

УРАВНЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОЕМКОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТА В НЕАССОЦИИРОВАННОМ РАСТВОРЕ

Т.Е. Ахапкина¹

А.А. Гуров²

С.Н. Соловьев¹

snsol@muctr.ru

С.В. Кожевникова¹

¹ РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

На основании теоретических представлений Кузнецовой выведено уравнение для расчета теплоемкости электролита в неассоциированном растворе. Это уравнение также может быть использовано и при определении таких важных характеристик, как константа и энтальпия ионной ассоциации в растворах электролитов. В основе вывода уравнения лежит простейшая модель — модель ионной ассоциации, позволяющая удовлетворительно описывать концентрационную зависимость некоторых свойств растворов. Модель ионной ассоциации базируется на существующем в растворах электролитов равновесии между ионами и ионными парами одного вида

Ключевые слова

Неассоциированный электролит, теплоемкость, теория Дебая — Хюккеля, теоретические представления Кузнецовой

Поступила 25.05.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. Создание совершенной теории растворов является одной из фундаментальных проблем современного естествознания. Важнейший класс растворов — растворы электролитов. К одним из самых удачных теоретических представлений в области реальных растворов электролитов относятся представления о различных аспектах ионной ассоциации в таких системах [1]. Эти представления можно рассматривать как разновидность широко распространенных в химии представлений о комплексообразовании в простейшем варианте, реализуемом равновесием между ионами и ионными парами.

Теория и модель ионной ассоциации. На примерах более чем 200 электролитных систем (водных, неводных, смешанных) в работах [2, 3] показано, что простейшая модель ионной ассоциации удовлетворительно

описывает концентрационную зависимость вплоть до единиц моляльной концентрации таких характеристик растворов, как энтальпия разбавления, теплоемкость, плотность и др. С учетом этой модели найдены значения констант и энтальпий ионной ассоциации.

Среди перечисленных характеристик растворов наиболее плодотворным оказалось определение именно энтальпий разбавления, поскольку в этом случае в одном эксперименте сразу устанавливаются и энтальпии, и константы ионной ассоциации. В остальных случаях речь идет лишь только о нахождении констант ассоциации. Для определения энтальпий необходимо резко увеличить объем эксперимента — исследовать температурную зависимость констант ассоциации; при этом значения энтальпий ассоциации имеют большие погрешности.

При изучении ионной ассоциации любым методом определение значений констант и энтальпий этого процесса так или иначе необходимо сопровождать описанием растворов полностью ионизированных электролитов в рамках каких-либо теоретических (эмпирических) представлений. В настоящее время одним из таких представлений является теория Дебая — Хюккеля, уверенно «работающая» в области крайне разбавленных растворов. Однако в этой области энтальпии разбавления очень малы и поэтому либо не могут быть измерены, либо измеряются, но с достаточно существенными погрешностями; теплоемкости и плотности растворов указанной концентрационной области почти не отличаются от теплоемкости и плотности индивидуальных растворителей. В подобной ситуации в работе [2] предложено видоизменить смысл понятия «ионная ассоциация», а именно рассматривать (интерпретировать) последнюю как способ учета отклонений характеристик реального раствора электролита от характеристик гипотетического, подчиняющегося тем или иным теоретическим представлениям, например теории Дебая — Хюккеля при любых значениях концентрации. Перечисленные выше результаты получены авторами настоящей работы на основе значений энтальпий разбавления растворов широкой области моляльных концентраций в рамках именно таких представлений. Найденные значения констант ассоциации (при этом концентрации растворов составляли от десятых долей до единиц моляльной концентрации) совпадают в большинстве случаев со значениями, определенными по кондуктометрическим данным для области разбавленных растворов, где предполагается справедливое применение теории Дебая — Хюккеля.

Следует также отметить совпадение значений констант ассоциации, найденных по результатам измерения энтальпий разбавления достаточно концентрированных растворов (ионизированная часть электролита опи-

сывается теорией Дебая — Хюккеля во втором приближении), со значениями этих характеристик, рассчитанными по результатам измерений концентрационной зависимости теплоемкости и плотности в рамках простейшей модели ионной ассоциации — модели существующего в растворах равновесия между ионами и ионными парами одного вида.

Для теоретического описания энтальпий разбавления и изменения теплоемкости растворов полностью ионизированного электролита в работе [4] выведены соответствующие уравнения на основе второго приближения теории Дебая — Хюккеля.

Привлекательными для теоретического рассмотрения растворов полностью ионизированного электролита являются представления Е.М. Кузнецовой [5], которые хорошо описывают концентрационную зависимость коэффициентов активности электролитов. На основе этих представлений в работе [6] получено уравнение для расчета энтальпий разбавления растворов полностью ионизированного электролита. В этой работе проведено сопоставление рассчитанных значений со значениями, найденными по уравнению, которое выведено на основе теории Дебая — Хюккеля.

Выбор П. Дебаем и Э. Хюккелем в качестве аргумента функции активности электролита корня квадратного из концентрации нельзя признать обоснованным. Более правильным, как отмечено в работе [5], было использование для этого корня кубического из концентрации. В указанной работе выведено сравнительно несложное соотношение для расчета среднеионного коэффициента активности, которое хорошо описывает его концентрационную зависимость вплоть до единиц моляльной концентрации. Это объясняется тем, что в нем в определенной степени учитывается и ионная ассоциация. На основе соотношения Кузнецовой в работе [6] получено уравнение для расчета энтальпии разбавления раствора неассоциированного электролита, используемое в процедуре нахождения термодинамических характеристик ионной ассоциации по данным об энтальпиях разбавления.

Последовательность вывода уравнения. Основой для вывода уравнения служит соотношение [6, 7]:

$$\lg \gamma_{\pm} = -\frac{A'm^{1/3}}{\varepsilon T} + \frac{B'm}{\varepsilon T} \left(a^2 - \frac{P}{a} \right) + \frac{C'm^{4/3}}{\varepsilon T} P,$$

где γ_{\pm} — среднеионный моляльный коэффициент активности электролита; m — моляльная концентрация раствора электролита; ε — диэлектрическая проницаемость растворителя; T — температура раствора; a — расстояние между наиболее сближенными ионами; P — функция поляризуемости ионов,

$$P = \frac{\alpha_+ v_+}{v_-} + \frac{\alpha_- v_-}{v_+};$$

v_+, v_- — число катионов и анионов в формульной единице электролита; α_+, α_- — поляризуемости катиона и аниона; A', B', C' — коэффициенты,

$$A' = \frac{29550 z_+ z_- q}{(v_+ + v_-)^{2/3}}; \quad B' = 316,10 z_+ z_- q; \quad C' = 31,14 z_+ z_- q (v_+ + v_-)^{1/3};$$

z_+, z_- — зарядовые числа катиона и аниона; q — параметр,

$$q = \left[\frac{z_+^2 v_+ + z_-^2 v_-}{2} \right]^{1/2}.$$

При выводе также использовано и термодинамическое уравнение [6, 8]:

$$\bar{H}_2 - \bar{H}_2^\circ = -\nu RT^2 (Am^{1/3} + Bm + Cm^{4/3}). \quad (1)$$

Здесь $\bar{H}_2, \bar{H}_2^\circ$ — парциальные мольные энтальпии электролита в растворе конечной концентрации и при бесконечном разбавлении; индекс «2» означает, что характеристика относится к растворенному веществу; $\nu = \nu_+ + \nu_-$ — общее число ионов в формульной единице электролита; R — универсальная газовая постоянная; A, B, C — коэффициенты,

$$A = \frac{A'}{\varepsilon T} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right);$$

$$B = -\frac{B'}{\varepsilon T} \left\{ \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) \left(a^2 - \frac{P}{a} \right) - 2a \frac{\partial a}{\partial T} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{a^2} \left[a \left(\frac{v_+}{v_-} \frac{\partial \alpha_+}{\partial T} + \frac{v_-}{v_+} \frac{\partial \alpha_-}{\partial T} \right) - \left(\frac{\alpha_+ v_+}{v_-} + \frac{\alpha_- v_-}{v_+} \right) \frac{\partial a}{\partial T} \right] \right\};$$

$$C = -\frac{C'}{\varepsilon T} \left[P \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) - \left(\frac{v_+}{v_-} \frac{\partial \alpha_+}{\partial T} + \frac{v_-}{v_+} \frac{\partial \alpha_-}{\partial T} \right) \right].$$

Постоянные параметры в частных производных опущены.

Прежде чем продифференцировать уравнение (1), следует упростить выражения входящих в него коэффициентов B и C , имея в виду отсутствие объективной информации о температурной зависимости как поляризуемостей ионов α_+, α_- , так и расстояния между наиболее сближенными ионами a . С учетом отмеченного можно принять

$$\frac{\partial \alpha_+}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_-}{\partial T} = 0, \quad \frac{\partial a}{\partial T} = 0. \quad (2)$$

Необходимо отметить, что величины A' , B' и C' , входящие в выражения коэффициентов A , B и C , не зависят от температуры. В результате упрощения уравнение (1) принимает вид

$$\begin{aligned} \bar{H}_2 - \bar{H}_2^\circ = & -\frac{\nu RTA'}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) m^{1/3} + \frac{\nu RTB'}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) \left(a^2 - \frac{P}{a} \right) m + \\ & + \frac{\nu RTC'}{\varepsilon} P \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) m^{4/3}. \end{aligned}$$

Дифференцирование последнего выражения по температуре приводит к соотношению

$$\frac{\partial (\bar{H}_2 - \bar{H}_2^\circ)}{\partial T} = \frac{-\nu RTA'\varepsilon + \nu RTA' \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}}{\varepsilon^2} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) m^{1/3} - \quad (I)$$

$$- \frac{\nu RTA'}{\varepsilon} \left(-\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial T^2} - \frac{1}{T^2} \right) m^{1/3} + \quad (II)$$

$$+ \frac{-\nu RTB'\varepsilon + \nu RTB' \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}}{\varepsilon^2} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) \left(a^2 - \frac{P}{a} \right) m + \quad (III)$$

$$+ \frac{\nu RTB'}{\varepsilon} \left(-\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial T^2} - \frac{1}{T^2} \right) \left(a^2 - \frac{P}{a} \right) m + \quad (IV)$$

$$+ \frac{\nu RTB'}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) \left(2a \frac{\partial a}{\partial T} - \frac{a \frac{\partial P}{\partial T} - P \frac{\partial a}{\partial T}}{a^2} \right) m + \quad (V)$$

$$+ \frac{\nu RTC'\varepsilon + \nu RTC' \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}}{\varepsilon^2} P \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) m^{4/3} + \quad (VI)$$

$$+ \frac{\nu RTC'}{\varepsilon} \frac{\partial P}{\partial T} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) m^{4/3} + \quad (VII)$$

$$+ \frac{\nu RTC'}{\varepsilon} P \left(-\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial T^2} - \frac{1}{T^2} \right) m^{4/3}, \quad (VIII)$$

правая часть которого состоит из восьми (I–VIII) слагаемых. Учитывая введенные выше допущения (2), а также $\partial^2 \varepsilon / \partial T^2 = 0$ и $\partial P / \partial T = 0$, можно существенно сократить правую часть этого соотношения, в частности из-

бавиться в ней от пятого и седьмого слагаемых. Объединяя первое и второе, третье и четвертое, шестое и восьмое слагаемые и учитывая, что

$$\frac{\partial(\bar{H}_2 - \bar{H}_2^\circ)}{\partial T} = \bar{C}_{p_2} - \bar{C}_{p_2}^\circ,$$

получают уравнение

$$\begin{aligned} \bar{C}_{p_2} - \bar{C}_{p_2}^\circ = & \left[\frac{\nu RTA' \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} - \nu RA' \varepsilon}{\varepsilon^2} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) + \frac{\nu RTA'}{\varepsilon} \left(\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T^2} \right) \right] m^{1/3} + \\ & + \left[\frac{\nu RTB' \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} - \nu RTB' \varepsilon}{\varepsilon^2} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) \left(a^2 - \frac{P}{a} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{\nu RTB'}{\varepsilon} \left(\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T^2} \right) \left(a^2 - \frac{P}{a} \right) \right] m + \\ & + \left[\frac{\nu RC' \varepsilon + \nu RTC' \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}}{\varepsilon^2} \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) P - \frac{\nu RTC'}{\varepsilon} P \left(\frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T^2} \right) \right] m^{4/3}. \quad (3) \end{aligned}$$

Здесь $\bar{C}_{p_2}, \bar{C}_{p_2}^\circ$ — парциальные мольные теплоемкости электролита в растворе конечной концентрации и при бесконечном разбавлении.

После ввода в (3) сокращенных обозначений

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\nu RA'}{\varepsilon} \left[\left(T \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} - 1 \right) \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) + T \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T^2} \right) \right]; \\ H &= \frac{\nu RB'}{\varepsilon} \left(a^2 - \frac{P}{a} \right) \left[\left(T \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} - 1 \right) \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) - T \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T^2} \right) \right]; \\ K &= \frac{\nu RC'}{\varepsilon} P \left[\left(1 - T \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T} \right) - T \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \ln \varepsilon}{\partial T} + \frac{1}{T^2} \right) \right] \end{aligned}$$

оно приобретает компактную форму

$$\bar{C}_{p_2} - \bar{C}_{p_2}^\circ = \sigma m^{1/3} + Hm + Km^{4/3}. \quad (4)$$

Известно, что парциальная мольная теплоемкость \bar{C}_{p_2} и кажущаяся теплоемкость растворенного вещества $\Phi_{\text{ср}}$ связаны соотношением [9, 10]:

$$\bar{C}_{p2} = \Phi_{cp} + \frac{m^{1/3}}{3} \frac{\partial \Phi_{cp}}{\partial m^{1/3}}.$$

Вычитая из обеих его частей \bar{C}_{p2}° и учитывая $\bar{C}_{p2}^\circ = \Phi_{cp}^\circ$, $\partial \Phi_{cp} = \partial(\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ)$, получают уравнение:

$$\bar{C}_{p2} - \bar{C}_{p2}^\circ = \Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ + \frac{m^{1/3}}{3} \frac{\partial(\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ)}{\partial m^{1/3}}. \quad (5)$$

Здесь $(\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ)$ — разность кажущихся теплоемкостей электролита в растворе конечной концентрации и при бесконечном разбавлении.

Решением полученного дифференциального уравнения (5) является выражение

$$\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ = \frac{L}{m}, \quad (6)$$

где L — некоторая постоянная.

Сравнивая соотношения (4) и (5), можно отметить, что

$$\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ + \frac{m^{1/3}}{3} \frac{\partial(\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ)}{\partial m^{1/3}} = \sigma m^{1/3} + Hm + Km^{4/3}. \quad (7)$$

Подстановка выражения (6) в уравнение (7) и допущение, что L — функция $m^{1/3}$, приводят к окончательному дифференциальному уравнению, имеющему решение

$$\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ = \frac{3}{4} \sigma m^{1/3} + \frac{1}{2} Hm + \frac{3}{7} Km^{4/3} + \frac{1}{m} M,$$

где M — постоянная интегрирования.

Постоянная интегрирования M должна быть равна нулю, поскольку $\lim_{m^{1/3} \rightarrow \infty} (\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ) = 0$. Таким образом, итоговая форма уравнения для расчета разности соответствующих кажущихся теплоемкостей $(\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ)$ электролита, раствор которого подчиняется теоретическим представлениям Кузнецовой, имеет вид

$$\Phi_{cp} - \Phi_{cp}^\circ = \frac{3}{4} \sigma m^{1/3} + \frac{1}{2} Hm + \frac{3}{7} Km^{4/3}. \quad (8)$$

Изменение кажущейся теплоемкости при переходе от раствора молярной концентрации, равной m_1 , к раствору, молярная концентрация которого составляет m_2 , описывается уравнением

$$\Phi_{cp1} - \Phi_{cp2} = \frac{3}{4} \sigma (m_1^{1/3} - m_2^{1/3}) + \frac{1}{2} H (m_1 - m_2) + \frac{3}{7} K (m_1^{3/4} - m_2^{3/4}).$$

Заключение. Полученное в представленной работе уравнение (8) может быть использовано для теоретического расчета теплоемкости неассоциированных электролитов, в том числе и при определении некоторых характеристик ионной ассоциации в растворах электролитов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Marcus Y., Hefter G. Ion pairing. *Chem. Rev.*, 2006, vol. 106, iss. 11, pp. 4585–4621. DOI: 10.1021/cr040087x
- [2] Соловьев С.Н., Хекало Т.В. Определение термодинамических характеристик ассоциации электролитов в растворах, на основе термохимических измерений. *Труды РХТУ им. Д.И. Менделеева*, вып. 158. М., МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1989, с. 129–138.
- [3] Минасян К.А., Соловьев С.Н. Термодинамические характеристики ионной диссоциации сильных электролитов. *Труды РХТУ им. Д.И. Менделеева*, вып. 182. М., МХТИ им. Д.И. Менделеева, 2008, с. 114–124.
- [4] Крачковская Ю.А., Овчинникова О.В., Соловьев С.Н. Уравнение для расчета теплоемкости растворов электролитов, подчиняющихся теории Дебая — Хюккеля. *Труды РХТУ им. Д.И. Менделеева*, вып. 187, М., МХТИ им. Д.И. Менделеева, 2014, с. 124–131.
- [5] Кузнецова Е.М. Количественное описание термодинамических свойств индивидуальных и смешанных растворов сильных электролитов в различных растворителях в широком интервале концентраций. *Журн. физ. химии*, 1993, т. 67, № 9, с. 1765–1775.
- [6] Соловьев С.Н., Сенаторова С.В., Колесник Е.А. Новое уравнение для расчета энтальпий разбавления растворов неассоциированных электролитов. *Журн. физ. химии*, 2006, т. 80, № 10, с. 1891–1895.
- [7] Харнед Г., Оуэн Б. Физическая химия растворов электролитов. М., ИИЛ, 1952.
- [8] Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. М., КД «Либроком», 2012.
- [9] Вишняков А.В., Кизим Н.Ф. Физическая химия для бакалавров. Тула, Аквариус, 2014.
- [10] Васильев В.П. Термодинамические свойства растворов электролитов. М., Высш. шк., 1982.

Ахапкина Татьяна Евгеньевна — ассистент кафедры общей и неорганической химии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Гуров Александр Алексеевич — канд. хим. наук, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Соловьев Сергей Николаевич — д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой общей и неорганической химии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Кожевникова Светлана Валерьевна — канд. хим. наук, доцент кафедры общей и неорганической химии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ахапкина Т.Е., Гуров А.А., Соловьев С.Н. и др. Уравнение для расчета теплоемкости электролита в неассоциированном растворе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, №1, с. 77–87. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-1-77-87

AN EQUATION FOR COMPUTING THERMAL CAPACITY OF AN ELECTROLYTE IN A DISSOCIATED SOLUTION

T.E. Akhapkina¹

A.A. Gurov²

S.N. Solov'ev¹

snsol@muctr.ru

S.V. Kozhevnikova¹

¹ Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The authors used E.M. Kuznetsova's theory to derive an equation for computing thermal capacity of an electrolyte in a dissociated solution. This equation may also be used to determine such important characteristics as the constant and enthalpy of ion association in electrolyte solutions. This equation is derived from the simplest model, that of ion association, which allows certain solution properties to be adequately described as functions of concentration. The ion association model is based on the equilibrium between ions and ion pairs of the same kind that exists in electrolyte solutions

Keywords

Strong electrolyte, thermal capacity, Debye — Hückel theory, Kuznetsova's theory

Received 25.05.2018

© Author(s), 2019

REFERENCES

[1] Marcus Y., Hefter G. Ion pairing. *Chem. Rev.*, 2006, vol. 106, iss. 11, pp. 4585–4621. DOI: 10.1021/cr040087x

- [2] Solov'yev S.N., Khekalov T.V. Opredelenie termodinamicheskikh kharakteristik assotsiatsii elektrolitov v rastvorakh na osnove termokhimicheskikh izmereniy [Estimation of thermodynamic characteristics of electrolyte association based on chemical measurements]. *Trudy RKhTU im. D.I. Mendeleeva. Vyp. 158* [Transactions of MUCTR. Vol. 158]. Moscow, Mendeleev UCTR Publ., 1989, pp. 129–138 (in Russ.).
- [3] Minasyan K.A., Solov'yev S.N. Termodinamicheskie kharakteristiki ionnoy assotsiatsii sil'nykh elektrolitov [Thermodynamic characteristics of ion association of strong electrolytes]. *Trudy RKhTU im. D.I. Mendeleeva. Vyp. 182* [Transactions of MUCTR. Vol. 182]. Moscow, Mendeleev UCTR Publ., 2008, pp. 114–124 (in Russ.).
- [4] Krachkovskaya Yu.A., Ovchinnikova O.V., Solov'yev S.N. Uravnenie dlya rascheta teploemkosti rastvorov elektrolitov, podchinyayushchikhsya teorii Debaya — Khyukkelya [Equation for heat capacity calculation of electrolyte solution obeying to the Debye — Hückel theory]. *Trudy RKhTU im. D.I. Mendeleeva. Vyp. 187* [Transactions of MUCTR. Vol. 187]. Moscow, Mendeleev UCTR Publ., 2014, pp. 124–131 (in Russ.).
- [5] Kuznetsova E.M. Quantitative description of thermodynamic properties of individual and mixed solutions of strong electrolytes in different solvents and in a wide concentration range. *Zhurnal Fizicheskoy Khimii*, 1993, vol. 67, no. 9, pp. 1765–1775 (in Russ.).
- [6] Solov'ev S.N., Senatorova S.V., Kolesnik E.A. A new equation for calculating the enthalpies of dilution of solutions of nonassociated electrolytes. *Russ. J. Phys. Chem.*, 2006, vol. 80, iss. 10, pp. 1683–1685. DOI: 10.1134/S0036024406100244
- [7] Harned H.S., Owen B.B. The physical chemistry of electrolytic solutions. Reinhold Pub. Corp., 1950.
- [8] Karapet'yants M.Kh. Khimicheskaya termodinamika [Chemical thermodynamics]. Moscow, KD "Librokom" Publ., 2012.
- [9] Vishnyakov A.V., Kizim N.F. Fizicheskaya khimiya dlya bakalavrov [Physical chemistry for bachelors]. Tula, Akvarius Publ., 2014.
- [10] Vasil'yev V.P. Termodinamicheskie svoystva rastvorov elektrolitov [Thermodynamic properties of electrolyte solution]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982.

Akhapkina T.E. — Assist. Lecturer, Department of General and Inorganic Chemistry, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Gurov A.A. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Solov'ev S.N. — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Head of Department of General and Inorganic Chemistry, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Kozhevnikova S.V. — Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Professor, Department of General and Inorganic Chemistry, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploschad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Akhapkina T.E., Gurov A.A., Solovev S.N., et al. An Equation for Computing Thermal Capacity of an Electrolyte in a Dissociated Solution. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 1, pp. 77–87 (in Russ.).

DOI: 10.18698/1812-3362-2019-1-77-87



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник авторов
А.А. Гурова, П.В. Слитикова, Ж.Н. Медных

**«Химия: теория и практика.
Металлы и сплавы»**

Учебник является оригинальным изданием и не имеет аналогов среди литературы по химии, используемой в учебном процессе технических университетов и вузов. По содержанию и структуре книга представляет собой совокупность учебника и практикума и состоит из трех разделов. Первый посвящен современным вопросам классификации, строения, получения и очистки металлов. Во втором разделе рассмотрены основные физические и химические свойства металлов. Третий раздел содержит материал, охватывающий сплавы и растворы в металлических системах. Учебник соответствует государственному образовательному стандарту по химии для технических направлений и специальностей и предназначен для студентов 1-3-го курсов.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
<http://baumanpress.ru>