

Задача 9-5

В 2020 году исполнилось 75 лет атомной промышленности России. Основным используемый в качестве ядерного топлива элемент – это уран, что обусловило бурное развитие в СССР уранодобывающей промышленности.

Расположенное в Забайкальском крае Октябрьское месторождение было разведано в 1967 году и эксплуатируется вплоть до сегодняшнего дня. Современные запасы всего месторождения оцениваются в 9 тыс. тонн урана, рассеянного в породе, сложенной в основном диоритами ($\rho = 2900 \text{ кг/м}^3$). Среднее массовое содержание урана в ней – 0.205 %. По оценкам геологов, 60 % урана всего месторождения сосредоточено в залежи О-1, ширина и протяженность которой составляют в среднем около 70 и 450 м соответственно.

1. Приняв среднее содержание урана в залежи О-1 равным среднему по месторождению, рассчитайте вертикальную глубину залежи О-1. Считайте, что залежь имеет форму прямоугольного параллелепипеда и состоит почти полностью из диорита.

За период времени, прошедший с формирования месторождения, в урановой руде установилось вековое равновесие между ураном-235 и рядом

радиоактивных элементов, образующихся при его распаде. Вековое равновесие – это состояние, когда отношение количеств любых двух изотопов в этом ряду равно отношению их периодов полураспада.

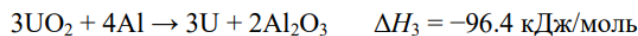
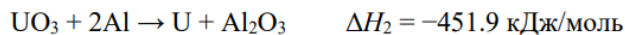
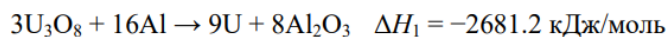
В таблице представлены периоды полураспада урана-235 и некоторых изотопов из этого ряда. Содержание изотопа урана-235 в руде составляет 0.72 мольн. % от общего количества урана.

^{235}U	^{231}Th	^{231}Pa	^{227}Ac	^{227}Th	^{223}Ra	^{219}Rn	^{215}Po
$7.04 \cdot 10^8$ лет	25.52 ч	32760 лет	21.8 лет	18.68 сут	11.43 сут	3.96 с	$1.78 \cdot 10^{-3}$ с

2. Какого изотопа среди представленных в месторождении меньше всего? Рассчитайте общую массу этого изотопа во всем Октябрьском месторождении. Ответ объясните и приведите Ваши расчёты.

Одно из ключевых превращений в промышленной химии урана – реакция UO_2 с газообразным фтороводородом с образованием UF_4 и паров воды. Она предшествует получению гексафторида урана, который используют для разделения его изотопов.

Известны энтальпии следующих реакций (все вещества, для которых не указано агрегатное состояние – твердые).



3. Рассчитайте энтальпию образования UO_2 из простых веществ и изменение энтальпии в реакции $\text{UO}_2 + 4\text{HF}_{(\text{г.})} \rightarrow \text{UF}_4 + 2\text{H}_2\text{O}_{(\text{г.})}$, если энтальпии образования UF_4 , $\text{HF}_{(\text{г.})}$ и $\text{H}_2\text{O}_{(\text{г.})}$ из простых веществ равны -1864 , -273.3 , -241.8 кДж/моль , соответственно.

4. Для разделения изотопов урана используют газообразный гексафторид урана. Полученный после обогащения образец, содержащий $^{235}\text{UF}_6$ и $^{238}\text{UF}_6$, имеет плотность на 0.19 % меньше, чем исходный UF_6 , в котором соотношение изотопов урана – природное. Каковая мольная доля $^{235}\text{UF}_6$ в обогащенной смеси?

Решение задачи 9-5 (автор: Курамшин Б. К.)

1. Масса урана в залежи О-1: $m_{U,O-1} = 0.6 \cdot 9000 = 5400$ тонн

Общая масса залежи О-1: $m_{O-1} = m_{U,O-1} / 0.00205 = 5400 : 0.00205 = 2.634 \cdot 10^6$ тонн = $2.634 \cdot 10^9$ кг

Объем залежи: $V_{O-1} = m_{O-1} / \rho = 2.634 \cdot 10^9 : 2900 = 9.083 \cdot 10^5$ м³

Глубина залежи равна отношению объема к ширине и протяженности:

$$c = V/(ab) = 9.083 \cdot 10^5 : (70 \cdot 450) = \mathbf{29 \text{ м.}}$$

2. Выразим исходя из определения векового равновесия количество i -го изотопа через период полураспада и содержание урана-235.

$$\frac{n_i}{n_{235\text{U}}} = \frac{\tau_i}{\tau_{235\text{U}}} \Rightarrow n_i = \frac{\tau_i n_{235\text{U}}}{\tau_{235\text{U}}}$$

То есть количество данного изотопа прямо пропорционально его периоду полураспада. Тогда меньше всего будет изотопа с наименьшим периодом полураспада, то есть ²¹⁵Р_о. Рассчитаем его массу.

Количество моль изотопов урана в месторождении:

$$n_{\text{U}} = m_{\text{U}} : M_{\text{U}} = 9 \cdot 10^9 \text{ г} : 238 \text{ г/моль} = 3.78 \cdot 10^7 \text{ моль}$$

$$n_{235\text{U}} = 0.0072 \cdot n_{\text{U}} = 0.0072 \cdot 3.78 \cdot 10^7 = 2.72 \cdot 10^5 \text{ моль}$$

$$n_{\text{Po}} = \frac{\tau_{\text{Po}} n_{235\text{U}}}{\tau_{235\text{U}}} = \frac{1.78 \cdot 10^{-3} \cdot 2.72 \cdot 10^5}{7.04 \cdot 10^8 \cdot 365.25 \cdot 24 \cdot 3600} = 2.18 \cdot 10^{-14} \text{ моль}$$

$$m_{\text{Po}} = 215 \cdot 2.18 \cdot 10^{-14} = \mathbf{4.7 \cdot 10^{-12} \text{ г}}$$

Таким образом, во всем месторождении около **4.7 пикограммов (!)** полония-215.

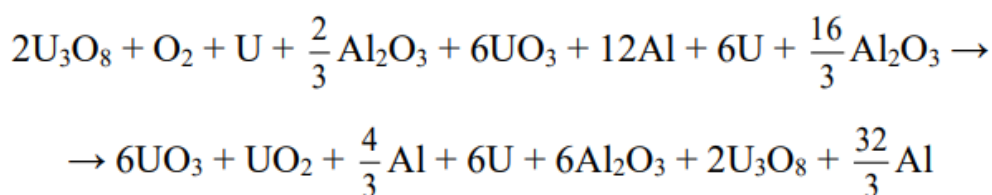
3. Найдем энтальпию реакции $U + O_2 \rightarrow UO_2$. Для получения этого уравнения реакции комбинированием имеющихся 4-х реакций необходимо взять реакцию, обратную четвертой, т. к. только в ней фигурирует кислород O_2 (с коэффициентом 1, но в правой части).

Кроме того, необходимо взять реакцию, обратную третьей, с коэффициентом $1/3$, т. к. только в ней фигурирует UO_2 , но с коэффициентом 3 и в левой части.

Вторую реакцию надо взять с коэффициентом 6, т. к. в ее левой части фигурирует $1UO_3$, который фигурирует с коэффициентом 6 в правой части после использования реакции 4.

Реакцию, обратную первой, необходимо домножить на $2/3$, т. к. коэффициент перед U_3O_8 должен быть 3, а в реакции 1 он равен 2.

Проверим эти соображения непосредственным сложением реакций с соответствующими коэффициентами:



После сокращения: $U + O_2 \rightarrow UO_2$.

$$\text{Итак, } \Delta_f H(UO_2) = -\Delta H_4 - \frac{1}{3} \Delta H_3 + 6 \Delta H_2 - \frac{2}{3} \Delta H_1 = -1085 \text{ кДж/моль.}$$

Энтальпия реакции $UO_2 + 4HF_{(г)} \rightarrow UF_4 + 2H_2O_{(г)}$

$$\Delta_r H = \Delta_f H(UF_4) + 2 \Delta_f H(H_2O_{(г)}) - \Delta_f H(UO_2) - 4 \Delta_f H(HF_{(г)}) \approx -169 \\ \text{кДж/моль.}$$

4. Молярная масса UF_6 , полученного из природных источников, равна 352 г/моль, тогда средняя молярная масса смеси $^{235}UF_6$ и $^{238}UF_6$ равна

$$M_{\text{ср}} = (1 - 0.0019) \cdot 352 = 351.33 \text{ г/моль.}$$

Если мольная доля $^{235}UF_6$ с молярной массой 349 г/моль равна x , то мольная доля $^{238}UF_6$ с молярной массой 352 г/моль равна $1 - x$.

$$349 \cdot x + 352(1 - x) = 351.33$$

$$x = 0.222 \approx 22 \%$$

Отметим, что такая высокая степень обогащения не используется в реакторах АЭС, но используется в некоторых исследовательских реакторах.

Система оценивания:

1	Расчет массы урана, массы залежи, объема залежи и глубины залежи – по 1 баллу	4 балла
2	Вывод о ^{215}Po с объяснением – 2 балла Расчет количества урана-235, количества полония-215, массы полония-215 – по 1 баллу	5 баллов
3	Вывод формулы для энтальпии образования и расчет значения энтальпии образования – по 2 балла Выражение для энтальпии реакции и расчет энтальпии реакции – по 2 балла	8 баллов
4	Расчет средней молярной массы – 1 балл Расчет содержания $^{235}\text{UF}_6$ – 2 балла	3 балла
ИТОГО: 20 баллов		