

УДК 541.123.21

## О РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЧИСЕЛ ГИДРАТАЦИИ ИОНОВ В РАЗБАВЛЕННЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

<sup>1</sup>Масимов Э.А., <sup>2</sup>Аббасов Х.Ф.

<sup>1</sup>Бакинский Государственный Университет, Баку, e-mail: masimovspectr@rambler.ru;

<sup>2</sup>НИПИ Нефтегаз ГНКАР, Баку, e-mail: abbasovhakim@gmail.com

Были исследованы рефракционные свойства разбавленных водных растворов некоторых электролитов. Для объяснения экспериментальных результатов было использовано уравнение Лоренц – Лоренца, в котором учитывали вклады в общую поляризацию, как свободных молекул воды, так и гидратированных ионов. Числа гидратации ионов в разбавленных водных растворах сульфата магния  $MgSO_4$ , а также в водных растворах солей калия  $KOH$ ,  $KCl$ ,  $KI$ ,  $KIO_3$  были определены предложенным рефрактометрическим методом. В данной модели предполагалось что, поляризуемость гидратированного иона пропорциональна кубу радиуса этого иона, а объем гидратированного иона был принят равным сумме объема негидратированного иона и объема гидратной оболочки. Было установлено что, вычисленные числа гидратации анионов растут с ростом их радиусов в следующем порядке:  $OH^-$ ,  $Cl^-$ ,  $I^-$  и  $IO_3^-$ . В работе также предложена «ион-дипольная» модель для оценивания числа гидратации ионов в электролитах в случае однослойной гидратной оболочки.

**Ключевые слова:** электролит, число гидратации, поляризация, показатель преломления, сульфат магния, соли калия

## ABOUT REFRACTOMETRY DETERMINATION OF THE HYDRATION NUMBERS OF IONS IN DILUTED AQUEOUS SOLUTIONS OF ELECTROLYTES

<sup>1</sup>Masimov E.A., <sup>2</sup>Abbasov H.F.

<sup>1</sup>Baku State University, Baku, e-mail: masimovspectr@rambler.ru;

<sup>2</sup>Oil Gas Scientific Research Project Institute of SOCAR, Baku, e-mail: hakimabbasov@yahoo.com

Refraction properties of diluted aqueous solutions of some electrolytes were studied. In order to explain experimental results, the Lorentz–Lorenz equation was involved, where the contributions of both free water molecules and hydrated ions to net polarization are taken into account. The hydration numbers of ions in diluted aqueous solutions of magnesium sulfate  $MgSO_4$  and in aqueous solutions of  $KOH$ ,  $KCl$ ,  $KI$ ,  $KIO_3$  were determined by proposed refractometry method. The model suggests that the polarizability of the hydrated ion is proportional to the cube of the ion radius and the volume of the hydrated ion equals to the sum of the non hydrated ion and hydration shell volumes. It was established that the calculated hydration numbers of the anions increase with their radii in the sequence:  $OH^-$ ,  $Cl^-$ ,  $I^-$  and  $IO_3^-$ . To estimate of the hydration number of ions in electrolytes in the case of a single-layer hydration shell the «ion-dipole» model also proposed.

**Keywords:** electrolyte, hydration number, polarization, refraction index, magnesium sulfate, potassium salts

Рефракция растворов носит информации о структуре раствора и о растворении вещества в данном растворителе [1–4]. В этой работе числа гидратации ионов в разбавленных водных растворах некоторых электролитов были определены рефрактометрическим методом. Благодаря тому, что при оптических частотах диполи и ионы не успевают следить за изменениями направления электрического поля световой волны, основной вклад в поляризацию среды вносят электроны и в данном случае для водных растворов электролитов ( $K_iA_j$ ) можно применить уравнение Лоренца-Лоренца [4]:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{N_{H_2O} \alpha_{H_2O}}{3} + \frac{N_{K^{+j}} \alpha_{K^{+j}}^*}{3} + \frac{N_{A^{-i}} \alpha_{A^{-i}}^*}{3} + \frac{N_{K_iA_j} \alpha_{K_iA_j}}{3}, \quad (1)$$

где,  $n$  показатель преломления рассматриваемого раствора,  $\alpha_{H_2O}$ ,  $\alpha_{K^{+j}}^*$ ,  $\alpha_{A^{-i}}^*$ ,  $\alpha_{K_iA_j}$

поляризуемости молекул воды, гидратированных катионов  $K^{+j}$  валентности  $+j$  и анионов  $A^{-i}$  валентности  $-i$ , нейтральных молекул  $K_iA_j$  ( $K_iA_j \rightarrow iK^{+j} + jA^{-i}$ ), соответственно,  $N_{H_2O}$ ,  $N_{K^{+j}}$ ,  $N_{K_iA_j}$ ,  $N_{K_iA_j}$  числа свободных молекул воды, катионов  $K^{+j}$  и анионов  $A^{-i}$ , нейтральных молекул  $K_iA_j$  в единичном объеме раствора, соответственно.

Члены в правой части уравнения (1) отражают вклады в общую поляризацию раствора, даваемые свободными, не вовлеченными в гидратацию молекулами воды, диссоциированными ионами  $K^{+j}$ ,  $A^{-i}$  и недиссоциированными, нейтральными молекулами  $K_iA_j$  соответственно. Обозначая степень диссоциации  $K_iA_j$  через  $\beta$ , числа свободных молекул воды, ионов  $K^{+j}$ ,  $A^{-i}$  и нейтральных молекул  $K_iA_j$  в единице объема раствора можно выразить через концентрацию  $K_iA_j$  в растворе  $c$ :

$$N_{K^{+j}} \approx \beta i N_{K_iA_j} = \frac{\beta i c p N_0}{M_{K_iA_j}},$$

$$N_{A^{-i}} \approx \beta j N_{K_i A_j} = \frac{\beta j c \rho N_0}{M_{K_i A_j}},$$

$$N_{K_i A_j} = \frac{(1-\beta) c \rho N_0}{M_{K_i A_j}}, \quad (2)$$

где,  $\rho$  – плотность раствора,  $N_0$  – постоянная Авогадро,  $M_{K_i A_j}$  – молярная масса  $K_i A_j$ . Для чистой воды уравнение (1) выглядит следующим образом:

$$\frac{n_{\text{H}_2\text{O}}^2 - 1}{n_{\text{H}_2\text{O}}^2 + 2} = \frac{N_{\text{H}_2\text{O}}^0 \alpha_{\text{H}_2\text{O}}}{3}. \quad (3)$$

В разбавленном водном растворе можно принять следующее допущение:

$$N_{\text{H}_2\text{O}} \approx N_{\text{H}_2\text{O}}^0$$

где,  $N_{\text{H}_2\text{O}}^0$  есть число свободных молекул воды в единице объема чистой, неразбавленной воды. Учитывая соотношения (2) и (3) в (1) получим:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}^2 - 1}{n_{\text{H}_2\text{O}}^2 + 2} + \frac{c \rho N_0}{3 M_{K_i A_j}} \times$$

$$\times \left( \beta i \alpha_{K^{+j}}^* + \beta j \alpha_{A^{-i}}^* + (1-\beta) \alpha_{K_i A_j} \right). \quad (4)$$

Принимая во внимание, что в разбавленных водных растворах вещество  $K_i A_j$  полностью диссоциирует на ионы  $\beta \approx 1$ , уравнение (4) можно представить в следующем виде:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}^2 - 1}{n_{\text{H}_2\text{O}}^2 + 2} + \frac{c \rho N_0 \alpha_{\text{H}_2\text{O}}}{3 M_{K_i A_j}} \times$$

$$\times \left( i \frac{\alpha_{K^{+j}}^*}{\alpha_{\text{H}_2\text{O}}} + j \frac{\alpha_{A^{-i}}^*}{\alpha_{\text{H}_2\text{O}}} \right). \quad (5)$$

В первом приближении поляризуемость гидратированного иона можно взять пропорциональной кубу радиуса этого иона, а объем гидратированного иона можно представить как сумму объема негидратированного иона и объема гидратной оболочки:

$$V_{h.ion} \approx V_{ion} + h_{ion} V_{\text{H}_2\text{O}},$$

$$\frac{\alpha_{ion}^*}{\alpha_{\text{H}_2\text{O}}} \approx \frac{V_{h.ion}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} \approx h_{ion} + \frac{V_{ion}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} \approx h_{ion} + \left( \frac{r_{ion}}{r_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^3, \quad (6)$$

где,  $V_{h.ion}$ ,  $V_{h.ion}$ ,  $V_{ion}$  и  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  объемы гидратированного иона, негидратированного иона и молекулы воды, соответственно;  $h_{ion}$  число гидратации иона (катиона  $K^{+j}$  или аниона  $A^{-i}$ );  $r_{ion}$  и  $r_{\text{H}_2\text{O}}$  радиусы гидратированного

иона данного типа и молекулы воды. Подставляя формулу (6) в (5) получим:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}^2 - 1}{n_{\text{H}_2\text{O}}^2 + 2} + \frac{c \rho N_0 \alpha_{\text{H}_2\text{O}}}{3 M_{K_i A_j}} \times$$

$$\times \left( i \left( \frac{r_{K^{+j}}}{r_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^3 + j \left( \frac{r_{A^{-i}}}{r_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^3 + h_{K^{+j}} + h_{A^{-i}} \right). \quad (7)$$

Воспользуясь уравнением (7) из графика зависимости отношения  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2)$  от концентрации электролита  $c$ , по угловому коэффициенту графика  $\text{tg} \varphi$  можно определить сумму чисел гидратации катиона  $K^{+j}$  и аниона  $A^{-i}$  в растворе при разных концентрациях  $K_i A_j$ :

$$h_{K^{+j}} + h_{A^{-i}} = \frac{3 M_{K_i A_j} \text{tg} \varphi}{\rho N_0 \alpha_{\text{H}_2\text{O}}} -$$

$$- i \left( \frac{r_{K^{+j}}}{r_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^3 - j \left( \frac{r_{A^{-i}}}{r_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^3. \quad (8)$$

#### Результаты исследования и их обсуждения

Мы применяли эту модель для определения числа гидратации ионов в разбавленных водных растворах сульфата магния  $\text{MgSO}_4$  и солей калия  $\text{KOH}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KI}$ ,  $\text{KIO}_3$ . Была измерена концентрационная зависимость показателя преломления разбавленных водных растворов сульфата магния на рефрактометре FR0429. Полученные данные в координатах  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2) - c$  представлены на рис. 1. Как следует из рисунка до определенной концентрации сульфата магния ( $\approx 1,5\%$ ) данная зависимость носит линейный характер, а выше этой концентрации наклон кривой уменьшается. Это можно объяснить тем, что при малых концентрациях сульфат магния полностью диссоциирует на ионы и эти ионы до концентрации  $\approx 1,5\%$  не взаимодействуют между собой. Поэтому толщины гидратных оболочек и поляризуемости этих гидратированных ионов до указанной концентрации остаются постоянными и тем самым, как следует из формулы (7) в этой области угловым коэффициент  $\text{tg} \varphi$  не будет зависеть от концентрации. При указанных концентрациях из-за сильной разбавленности раствора ростом плотности раствора можно пренебречь. При дальнейшем росте концентрации толщина гидратной оболочки  $\approx r_{\text{H}_2\text{O}}$  и соответственно, поляризуемости этих гидратированных ионов  $\alpha_{\text{Mg}^{2+}}^*$  и  $\alpha_{\text{SO}_4^{2-}}^*$ , а также плотность раствора  $\rho$  становятся зависимыми от  $c$ . Когда начинает проявляться взаимодействие ионов между собой, гидратные

оболочки ионов начинают разрушаться, уменьшаются поляризуемости гидратированных ионов ( $\alpha_{Mg^{2+}}$ ,  $\alpha_{SO_4^{2-}}$ ), что проявляется в уменьшении углового коэффициента в вышеуказанной зависимости (рис. 1). По перегибу графика зависимости отношения  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2)$  от концентрации электролита  $c$  можно определить пороговую концентрацию взаимодействия ионов между собой в данном растворе.

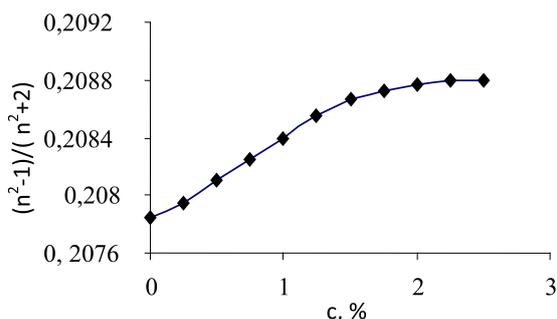


Рис. 1. Концентрационная зависимость отношения  $\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}$  для водного раствора сульфата магния

Подставляя взятых из литературы [1–3] значения параметров, ( $r_{Mg^{2+}} = 65$  пм,  $r_{SO_4^{2-}} = 150$  пм,  $r_{H_2O} = 140$  пм,  $\alpha_{H_2O} = 1,45 \times 10^{-30} \text{ м}^3$ ,  $\rho \approx 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $M_{MgSO_4} \approx 0,12 \text{ кг/моль}$ ) входящих в формулу (8), по угловому коэффициенту графика представленного на рис. 1 мы определили сумму чисел гидратации ионов  $Mg^{2+}$  и  $SO_4^{2-}$  в водном растворе сульфата магния для следующих его концентраций:  $h_{Mg^{2+}} + h_{SO_4^{2-}} \approx 21,71$  для концентраций  $c \leq 1,5\%$ ,  $\text{tg}\varphi = 0,0559$  и  $h_{Mg^{2+}} + h_{SO_4^{2-}} \approx 7,46$  для концентраций  $1,5\% \leq c < 2\%$ ,  $\text{tg}\varphi = 0,0224$ . Отметим, что концентрация  $c_0 = 1,5\%$  является пороговой концентрацией взаимодействия ионов в водном растворе сульфата магния.

В книге Р. Робинсона и Р. Стокса [5] приведены значения чисел гидратации разных ионов определенных разными методами, где число гидратации для соли  $MgCl_2$  (что примерно равно числу гидратации иона  $Mg^{2+}$ ) по данным Барнартта [6] найдено равным 16–17. В работе [7] из концентрационных зависимостей коэффициентов диффузии молекул воды в растворах  $H_2SO_4$  определено число гидратации иона  $SO_4^{2-}$ : 6. Сравнение значения суммы чисел гидратации ионов  $Mg^{2+}$  и  $SO_4^{2-}$  взятых из [6, 7] с полученными в нашей работе при концентрациях  $c < 1,5\%$ ,  $\text{tg}\varphi = 0,0559$  показывает удовлетворительное согласие:  $h_{Mg^{2+}} + h_{SO_4^{2-}} = 16 + 6 = 22$ .

Показатели преломления разбавленных водных растворов солей калия КОН, КСl, КI и  $KIO_3$  были измерены рефрактометрическим методом в интервале концентраций  $0 < c < 5\%$ . Если пренебречь концентрационной зависимостью поляризуемости и чисел гидратации ионов, что можно сделать при малых концентрациях растворимого вещества, то отношение  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2)$  представляет из себя линейную функцию концентрации:  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2) = A + Bc$ . Полученные из эксперимента значения параметров  $A$  и  $B$  для исследованных при температуре  $25^\circ\text{C}$ , водных растворов (кроме водного раствора КОН) оказались следующими: для всех растворов  $A = 0,20422$ , а значения  $B$  для КСl  $B \approx 0,09$ , для КI  $B \approx 0,055$ , а для  $KIO_3$   $B \approx 0,073$ . График зависимости отношения  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2)$  от  $c$  для водного раствора КОН представлен на рис. 2. Видно что, для КОН линейность концентрационной зависимости  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2)$  не выполняется. Для КОН пороговая концентрация взаимодействия ионов равна  $c_0 = 3\%$ . На рис. 3 указан график зависимости суммы чисел гидратации иона калия и анионов  $OH^-$ ,  $Cl^-$ ,  $I^-$  и  $IO_3^-$  от суммы радиусов иона калия и соответствующих анионов построенного по табл. 1. Для проведения сравнений эти числа гидратации были определены при одинаковой молярной концентрации растворов ( $\approx 0,27$  моль/л).

Таблица 1

Сумма чисел гидратации иона калия и анионов  $OH^-$ ,  $Cl^-$ ,  $I^-$  и  $IO_3^-$  при концентрации  $0,27$  моль/л и температуре  $25^\circ\text{C}$

Вещество	$r_1 + r_2$ , пм	$h_1 + h_2$
КОН	273	14,5
КСl	314	19,6, 21,01 [9]
КI	347	26,1, 22,71 [9]
$KIO_3$	488	34,4

Через  $h_1$  обозначено число гидратации ионов калия, а через  $h_2$  – числа гидратации анионов  $OH^-$ ,  $Cl^-$ ,  $I^-$  и  $IO_3^-$  соответственно. Видно, что с ростом радиусов анионов сумма чисел гидратации ионов растёт. Если число гидратации ионов калия во всех случаях принимать одинаково, то увеличение суммы можно объяснить ростом площади поверхности анионов с ростом их радиусов. Несмотря на одинаковость зарядов всех анионов в данном случае основную роль играет стерический фактор: с ростом радиусов анионов возникают новые позиции для размещения водных молекул на поверхности аниона и числа гидратации анионов растут по следующей последовательности:

$\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\dot{\text{I}}$  и  $\dot{\text{I}}\text{O}_3^-$ . Значения чисел гидратации исследованных анионов, вычисленных по предложенному методу при принятии число гидратации иона калия равным 4

[5, 8], приведены на рис. 4 и в табл. 2. Тут же указаны числа гидратации этих ионов взятых из литературы [9] для проведения сравнения.

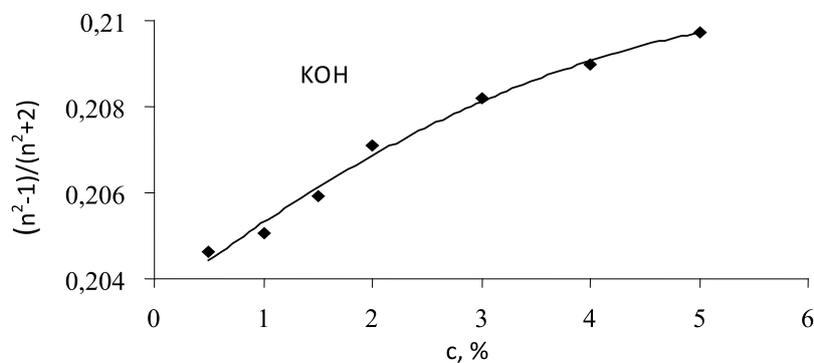


Рис. 2. Зависимость соотношения  $(n^2 - 1)/(n^2 + 2)$  от концентрации  $\text{KOH}$  в системе  $\text{KOH} + \text{вода}$

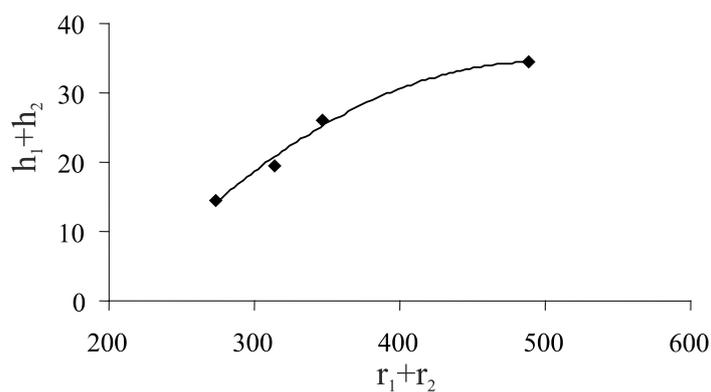


Рис. 3. Зависимость суммы чисел гидратации иона калия и анионов  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\dot{\text{I}}$  и  $\dot{\text{I}}\text{O}_3^-$  от суммы радиусов иона калия и соответствующих анионов

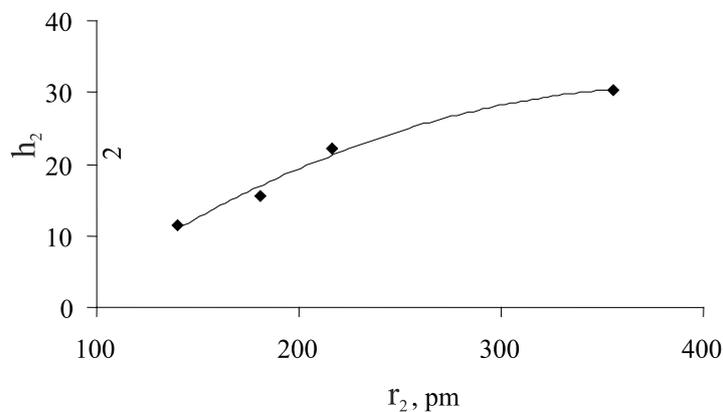


Рис. 4. Зависимость чисел гидратации анионов  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\dot{\text{I}}$  и  $\dot{\text{I}}\text{O}_3^-$  от радиуса соответствующих анионов

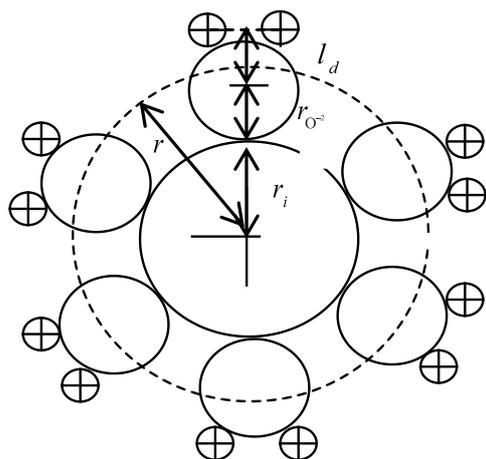


Рис. 5. Ион с гидратной оболочкой

**Таблица 2**  
Числа гидратации анионов  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{I}^-$  и  $\text{IO}_3^-$  при концентрации 0,27 моль/л и температуре 25 °С

Анион	$r_2$ , pm	$h_2$
$\text{OH}^-$	140	10,5
$\text{Cl}^-$	181	15,6
$\text{I}^-$	216	22,1
$\text{IO}_3^-$	355	30,4

Наблюдается удовлетворительная корреляция между нашими и литературными данными. В работе [10] показано, что гидратация ионов, присутствующих в воде сильно влияют на валентные полосы комбинационного рассеяния воды и сила влияния анионов увеличивается в ряду:  $\text{F}^- < \text{SO}_4^{2-} < \text{Cl}^- < \text{Br}^- < \text{I}^- \approx \text{NO}_3^-$ , что согласуется с результатами, полученными нашим методом.

Числа гидратации каждого иона можно оценить предлагаемой нами, простой «ион-дипольной» моделью. В этой модели ион с гидратной оболочкой представляется в виде, как указано на рис. 5. В равновесном состоянии (месторасположение диполя на рисунке нарисовано пунктирной линией) потенциальная энергия данного диполя в поле иона и остальных диполей  $W = -p_d E(r)$  уравновешивается с его кинетической энергией  $\approx \frac{5}{2} kT$ :

$$-\frac{p_d}{\varepsilon} \left( \frac{q_i}{4\pi\varepsilon_0 r^2} - \frac{h_i q_d}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \right) = \frac{5kT}{2}, \quad (9)$$

где,  $h_i$  – число гидратации иона,  $r = r_i + r_{\text{O}^{2-}} + l_d/2$  – расстояние между центрами иона и молекулой воды гидратной оболочки в равновесном положении,  $r_i$  ра-

диус рассматриваемого иона,  $r_{\text{O}^{2-}}$  – радиус иона  $\text{O}^{2-}$ ,  $l_d = p_d/q_d$  – длина диполя воды,  $p_d$  – дипольный момент молекулы воды,  $q_d = 2e$  – заряд диполя воды,  $q_i$  заряд рассматриваемого иона,  $e$  – элементарный заряд,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость раствора,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

Из уравнения (9) можно определить число гидратации иона:

$$h_i = \frac{q_i}{q_d} + \frac{10\pi\varepsilon\varepsilon_0 kT (r_i + r_{\text{O}^{2-}} + p_d/(2q_d))^2}{p_d q_d}. \quad (10)$$

Расчет значения чисел гидратации ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в водном растворе по формуле (10) ( $r_{\text{Mg}^{2+}} = 65$  пм,  $r_{\text{O}^{2-}} = 140$  пм,  $p_d = 6,13 \cdot 10^{-30}$  Кл·м,  $\varepsilon \approx 81$ ,  $T \approx 300$  К) давал следующие значения:  $h_{\text{Mg}^{2+}} = 3,4$ ,  $h_{\text{SO}_4^{2-}} = 5,3$ ,  $h_{\text{Mg}^{2+}} + h_{\text{SO}_4^{2-}} = 8,7$ . Последнее значение суммы чисел гидратации ионов  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  удовлетворительно согласуется со значением этой суммы определенном вышеуказанном рефрактометрическим методом при концентрациях  $1,5\% < c < 2\%$ ,  $\text{tg}\varphi = 0,0224$ :  $h_{\text{Mg}^{2+}} + h_{\text{SO}_4^{2-}} \approx 7,46$ . Это означает что, уже при указанных концентрациях гидратные оболочки ионов становятся однослойными, как в «ион-дипольной» модели. Вычисленные по формуле (10) значения чисел гидратации для ионов  $\text{K}^+$  и  $\text{Na}^+$  также хорошо согласуются со значениями чисел гидратации этих ионов определенными по скорости диффузии через мембрану Бринтцигером [8]:  $h_{\text{K}^+} = 4,56$ ,  $h_{\text{Na}^+} = 3,57$ .

#### Список литературы

1. Полинг Л. Общая химия, пер. с англ. – М., 1974. – 683 с.
2. Масимов Э.А., Аббасов Х.Ф. Рефрактометрическое определение числа гидратации ионов в разбавленных водных растворах сульфата магния. Журнал Физической Химии. – 2012. – Т. 86, № 3. – С. 470–472.
3. Картмелл Э., Фоулз Г.В.А. Валентность и строение молекул, пер. с англ. – М., 1979.
4. Bottcher C.J.F., Bordewijk P. Theory of Electric Polarization., Elsevier. Amsterdam. – 1992.
5. Робинсон Р., Стокс Р. Растворы электролитов. – М.:Изд. иностр. лит., 1963. – 113 с.
6. Barnartt S. Quart. Rev. – 1953. – Vol. 7. – P. 84.
7. Таныгина Н.А. Динамика и структурная организация молекул воды в водных растворах электролитов / Н.А. Таныгина, Н.Е. Журавлева, В.А. Севрюгин // X Всеросс. конф. «Структура и динамика мол. систем»: Сб. ст. ч. 3, Казань: ИЦ КГУ, 2003. – С. 273–276.
8. Балданов М.М. и др. Неэмпирический расчет сольватных чисел ионов в растворах // ДАН СССР. – 1989. – Т. 308, № 1. – С. 106–110.
9. Афанасьев В.Н., Устинов А.Н. Верификация сольватации электролитов от разбавленных до концентрированных в водных растворах // Вестник Московского Университета, серия 2, химия, 2011. – Т. 52, № 5. – С. 323–340.
10. Буриков С.А. Закономерности проявления гидратации ионов в спектральных полосах комбинационного рассеяния воды: Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата ф.-м.-н. – М., 2008. – 22 с.