

Практическая работа № 7

Физико – химические факторы загрязнения природных вод. Растворение. Жесткость

Процессы растворения газов в природных водах

Закон Генри: если идеальный газ находится в равновесии с растворителем, то количество растворенного газа пропорционально парциальному давлению данного газа.

$$C_i(p-p) = K_{Gi} P_i,$$

где $C_i(p-p)$ - концентрация i -ой примеси газа в растворе, моль/л; K_{Gi} - константа Генри для данной температуры раствора, моль/(л·Па) или моль/(л·атм); P_i - парциальное давление i -ой примеси в газовой фазе, находящейся в равновесии с раствором, Па или атм.

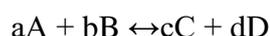
Термодинамический критерий самопроизвольного протекания процесса :

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad \Delta G < 0.$$

Переход из газообразного состояния в растворенное – процесс, для которого ΔH^0 и ΔS^0 , являются отрицательными величинами. Растворенное состояние более упорядочено, чем газ.

Процессы растворения твердых веществ в природных водах

Для описания процессов взаимодействия между твердыми веществами и природными водами используются методы равновесной термодинамики. В общем виде взаимодействие может быть представлено в идее уравнения:



Константа равновесия данного процесса может быть представлена уравнением:

$$K_{\text{процесса}} = (a^c \cdot a^d) / (a^a \cdot a^b), \quad \lg K_{\text{процесса}}^0 = - \Delta G_{\text{процесса}}^0 / (2,3RT^0),$$

где $\Delta G_{\text{процесса}}^0$ - энергия Гиббса процесса, взятая с обратным знаком, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К); T^0 - температура при стандартных условиях ($T^0 = 298 \text{ K}$); 2,3 – коэффициент перехода от значения в натуральных логарифмах к значению в десятичных логарифмах.

Значение константы равновесия при температуре, отличающейся от стандартных условий можно определить из уравнения:

$$\lg K_1/K^0 = \{\Delta H_{\text{проц.}} (1/T^0 - 1/T_1)\} / 2,3 R.$$

где K_1 , K^0 и T^0 , T_1 - константы равновесия и температуры процесса в стандартных и рассматриваемых условиях соответственно; $\{\Delta H_{\text{проц.}}\}$ - значение энтальпии реакции, равное разности между суммой энтальпий продуктов и суммой энтальпий исходных веществ, R – универсальная газовая постоянная. Для большинства реакций растворения, протекающих в поверхностных водах: $0,4K^0 \leq K(T=338 \text{ K}) \leq 2,5 K^0$.

Влияние давления на значение константы равновесия можно оценить из уравнения:

$$\lg K_1/K^0 = \{\Delta V (P - 1)\} / 2,3 RT^0,$$

где K_1 , K^0 и K – константы равновесия процесса при общем давлении P и 1 атм соответственно; ΔV – изменение молярного объема в процессе реакции.

Для большинства процессов растворения твердых соединений в природных условиях изменение молярного объема не превышает 40 см³/моль. Поэтому при увеличении давления до 100 атм логарифм отношения констант равновесия будет равен примерно: $\lg K_1/K^0 \approx 0,07$.

Показатель агрессивности природных вод: $A = \lg K / \{(\text{ПА})_{\text{прод}} / \{(\text{ПА})_{\text{реак}}\}\}$,

где A – показатель агрессивности воды; K – константа равновесия процесса растворения данного вещества; ПА – произведение активности продуктов реакции, содержащихся в данной воде, и реагентов, содержащихся в растворяемом веществе, соответственно.

Показатель неустойчивости I по численному значению равен показателю агрессивности с обратным знаком: $I = -A$, или $I = -A = \lg \{(\text{ПА})_{\text{прод}} / \{(\text{ПА})_{\text{реак}} / K\}\}$.

Уравнение процесса растворения в водной среде можно представить в виде:



$$K_{\text{равн}} = a^a \cdot a^b_{\text{B}}.$$

Для оценки концентраций примесей в растворе используется понятие произведения растворимости: $\text{Пр} = [A^{b+}]^a [B^{a-}]^b$, где $[A^{b+}]^a$ и $[B^{a-}]^b$ – концентрации ионов в растворе (моль/л) в степени, соответствующей стехиометрическому коэффициенту в уравнении реакции растворения.

Произведение растворимости и константа равновесия процесса растворения связаны между собой: $\text{Пр} = K_{\text{равн}} / (\gamma^a_A \gamma^b_B)$,

где $\gamma^a_A \gamma^b_B$ – коэффициенты активности соответствующих ионов в степени, соответствующей стехиометрическому коэффициенту в реакции.

Жесткость природных вод

Жесткостью воды называется свойство воды, обусловленное содержанием в ней ионов кальция и магния. Числовое значение жесткости, выраженное в моль/м³, равно числовому значению жесткости, выраженному в миллиграмм – эквивалентах на литр (мг-эquiv / л); 1 мг – эквив./л соответствует содержанию в воде 20,04 мг/л ионов Ca^{2+} или 12, 16 мг/л ионов Mg^{2+} . Величину жесткости можно определить по уравнению:

$$\begin{aligned} \text{Ж} &= [\text{Ca}^{2+}] / (\text{M}(\text{Ca}^{2+}) \cdot f(\text{Ca}^{2+})) + [\text{Mg}^{2+}] / (\text{M}(\text{Mg}^{2+}) \cdot f(\text{Mg}^{2+})); \\ &= [\text{Ca}^{2+}] / 20,04 + [\text{Mg}^{2+}] / 12,16; \end{aligned}$$

где Ж – жесткость воды, моль/л; $[\text{Ca}^{2+}]$ и $[\text{Mg}^{2+}]$ – концентрации ионов кальция и магния, мг/л; $f(\text{Ca}^{2+})$ и $f(\text{Mg}^{2+})$ – факторы эквивалентности ионов кальция и магния ($f(\text{Ca}^{2+})=f(\text{Mg}^{2+})= 1/2$); $\text{M}(\text{Ca}^{2+})$ и $\text{M}(\text{Mg}^{2+})$ – молярные массы ионов кальция и магния ($\text{M}(\text{Ca}^{2+}) = 40,08$ г/моль и $\text{M}(\text{Mg}^{2+}) = 24,32$ г/моль).

Жесткость, определяемую по выше приведенному уравнению называют *общей жесткостью* воды, поскольку в воде различают карбонатную, некарбонатную, устранимую и неустраиваемую жесткость воды.

Классификация природных вод по величине жесткости

Жесткость, моль/л	Группа воды
< 1,5	Очень мягкая
1,5 – 3,0	Мягкая
3,0 – 5,4	Средней жесткости
5,4 – 10,7	Жесткая
>10,7	Очень жесткая

Под *карбонатной жесткостью* понимается количество ионов кальция и магния, связанных с карбонат- и гидрокарбонат –ионами.

Некарбонатная жесткость воды определяется как разность значений общей и карбонатной жесткости.

Устраиваемая жесткость воды представляет собой часть карбонатной жесткости, которая удаляется при кипячении воды. Устраиваемую жесткость определяют экспериментально.

Неустраиваемая жесткость воды определяется как разность значений общей и устранимой жесткости воды.

За рубежом для выражения значений жесткости воды используются различные единицы измерения:

$$1 \text{ моль/м}^3 = 2,804 \text{ немецких градусов жесткости};$$

$$1 \text{ моль/м}^3 = 5,005 \text{ французских градусов жесткости};$$

$$1 \text{ моль/м}^3 = 50,050 \text{ американских градусов жесткости}.$$

Примеры решения типовых задач

Пример 1. На сколько миллиграммов в каждом литре воды уменьшится равновесное содержание кислорода в верхнем слое воды природного водоема при увеличении температуры приземного воздуха с 5 до 25 С⁰, если его парциальное давление не изменилось, концентрация кислорода соответствует средним для приземного слоя значениям, давление воздуха соответствует стандартным значениям? Парциальным давлением паров воды можно пренебречь. \

Решение. Равновесное содержание растворенного кислорода в верхнем слое природного водоема $C(O_2)_{(p-p)}$, в соответствии с законом Генри, зависит от парциального давления кислорода $P(O_2)$ и значения константы Генри, изменяющейся в зависимости от температуры: $C(O_2)_{(p-p)} = K_{Г}(O_2) \cdot P(O_2)$.

Поскольку по условию задачи парциальное давление кислорода не изменялось, различие равновесных значений концентраций кислорода при температуре 5 и 25⁰С связано лишь с изменением константы Генри. Поэтому можно записать:

$$\Delta C(O_2)_{(p-p)} = C^1(O_2)_{(p-p)} - C^{11}(O_2)_{(p-p)} = (K_{Г}^1(O_2) - K_{Г}(O_2)) P(O_2),$$

где $C^1(O_2)_{(p-p)}$, $C^{11}(O_2)_{(p-p)}$ и $K_{Г}^1(O_2)$, $K_{Г}(O_2)$ - равновесные значения концентрации кислорода в воде из значения константы Генри процесса растворения кислорода в воде при 5 и 25⁰С соответственно.

Значения константы Генри при различных температурах см в Приложении табл 3,4

$$K_{Г}^1(O_2) = 0,00191 \text{ моль}/(\text{л}\cdot\text{атм}) \text{ при } 5^{\circ}\text{C},$$

$$K_{Г}(O_2) = 0,00130 \text{ моль}/(\text{л}\cdot\text{атм}) \text{ при } 25^{\circ}\text{C}.$$

Парциальное давление кислорода можно определить, зная общее давление воздуха $P_{\text{общ}}$ и объёмную долю кислорода в приземном слое воздуха $\alpha(O_2)$ (поскольку по условию задачи парциальным давлением паров воды можно пренебречь, объёмную долю кислорода можно принять равной объёмной доле кислорода сухого воздуха в приземном слое атмосферы, см табл 1.1):

$$P(O_2) = P_{\text{общ}} \cdot \alpha(O_2) = 1 \text{ атм} \cdot 0,2095 = 0,2095 \text{ (атм)}.$$

Равновесное содержание кислорода в растворе равно:

$$C^1(O_2)_{(p-p)} = (0,00191 - 0,00130) \cdot 0,2095 = 1,28 \cdot 10^{-4} \text{ (моль/л)}.$$

Для перевода концентрации в мг/л необходимо умножить полученное значение на величину молярной массы кислорода ($32 \cdot 10^3$ мг/моль):

$$\Delta C(O_2)_{(p-p)} = \Delta C^1(O_2) \cdot M(O_2) = 1,28 \cdot 10^{-4} \cdot 32 \cdot 10^3 = 4,1 \text{ (мг/л)}.$$

Ответ: содержание кислорода в каждом литре воды поверхностного слоя природного водоема уменьшится на 4,1 мг.

Пример 2. Какая природная вода (из двух) более агрессивна по отношению к гипсу ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), если активность катионов кальция и анионов SO_4^{2-} для первой и второй воды составляет:

$$a_1(\text{Ca}^{2+}) = 10^{-3} \text{ моль/л}; \quad a_2(\text{Ca}^{2+}) = 10^{-2,8} \text{ моль/л};$$

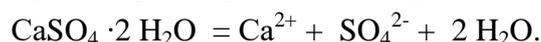
$$a_1(\text{SO}_4^{2-}) = 10^{-1,5} \text{ моль/л}; \quad a_2(\text{SO}_4^{2-}) = 10^{-2} \text{ моль/л}?$$

Активность гипса в твердой фазе принять равной единице. Температура и давление соответствуют стандартным значениям.

Решение. Агрессивность природных вод по отношению к одному и тому же веществу тем выше, чем больше численное значение показателя агрессивности:

$$A = \lg K / \{ (PIA)_{\text{прод}} / \{ (PIA)_{\text{реак}} \} \},$$

Процесс растворения гипса протекает по уравнению:



По условию задачи необходимо сравнить агрессивность двух различных по составу вод по отношению к одному и тому же соединению, активность которого равна единице, $(\text{ПА})_{\text{реак}} = 1$. Поэтому можно упростить выражение для показателя агрессивности:

$$A_i = \lg [K / \{(\text{ПА})_i \text{ прод}\}].$$

Поскольку значение константы равновесия процесса растворения гипса при заданных условиях – величина постоянная, показатель агрессивности будет тем больше, чем меньше произведение активностей реагентов в воде. Поэтому для решения задачи необходимо сравнить произведения активностей в различных природных водах:

$$\text{для первой воды } (\text{ПА})_1 = a_1(\text{Ca}^{2+}) \cdot a_1(\text{SO}_4^{2-}) = 10^{-3} \cdot 10^{-1,5} = 10^{-4,5} \text{ (моль/л)}^2;$$

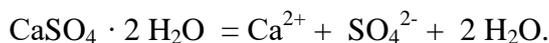
$$\text{для второй воды } (\text{ПА})_2 = a_2(\text{Ca}^{2+}) \cdot a_2(\text{SO}_4^{2-}) = 10^{-2,8} \cdot 10^{-2,0} = 10^{-4,8} \text{ (моль/л)}^2.$$

Поскольку $(\text{ПА})_2 < (\text{ПА})_1$, т.е. $(10^{-4,8} < 10^{-4,5})$, вторая природная вода более агрессивна по отношению к гипсу.

Ответ: вторая вода более агрессивна по отношению к гипсу.

Пример 3. Какой процесс – растворение или осаждение гипса – будет происходить при его контакте с природной водой, в которой активности катионов кальция и анионов SO_4^{2-} составляют 10^{-4} и 10^{-2} моль/л соответственно? Температура и давление соответствуют стандартным значениям.

Решение. Процесс растворения гипса можно представить в виде уравнения:



Направление процесса (осаждение или растворение) можно определить из соотношения: $(\text{ПА})_{\text{прод}} / K_{\text{равн}}$, если оно меньше 1, то идет процесс растворения, если больше 1, то идет процесс осаждения.

Произведения активностей продуктов процесса растворения гипса следует принять равным произведению активностей соответствующих ионов в природной воде:

$$(\text{ПА})_{\text{прод}} = a(\text{Ca}^{2+}) a(\text{SO}_4^{2-}) = 10^{-4} \cdot 10^{-2} = 10^{-6} \text{ (моль/л)}^2.$$

Значения константы равновесия реакции растворения гипса можно определить из термодинамических данных: $\lg K_{\text{реакц}}^0 = -\Delta G_{\text{реакц}}^0 / (2,3RT^0)$.

Значение $\Delta G_{\text{реакц}}^0$ определим из выражения:

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{реакц}}^0 &= -\sum \Delta G_{\text{прод}}^0 - \sum \Delta G_{\text{реак}}^0 = \\ &= \Delta G_{\text{обр}}^0(\text{Ca}^{2+}) + \Delta G_{\text{обр}}^0(\text{SO}_4^{2-}) + 2 \Delta G_{\text{обр}}^0(\text{H}_2\text{O}) - \Delta G_{\text{обр}}^0(\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}). \end{aligned}$$

Подставив значения энергии Гиббса образования ионов и соединений в стандартных условиях (см. Приложения табл 5) в данное уравнение, получим:

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{реакц}}^0 &= (-552,70) + (-743,99) + 2(-237,23) - (-1799,8) = 28,65 \text{ (кДж/моль)} = \\ &28,65 \cdot 10^3 \text{ (Дж/моль)}. \end{aligned}$$

Логарифм константы равновесия равен: $\lg K_{\text{реакц}}^0 = -28,65 \cdot 10^3 / (2,3 \cdot 8,31 \cdot 298,3) = -5,0$.

Константа равновесия процесса растворения гипса равна:

$$K_{\text{реакц}}^0 = 9,4 \cdot 10^{-6}. \text{ Соотношение } (\text{ПА})_{\text{прод}} / K_{\text{равн}} = 10^{-6} / 9,4 \cdot 10^{-6} < 1, \text{ то}$$

раствор ненасыщен относительно гипса, и идет процесс растворения гипса.

Ответ: будет происходить растворение гипса.

Пример 4. Определите значение общей и карбонатной жесткости для среднего состава речной воды (см. табл. 2). Ответ дайте в молях на литр, немецких, французских и американских градусах жесткости. К какой группе вод по величине жесткости следует отнести эти воды? Принять плотность воды равной 1 кг/л.

Решение. В соответствии с уравнением

$$Ж = [Ca^{2+}] / (M(Ca^{2+}) \cdot f(Ca^{2+})) + [Mg^{2+}] / (M(Mg^{2+}) \cdot f(Mg^{2+})),$$

Величину общей жесткости можно определить. Зная концентрацию ионов кальция и магния в воде, выраженную в мг/л. В табл. 2 представлены значения концентрации ионов кальция и магния, выраженные в $млн^{-1}$. Поскольку, по условию задачи, плотность воды равна 1 кг/л, значения концентрации, выраженные в $млн^{-1}$ и мг/л равны между собой и составляют $[Ca^{2+}] = 20,0$ мг/л и $[Mg^{2+}] = 3,4$ мг/л.

$$\begin{aligned} \text{Общая жесткость воды составит:} &= [Ca^{2+}] / 20,04 + [Mg^{2+}] / 12,16 = \\ &= 20,0 / 20,04 + 3,4 / 12,16 = 1,3 \text{ (моль/л)}. \end{aligned}$$

Воды с таким значением общей жесткости следует отнести к группе очень мягких вод.

Значение карбонатной жесткости определяется количеством ионы кальция и магния, связанных с карбонат – ионами. Поскольку в воде, отвечающей среднему составу речной воды, отсутствуют карбонат – ионы, значение карбонатной жесткости может быть определено по концентрации гидрокарбонат – ионов (мг/л):

$$Ж_{\text{карб}} = [HCO_3^-] / (M(HCO_3^-) \cdot f(HCO_3^-)) \text{ (моль/м}^3\text{)};$$

где $f(HCO_3^-)$ – фактор эквивалентности, равный единице для гидрокарбонат – иона, $M(HCO_3^-)$ – молярная масса гидрокарбонат- иона ($M = 61$ г/моль).

Карбонатная жесткость, равная значению концентрации гидрокарбонат – иона. составит: $Ж_{\text{карб}} = 35 / (61 \cdot 1) = 0,57$ (моль/м³).

Значение жесткости, выраженное в немецких, французских или американских градусах жесткости, легко получит, зная величину жесткости, выраженную в моль/л, и соотношение между одним моль/л и соответствующим градусом жесткости:

$$Ж \text{ (национальный градус жесткости)} = Ж \text{ (моль/м}^3\text{)} \cdot K_i,$$

где K_i – коэффициент соотношения между национальными градусами жесткости и одним моль/м³ воды.

Для воды. Отвечающей среднему составу речной воды, получим:

$$Ж = 1,3 \cdot 2,804 = 3,6 \text{ немецких градуса жесткости};$$

$$Ж = 1,3 \cdot 5,005 = 6,4 \text{ французских градуса жесткости};$$

$$Ж = 1,3 \cdot 50,050 = 64 \text{ американских градуса жесткости};$$

Ответ: вода, отвечающая среднему составу речной воды, имеет общую жесткость, равную 1,3 моль/м³, что соответствует 3,6 немецких градуса жесткости; 6,4 французских градуса жесткости; 64 американских градуса жесткости. Карбонатная жесткость этой воды $Ж_{\text{карб}} = 0,57$ (моль/м³). Эту воду следует отнести к группе очень мягких вод.

Индивидуальное задание № 1

Задание 1. На сколько молей уменьшится равновесное содержание кислорода в каждом литре верхнего слоя воды природного водоема при увеличении температуры приземного воздуха с $n^{\circ}\text{C}$ до 25°C , если парциальное давление кислорода не изменилось, концентрация кислорода соответствует средним для приземного слоя значениям, давление воздуха соответствует стандартным значениям? Парциальным давлением паров воды можно пренебречь.

Задание 2. Какая из двух природных вод более агрессивна по отношению к гипсу ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), если активности катионов кальция и анионов SO_4^{2-} для первой и второй воды составляют:

$$a_1(\text{Ca}^{2+}) = 10^{-2,5} \text{ моль/л};$$

$$a_2(\text{Ca}^{2+}) = 10^{-2,7} \text{ моль/л};$$

$$a_1(\text{SO}_4^{2-}) = 10^{-1,7} \text{ моль/л};$$

$$a_2(\text{SO}_4^{2-}) = 10^{-2,3} \text{ моль/л?}$$

Активность гипса в твердой фазе принять равной единице

Вариант	Задание 1	Задание 2			
	$T^{\circ}\text{C}$	$a_1(\text{Ca}^{2+})$	$a_2(\text{Ca}^{2+})$	$a_1(\text{SO}_4^{2-})$	$a_2(\text{SO}_4^{2-})$
1	4	$10^{-2,3}$	$10^{-2,7}$	$10^{-1,7}$	$10^{-2,3}$
2	10	$10^{-2,0}$	$10^{-2,8}$	$10^{-1,6}$	$10^{-2,5}$
3	15	$10^{-2,1}$	$10^{-2,5}$	$10^{-1,3}$	$10^{-2,7}$
4	5	$10^{-2,0}$	$10^{-2,0}$	$10^{-1,5}$	$10^{-2,0}$
5	12	$10^{-2,3}$	$10^{-2,0}$	$10^{-1,9}$	$10^{-2,3}$
6	18	$10^{-2,0}$	$10^{-2,7}$	$10^{-1,3}$	$10^{-2,2}$
7	22	$10^{-2,2}$	$10^{-2,2}$	$10^{-1,7}$	$10^{-2,5}$
8	17	$10^{-2,3}$	$10^{-2,7}$	$10^{-1,7}$	$10^{-2,3}$
9	13	$10^{-2,0}$	$10^{-2,4}$	$10^{-1,9}$	$10^{-2,6}$
10	6	$10^{-2,1}$	$10^{-2,1}$	$10^{-1,4}$	$10^{-2,1}$

Индивидуальное задание № 2

Задание 1. Определите среднее значение жесткости и щелочности природной воды. Запишите ее средний состав в виде формулы. К какому типу, классу по О.А. Алекину следует отнести эти воды?

Средний состав воды в (млн⁻¹):

Na^+ - а; Cl^- - б; Mg^{2+} - в; SO_4^{2-} - г; Ca^{2+} - д; HCO_3^- - е.

Задание 2. Какую жесткость и щелочность будут иметь поверхностные, воды, находящиеся в равновесии с атмосферным воздухом, в котором среди «активных» примесей присутствует лишь диоксид углерода, и карбонатными породами, состоящими из кальцита (CaCO_3)? Концентрация диоксида углерода в воздухе равна a млн^{-1} , температура равна 298 К, общее давление воздуха - 101,3 кПа, парциальное давление паров воды - 3160 Па. При оценке принять, что коэффициенты активности всех компонентов равны единице.

Вариант	Задание 1						Задание 2
	Na^+ а	Cl^- б	Mg^{2+} в	SO_4^{2-} г	Ca^{2+} д	HCO_3^- е	а млн^{-1}
1	100	100	50	400	93	170	500
2	58	120	35	205	38	200	459
3	125	135	32	120	120	136	368
4	55	150	54	306	87	205	654
5	45	120	28	273	79	164	478
6	120	105	47	180	99	178	590
7	140	95	54	120	115	156	600
8	110	138	20	145	125	190	200
9	70	125	60	385	115	135	300
10	135	132	35	453	75	156	250

Контрольные задачи

1. На сколько молей уменьшится равновесное содержание кислорода в каждом литре верхнего слоя воды природного водоема при увеличении температуры приземного воздуха с 5 до 25°C, если парциальное давление кислорода не изменилось, концентрация кислорода соответствует средним для приземного слоя значениям, давление воздуха соответствует стандартным значениям? Парциальным давлением паров воды можно пренебречь.

2. Какая из двух природных вод более агрессивна по отношению к гипсу ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), если активности катионов кальция и анионов SO_4^{2-} для первой и второй воды составляют:

$$a_1(\text{Ca}^{2+}) = 10^{-2,5} \text{ моль/л};$$

$$a_2(\text{Ca}^{2+}) = 10^{-2,7} \text{ моль/л};$$

$$a_1(\text{SO}_4^{2-}) = 10^{-1,7} \text{ моль/л};$$

$$a_2(\text{SO}_4^{2-}) = 10^{-2,3} \text{ моль/л}?$$

Активность гипса в твердой фазе принять равной единице.

3. Какой процесс - растворение или осаждение гипса - будет происходить при его контакте с природной водой, в которой активности катионов кальция и анионов SO_4^{2-} составляют 10^{-2}

3.5 и $10^{-2.2}$ моль/л соответственно? Температура и давление соответствуют стандартным условиям.

4. Определите значение общей и карбонатной жесткости для среднего состава атмосферных осадков (см. табл. 2.2). Ответ дайте в молях на литр, немецких, французских и американских градусах жесткости. К какой группе вод по величине жесткости следует отнести эти воды? Принять плотность воды равной 1 кг/л.

5. На какую максимальную глубину за счет растворения карбоната кальция в выпадающей на плато дождевой воде может опуститься уровень природного известнякового плато к 3000 году, если дождевая вода полностью стекает с поверхности плато, но лишь после установления равновесия, между дождевой водой, карбонатом кальция (кальцитом) и атмосферным воздухом? Уровень осадков, выпадающих на плато в течение этого периода, принять одинаковым и равным 900 мм/год. Температура все время составляла 298 К, давление - 101,3