества сульфата меди(II) и воды. Таким образом,

$$m(\text{H}_2\text{SO}_4) = 0.251572(98) = 24.6541 \text{ g},$$

$$m(\text{CuSO}_4) = 0.251572(159.5) = 40.1258 \text{ g},$$

$$m(\text{вода, образовавшаяся в реакции}) = 0.251572(18) = 4.52830 \text{ g}.$$

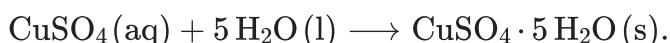
Массовая доля серной кислоты в растворе составляет 20%, поэтому масса раствора равна

$$m(\text{раствор кислоты}) = \frac{24.6541}{0.20} = 123.2704 \text{ g}.$$

Общая масса воды после реакции включает как воду, внесённую с раствором кислоты, так и образовавшуюся воду:

$$m_{\text{water},0} = 0.80(123.2704) + 4.52830 = 103.1447 \text{ g}.$$

При охлаждении образуются кристаллы пентагидрата:



При кристаллизации из раствора удаляются как растворённая соль, так и вода. Пусть x — масса кристаллов пентагидрата. Эти кристаллы содержат

$$\frac{159.5}{249.5}x \text{ соли } \text{CuSO}_4, \quad \frac{90}{249.5}x \text{ воды } \text{H}_2\text{O}.$$

Оставшийся раствор насыщен при 20 °C, поэтому

$$\frac{40.1258 \text{ g} - \frac{159.5}{249.5}x}{103.1447 \text{ g} - \frac{90}{249.5}x} = \frac{20.9}{100}.$$

Следовательно,

$$x = \frac{40.1258 - 0.209(103.1447)}{\frac{159.5}{249.5} - 0.209 \frac{90}{249.5}} \text{ g} = 32.9295 \text{ g}.$$

Таким образом, масса выкристаллизовавшегося вещества составляет

$$m(\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}) = 32.9 \text{ g}.$$

Решение проверено по официальному решению.

Задача 6: Два оксида одного и того же металла

Оксид некоторого металла содержит 22.55 % кислорода по массе. Другой оксид того же металла содержит 50.48 масс. % кислорода.

Задача:

1. Какова относительная атомная масса металла?

Условие переведено с официального английского текста.

Ответы

1. Относительная атомная масса составляет приблизительно **55** ($A_r \approx 54.94$). Этот металл — **марганец**, Mn. Относительная атомная масса — безразмерная величина.

Решение

1.

Пусть относительная атомная масса металла равна A , а его степени окисления в двух оксидах равны n_1 и n_2 . Принимая $A_r(\text{O}) = 16.00$ и учитывая, что степень окисления кислорода равна -2 , получаем

$$\frac{m(\text{кислорода})}{m(\text{металла})} = \frac{8n}{A}.$$

Таким образом, отношения массы кислорода к массе металла равны

$$\frac{8n_1}{A} = \frac{22.55}{77.45}, \quad \frac{8n_2}{A} = \frac{50.48}{49.52}.$$

Деление позволяет исключить A :

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{50.48/49.52}{22.55/77.45} = 3.50117 \approx \frac{7}{2}.$$

Наименьшие целочисленные степени окисления, соответствующие этому отношению, — $+2$ и $+7$. Большие пропорциональные пары потребовали бы химически неправдоподобных степеней окисления для этих обычных оксидов металла. Таким образом, формулы оксидов — MO и M_2O_7 .

Для первого оксида

$$\frac{16.00}{A + 16.00} = 0.2255,$$

поэтому

$$A = 16.00 \frac{77.45}{22.55} = 54.95.$$

Независимый расчёт для второго оксида даёт

$$\frac{7(16.00)}{2A + 7(16.00)} = 0.5048,$$

откуда

$$A = \frac{7(16.00)}{2} \frac{49.52}{50.48} = 54.94.$$

Эти результаты согласуются в пределах округления приведённых процентных содержаний и позволяют установить, что металл — **марганец**, для которого

$$A_r(\text{Mn}) \approx 54.94 \approx 55.$$

Эти оксиды:

- **Оксид марганца(II)**, MnO : SMILES ионной формульной единицы $[\text{Mn}^{+2}] \cdot [\text{O}^{-2}]$. В твёрдом состоянии он образует протяжённую ионную решётку; эта запись не представляет отдельную молекулу.
- **Оксид марганца(VII)**, Mn_2O_7 : SMILES $\text{O}=[\text{Mn}](=\text{O})(=\text{O})\text{O}[\text{Mn}](=\text{O})(=\text{O})=\text{O}$. Мостиковый атом кислорода соединяет два центра марганца с приблизительно тетраэдрической координацией.

Для проверки: при $A = 54.94$ содержание кислорода составляет 22.5543% и 50.4777%, что после округления даёт указанные значения.

Решение проверено по официальному решению.