

Межрегиональная олимпиада школьников
«БУДУЩИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛИ – БУДУЩЕЕ НАУКИ»
ФИНАЛЬНЫЙ ТУР 2021/22

Время выполнения – 180 минут

9 класс

Задача 9-1

Живые организмы в течение длительной эволюции приспособились к различным условиям существования. Одним из самых интересных и наименее исследованных на данный момент остается водный мир. В воде присутствуют те же газы, что и в воздухе, но в другом соотношении. Растворимость газов в воде и их давление над раствором связаны между собой законом Генри: молярная концентрация растворенного газа прямо пропорциональна его парциальному давлению. Именно наличие растворенных газов в воде и позволяет существовать живым организмам в водной среде. Информация о растворимости основных компонентов воздуха в воде при парциальном давлении соответствующего газа 1 атм и температуре окружающей среды 0°C приведена ниже (указан объем газа в мл, который поглощается 1 л дистиллированной воды):

Газ	Растворимость
Азот	42
Аргон	102
Углекислый газ	1712
Кислород	53

1. Рассчитайте содержание углекислого газа в атмосфере (в мольных и массовых долях), если при нормальных условиях массовая доля растворенного углекислого газа составляет 0.0001%.

2. Предложите состав газовой смеси (в мольных долях), которая состоит из четырех основных компонентов воздуха, если при ее растворении в чистой воде образуется раствор, в котором массовые доли этих газов равны между собой.

Среднюю молярную массу воздуха считайте равной 29 г/моль.

Решение

1. Вычислим молярную концентрацию углекислого газа в насыщенном растворе.

$$C(CO_2) = \frac{n(CO_2)}{V_{(p-ра)}} = \frac{V(CO_2)/V_m}{V_{(p-ра)}} = \frac{1712 \cdot 10^{-3} \text{ л} / 22.4 \text{ л/моль}}{1 \text{ л}} = 0.0764 \text{ моль/л.}$$

Эта концентрация углекислого газа в растворе создается при его парциальном давлении 1 атм.

Молярная концентрация углекислого газа в рассматриваемом растворе:

$$C(CO_2) = \frac{\omega(CO_2) \cdot 10}{M(CO_2)} = \frac{(0.0001 \cdot 10) \text{ г/л}}{44 \text{ г/моль}} = 2.27 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л.}$$

Эта концентрация создается давлением $2.27 \cdot 10^{-5} / 0.0764 = 0.000297$ атм.

Мольная доля углекислого газа в атмосфере составляет:

$$\frac{0.000297 \text{ атм}}{1 \text{ атм}} = 0.000297 \text{ или } 0.0297\% .$$

Массовая доля углекислого газа в атмосфере составляет:

$$\frac{0.0297 \cdot 44 \text{ г/моль}}{29 \text{ г/моль}} = 0.00045 \text{ или } 0.045\% .$$

2. Вычислим молярную концентрацию каждого газа в насыщенном растворе.

$$C(N_2) = \frac{n(N_2)}{V_{(p-ра)}} = \frac{V(N_2)/V_m}{V_{(p-ра)}} = \frac{42 \cdot 10^{-3} \text{ л} / 22.4 \text{ л/моль}}{1 \text{ л}} = 0.00188 \text{ моль/л;}$$

$$C(Ar) = \frac{n(Ar)}{V_{(p-ра)}} = \frac{V(Ar)/V_m}{V_{(p-ра)}} = \frac{102 \cdot 10^{-3} \text{ л} / 22.4 \text{ л/моль}}{1 \text{ л}} = 0.00455 \text{ моль/л;}$$

$$C(CO_2) = \frac{n(CO_2)}{V_{(p-ра)}} = \frac{V(CO_2)/V_m}{V_{(p-ра)}} = \frac{1712 \cdot 10^{-3} \text{ л} / 22.4 \text{ л/моль}}{1 \text{ л}} = 0.0764 \text{ моль/л;}$$

$$C(O_2) = \frac{n(O_2)}{V_{(p-ра)}} = \frac{V(O_2)/V_m}{V_{(p-ра)}} = \frac{53 \cdot 10^{-3} \text{ л} / 22.4 \text{ л/моль}}{1 \text{ л}} = 0.00237 \text{ моль/л.}$$

Допустим, что в 1 л воды растворено по 0.001 г каждого газа. Найдем молярную концентрацию каждого газа в таком растворе.

$$C(N_2) = \frac{0.001 \text{ г}}{M(N_2) \cdot V_{(p-ра)}} = \frac{0.001 \text{ г}}{28 \text{ г/моль} \cdot 1 \text{ л}} = 3.57 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л;}$$

$$C(Ar) = \frac{0.001 \text{ г}}{M(Ar) \cdot V_{(p-ра)}} = \frac{0.001 \text{ г}}{40 \text{ г/моль} \cdot 1 \text{ л}} = 2.5 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л;}$$

$$C(CO_2) = \frac{0.001 \text{ г}}{M(CO_2) \cdot V_{(p-ра)}} = \frac{0.001 \text{ г}}{44 \text{ г/моль} \cdot 1 \text{ л}} = 2.27 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л;}$$

$$C(O_2) = \frac{0.001 \text{ г}}{M(O_2) \cdot V_{(p-ра)}} = \frac{0.001 \text{ г}}{32 \text{ г/моль} \cdot 1 \text{ л}} = 3.13 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л.}$$

Для создания такой концентрации газов необходимо следующее парциальное давление каждого газа:

$$p(N_2) = \frac{3.57 \cdot 10^{-5}}{0.00188} = 0.0190 \text{ атм;}$$

$$p(Ar) = \frac{2.5 \cdot 10^{-5}}{0.00455} = 0.0055 \text{ атм;}$$

$$p(CO_2) = \frac{2.27 \cdot 10^{-5}}{0.0764} = 0.0003 \text{ атм;}$$

$$p(O_2) = \frac{3.13 \cdot 10^{-5}}{0.00237} = 0.0132 \text{ атм;}$$

$$P_{\text{общ}} = 0.0190 + 0.0055 + 0.0003 + 0.0132 = 0.038.$$

Мольная доля каждого газа составляет:

$$\varphi(N_2) = \frac{0.0190}{0.038} = 0.5007; \quad \varphi(Ar) = \frac{0.0027}{0.038} = 0.1443;$$

$$\varphi(CO_2) = \frac{0.0003}{0.038} = 0.0078; \quad \varphi(O_2) = \frac{0.0132}{0.038} = 0.3472.$$

Разбалловка:

За расчет мольной доли углекислого газа
 За расчет массовой доли углекислого газа
 За расчет мольных долей газов

6 б

7 б

3·4= 12 б

Итого 25 баллов

Задача 9-2

В таблице приведена растворимость оксида бария в воде при разной температуре:

Температура, °С	0	20	50	80
Растворимость, г на 100 г воды	1.5	3.84	11.75	90.8

При охлаждении насыщенного при 80°C раствора до более низкой температуры в осадок выпадает только продукт X (массовые доли: $\omega(\text{Ba}) = 43.49\%$, $\omega(\text{O}) = 50.79\%$).

1. Установите формулу X. Ответ подтвердите соответствующими расчетами.
2. Вычислите растворимость $\text{Ba}(\text{OH})_2$ и X в г на 100 г воды при 0°C, 20°C, 50°C, 80°C.
3. Какая масса X образуется при охлаждении 100 г насыщенного раствора $\text{Ba}(\text{OH})_2$ от 70°C до 10°C?

При расчете примите, что температурная зависимость растворимости $\text{Ba}(\text{OH})_2$ от 0°C до 30°C и от 50°C до 90°C является линейной.

Решение

1.

$$\frac{\omega(\text{Ba})}{M(\text{Ba})} : \frac{\omega(\text{O})}{M(\text{O})} : \frac{\omega(\text{H})}{M(\text{H})} = \frac{43.49}{137} : \frac{50.79}{16} : \frac{100-43.49-50.79}{1} = 0.3174 : 3.1743 : 5.72 = 1 : 10 : 18.$$

$\text{BaO}_{10}\text{H}_{18}$ или $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

2. При растворении оксида бария в воде образуется гидроксид: $\text{BaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ba}(\text{OH})_2$, поэтому часть воды переходит в состав гидроксида бария.

Рассмотрим пример расчета для температуры 20°C.

$$n(\text{BaO}) = \frac{m(\text{BaO})}{M(\text{BaO})} = \frac{3.84 \text{ г}}{153 \text{ г/моль}} = 0.0251 \text{ моль};$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = 0.0251 \text{ моль}; \quad m(\text{H}_2\text{O}) = 0.0251 \text{ моль} \cdot 18 \text{ г/моль} = 0.452 \text{ г};$$

$$m(\text{Ba}(\text{OH})_2) = 0.0251 \text{ моль} \cdot 171 \text{ г/моль} = 4.291 \text{ г};$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 100 - 0.452 \text{ г} = 99.548 \text{ г};$$

$$\frac{m(\text{Ba}(\text{OH})_2) \cdot 100}{m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{4.291 \cdot 100}{99.548} = 4.31 \text{ г} - \text{растворимость } \text{Ba}(\text{OH})_2 \text{ в } 100 \text{ г воды.}$$

Для $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$:

$$n(\text{H}_2\text{O}) = 0.0251 \cdot 9 = 0.2259 \text{ моль}; \quad m(\text{H}_2\text{O}) = 0.2259 \text{ моль} \cdot 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}} = 4.066 \text{ г};$$

$$m(\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}) = 0.0251 \text{ моль} \cdot 315 \text{ г/моль} = 7.9065 \text{ г};$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 100 - 4.066 \text{ г} = 95.934 \text{ г};$$

$$\frac{m(\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}) \cdot 100}{m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{7.9065 \cdot 100}{95.934} = 8.24 \text{ г} - \text{растворимость } \text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O} \text{ в } 100 \text{ г воды.}$$

В целом расчет можно проводить по следующей общей формуле:

$$100 \cdot \frac{\frac{m(\text{BaO в } 100 \text{ г } \text{H}_2\text{O})}{M(\text{BaO})} \cdot M(\text{Ba}(\text{OH})_2)}{100 - \frac{m(\text{BaO в } 100 \text{ г } \text{H}_2\text{O})}{M(\text{BaO})} \cdot M(\text{H}_2\text{O})} - \text{растворимость } \text{Ba}(\text{OH})_2 \text{ в } 100 \text{ г } \text{H}_2\text{O};$$

$$100 \cdot \frac{\frac{m(\text{BaO в } 100 \text{ г } \text{H}_2\text{O})}{M(\text{BaO})} \cdot M(\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O})}{100 - \frac{m(\text{BaO в } 100 \text{ г } \text{H}_2\text{O})}{M(\text{BaO})} \cdot 9 \cdot M(\text{H}_2\text{O})} - \text{растворимость } \text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O} \text{ в } 100 \text{ г } \text{H}_2\text{O}.$$

Результаты:

Температура, °С	0	20	50	80
Растворимость $\text{Ba}(\text{OH})_2$, г на 100 г воды	1.68	4.31	13.32	113.62
Растворимость $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, г на 100 г воды	3.14	8.24	27.63	> 200, нельзя точно установить

3. Воспользуемся линейностью зависимости растворимости $\text{Ba}(\text{OH})_2$ от 0°C до 30°C и

от 50°C до 90°C:

$$S(10^\circ\text{C}) = (1.68 + 4.31) / 2 = 3.0 \text{ г} / 100 \text{ г воды};$$

$$\omega(10^\circ\text{C}) = 3/103 = 0.0291;$$

$$S(70^\circ\text{C}) = 113.62 - (113.62 - 13.32) / 3 = 80.2 \text{ г} / 100 \text{ г воды}; \quad \omega(70^\circ\text{C}) = 80.2/180.2 = 0.445.$$

Массовая доля $\text{Ba}(\text{OH})_2$ в $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$:

$$\omega(\text{Ba}(\text{OH})_2)_X = \frac{M(\text{Ba}(\text{OH})_2)}{M(\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O})} = \frac{171}{315} = 0.543.$$

Для 100 г исходного раствора составим выражение для массовой доли $\text{Ba}(\text{OH})_2$:

$$\frac{m(\text{Ba}(\text{OH})_2)_{70} - \omega(\text{Ba}(\text{OH})_2)_X \cdot m}{100 - m} = \omega(10^\circ\text{C}) \quad \frac{44.5 - 0.543 \cdot m}{100 - m} = 0.0291;$$

$$m(\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}) = 80.93 \text{ г}.$$

Разбалловка:

За установление формулы X

7 б

За расчет растворимости $\text{Ba}(\text{OH})_2$ и $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

(по 1 б для каждого соединения для каждой температуры)

8 б

За расчет массы выпавшего осадка

10 б

Итого 25 баллов

Задача 9-3

Некоторая соль содержит 41.38% кислорода по массе. Насыщенный водный раствор этой соли разделили на три части. Первую часть обработали концентрированным раствором щелочи и нагрели до кипения, выделившийся бесцветный газ изменил цвет водного раствора лакмуса на синий.

Вторую часть обработали концентрированной соляной кислотой. Выделившийся бесцветный газ вызывает помутнение известковой воды; не горит; вызывает изменение фиолетовой окраски щелочного (KOH) раствора перманганата калия в зеленый цвет.

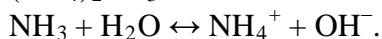
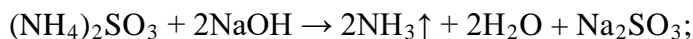
Третью часть выпарили и белый остаток прокалили при высокой температуре, после чего стакан оказался пустым.

Определите состав соли. Приведите краткие пояснения, напишите уравнения реакций.

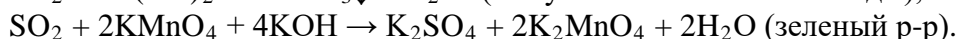
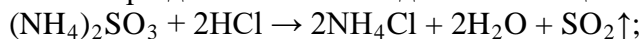
Решение

Анализируемая соль – сульфит аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$.

При нагревании со щелочью выделяется аммиак, водный раствор которого имеет щелочную среду и изменяет цвет лакмуса на синий.



При действии HCl выделяется бесцветный сернистый газ:

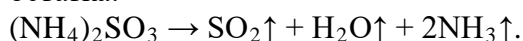


Нельзя было предположить карбонат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, но он бы выделил CO_2 , который не дал бы цветную реакцию с перманганатом.

Нельзя было предположить сульфид аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}$, но он бы выделил H_2S , который является горючим газом.

Нельзя было предположить нитрит аммония NH_4NO_2 , он бы дал смесь неокрашенного NO и окрашенного NO_2 .

Нагревание твердого сульфита аммония приводит к возгонке, либо к разложению без остатка:



Содержание кислорода подтверждает состав $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$:

$$\omega(\text{O}) = 48/116 = 0.4138 \text{ (41.38\%)}$$

Гидросульфит аммония NH_4HSO_3 , который дал бы те же самые качественные реакции, не подходит, так как у него $\omega(\text{O}) = 48/99 = 0.4848 \text{ (48.48\%)}$.

Разбалловка

За определение формулы $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$

56

За 5 уравнений реакций по 46

206

Итого 25 баллов

Задача 9-4

Стальной замкнутый сосуд объемом 134.4 л разделен пополам непроницаемой перегородкой. В первом отсеке находится смесь гелия и фтороводорода с равными массовыми долями. Во втором – смесь гелия и фосфина с равными мольными долями. Условия в сосуде нормальные. Не открывая сосуд, открыли перегородку и дождалась прекращения выпадения осадка. Какие вещества, в каком агрегатном состоянии, в каком количестве будут находиться в конечном состоянии в сосуде? Какое давление стало в сосуде, если температура сохранилась?

Решение

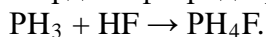
Определим количественный состав газов в первом отсеке.

$V_1 = 67.2$ л, значит $n(\text{He}) + n(\text{HF}) = 67.2/22.4 = 3$ моль. Пусть $m(\text{He}) = m(\text{HF}) = x$ (г). Тогда $x/4 + x/20 = 3$. Отсюда $x=10$. $n(\text{He}) = 2.5$ моль, $n(\text{HF}) = 0.5$ моль.

Определим количественный состав газов во втором отсеке.

$V_2=67.2$ л, значит $n(\text{He}) = n(\text{PH}_3) = 1.5$ моль.

Фосфин, являясь основанием подобно аммиаку, реагирует с HF с образованием твердого фторида фосфония PH_4F :



HF в недостатке, прореагирует полностью. Фосфин – в избытке.

Состав конечной смеси:

PH_3 газ, $n(\text{PH}_3) = 1.5 - 0.5 = 1$ моль.

He газ, $n(\text{He}) = 2.5 + 1.5 = 4$ моль.

PH_4F твердый $n(\text{PH}_4\text{F}) = 0.5$ моль.

Давление снизится, так как в замкнутом сосуде при постоянных температуре и объеме снижение количества газообразных веществ (было 6 моль, стало 5 моль) приведет к снижению давления. $P = 5/6 = 0.833$ атм (84383 Па).

Разбалловка

За уравнение

5 б

За указание на твердый продукт PH_4F (0.5 моль)

5 б

За указание на газы (1 моль PH_3 и 4 моль He) по 5б

10 б

За расчет $P = 0.833$ атм (84383 Па)

5 б

Итого 25 баллов